



COMMUNAUTE ECONOMIQUE EUROPEENNE
COMMISSION

ETUDES

*Etude de
chaussées économiques
en Afrique*

**Etude de
chaussées économiques
en Afrique**

RAPPORT GENERAL

RAPPORT DE SYNTHESE

ANNEXES

**RAPPORT
DE SYNTHÈSE**

COMMUNAUTE ECONOMIQUE EUROPEENNE

Fonds Européen de Développement

RAPPORT de SYNTHESE

Association CODECONGO-C.E.B.T.P.

Compagnie d'Etude du Congo
31, rue de la Science,

BRUXELLES IV

Centre Expérimental de Recherches
et d'Etudes du Bâtiment et des
Travaux Publics.

12, rue Brancion PARIS 15°

A V E R T I S S E M E N T

Le présent rapport de synthèse reprend les principaux résultats obtenus en laboratoire lors d'essais systématiques de stabilisation des sols fins ainsi que les conclusions les plus importantes concernant les conditions de mise en oeuvre de ces matériaux.

Il a été rédigé de telle façon que sa lecture soit possible indépendamment des autres pièces du dossier. Néanmoins, le lecteur devra se reporter au rapport général pour connaître :

- les voies et démarches qui nous ont conduits aux résultats mentionnés.
- les conseils et remarques de détail qui ont été volontairement omis.

-:-:-:-:-

S O M M A I R E

1 - INTRODUCTION

2 - ETUDE DU CORPS DE CHAUSSEE

2.1 - Généralités

2.2 - Synthèse des résultats

2.2.1. - Stabilisation mécanique

2.2.2. - Stabilisation à la chaux

2.2.3. - Stabilisation au ciment

2.2.4. - Stabilisation aux liants hydrocarbonés

2.3 - Exploitation des résultats

2.3.1. - Recherche du sol équivalent

2.3.2. - Exemple d'utilisation de la notion de sol équivalent

3 - OPERATIONS DE MISE EN OEUVRE

3.1 - Opérations élémentaires et choix des engins

3.2 - Etude du rendement des engins

3.2.1. - Formules générales de production

3.2.2. - Valeurs pratiques du coefficient d'utilisation

3.2.3. - Production des engins dans le cadre des opérations élémentaires

3.3 - Conclusions

3.3.1. - Opérations élémentaires

3.3.2. - Choix des engins

4 - CONSIDERATIONS D'ORDRE ECONOMIQUE

4.1 - Généralités

4.1.1. - Définitions des prix

4.1.2. - Définitions des productions

4.1.3. - Méthode pratique de calcul des prix prévisionnels

4.2. - Paramètres intervenant dans le calcul des prix

4.2.1. - Dépenses en matériaux

4.2.2. - Dépenses de mise en oeuvre

4.2.3. - Frais généraux et bénéfiques de l'entreprise

4.2.4. - Frais d'études et de contrôle

4.3 - Coût d'une solution

1 - INTRODUCTION

Le but de la présente étude est de définir un certain nombre de règles permettant l'établissement d'un projet économique de corps de chaussée en Afrique.

Or, les sols que l'on rencontre généralement sur le continent africain, dans les zones alluvionnaires ou détritiques sont composés de sable et d'argile. Cette représentation est évidemment grossière car il y a toujours d'autres éléments qui viennent s'ajouter à ces éléments de base et, de plus, la composition même de l'argile et du sable varie.

Néanmoins, au vu de résultats d'essais, on remarque que la majorité des sols africains peut être considérée comme un mélange intime d'une argile de type latéritique et de sable fin.

C'est pourquoi, à partir d'une argile latéritique A et d'un sable de dune S, nous avons défini cinq sols-types :

- A : Argile
- 0,75 A + 0,25 S : Argile sableuse
- 0,50 A + 0,50 S : Sable-argile
- 0,25 A + 0,75 S : Sable argileux
- S : Sable.

La granulométrie de ces sols est représentée sur la figure 1.

Sur ces matériaux, nous avons étudié en laboratoire les stabilisations suivantes :

- stabilisation mécanique
- stabilisation physico-chimique
 - à la chaux
 - au ciment
 - aux liants hydrocarbonés.

et nous avons déterminé les épaisseurs de chaussée par emploi de la méthode C.B.R.

Nous nous sommes également attachés à définir, suivant les différents sols-types, les engins à utiliser, enfin à présenter quelques considérations d'ordre économique.

2 - ETUDE DU CORPS DE CHAUSSEE

2.1 - Généralités.

La préparation des matériaux a permis de mettre en lumière l'influence de certains facteurs tels que le broyage et le malaxage. Les opérations de préparation des mélanges ont en effet été réalisées de deux manières distinctes (voir figure 2).

- un broyage et un malaxage mécaniques permettant de constituer un matériau qui peut être considéré comme un sol naturel. Ces opérations réalisées mécaniquement sont suffisamment poussées pour être comparables à l'action des différents agents naturels.
- un broyage réalisé au rouleau à main suivi d'un malaxage manuel qui donne des matériaux semblables à ceux qu'on peut obtenir sur chantier à l'aide des engins traditionnels.

Les essais C.B.R. sur matériaux stabilisés mécaniquement ont été effectués, d'une part en imbibant les échantillons pendant 4 jours, et d'autre part, en les laissant à leur humidité de compactage. De même les essais sur matériaux aux liants hydrauliques ont été exécutés sur des échantillons imbibés pendant 4 jours et non imbibés.

On a convenu de considérer que l'imbibition correspondait à un drainage normal, la nappe se trouvant à proximité et la non imbibition, à un drainage soigné, la nappe étant profonde.

La plupart des graphiques de synthèse portent en abscisse les différents types de sols. Ceci doit permettre une plus grande utilisation des résultats des essais effectués en laboratoire et limités à cinq types de sols. Il suffira de savoir classer un sol quelconque dans l'échelle des sols étudiés pour bénéficier des renseignements fournis par les essais de laboratoire et on pourra alors tirer toutes les conclusions relatives à l'emploi d'un tel matériau dans un corps de chaussée.

2.2 - Synthèse des résultats.

Les essais de portance effectués en laboratoire permettent de déterminer l'épaisseur totale de chaussée à prévoir en fonction du trafic et du C.B.R. du matériau compacté.

Dans l'application pratique aux sols types étudiés, les épaisseurs totales de chaussée ont été calculées en partant d'un trafic de 150 à 450 véhicules par jour, d'un poids en charge supérieur à 3 T. mais d'une charge par roue, limitée à 4 T.

Dans le cas où la route devrait supporter un trafic plus faible ou plus lourd, il suffirait de se reporter aux abaques C.B.R. du Road Research Laboratory.

STABILISATION DES SOLS FINS

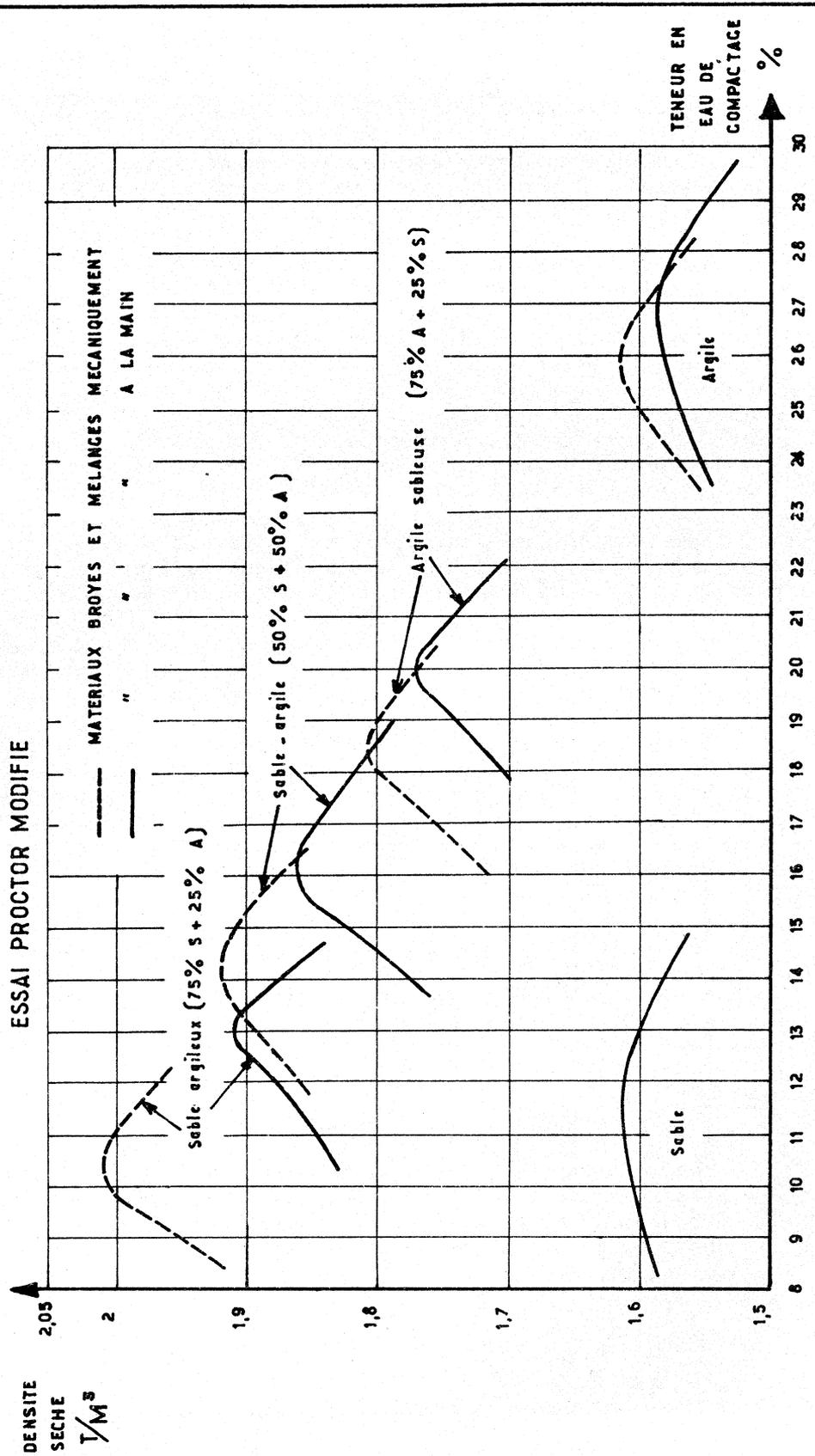


Fig. 2

2.2.1. Stabilisation mécanique

Nous avons reporté figure 3, pour les deux cas de drainage, le pourcentage de compactage du Proctor Modifié en fonction du type de sol rencontré et ceci pour différentes valeurs du C.B.R.

Ces deux réseaux de courbes qui résument les différentes conclusions relatives à chaque sol-type stabilisé mécaniquement, appellent les remarques suivantes :

- x et y sont respectivement le pourcentage en sable et argile de base dans chaque sol-type.
- e en cm représente l'épaisseur de chaussée surmontant la couche envisagée et correspondant au trafic que l'on s'est fixé.
- par ailleurs, le tracé expérimental (en traits mixtilignes) a été modifié pour $x > 75$ suivant les règles données par M. Peltier pour les sables.

Les abaques de la figure 3 font apparaître clairement que l'optimum se situe vers 60% de sable dans le cas d'un drainage normal et vers 70% d'argile dans le cas d'un drainage soigné.

On aura donc intérêt à étudier d'abord les possibilités de correction granulométrique du sol donné pour le ramener dans chaque cas de drainage, aux valeurs optimales ci-dessus.

En outre, comme un C.B.R. de 80 semble être un minimum pour une couche de base, on voit immédiatement que la stabilisation mécanique n'est possible qu'en plate-forme ou fondation pour un sol normalement drainé. Dans le cas d'un drainage parfait, la stabilisation mécanique peut être envisagée en couche de base si $25 < x < 75$ mais à condition de prévoir pratiquement 100% du P.M.

Notons par ailleurs que l'emploi de matériau argileux est à déconseiller d'une façon générale lorsqu'il y a des risques de saturation du sol en raison du potentiel de gonflement des sols argileux qui est d'autant plus élevé que le compactage est plus poussé.

REMARQUE : INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE-FORME SUR L'ÉPAISSEUR TOTALE DE LA CHAUSSEE.

La stabilisation mécanique est la seule à envisager en plate-forme. La figure n° 4 donne pour chaque sol-type étudié et en fonction des conditions de drainage de la plate-forme les épaisseurs totales de chaussée nécessaires, compte tenu du compactage de cette plate-forme.

STABILISATION MECANIQUE

CONDITIONS PRATIQUES MINIMALES A IMPOSER

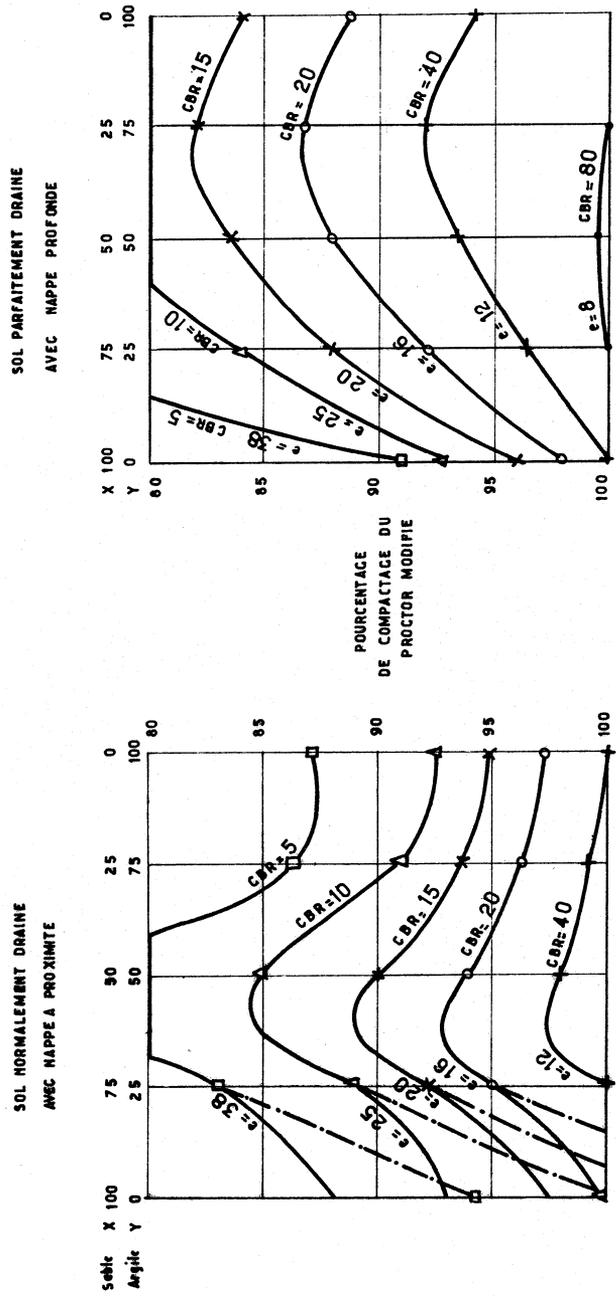


Fig. 3

INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE-FORME SUR L'ÉPAISSEUR TOTALE DE LA CHAUSSEE

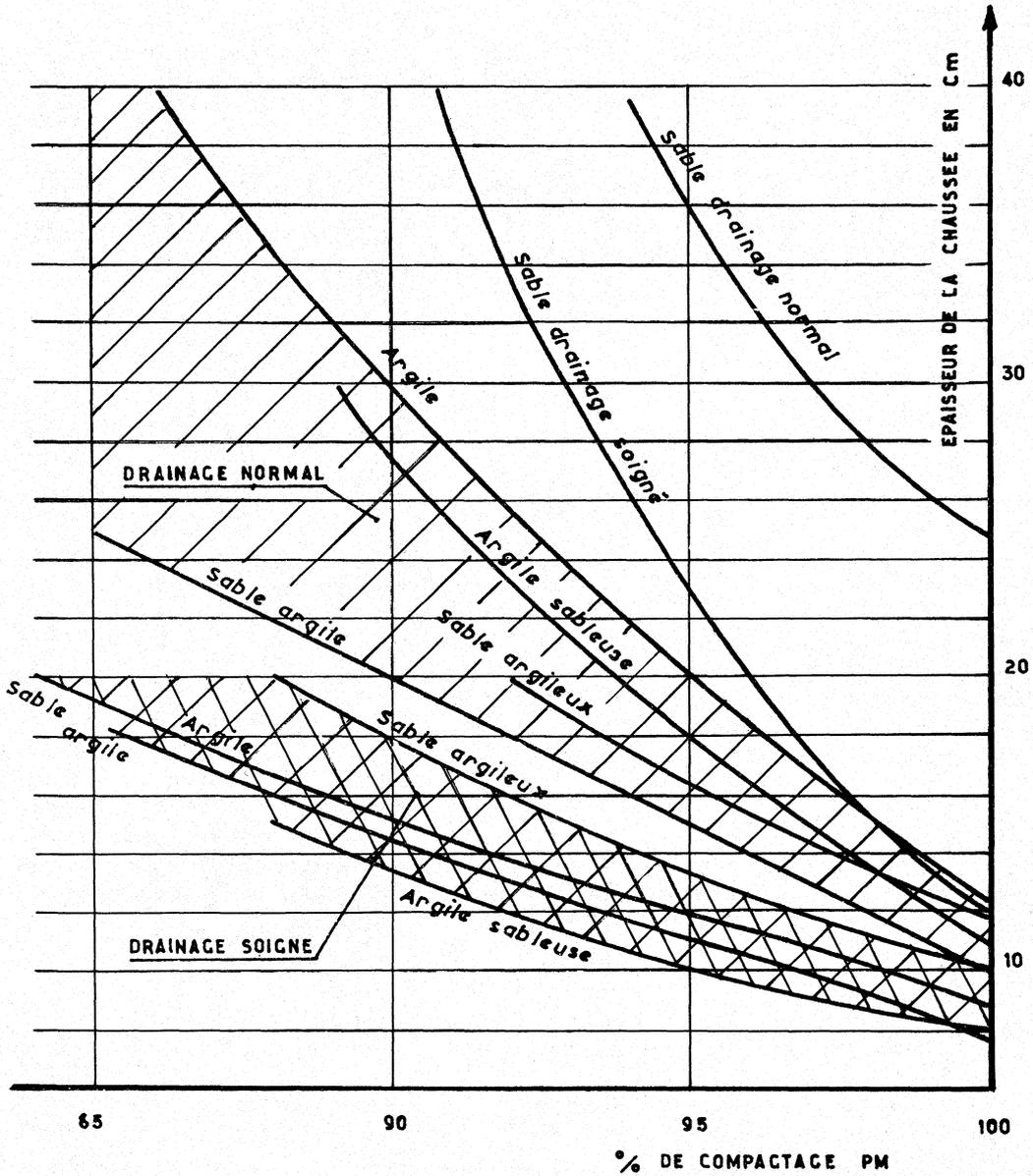


Fig 4

Cette figure met en évidence le comportement très différent de la plate-forme suivant les conditions de drainage et suivant que le matériau est rigoureusement sans cohésion, ou, au contraire, pourvu d'un minimum de cohésion.

Dans le cas où la plate-forme ne présente pas de risque d'imbibition, on constate :

- que les épaisseurs totales de chaussée nécessaires varient très peu suivant la nature du matériau dès que celui-ci possède un minimum de cohésion.
- que l'on peut réaliser un corps de chaussée sans fondation dès que le compactage de la plate-forme atteint 95% PM, ce qui est réalisable dans la plupart des cas.

Dans le cas où la plate-forme risque de subir des imbibitions, on constate :

- que l'épaisseur de chaussée nécessaire est beaucoup plus variable suivant la nature du matériau que dans le cas d'un drainage soigné.
- que le compactage a une influence beaucoup plus marquée sur cette épaisseur que dans le cas d'un drainage soigné.
- que même dans le cas d'une plate-forme risquant une imbibition, on peut limiter l'épaisseur totale de chaussée à 20 cm, dès que le compactage atteint 95% PM.
- que même s'il existe un risque d'imbibition, on peut éviter la fondation en compactant la plate-forme au voisinage de 100% PM ce qui indique, bien entendu, que la teneur en eau de cette plate-forme soit voisine de l'optimum Proctor Modifié.

En résumé, on a tout intérêt à prévoir pour la plate-forme le compactage le plus lourd possible et à assurer un drainage soigné de l'ensemble du corps de chaussée, plate-forme comprise.

Ce drainage est réalisable dans la plupart des cas à condition de couper la remontée capillaire et d'empêcher toute pénétration d'eau par les accotements, ce qui conduit à proscrire la réalisation d'encaissements et implique un compactage et une imperméabilisation des accotements.

2.2.2. - Stabilisation à la chaux

Sur la figure 5, il a été reporté pour les deux cas de drainage et pour les compactages de 90%, 95% et 100% du Proctor Modifié, le dosage en chaux, en fonction du type de sol rencontré. Nous avons pu tracer ainsi, dans ces différents cas, les courbes

STABILISATION A LA CHAUX

CONDITIONS THEORIQUES MINIMALES A IMPOSER

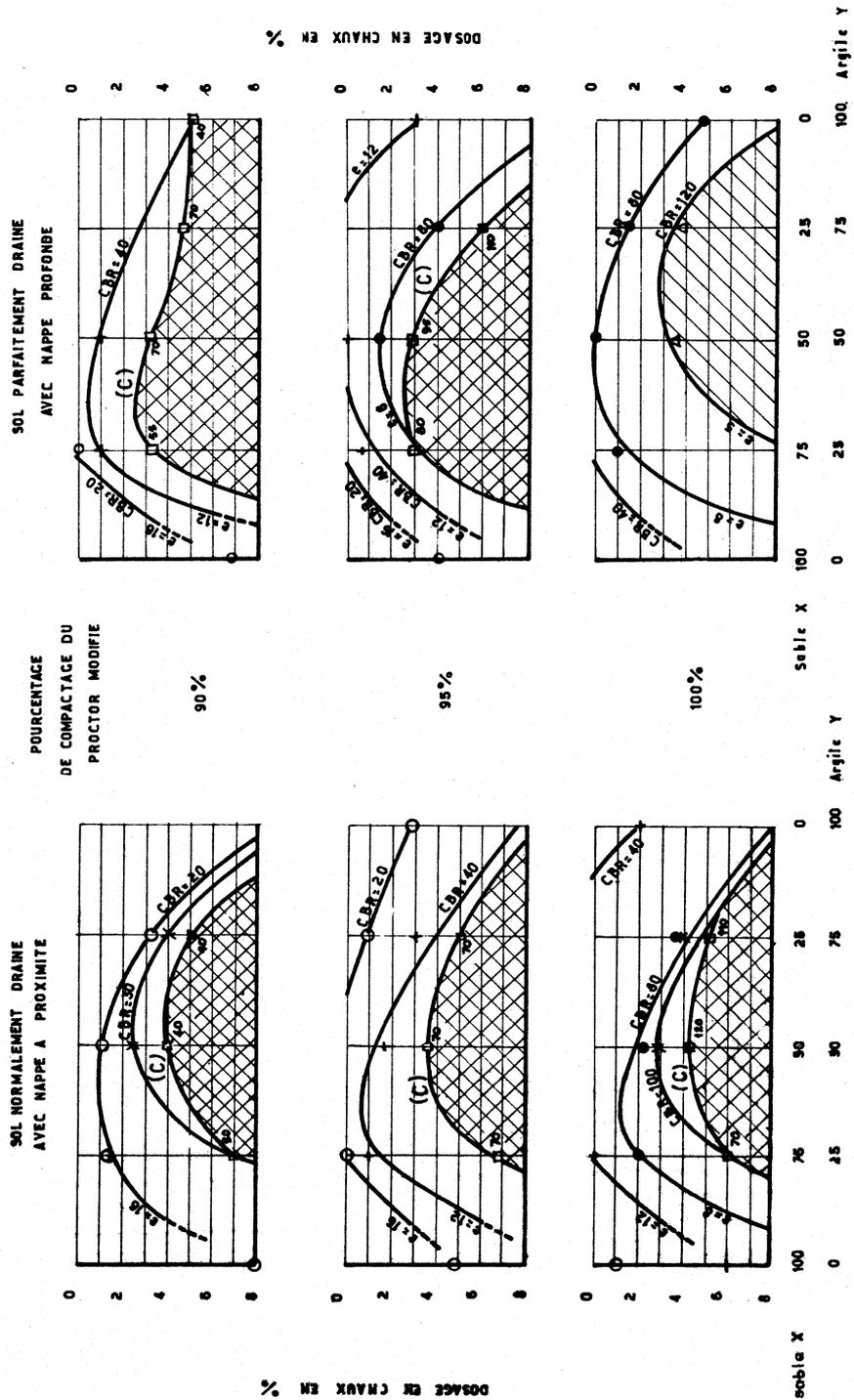


Fig. 5

STABILISATION A LA CHAUX

SURDOSAGE A ADOPTER SUR CHANTIER (1)

Mode de Mise en Oeuvre	Nature du sol	Sable	Sable argileux	Sable argile	Argile sableuse	Argile
MALAXAGE par PASSES MULTIPLES	Miveleuse (déplacement de cordon)		3,0			
	Charrues à disques		2,0	2,5		
	Rotavator porté		2,0	2,5	2,5	
	Pulvimixer		1,5	2,0	2,5	2,5
MALAXAGE par PASSE UNIQUE (Centrales Mobiles)	Trains de stabilisation à palettes		1,5	2,0	2,0	2,5
	Trains de stabilisation à rotors		1,0	1,5	1,5	2,0
MALAXAGE en CENTRALES FIXES	Batterie de Bétonnières		1,0	2,5		
	Centrales fixes		1,0	1,5	1,5	2,0

(1) Le dosage pratique ne doit pas être inférieur à 2%.

NOTA: Les surdosages indiqués sont destinés à compenser un éventuel défaut de malaxage, le répandage de liant étant supposé uniforme.

TABLEAU 1

d'égal C.B.R. qui résument les différentes conclusions faites pour chaque sol type stabilisé à la chaux.

Ces réseaux de courbes appellent les remarques suivantes :

- e en cm représente l'épaisseur de chaussée surmontant la couche envisagée et correspondant au trafic que l'on s'est fixé.
- le tracé a été arrêté pour 90 \times .

En effet, on a pu se rendre compte dans l'étude du sable, en comparant les résistances à la compression simple et les C.B.R. que ces derniers donnaient des résultats par trop optimistes : en réalité, la chaux joue, dans ce cas, un rôle de correcteur granulométrique, ce qui ne correspond pas évidemment, au but recherché. Il est donc exclu pratiquement de l'employer pour un sable pur; il sera bien plus intéressant, comme le démontre clairement les courbes de la figure 5, d'additionner ce sol d'un peu d'argile.

Certaines zones sont hachurées : d'abord celles correspondant à un C.B.R. supérieur à I20 (hachures parallèles). En effet, pour le trafic étudié, un C.B.R. supérieur à cette valeur ne diminue en rien l'épaisseur de chaussée surmontant la couche ayant un tel C.B.R.

D'autre part, les courbes de variation du C.B.R. en fonction du dosage présentant parfois un maximum, nous avons limité les dosages et obtenu ainsi une courbe (C) des dosages à ne pas dépasser. Le C.B.R. relatif à ce maximum est indiqué, pour chaque sol-type, sur la courbe (C). Les zones correspondantes sont couvertes de hachures croisées.

Il faut souligner d'ailleurs que les courbes de la figure 5 sont relatives à des dosages théoriques. Pour passer aux applications de chantier, on sera obligé de surdoser, pour des raisons de mise en oeuvre et de bonne dispersion dans le matériau. Les surdosages à adopter en fonction du mode de mise en oeuvre sont consignés dans le tableau I. En tout état de cause, on ne descendra pas en-dessous d'un dosage pratique de 2%.

D'une façon générale, les sols améliorés à la chaux perdent une partie de leur liant lorsqu'ils sont soumis à une forte circulation d'eau, ce qui se produira en général, dans les conditions d'utilisation. Il est donc souhaitable de les revêtir soit d'un tapis d'enrobés, soit de tout autre revêtement peu perméable.

2.2.3. - Stabilisation au ciment

Nous avons établi, pour les deux cas de drainage, des courbes analogues à celles du paragraphe précédent (voir figure 6).

Les remarques à faire sur ces différentes courbes sont semblables à celles ci-dessus.

STABILISATION AU CIMENT

CONDITIONS THEORIQUES MINIMALES A IMPOSER

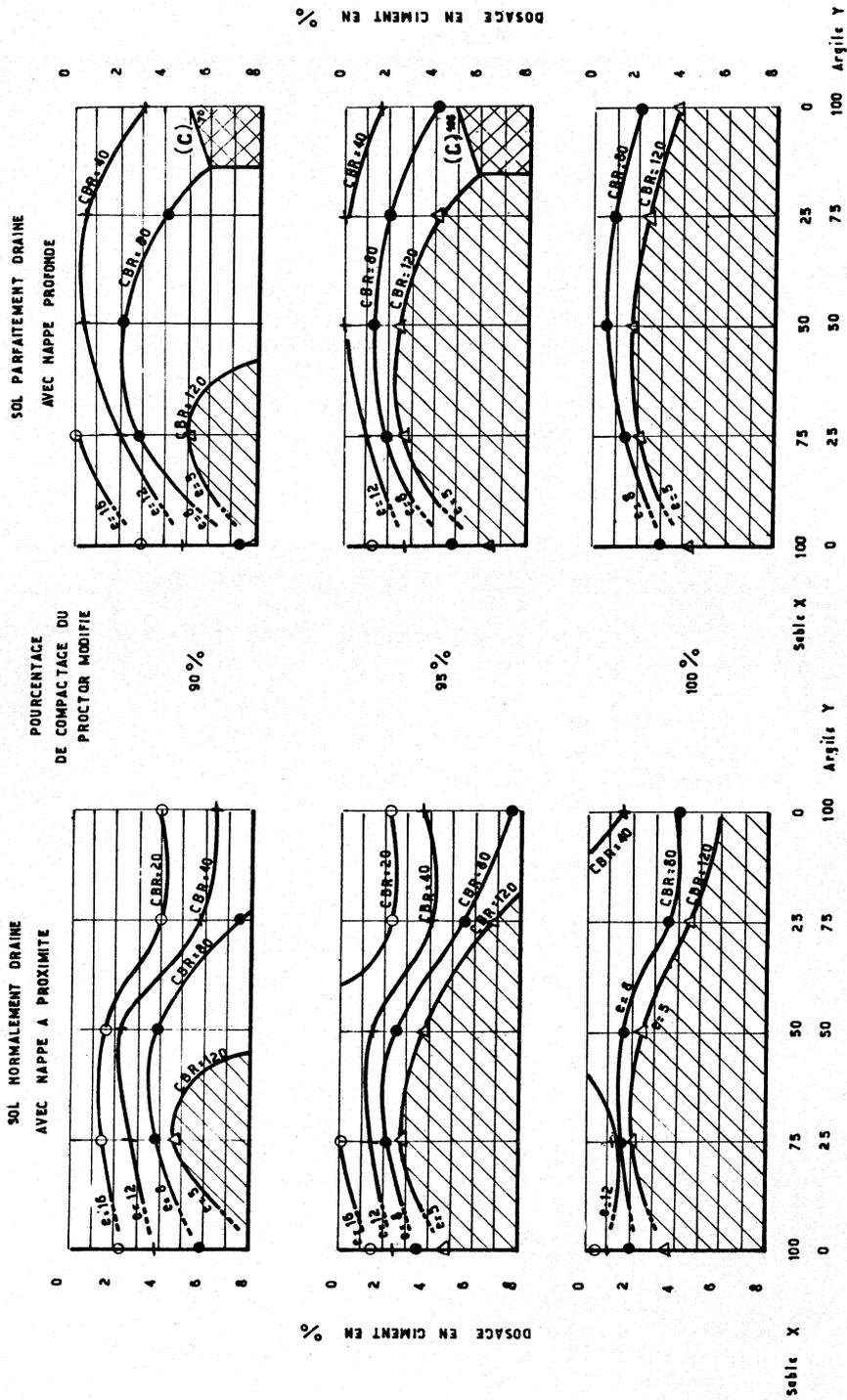


Fig. 6

Les surdosages à adopter, en fonction du mode de mise en oeuvre, sont consignés dans le tableau n° II. On ne descendra pas ici en-dessous d'un dosage pratique de 1,5%. Les dosages maxima sont fixés par des raisons économiques et aussi par le fait que pour les forts pourcentages, on passe à la technique des sols-ciment.

De même que précédemment et pour une raison identique, il sera souhaitable de revêtir les sols amendés au ciment, soit d'un tapis d'enrobés, soit de tout autre revêtement peu perméable.

Les règles de bonne construction des chaussées imposent d'avoir des assises de plus en plus perméables et de moins en moins résistantes quand on descend dans le corps de la chaussée.

Par conséquent, les sols stabilisés aux liants hydrauliques formeront, en général, une couche de base. La couche de fondation sera le plus souvent, faite avec le même matériau non amendé dont la résistance est plus faible et dont la perméabilité est équivalente.

2.2.4. - Stabilisation aux liants hydrocarbonés.

Etant donné les nombreux paramètres qui entrent en ligne de compte, à savoir :

- la nature du sol,
- le compactage,
- la stabilité Hubbard Field,
- le dosage en liant hydrocarboné,
- le dosage en eau,
- le dosage en dope,

il n'a pas été possible de tracer de courbes continues permettant "l'interpolation" entre deux sols-types. Nous avons simplement relevé dans le tableau III, la nature et la destination du liant en fonction du sol-type envisagé.

Il faut noter à propos de ce mode de stabilisation que, pour certains liants, la dispersion par malaxage, ne peut se faire d'une façon satisfaisante qu'en présence d'un excès d'eau. Par conséquent, si l'hygrométrie ambiante le permet, il faudra attendre le séchage, sinon le liant en question sera à écarter.

2.3 - Exploitation des résultats.

Les graphiques de synthèse portent en abscisse les différents types de sol. Il suffit donc de savoir classer un sol quelconque dans l'échelle des sols étudiés pour bénéficier des renseignements fournis par les essais de laboratoire. Le plus souvent, le sol

STABILISATION AU CIMENT

SURDOSAGE A ADOPTER SUR CHANTIER (1)

Mode de Mise en Oeuvre	Nature du sol	Sable	Sable argileux	Sable Argile	Argile sableuse	Argile
MALAXAGE par	Niveleuse (déplacement de cordon)		2,0	2,0	2,0	2,0
	Charrues à disques		1,5	2,5	2,5	2,5
	Rotavator porté		1,0	2,0	2,5	2,5
PASSES MULTIPLES	Pulvimixer		0,5	1,5	2,0	2,5
	Trains de stabilisation à palettes		0,5	1,5	2,0	2,5
MALAXAGE par PASSE UNIQUE (Centrales mobiles)	Trains de stabilisation à rotors		0,5	1,0	1,5	2,0
	Batterie de Bétonnières		1,0	2,0	2,0	2,0
CENTRALES FIXES	Centrales fixes		0,5	1,0	1,5	2,0

Sable
en couche de base
en fondation
Dosage minimal total

(1) Le dosage pratique ne doit pas être inférieur à 1,5%

NOTA : Les surdosages indiqués sont destinés à compenser un éventuel défaut de malaxage, le répannage de liant étant supposé uniforme/

TABLEAU 2

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

CONDITIONS PRATIQUES MINIMALES A IMPOSER

Nature et destination du liant		Nature du Sol	Sable	Sable argileux	Sable Argile	Argile sableuse	Argile
CUT BACK 50/100	Couche de base						
	Fondation						
CUT BACK 10/15	Couche de base		6% cut-back 7% eau				
	Fondation		5% cut-back 7% eau				
CUT BACK EX.2	Couche de base		6% EK.2 5% eau		5% EK.2 0,2% Dope 4266 ou 0,2% Stabiram		
	Fondation		5% EK.2 5% eau		5% EK.2 0,2% Dope 4266 ou 0,2% Stabiram		
EMULSION BASIQUE	Couche de base		7% Emulsion 3% chaux 5 à 7% eau				
	Fondation		5% Emulsion 3% chaux 5 à 7% eau				
EMULSION ACIDE	Couche de base			6% Emulsion (Excès d'eau)			
	Fondation			6% Emulsion (Excès d'eau)			

TABLEAU 3

rencontré se situera entre deux mélanges types. Le présent paragraphe a pour but de préciser, dans la mesure du possible, les règles à observer en pareil cas.

2.3.1. - Détermination du mélange Sx-Ay équivalent au sol étudié.

Le mélange Sx-Ay est tel qu'il contient x% de sable et y% d'argile.

Nous avons étudié en fonction de x et y, grâce aux résultats que nous possédions, les variations:

- de la granulométrie (fig.7)
- de l'indice de plasticité (fig.8)
- de la densité sèche maximale de Proctor Modifié (fig.9).
- de la classe USHRB (United States Highway Research Road), dans le tableau ci-dessous :

:	:	:	:	:	:	:
:	x	100	75	50	25	0
:	:	:	:	:	:	:
:	y	0	25	50	75	100
:	:	:	:	:	:	:
:	classe	A3	A2	A6	A7	A7
:	:	:	:	:	:	:

On peut donc assimiler le sol étudié à un mélange Sx-Ay, après détermination de sa granulométrie, de son indice de plasticité, de sa densité sèche maximale P.M. et de sa classe USHRB, mais il peut arriver que les valeurs de x et y déterminées par cette méthode, soient dispersées. Dans ce cas, afin d'être du côté de la sécurité, on retient, faute d'autres éléments, les valeurs les plus défavorables.

Nous supposons donc que les méthodes exposées ci-dessus ont conduit à adopter pour x et y, des valeurs bien déterminées, autrement dit, que le mélange Sx-Ay équivalent au sol étudié est connu.

Dans cette hypothèse, il est possible d'étudier grâce aux abaques et tableaux donnés précédemment, les conditions à imposer à ce sol afin qu'il résiste au trafic prévu suivant le type de stabilisation qu'on lui a fait subir.

2.3.2. - Exemple d'utilisation de la notion de sol équivalent

a) Recherche du sol équivalent.

Supposons que les essais sur le sol étudié nous aient donné :

- la granulométrie représentée sur la fig.7 par la courbe (C)
- l'indice de plasticité : IP = 8 (LL=42).
- la densité maximale du Proctor Modifié : 1,89 T/M³
- la classe U.S.H.R.B. : A2 - 5

EXEMPLE DE RECHERCHE DU SOL EQUIVALENT

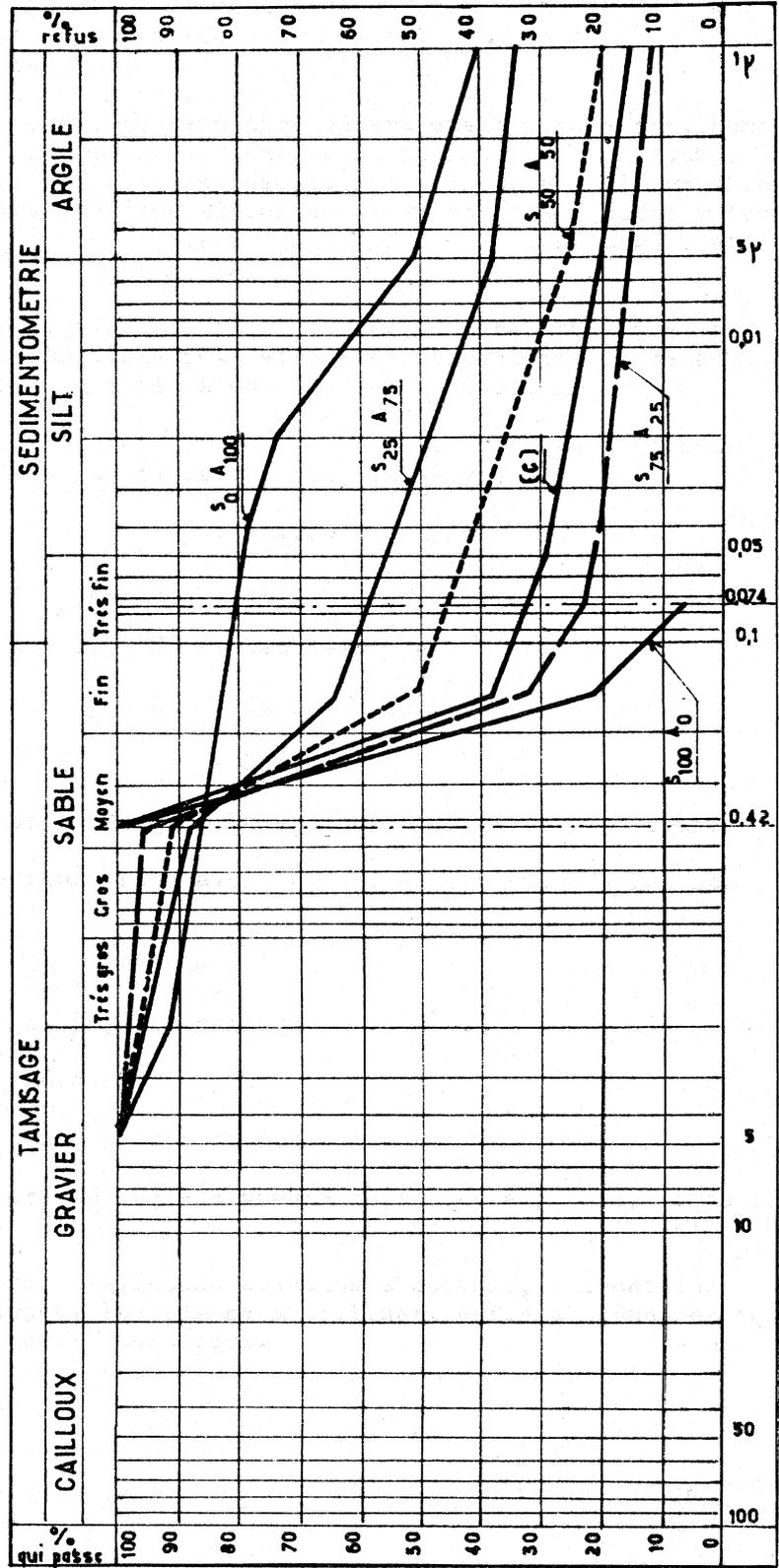
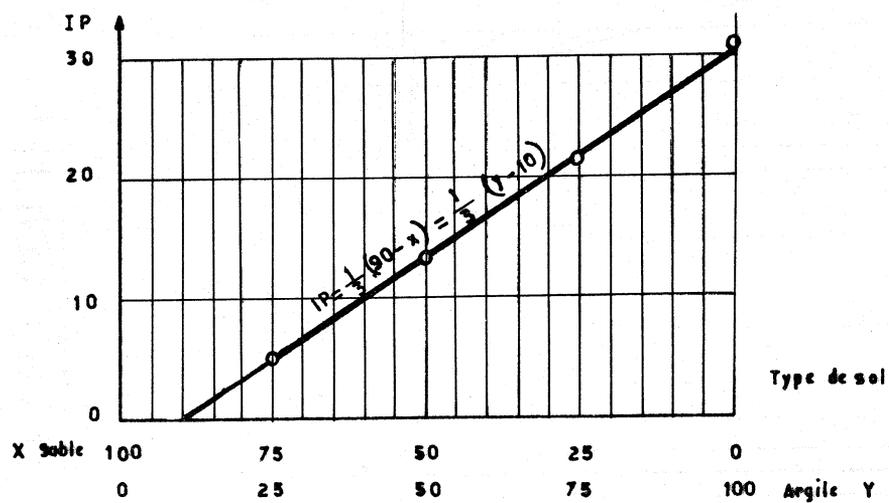
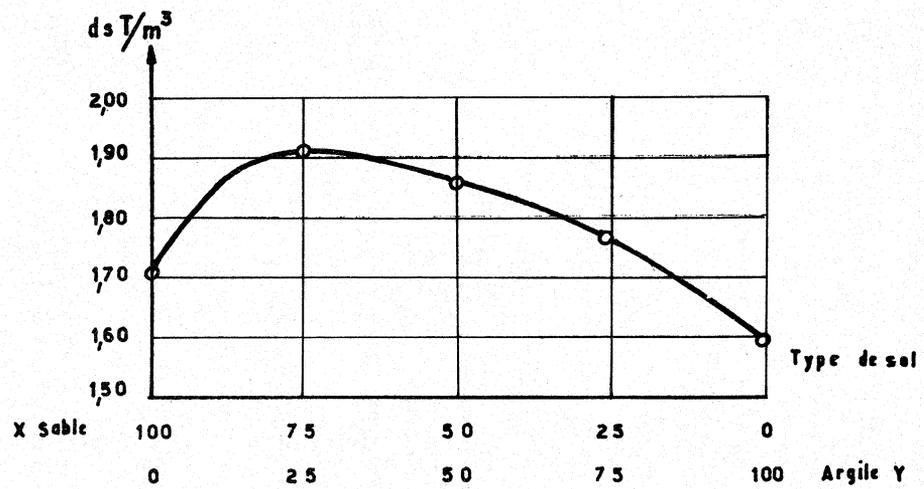


Fig. 7

VARIATION DE L'INDICE DE PLASTICITE EN FONCTION DU SOL Sx Ay.



VARIATION DE LA DENSITE SECHE MAXIMALE DU PROCTOR MODIFIE



(voir manuel du laboratoire routier de M.Peltier page 72)

On obtient alors à l'aide de :

- la figure 4, $x = 65$ $y = 35$
- la figure 3, $x = 63$ $y = 37$
- la figure 2, $x = 60$ $y = 40$

La classe U.S.H.R.B. A2 - 5 se recoupe bien avec le tableau ci-dessus. On prendra : $x = 63$ $y = 37$

b) Détermination du mode de stabilisation et des épaisseurs.

Reprenons le sol de l'exemple précédent. Nous supposons que le drainage s'effectuera normalement et que les moyens de compactage ne permettent pas de dépasser 95% du Proctor Modifié. Que pouvons-nous envisager comme stabilisation pour un tel sol?

- en plate-forme : la figure 6 nous montre qu'on peut atteindre, pour 95% du P.M, un C.B.R. de 25; l'épaisseur totale de la chaussée sera donc de 15 cm.
- en couche de fondation : l'épaisseur totale de chaussée étant de 15 cm, la couche de fondation n'est pas nécessaire.
- en couche de base : un C.B.R. de 80 est un minimum. La stabilisation à la chaux est impossible. La figure 7 montre qu'il faudra un dosage théorique de 2% en ciment. En supposant que le malaxage se fasse au Pulvimixer, nous voyons que le tableau II impose un surdosage compris entre 0,5% (sable argileux) et 1,5% (sable argile). Nous prendrons 1%. Le dosage pratique sera donc de 3% de ciment.

Le tableau III nous démontre que la stabilisation aux liants hydrocarbonés est également possible : 6% d'EK.2 semble un pourcentage suffisant. Néanmoins, le dosage en dope devra être précisé par une étude particulière.

3 - CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE.

3.1 - Opérations élémentaires et choix des engins.

Dans les tableaux ci-après sont indiquées les opérations élémentaires nécessaires au traitement de la plate-forme et à la stabilisation des couches de fondation et de base ainsi que le degré d'efficacité des engins utilisés dans chaque opération élémentaire.

En ce qui concerne le traitement de la plate-forme, les opérations élémentaires indiquées correspondent au cas le plus défavorable, c'est-à-dire au cas où la teneur en eau naturelle du sol constituant la plate-forme est très différente de la teneur optimale Proctor.

Si la teneur en eau naturelle est voisine de la teneur en eau de compactage, il n'est pas nécessaire de prévoir une scarification, une aération ou une humidification. Il est alors possible de procéder directement au compactage de la plate-forme et à son réglage après compactage.

L'aération est pratiquée si la teneur en eau naturelle est très supérieure à la teneur en eau optimale. Cette opération est d'autant plus facile que le matériau est moins argileux. Pour qu'elle soit possible, il faut que le degré hygrométrique de l'air ne soit pas trop élevé, ce qui n'est pas toujours réalisé, en particulier, en région de forêt. En climat équatorial très humide, il est fréquemment impossible d'abaisser de plus de 2 points la teneur en eau naturelle et dans ce cas, il vaut souvent mieux ne pas toucher à la plate-forme et augmenter les épaisseurs de chaussée en conséquence.

En ce qui concerne les couches de fondation et de base, l'apport du matériau constitue un poste essentiel dans la stabilisation. Les engins de chargement et de transport seront essentiellement fonction de la distance moyenne entre les emprunts et des conditions d'accès à ces emprunts.

La préparation du matériau avant stabilisation doit être de plus en plus soignée lorsque l'on passe du sable à l'argile. Il est, par exemple, pratiquement impossible de pulvériser une argile au moyen des appareils du type agricole. Dans le cas de ce matériau, les possibilités de pulvérisation dépendent essentiellement de la teneur en eau naturelle du matériau.

Les techniques d'incorporation du liant et les matériels correspondants seront choisis en fonction de la nature du terrain, du dosage minimal admissible et de l'importance du chantier. Le répandage manuel du liant doit être proscrit pour des dosages inférieurs à 4%. Il est par contre admissible dans le cas de petits chantiers utilisant comme matériau de base le sable ou le sable argileux. Le malaxage au moyen de trains de stabilisation ou de centrales de grande capacité n'est parfaitement adapté que dans le cas de très gros programmes de construction.

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 μ : 6 %

IP -

d_{sm} Proctor = 1,71 T/m³

MATÉRIAU
SABLE

	Opérations élémentaires	Engins	Couche de fondation			Couche de base						
			stabil. méca.	stabil. méca.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	stabil. méca.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques										
		Rotavator										
		Pulvimixer										
		Préparixeur										
		Rotor du train de stabilisat.										
	Concasseur mobile											
	Aération	Niveleuse, charrue à disque						•			•	
		Pulvimixer						•••			•••	
		Citerne et rampe (passes mult.)	••					••			••	
	Préhumidification	Citerne et pompe (passe unique)	•					•			•	
Citerne branchée sur malaxeur							••••			••••		
2	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)			•	••				•		
		Répandeur à liant			••	•••				•••		
		Citerne épandeuse à rampe						••			•	
		Citerne branchée sur malaxeur						••••			••••	
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	••		••	••				••		
		Citerne et pompe (passe unique)	•		•	•				•		
		Rampe longitudinale	•••		•••	•••				•••		
		Citerne branchée sur malaxeur			••••	••••				••••		
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)						•				
		Charrue à disques						••			•	
		Rotavator						•	••	•		
		Pulvimixer			••	•••	••			•••	•	
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••	••••			••••	••••	
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••	••••			••••	••••	
		Centrale fixe (plant)			••••	••••				••••	••••	
		Batteries de bétonnières			•••	•••	•			•••	•	
		Aération	Niveleuse						•			•
			Pulvimixer						•••			•••
		Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•		••	••	•••			••	•••
			Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.	••		•••	•••	••			•••	••
Vibro tamper	•••			••••	••••	•••			••••	•••		
Dameuse mécanique				•••	•••	•••			•••	•••		
Compactage	Rouleau à pneus 9/12 t					••	•••			•	•••	
	Rouleau à pneus 30 à 45 t	•••		•••	•••	••			••••	••••		
	Rouleau à pneus 50 à 100 t	•••••		••	••							
	Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t											
	Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t											
	Fouloir mécanique											
	Rouleau lisse 5 t							••				
	Rouleau lisse 15 t							••		••		
	Rouleau à grilles											
	Rouleau à plaques 16,25 t					••			••			
	Rouleau lisse vibrant < 2 t											
	Rouleau lisse vibrant 3,6 t											
	Rouleau lisse vibrant 4,8 t											
	Plaques vibrantes 0,5/0,7 t											
	Plaques vibrantes > 1,7 t	••										
	Vibro tamper 2,4 t	•••							•••	•		
	Grenouille 0,5 t											
	Grenouille 1 t					••	••			••		
Compactage de finition	Rouleau à pneus 9/12 t			•••	•••	••••			•	••		
	Rouleau lisse tandem 12/14 t			•	••	•••			••	•••		
	Rouleau lisse tandem 5/8 t			•••	•••	•••			•••	•••		
	Rouleau vibrant 3,6 t			•••	••••	•			••••	•		
	Rouleau vibrant 4,8 t			••••	••••	•••			••••	•••		

 matériel inopérant ou opération contre-indiquée
 matériel peu efficace (à éviter)
 matériel à efficacité moyenne
 matériel à bonne efficacité
 matériel à excellente efficacité
 opération superflue

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGINs

% < 80 μ : 23 %

IP - 5

d sm Proctor = 2,01 T/m³

MATÉRIAU
SABLE ARGILEUX

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme					Couche de fondation			Couche de base					
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydrocarbonés	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydrocarbonés					
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques	••	••	•	•	•		•	•	•		•	•	•	
		Rotavator	•••	•••	••	••	••		••	••	•••		••	••	•••	
		Pulvimixer	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Préparizer														
		Rotor du train de stabilisat.			••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Concasseur mobile														
	Aération	Niveleuse, charrue à disque	•	•	••	••	••		••	••	••		••	••	••	
		Pulvimixer	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)					•••								•••	
		Citerne et pompe (passe unique)					•••								•••	
Citerne branchée sur malaxeur						••••								••••		
2	Répandage du liant	Manuel (herse ou niveleuse)				••				•				•		
		Répandeur à liant			•	•••				•	••				•	••
		Citerne épandeuse à rampe					••									•
		Citerne branchée sur malaxeur					••••								••••	
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	•••	•••	••	••			••	••			••	••		
		Citerne et pompe (passe unique)	•••	•••	•••	•••			•••	•••			•••	•••		
		Rampe longitudinale	•••	•••	•••	•••			•••	•••			•••	•••		
		Citerne branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••			••••	••••			••••	••••		
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)	•	•		•										
		Charrue à disques	••	••		••				•				•		
		Rotavator	••	••	•	••	•			•	••			•	••	
		Pulvimixer	••••	••••	••	•••	••		•••	••	•		•••	••	•	
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Centrale fixe (plant)			••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Batteries de bétonnières				••				••				••		
	3	Aération	Niveleuse					•								•
			Pulvimixer					•••								•••
		Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••
			Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••
Vibro tamper			•••	•••	••••	••••	••		••••	••••	••		••••	••••	••	
Dameuse mécanique					•••	•••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••	
Compactage		Rouleau à pneus 9/12 t	•••		••	••	•••		••	••	•••		••	••	•••	
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••		••••	••••	••••	
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	•••		••	••	•••		••	••	•••		••	••	•••	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t	•••		••	••	•••		••	••	•••		••	••	•••	
		Faioir tronconique	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••	
		Rouleau lisse 5 t														
		Rouleau lisse 15 t			•	•	••				•	•		•	•	
		Rouleau à grilles	•													
		Rouleau à plaques 16,25 t	•••	•	•••	•••			•••	•••			•••	•••		
		Rouleau lisse vibrant < 2 t														
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t														
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t			••	••	•				•	•		•	•	
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t														
Plaques vibrantes > 1,7 t		•••		••	••					•	•					
Vibro tamper 2,4 t		•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••		
Grenouille 0,5 t				••	••					••	••				••	
Grenouille 1 t		•••	•••	•••	•••			•••	•••			•••	•••			
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t	••••	••••	••••	••••	••••		••	••	••		••	••	••	
		Rouleau lisse tandem 12/14 t	••	••	•••	••	••••		•••	•••	•••		•••	•••	•••	
		Rouleau lisse tandem 5/8 t	•	•	••	••	•••		•••	•••	•••		•••	•••	•••	
		Rouleau vibrant 3,6 t	•	•	••••	••••	••		•••	•••	••		•••	•••	••	
		Rouleau vibrant 4,8 t	••	••	••••	••••	•••		••••	••••	•••		••••	••••	•••	

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 µ : 45 %

IP - 13,5

d_{5m} Proctor = 1,92 T/m³

MATÉRIAU
SABLE ARGILE

	matériel inopérant ou opération contre-indiquée
•	matériel peu efficace (à éviter)
••	matériel à efficacité moyenne
•••	matériel à bonne efficacité
••••	matériel à excellente efficacité
	opération superflue

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme		Couche de fondation			Couche de base			
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydro-liqués < 4%	liants hydro-liqués > 4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydro-liqués < 4%	liants hydro-liqués > 4%	liants hydro-carbonés
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charue à disques	••	••	•	•		•	•		
		Rotavator	••	••	••	••	•		••	••	•
		Pulvimixer	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••
		Préparizer	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Rotor du train de stabilisat.			••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Concasseeur mobile							••••	••••	••••
	Aération	Niveleuse, charue à disque	•	•	••	••	••		••	••	••
		Pulvimixer	•••	•••	•••	••••	••••		••••	••••	••••
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)									•••
		Citerne et pompe (passe unique)									••
Citerne branchée sur malaxeur										••••	
2	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)				••					
		Répandeur à liant			••	••••					
		Citerne épardeuse à rampe					•				•
		Citerne branchée sur malaxeur						••••			••••
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Citerne et pompe (passe unique)	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Rampe longitudinale	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Citerne branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••			••••	••••	
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)									
		Charue à disques	••	••		•					•
		Rotavator	•••	•••	••	••			•	••	
		Pulvimixer	••••	••••	••	••••	•		••	•••	•
		Train de stabilisation à palettes			•••	•••	••••		•••	•••	••••
		Train de stabilisation à rotor			•••	•••	••••		•••	•••	••••
		Centrale fixe (plant)			••••	••••	••••		••••	••••	•••
Batteries de bétonnières					•					•	
3	Aération	Niveleuse									
		Pulvimixer					•••			•••	
	Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•••	•••	••••	••••	•••		••••	••••	•••
		Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.	•	•	•••	•••	••		•••	•••	•••
		Vibro tamper	••	••	••	••	••		••	••	••
		Dameuse mécanique	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••
	Compactage	Rouleau à pneus 9/12 t	••		•••	•••	••••		•••	•••	••••
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••	•••	••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	•••	••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	••		••	••			••	•••	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t	••		••	••			••	•••	
		Fouloir tronconique	••••	•••	••••	••••			•••	•••	
		Rouleau lisse 5 t									
		Rouleau lisse 15 t	•		•	•	••		•	•	••
		Rouleau à grilles	•		•	•			•	•	
		Rouleau à plaques 16,25 t	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	
		Rouleau lisse vibrant < 2 t									
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t				•					
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t				•	••	••			•
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t					•				
		Plaques vibrantes > 1,7 t	•		•	•			•	•	
	Vibro tamper 2,4 t	••		••	••	•					
	Grenouille 0,5 t			••	•••			••	••		
	Grenouille 1 t	•••	•••	•••	•••			•••	•••		
	Compactage de finition	Rouleau à pneus 9/12 t	••••	••••	••••	••••	••••		••	••	•••
Rouleau lisse tandem 12/14 t		••	•••	••••	••••	•••		•••	•••	•••	
Rouleau lisse tandem 5/8 t		•	•	••••	••••	•••		•••	•••	•••	
Rouleau vibrant 3,6 t		•	•	••••	••••	•		•••	•••	•	
Rouleau vibrant 4,8 t		••	••	••••	••••	•••		••••	••••	•••	

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 μ : 58 %

IP - 22

d_{sm} Proctor = 1,80 T/m²

MATÉRIAU
ARGILE SABLEUSE

	matériel inopérant ou opération contre-indiquée
•	matériel peu efficace (à éviter)
••	matériel à efficacité moyenne
•••	matériel à bonne efficacité
••••	matériel à excellente efficacité
	opération superflue

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme		Couche de fondation			Couche de base					
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydrauliques <4%	liants hydrauliques >4%	liants hydrocarbonés	stab. méc.	liants hydrauliques <4%	liants hydrauliques >4%	liants hydrocarbonés		
1 PREPARATION DU MATÉRIAU	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques	•	•									
		Rotavator	•	•	•	•			•	•			
		Pulvimixer	••	••	••	••			••	••			
		Préparizer	•••	•••	•••	•••			•••	•••			
		Rotor du train de stabilisat.			•••	•••			•••	•••			
		Concasseur mobile											
	Aération	Niveleuse, charrue à disque	•	•									
		Pulvimixer	•••	•••	•••	•••			•••	•••			
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)											
		Citerne et pompe (passe unique)											
Citerne branchée sur malaxeur													
2 INCORPORATION DU LIANT STABILISANT ET DE L'EAU	Répandage du liant	Manuel ± (herse ou niveleuse)									••		
		Répandeur à liant				•	•••			•	•••		
		Citerne épandeuse à rampe											
		Citerne branchée sur malaxeur											
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	••	••	••	••			••	••			
		Citerne et pompe (passe unique)	•	•	••	••			••	••			
		Rampe longitudinale	•••	•••	•••	•••			•••	•••			
		Citerne branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••			••••	••••			
	Malaxage	Niveleuse (déplacement: cordon)											
		Charrue à disques	•	•									
		Rotavator	•	•	•	•						•	
		Pulvimixer	•••	•••	•	•••			•	•••			
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••			••••	••••			
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••			••••	••••			
		Centrale fixe (plant)			••••	••••			••••	••••			
		Batteries de bétonnières											
	3 COMPACTAGE ET FINITION	Aération	Niveleuse										
			Pulvimixer										
		Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•••	•••	•••	•••			•••	•••		
			Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.										
Vibro tamper													
Dameuse mécanique					•••	•••			•••	•••			
Compactage		Rouleau à pneus 9/12 t	••			••						••	
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••			••••			••••	••••			
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	••••	••	••			••••	••••			
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t										•	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 12 t	••	•		•						•	
		Fouloir tronconique	••••	••••	•••	•••			•••	•••			
		Rouleau lisse 5 t											
		Rouleau lisse 15 t											
		Rouleau à grilles											
		Rouleau à plaques 16,25 t	•		••	•••			••	•••			
		Rouleau lisse vibrant < 2 t											
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t											
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t											
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t											
		Plaques vibrantes > 1,7 t											
		Vibro tamper 2,4 t											
Grenouille 0,5 t													
Grenouille 1 t		•••	•••	•••	•••			•••	•••				
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t	•••	•••	•••	•••			••	••			
		Rouleau lisse tandem 12/14 t	•	•	•••	•••			•••	•••			
		Rouleau lisse tandem 5/8 t			••	••			••	••			
		Rouleau vibrant 3,6 t											
	Rouleau vibrant 4,8 t			••	••			••	••				

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 μ : 82 %
 IP - 31
 d sm Proctor = 1,61 T/m³

MATÉRIAU
ARGILE

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme	Couche de fondation			Couche de base					
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydrauliques <4%	liants hydrauliques >4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydrauliques <4%	liants hydrauliques >4%	liants hydro-carbonés	
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques	•									
		Rotavator	•									
		Pulvimixer	••		•	•					•	
		Préparizer	•••		•••	•••					•••	
		Rotor du train de stabilisat.			•••	•••					•••	
		Concasseur mobile	••••		••••	••••					••••	
	Aération	Niveleuse, charrue à disque	•									
		Pulvimixer	••		•••	•••					•••	
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)										
		Citerne et pompe (passe unique)										
Citerne - branchée sur malaxeur												
2	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)				••						
		Répandeur à liant			•	•••					•••	
		Citerne épineuse à rampe										
		Citerne branchée sur malaxeur										
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	••		•	•					•	
		Citerne et pompe (passe unique)										
		Rampe longitudinale	•••		•••	•••					•••	
		Citerne branchée sur malaxeur	••••		••••	••••					••••	
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)										
		Charrue à disques										
		Rotavator	•									
		Pulvimixer	•••			•					•	
		Train de stabilisation à palettes			•••	••••					•••	
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••					••••	
		Centrale fixe (plant)			••••	••••					••••	
		Batteries de bétonnières										
	3	Aération	Niveleuse									
			Pulvimixer									
Précompactage		Rouleau à pneus <15 t	••••		•••	•••					•••	
		Plaques vibrantes <1 t ou tamper des trains stab.										
		Vibro tamper										
Dameuse mécanique				•••	•••					•••		
Compactage		Rouleau à pneus 9/12 t	••			••						
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	•••		••••	••••					••••	
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	•		•	•						
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	•									
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t										
		Fouloir tronconique	••••		•••	•••					•••	
		Rouleau lisse 5 t										
		Rouleau lisse 15 t										
		Rouleau à grilles			••	••						
		Rouleau à plaques 16,25 t	•		•	•						
		Rouleau lisse vibrant <2 t										
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t										
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t										
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t										
		Plaques vibrantes >1,7 t										
Vibro tamper 2,4 t												
Grenouille 0,5 t												
Grenouille 1 t		•••		••	••					•••		
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t	•••		•••	•••					••	
		Rouleau lisse tandem 12/14 t			•••	•••					•••	
		Rouleau lisse tandem 5/8 t			••	••					•	
		Rouleau vibrant 3,6 t										
	Rouleau vibrant 4,8 t			•	•					•		

Pour une opération déterminée, il est généralement possible d'utiliser des engins différents. Parmi ces engins et compte tenu de toutes les opérations élémentaires nécessaires, on peut définir un parc d'engins nécessaires à l'ensemble du chantier. Le choix de ce parc sera fait d'une part, en fonction des normes de mise en oeuvre découlant des essais en laboratoire (en particulier en ce qui concerne le compactage, la distribution du liant et la préparation des matériaux avant stabilisation) et d'autre part, en fonction de l'importance du chantier et des délais d'exécution. D'une façon générale, les techniques de stabilisation par passes multiples sont parfaitement adaptées aux chantiers de petite ou moyenne importance, les techniques de stabilisation par centrale mobile ou centrale fixe étant plutôt adaptée aux chantiers de grande envergure et de grand rendement.

3.2 - Etude du rendement des engins.

3.2.1 - Formules générales de production.

Dans le cas d'engins travaillant par passe unique, la production utile est donnée par la relation :

$$S = 60 \times V \times L \times \rho$$

ou S = Production en m²/h.

V = Vitesse d'avancement en mètre/minute

L = Largeur de travail en mètre

ρ = Coefficient d'utilisation

Ce coefficient d'utilisation a pour expression :

$$\rho = \frac{t - t_0}{t}$$

t étant la durée maximale d'utilisation possible sur chantier et t₀ les temps d'immobilisation pour causes diverses.

Pour les engins travaillant par passes multiples mais à vitesse constante, cette relation devient :

$$S = \frac{60 \times V \times L}{N} \times \rho$$

N étant le nombre de passes.

3.2.2 - Valeurs pratiques du coefficient d'utilisation.

Les valeurs moyennes à prendre en considération pour l'Afrique et déduites des expériences tirées de quelques chantiers sont celles du tableau ci-après.

Tableau des coefficients d'utilisation (valeurs pratiques)	
Matériel agricole tracté (hermes charrues cultivateurs rotavator)	0,20
Niveleuse	0,20
Matériel de pulvérisation à moteur	0,20
Matériel de compactage tracté	0,30
Matériel de compactage automoteur	0,30
Citernes	0,30
Matériel de malaxage tracté	0,50
Matériel de malaxage automoteur	0,50

3.2.3 - Production des engins dans le cadre des opérations élémentaires.

A - Préparation du matériau.

On trouvera ci-après quelques ordres de grandeur des rendements à attendre et quelques remarques, concernant les différentes opérations élémentaires.

- Réglage et mise au profil à la niveleuse.
production horaire utile : environ 300 m²/heure
- Scarification de la plate-forme à la niveleuse.
production horaire utile : environ 900 m²/heure.
- Répandage et réglage des matériaux d'apport à la niveleuse
production horaire utile : environ 1200 m²/heure.
- Pulvérisation.

Les productions utiles exprimées en m²/H ainsi que le nombre de passes généralement nécessaires sont indiquées au tableau suivant :

type d'engin	Production utile en m ² /heure				
	Type de sol				
	Sable	Sable argileux	Sable argile	argile sableuse	argile
Cultivateur ou charrue à disques		1.000 3 passes	750 4 passes	500 6 passes	375 8 passes
Rotavator		1.100 2 passes	1.100 2 passes	720 3 passes	540 4 passes
Pulvimixer		2.100 1 passe	1.100 2 passes	1.100 2 passes	720 3 passes
Préparizer			2.100 1 passe	2.100 1 passe	1.100 2 passes
Concasseur mobile					550 3 passes

- Aération.

Les productions indiquées au tableau suivant correspondent à une élimination d'environ 4% d'eau pour les matériaux sableux et 2% pour les matériaux argileux.

type d'engin	Production utile en m ² /heure				
	type de sol				
	Sable	Sable argileux	Sable argile	argile sableuse	argile
Niveleuse par déplace- ment de cor- don y com- pris mise en cordon et réglage. Charrue à disques		300	240	120	100
Pulvimixer (capot ou- vert)		200 4 passes	200 4 passes	140 6 passes	100 8 passes

- Pré-humidification.

La pré-humidification n'est utilisée que dans le cas où le matériau à stabiliser est un sable pulvérulent et dans le but de faciliter le passage des engins de chantier.

La production utile au répandage est de l'ordre de 3.000 m² par heure.

- Mise en cordon

La mise en cordon est pratiquée dans le cas où le malaxage est prévu au moyen de centrales mobiles travaillant en cordon, par exemple Road Mixer Wood ou Travel Plant Barber Green.

Les productions relatives à la mise en cordon dépendent de l'épaisseur de la couche avant compactage et de la largeur de la chaussée.

B - Incorporation du liant.

- Répandage du liant et humidification

En ce qui concerne le répandage du liant et l'humidification, les rendements sont essentiellement fonction des quantités à répandre au m² ainsi que des dispositions prises pour le stockage sur chantier. Il est pratiquement impossible de donner des valeurs moyennes de rendement.

- malaxage.

On trouvera aux tableaux des pages 33 et 34 , le nombre de passes nécessaires ainsi que les rendements moyens susceptibles d'être pris en compte pour le malaxage à la charrue à disques et au pulvimixer.

Le train de stabilisation donne des rendements compris entre 160 et 800 m²/heure pour des couches de 15 cm après compactage.

C - Compactage et finition.

- Aération.

Les opérations d'aération s'avèrent nécessaires dans deux cas :

- lorsque le matériau à compacter présente une teneur en eau naturelle trop élevée.
- lorsqu'un liant hydrocarboné à trop forte teneur en solvant a dû être utilisé pour faciliter l'enrobage au cours des opérations de malaxage.

Les rendements à prendre en compte sont extrêmement variables suivant les quantités d'eau ou de solvant à éliminer et suivant les conditions climatiques locales.

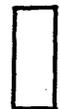
TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	PLATE-FORME		865 3 passes	865 3 passes	650 4 passes	
	STABILISATION MECANIQUE		865 3 passes	865 3 passes	650 4 passes	
	FONDATION					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	865 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	650 4 passes	430 6 passes	430 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					

Vitesse : 90 m/min.
Largeur : 2,40 m

$$S = \frac{60 \times 90 \times 2,40 \times 0,20}{N} = \frac{2.590}{N}$$

Operation
superflue

Operation
inopérante



OPERATION : Malaxage au Pulvimixer

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE STABILISATION	TYPE DE SOL	SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
		PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE	1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes
FONDATION	STABILISATION MECANIQUE	1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	900 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	650 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	900 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	900 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	650 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	900 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		

Vitesse : 50 m/min.
Largeur : 1,80 m

$$S = \frac{60 \times 50 \times 1,80 \times 0,50}{N} = \frac{2.700}{N}$$

Operation superflue

Operation inoperante

- Compactage.

Les productions utiles des différents types d'appareils sont indiquées au tableau des pages 36 à 40 inclus.

3.3 - Conclusions.

3.3.1 - Opérations élémentaires.

Traitement de la plate-forme.

La préparation du matériau et l'humidification sont essentiellement fonction de la teneur en eau naturelle de la plate-forme.

Dans le cas du sable, ces opérations sont inutiles, les courbes Proctor mettant en évidence une faible variation de densité en fonction de la teneur en eau.

Les difficultés de préparation et d'humidification du matériau augmentent avec sa teneur en argile. Dans le cas des argiles, ces opérations s'avèrent délicates et l'on aurait tout intérêt à effectuer les compactages des plates-formes lorsque la teneur en eau naturelle est la plus voisine possible de la teneur en eau optimale : cela implique la réalisation des compactages à une période bien déterminée de l'année. Si la teneur en eau naturelle est très supérieure à la teneur en eau optimale, il est pratiquement impossible de faire baisser cette teneur en eau naturelle par une simple aération et dans ce cas, il vaut mieux envisager une surépaisseur du corps de chaussée plutôt qu'une aération.

Les compactages sont à réaliser avec les engins les plus lourds possible, ce qui implique un précompactage destiné à permettre le passage des compacteurs lourds dans le cas du sable et à éviter le feuilletage sous l'effet des compacteurs lourds dans le cas des argiles.

Les compacteurs lourds à pneus sont utilisables dans tous les cas, les appareils travaillant par vibration étant surtout réservés aux sols très sableux et les rouleaux à pieds de mouton aux sols plus argileux.

Traitement des couches de base et des fondations.

La préparation des matériaux avant incorporation du liant doit être d'autant plus soignée que le matériau devient plus argileux.

Les matériels du type agricole ne sont utilisables que pour des matériaux contenant moins de 50% d'argile et pour des dosages supérieurs à 4%.

Quelle que soit la nature du liant à incorporer, les appareils de malaxage nécessitant des puissances de brassage d'autant plus élevées que le matériau est plus argileux.

PRODUCTION UTILE EN m²/h

OPERATION : Compactage au rouleau vibrant 4 T.

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	STABILISATION MECANIQUE	180 6 passes				
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	270 4 passes	270 4 passes	180 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		180 6 passes			
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		180 6 passes			
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes	135 8 passes

Vitesse : 2 km/h
 Largeur : 1,80 m

$$S = \frac{2.000 \times 1,80}{N} \times 0,3 = \frac{1.080}{N}$$



TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	STABILISATION MECANIQUE		325 10 passes	270 12 passes	200 16 passes	200 16 passes
	STABILISATION MECANIQUE					
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		325 10 passes	270 12 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	405 8 passes	405 8 passes	325 10 passes	200 16 passes	200 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	405 8 passes	405 8 passes	325 10 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		270 12 passes	230 14 passes	200 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	325 10 passes	270 12 passes	230 14 passes	200 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	270 12 passes	325 10 passes	325 10 passes		

$$S = \frac{6.000 \times 1,80}{N} \times 0,3 = \frac{3.240}{N}$$

Vitesse : 6 km/h
Largeur : 1,80 m

Operation
superflue

Operation
inoperante

PRODUCTION UTILE EN m²/h

OPERATION : Compactage au rouleau lisse 10/12 T.

TYPE DE SOL		SABLE	SABLE ARGILEUX	SABLE ARGILE	ARGILE SABLEUSE	ARGILE
STABILISATION		100% S	75% S + 25% A	50% S + 50% A	25% S + 75% A	100% A
PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE		340 4 passes	340 4 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	225 6 passes	225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		170 8 passes	170 8 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	170 8 passes	225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	170 8 passes	170 8 passes	170 8 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		170 8 passes	170 8 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	170 8 passes	170 8 passes	170 8 passes		

Vitesse : 3 km/h
 Largeur : 1,50 m

$$S = \frac{3.000 \times 1,50}{N} \times 0,50 = \frac{1.350}{N}$$

Operation superflue

Operation inoperante

OPERATION : Compactage au rouleau à pied de mouton 10 T.
(2 tambours)

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE		200 10 passes	165 12 passes	140 14 passes	125 16 passes
	STABILISATION MECANIQUE		155 12 passes	140 14 passes	125 16 passes	
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		200 10 passes	200 10 passes	200 10 passes	125 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		250 8 passes	250 8 passes	155 12 passes	125 16 passes
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		155 12 passes	165 12 passes	125 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		200 10 passes	200 10 passes	165 12 passes	125 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					

$$S = \frac{3.000 \times 2,20}{N} \times 0,3 = \frac{1.980}{N}$$

Vitesse : 3 km/h
Largeur : 2 x 1,10

Operation
superflue

Operation
inoperante

OPERATION : Compactage au rouleau à pneus de 30 à 45 T.

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE A 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	370 8 passes
	STABILISATION MECANIQUE		540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	270 8 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	270 8 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		360 6 passes	360 6 passes	270 8 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	540 4 passes	360 6 passes	360 6 passes	270 8 passes	215 10 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes		

$$\text{Vitesse : } 4 \text{ km/h} \quad S = \frac{4.000 \times 1,80}{N} \times 0,3 = \frac{2.160}{N}$$

$$\text{Largeur : } 1,80 \text{ m}$$

Operation
superflue

Operation
inoperante

Dans le cas des liants hydrauliques le répandage manuel du liant n'est admissible que pour des dosages supérieurs à 4%.

Comme dans le cas des plates-formes, les fondations et couches de base devront être compactées au maximum d'intensité possible, ce qui permet une stabilisation avec dosage minimum en liant.

3.3.2 - Choix des engins.

Mis à part les argiles dont la stabilisation demande une puissance de pulvérisation et de malaxage élevée, les matériaux étudiés peuvent être traités soit :

- par passes multiples
- au moyen de trains de stabilisation, à palettes ou à rotor travaillant en cordon ou sur matériaux étalés.
- en centrale fixe.

Dans le cas des argiles, les trains de stabilisation à rotor, travaillant sur matériaux étalés sont préférables aux centrales fixes et aux appareils travaillant par passes multiples.

Le choix de la technique de stabilisation et du matériel est surtout fonction du dosage, de l'importance du chantier et des délais d'exécution.

Les trains de stabilisation et les centrales fixes sont adaptés aux chantiers à grand rendement quel que soit le dosage en liant.

Les appareils travaillant par passes multiples adaptés aux chantiers de faible ou de moyenne importance, impliquent un dosage en liant supérieur à 4%.

Dans le cas de la stabilisation aux liants hydrauliques, il ne faut pas perdre de vue que les opérations d'incorporation du liant de compactage et de finition, doivent être terminées avant le début de la prise du liant.

4 - CONSIDERATIONS D'ORDRE ECONOMIQUE

4.1 - Généralités

4.1.1. - Définition des prix.

On appelle PRIX DE REVIENT SEC le prix qui ne renferme que les éléments de dépense entraînée par la fourniture des matériaux sur chantier ou la marche des engins et des équipes nécessaires à la mise en oeuvre de ces matériaux.

On appelle PRIX DE REVIENT CHANTIER, le prix de revient sec majoré :

- des frais d'installation et de repliement du chantier
- des frais généraux locaux.

On appelle PRIX DE REVIENT ENTREPRISE, le prix de revient chantier majoré des frais de siège.

On appelle PRIX DE VENTE ENTREPRISE, le prix de revient entreprise majoré des bénéfices de l'entreprise et des taxes.

On appelle PRIX DE REVIENT ADMINISTRATION, le prix de vente entreprise majoré des frais d'études de projet et de contrôle.

4.1.2 - Définition des productions.

On appelle PRODUCTION INSTANTANEE la quantité produite par une équipe ou un engin pendant 1 heure effective de travail.

La PRODUCTION UTILE est la quantité effectivement produite pendant un temps déterminé, compte tenu des différents arrêts dus aux conditions de travail des engins. Le rapport entre la production utile et la production instantanée est de COEFFICIENT DE RENDEMENT.

Si l'on tient compte de toutes les immobilisations d'un matériel affecté à un chantier routier déterminé, on obtient le COEFFICIENT D'UTILISATION ou COEFFICIENT DE RENDEMENT GLOBAL qui n'est autre que le rapport entre la production utile statistique ramenée à 1 heure et la production instantanée théorique fournie par les constructeurs. Il y a lieu de ne pas confondre ce coefficient d'utilisation avec le COEFFICIENT DE MOBILISATION utilisé pour le calcul du taux de location d'un engin et qui représente le nombre de jours d'affectation de cet engin à différents chantiers dans l'année.

4.1.3 - Méthode pratique du calcul des prix prévisionnels.

Pour un travail déterminé lancé à l'adjudication, les entreprises intéressées opèrent généralement de la façon suivante :

L'examen des documents techniques de l'appel d'offre permet de fixer pour chaque opération élémentaire, le type et le nombre d'engins et la constitution des équipes nécessaires, compte tenu du planning d'exécution imposé et des rendements observés sur des chantiers analogues.

La totalisation de ces besoins en matériel permet de fixer un parc de matériel nécessaire à l'ensemble du chantier et de réajuster les conditions d'utilisation des engins dans chacune des opérations élémentaires de façon à garantir une utilisation rationnelle des engins et plus particulièrement des engins de prix de revient élevé.

Le parc en matériel étant fixé, l'ensemble du matériel constituant ce parc est loué au chantier par l'entreprise suivant un barème de location propre à chaque entreprise mais établi sur le même principe que les barèmes officiels.

Connaissant le prix de location des engins, leur rendement instantané et leur coefficient d'utilisation, il est possible de déterminer les prix de revient secs correspondant à chaque poste.

Une étude analogue est faite dans le cas d'opérations élémentaires à réaliser au moyen d'équipes et les besoins globaux en personnel d'exécution sont chiffrés.

De même, l'estimation des frais de chantier n'est possible qu'après étude des différents postes intervenant dans ces frais tels qu'amenée et repli du matériel et installations de chantier.

Ces frais de chantier sont considérés soit comme des frais généraux locaux et amortis sur chaque poste du bordereau de prix, soit comme un travail particulier annexe remboursé dans les mêmes conditions que les différents travaux proprement dits.

4.2 - Paramètres intervenant dans le calcul des prix.

4.2.1 - Dépenses en matériaux.

Les dépenses en matériaux comprennent les postes suivants:

- l'apport du matériau à stabiliser
- la livraison au chantier des agents stabilisants
- l'apport de l'eau nécessaire au compactage ou au malaxage.

Les dépenses relatives à l'apport du matériau à stabiliser comprennent les frais :

- de déforestation et de découverte des emprunts
- de préparation éventuelle des matériaux dans l'emprunt
- de chargement
- de transport

Les dépenses en agents stabilisants comprennent, d'une part les frais d'achat et d'autre part, les frais d'acheminement, de déchargement et de stockage au chantier.

Les dépenses relatives à l'apport d'eau comprennent :

- les frais d'installation de stations de pompage ou même, de réalisation de puits ou de forages
- les frais de transport au chantier
- éventuellement, les frais de stockage.

4.2.2 - Dépenses de mise en oeuvre.

Prix de revient d'une équipe :

Les dépenses relatives au fonctionnement d'une équipe comprennent les salaires, les charges sociales et les frais de petit matériel.

Les opérations élémentaires nécessitant le plus de main-d'oeuvre sont :

- la préparation du matériau et en particulier, l'élimination à la main de gros éléments ainsi que le calibrage des cordons.

- l'incorporation du liant et en particulier, les répandages manuels et les malaxages en centrale fixe à l'aide de bétonnières ou de batteries de bétonnières.

Quelques valeurs moyennes observées sur différents chantiers sont indiquées ci-dessous :

Technique de stabilisation	Mode de stabilisation	Main-d'oeuvre en homme/jour/m ²
Par passes multiples	Mécanique	0,014
"	Liants hydrauliques	0,22
Par passe unique sur cordon	"	0,16
En Centrale	Liants hydrocarbonés	0,05
Batterie de bétonnières	Liants hydrauliques	0,22

Prix de revient d'un engin.

D'une façon générale sur les chantiers de travaux publics le prix de revient d'un engin comprend les frais de personnel de conduite et d'entretien.

Les dépenses correspondantes comprennent :

- les frais de mise à disposition ou de location proprement dite, soit : l'amortissement, les grosses réparations et pièces de rechange, la main-d'oeuvre d'atelier.

- les frais d'exploitation directement liés à la marche de l'engin et comprenant : les pièces d'usure, les carburants, les ingrédients, le personnel de conduite et le petit entretien journalier.

Les frais de mise à disposition sont intégralement supportés par le chantier quelle que soit la production effective des engins alors que les frais d'exploitation sont essentiellement liés à la marche effective des engins.

Frais de chantier

Les frais de chantier comprennent :

- les frais d'installation et de repli du chantier proprement dit, atelier, magasin etc... et les frais d'amenée et de repli du matériel et du personnel.
- les frais généraux locaux correspondant aux frais de conduite des travaux, de direction locale, d'équipes topographiques et de contrôle.

4.2.3 - Frais généraux et bénéfiques de l'entreprise.

Les frais généraux d'entreprise sont souvent évalués à 40% du prix de revient sec des travaux, compte tenu de la répartition suivante :

- frais généraux 10%
- quote-part des frais de siège 8%
- frais financiers 4%
- bénéfice 13%
- aléas 5%.

4.2.4 - Frais d'étude et de contrôle.

Les frais d'étude comprennent :

- les études topographiques
- les recherches de matériaux
- l'établissement des dossiers techniques et administratifs

Les frais de contrôle portent sur les contrôles de mise en oeuvre quelquefois sous-traités et sur la surveillance des travaux du personnel administratif directement payé sur les crédits de construction.

Il est difficile de donner des coûts d'études dans différents territoires, toutefois les valeurs moyennes suivantes ont été observées :

100.000 à 450.000 FA par km, soit 15 à 75 FA par m² de chaussée revêtue.

En ce qui concerne les études de sol, les prix au m² varient de 3,8 à 20,00 FA.

On consacre souvent aux études en laboratoire des budgets correspondant à des pourcentages de 0,5 à 1% du montant des travaux.

L'énoncé des différents paramètres intervenant dans une étude de prix met en évidence l'extrême complexité du problème, les données climatiques et les régimes douaniers essentiellement variables d'un pays à l'autre ayant une incidence considérable sur le prix de revient des matériaux et des engins.

4.3 - Coût d'une solution.

Les prix ramenés à l'unité de travail produite, par exemple le m² de couche de base, peuvent être exprimés, soit en prix de revient sec, soit en prix de revient chantier, soit en prix de revient global.

Le prix de revient sec a pour expression

$$P = \underbrace{aP_a + sP_s + eP_e}_{\text{matériaux}} + \underbrace{\frac{M}{q} + \frac{E}{q}}_{\text{mise en oeuvre}}$$

avec :

a = quantité d'apport par m² de prix unitaire P_a
 s = quantité de produit stabilisant par m² de prix unitaire P_s
 e = quantité d'eau par m² de prix unitaire P_e
 M = coût de location journalière du parc d'engins
 E = coût journalier des équipes et du personnel auxiliaire non attaché à un engin.
 q = production globale journalière en m².

Le prix de revient chantier a pour expression :

$$P_c = aP_a + sP_s + eP_e + \frac{M}{q} + \frac{E}{q} + \frac{C}{q} + \frac{I}{Q} + \frac{A}{Q}$$

avec :

C = coût journalier de conduite des travaux
 I = coût total des installations de chantier
 A = Frais d'amenée et de repli du matériel et du personnel
 Q = quantité totale produite au cours du chantier en m².

Le prix de revient administration a pour expression :

$$P_g = (aP_a + sP_s + eP_e + \frac{M + E + C}{q} + \frac{I + A}{Q})(1 + F_g) + \frac{F_e}{Q}$$

avec :

F_g = frais généraux bénéfiques
 F_e = frais d'études et de contrôle.

En réalité, il s'agit bien, plutôt que de chiffrer exactement le coût d'une solution, d'établir une comparaison économique entre les solutions techniquement possibles. Dans ce cas, la formule générale de prix de revient sec peut être utilisée en première approximation.

En effet, on peut admettre que les frais de chantier (frais de conduite des travaux, frais d'installation de chantier) et les dépenses d'études sont pratiquement indépendants de la solution retenue.

Toutefois, il est indispensable de tenir compte de l'incidence des frais d'amenée et de repli des différents matériels dans le cas de chantier de courte durée et d'accès difficile, en particulier en ce qui concerne les matériels lourds et encombrants, tels que train de stabilisation, centrale fixe et compacteur lourd.

Les incidences relatives des différents postes sont essentiellement fonction de la technique de stabilisation adoptée et des conditions propres à chaque chantier.

**RAPPORT
GENERAL**

COMMUNAUTE ECONOMIQUE EUROPEENNE

Fonds Européen de Développement

-:--:--:--

R A P P O R T G E N E R A L

Association CODECONGO-C.E.B.T.P.

Compagnie d'Etudes du Congo
31, rue de la Science,

B R U X E L L E S I V

Centre Expérimental de Recherches
et d'Etudes du Bâtiment et des
Travaux Publics.

12, rue Brancion

PARIS 15°

S O M M A I R E

1 - INTRODUCTION

1.1 - BUT ET PORTEE DE L'ETUDE

1.2 - COMPLEXITE DU PROBLEME

1.3 - METHODES DE L'ETUDE

1.3.1 - Détermination des sols-types

1.3.2 - Etude de la stabilisation du corps de chaussée

1.3.3 - Etude des conditions de mise en oeuvre

1.3.4 - Etude économique

1.4 - PLAN DE L'ETUDE

2 - ETUDE DU CORPS DE CHAUSSEE

2.1 - GENERALITES

2.2 - SYNTHESE DES ESSAIS EN LABORATOIRE

2.2.1. Stabilisation mécanique

1. Essais de compactage Proctor Modifié

2. Essais de portance

3. Caractéristiques mécaniques

4. Conclusions

2.2.2. Stabilisation à la chaux

1. Mode d'action de la chaux

2. Influence sur les limites d'Atterberg

3. Essais de compactage Proctor Modifié

4. Essais de portance C.B.R.

5. Caractéristiques mécaniques

6. Conclusions

2.2.3. Stabilisation au ciment

1. Mode d'action au ciment

2. Influence sur les limites d'Atterberg

3. Essais de compactage Proctor Modifié

4. Essais de portance C.B.R.

5. Caractéristiques mécaniques

6. Conclusions

2.2.4. Stabilisation aux liants hydrocarbonés

1. Mode d'action des liants

2. Sable

3. Sable argileux

4. Sable argile

5. Argile sableuse et argile

2.3 - CONSTITUTION DU CORPS DE CHAUSSEE

2.3.1. Détermination des épaisseurs

1. Généralités

2. Sable

3. Sable argileux

4. Sable argile

5. Argile sableuse

6. Argile

2.3.2. Choix du mode de stabilisation et dosage

1. Généralités
2. Stabilisation du sable
 1. Stabilisation mécanique
 2. Stabilisation à la chaux
 3. Stabilisation au ciment
 4. Stabilisation aux liants hydrocarbonés
3. Stabilisation du sable argileux
4. Stabilisation du sable argile
5. Stabilisation de l'argile sableuse
6. Stabilisation de l'argile
7. Cas d'un sol intermédiaire
 1. Détermination du mélange équivalent au sol étudié
 2. Stabilisation mécanique
 3. Stabilisation à la chaux
 4. Stabilisation au ciment
 5. Stabilisation aux liants hydrocarbonés

2.4 - REMARQUES SUR LA STABILISATION AU LIGNO-SULFITE

3 - CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

3.1 - GENERALITES

- 3.1.1. Opérations élémentaires
 1. Traitement de la plate-forme
 2. Traitement des fondations et couches de base
 - 2.1. Apport du matériau
 - 2.2. Préparation du matériau
 - 2.3. Incorporation du liant
 3. Compactage et finitions
- 3.1.2. Choix des engins

3.2 - CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

- 3.2.1. Opérations élémentaires
 1. Sable
 2. Sable argileux
 3. Sable argile
 4. Argile sableuse
 5. Argile
- 3.2.2. Choix des engins
 1. Sable
 2. Sable argileux
 3. Sable argile
 4. Argile sableuse
 5. Argile
- 3.2.3. Etude du rendement des engins
 1. Formule générale de production
 2. Valeurs pratiques du coefficient d'utilisation
 3. Application en opération élémentaire

3.3 - CONCLUSIONS PARTICULIERES

- 3.3.1. Opérations élémentaires
- 3.3.2. Choix des engins

4 - CONSIDERATIONS D'ORDRE ECONOMIQUE

4.1 - GENERALITES

4.1.1. Introduction

4.1.2. Paramètres intervenant dans le calcul d'un prix

1. Dépenses en matériaux
2. Dépenses de mise en oeuvre

4.1.3. Complexité de l'Etude

1. Incidence des prix des matériaux
2. Incidence des prix de revient des engins
3. Incidence de la production des engins

4.2 - ELEMENTS DU PRIX DE REVIENT D'UNE SOLUTION

4.2.1. Prix de revient des matériaux

1. Apport du matériau à stabiliser
2. Approvisionnement des liants
3. Approvisionnement de l'eau

4.2.2. Prix de revient d'une équipe

4.2.3. Prix de revient d'un engin

1. Méthodes de calcul d'un prix de revient
2. Exemples de barèmes de locations

4.2.4. Analyse des frais de chantier et des frais généraux

1. Frais de chantier
2. Frais généraux entreprise

4.2.5. Frais d'Etudes et de Contrôle

4.3 - PRIX DE REVIENT D'UNE SOLUTION

4.3.1. Coût des opérations élémentaires

4.3.2. Coût d'une solution

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 - BUT ET PORTEE DE L'ETUDE

La présente étude traite de la constitution des chaussées à éléments fins en Afrique et s'intéresse principalement à la confection du corps de chaussée (1). Elle n'a pas la prétention d'être exhaustive. En effet, un certain nombre de points ont été volontairement délaissés dans ce qui va suivre, en particulier les questions concernant les recherches de tracés et de profils, les mouvements de terre, les recherches d'emprunts, les ouvrages.

Par ailleurs, le cas des chaussées à squelette n'a pas été envisagé. Deux raisons justifient cette omission volontaire : la première, c'est l'existence sur les territoires africains de nombreuses zones de sols fins totalement dépourvus de gros éléments. Un rapide aperçu géologique de l'Afrique permet de nous en convaincre : (voir carte sommaire ci-jointe, fig.2).

L'Afrique est surtout constituée d'un bloc huronien dont la partie ancienne comporte une série de zones d'envoyage qui sont essentiellement constituées de sables et d'argile.

On distingue particulièrement :

- des bassins intérieurs tels que ceux du Niger, du Tchad, du Congo, de l'Angola et du Kalahari.
- des bassins extérieurs tels que ceux du Sénégal, du golfe de Guinée, de Côte d'Ivoire, du Dahomey - Nigéria, des Somalies, de Lybie, d'Egypte et de nombreux autres de moindre surface.

Cet ensemble représente une partie importante de la superficie de l'Afrique.

La deuxième raison est d'ordre pécuniaire. En Effet, l'emploi de pierrailles et graviers exige pratiquement toujours l'installation de carrières et une exploitation fatalement limitée dans de temps à la construction de la route, donc peu économique.

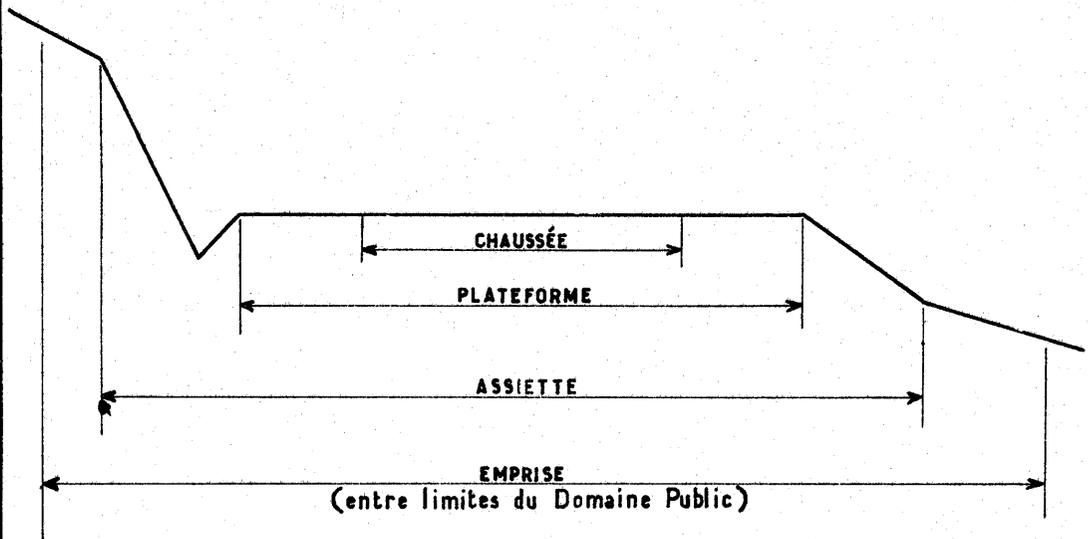
C'est pourquoi il convient d'essayer d'employer au maximum les matériaux se trouvant à pied d'oeuvre et parallèlement, de réduire le pourcentage de matériaux à prix de revient élevé.

Les idées exposées ci-dessus expliquent que la technique des sols stabilisés voit son champ d'action s'établir continuellement. Or, les normes habituellement admises en Europe ne sont, en général, plus valables dans les pays africains, cela à cause de différences sensibles dans le climat et le trafic.

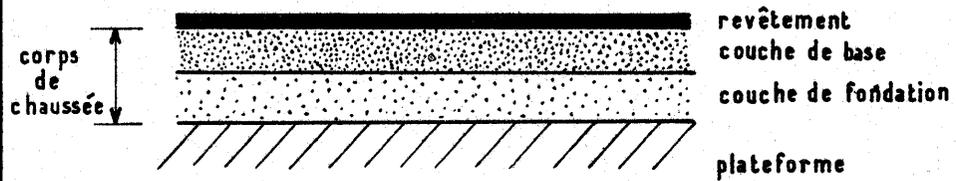
(1) voir figure 1

COUPES SCHEMATIQUES D'UNE CHAUSSEE A ELEMENTS FINS

COUPE TRANSVERSALE



COUPE LONGITUDINALE



PRINCIPAUX BASSINS D'AFRIQUE

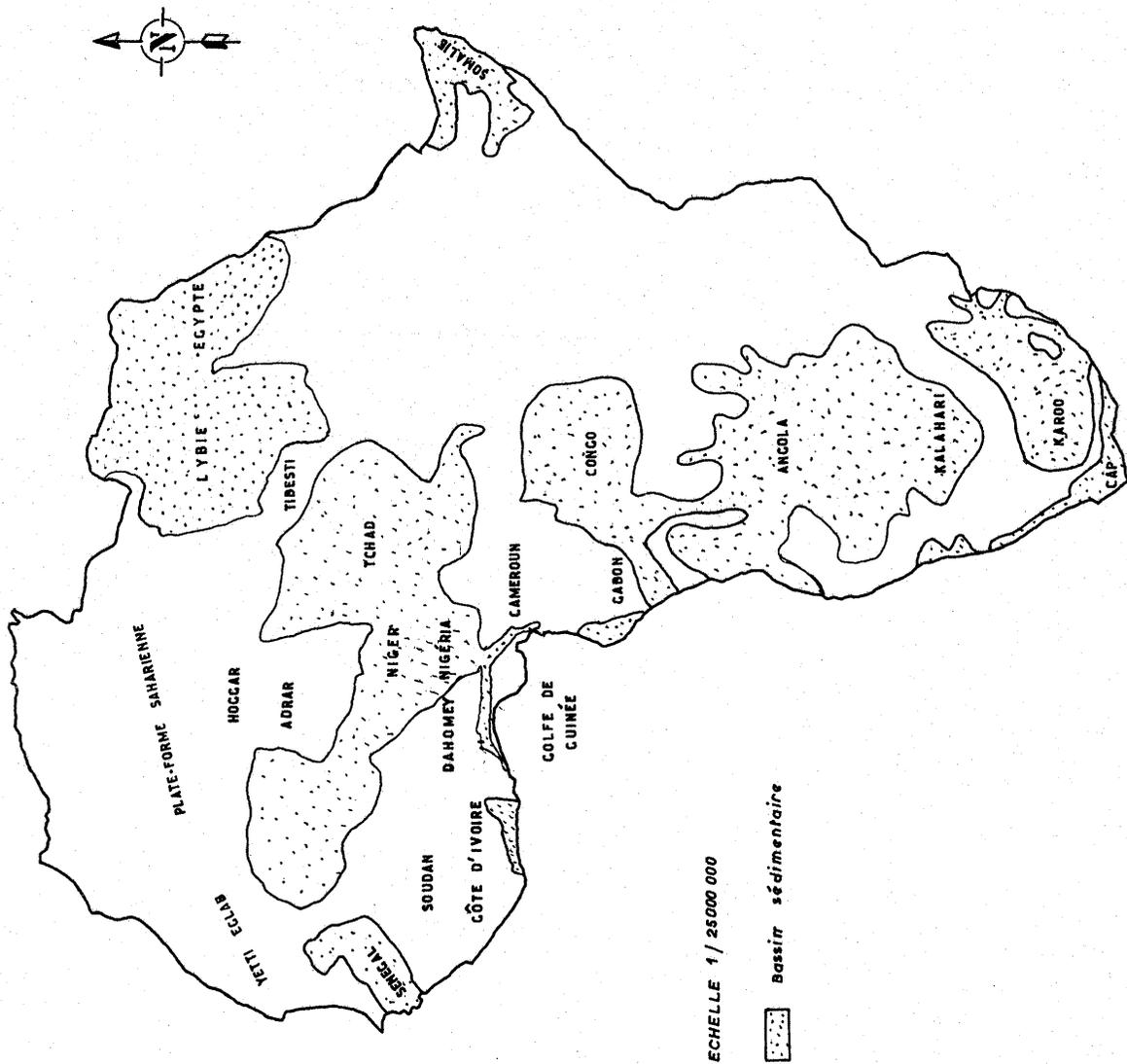


Fig. 2

En effet, la plupart des régions africaines ne connaissent pas le gel. De plus, si en Europe les impératifs du trafic exigent la pose immédiate de revêtements routiers du type "lourd", il est au contraire possible en Afrique de faire varier les méthodes de revêtement de façon à réaliser des routes adaptées aux besoins du moment et n'exigeant pas, au départ, des dépenses souvent déraisonnables; autrement dit, il convient de rechercher des solutions du type progressif. Par voie de conséquence, les solutions adoptées conduisent à des conditions de mise en oeuvre spéciales.

Malheureusement, aucune étude systématique n'avait été entreprise jusqu'alors et les quelques résultats obtenus restaient fragmentaires. En particulier, aucune synthèse des réalisations antérieures n'avait été élaborée et il n'existait pas de bases pour observer la tenue de ces réalisations dans le temps et en déduire des éléments positifs. Il s'ensuivait que les réalisations routières étaient généralement conçues ou bien avec une idée à priori, sans envisager la différente gamme de solutions possibles, ou bien avec une sécurité trop élevée, les administrations ne désirant pas prendre le risque d'imposer des solutions "légères" aux entreprises.

En résumé, on se trouvait en présence de techniques relativement jeunes, s'appuyant souvent sur des règles semi-empiriques et conduisant éventuellement à un supplément de coût inutile.

Il apparaissait donc comme des plus intéressant, de schématiser les problèmes dans un canevas général dans lequel pourraient s'inscrire les expériences et réalisations particulières faites dans les différents pays d'Afrique; la discussion du canevas général servirait à établir un programme plus étendu des études ou des réalisations d'essais conduisant, en fin de compte, à la rédaction de règles techniques et économiques.

1.2 - COMPLEXITE DU PROBLEME

Les sols que l'on rencontre généralement en Afrique dans les Zones alluvionnaires ou détritiques sont composés de sable et d'argile. Cette représentation est évidemment grossière car il y a toujours d'autres éléments qui viennent s'ajouter à ces éléments de base, et de plus, la composition même de l'argile et du sable varie.

Cependant, si on examine les résultats d'essais, on remarque que la majorité des sols africains peut être considérée comme un mélange intime d'une argile de type latéritique et de sable fin.

Il est évidemment impossible de dresser le canevas général dont il est question au paragraphe précédent, en englobant immédiatement toutes les inconnues :

- de constitution des terrains
- de trafic
- de mise en oeuvre
- d'économie.

Il importe donc de définir des règles pour les cas simples les plus courants quitte à les étendre, les compléter et les perfectionner par la suite.

1.3 - METHODES DE L'ETUDE

1.3.1. Détermination des sols-types

Nous avons donc été amenés à utiliser une argile latéritique de la région d'Abidjan et un sable fin de la région de Dakar, ces deux matériaux pouvant être considérés comme des matériaux de base.

Si A et S désignent respectivement l'argile et le sable ci-dessus, on peut considérer que les terrains définis par :

- A
- 0,75 A + 0,25 S
- 0,50 A + 0,50 S
- 0,25 A + 0,75 S
- S

et que nous désignerons dans toute la suite de l'étude par les termes :

- Argile
- Argile sableuse
- Sable-argile
- Sable argileux
- Sable,

répondent bien aux conditions du paragraphe 1.2.

Les expressions "sol-type" ou "matériau-type" s'appliquent à l'un quelconque de ces sols.

Toutefois, l'énumération ci-dessus permet immédiatement de constater que, par exemple, le cas du silt pur d'ailleurs peu fréquent, sort du cadre de notre étude.

1.3.2. Etude de la stabilisation du corps de chaussée

Sous l'effet du compactage seul, certains terrains acquièrent des propriétés mécaniques suffisantes pour servir directement de couche de base aux routes. Ces terrains compactés ne nécessitent plus que la pose d'un enduit plus ou moins mince, suivant le trafic que doit supporter la route. Dans ces conditions, il s'agit d'une stabilisation mécanique pure.

Si sous l'effet du compactage seul les terrains ne parviennent pas à acquérir les propriétés mécaniques exigées pour la route, il convient de les améliorer pour qu'ils puissent satisfaire aux conditions nécessaires en leur incorporant :

- soit une autre terre de caractéristiques adéquates et, dans ce cas, il s'agit d'une stabilisation par simple amendement du sol ou "correction granulométrique"
- soit un produit quelconque comme la chaux, le ciment, les liants hydrocarbonés, les résines, etc... et, dans ce dernier cas, il s'agit d'une stabilisation physio-chimique.

Economiquement parlant, la stabilisation mécanique est toujours la moins chère, puis vient la stabilisation par amendement qui utilise des matériaux d'un prix de revient faible et, enfin, la stabilisation physico-chimique qui nécessite l'emploi de produits relativement coûteux.

Les stabilisations exécutées à la chaux, au ciment ou aux liants hydrocarbonés sont néanmoins d'un emploi courant partout où il est impossible d'amender convenablement le terrain naturel et où les conditions routières imposent des caractéristiques géotechniques élevées.

Quoi qu'il en soit, ces méthodes sont généralement bien moins onéreuses que l'ancien procédé de fondation sur hérisson ou empierrements.

Pour circonscrire le problème dans des limites normales et raisonnables sans pour cela lui élever tout caractère de généralité indispensable, les stabilisations suivantes ont donc été étudiées en laboratoire pour les cinq matériaux-types :

- Stabilisation mécanique
 - qui englobe partiellement la stabilisation par amendement des sols argileux au sable ou des sols sableux à l'argile.
- Stabilisation physico-chimique
 - à la chaux
 - au ciment
 - aux liants hydrocarbonés.

En ce qui concerne la détermination des épaisseurs, c'est la méthode C.B.R. qui a été employée, du moins pour les trois premiers genres de stabilisation. On peut formuler plusieurs critiques sur l'emploi de cette méthode : d'abord les critiques classiques portant sur la méthode elle-même. Nous ne nous y attarderons pas. Ensuite, on peut se demander dans quelle mesure la méthode C.B.R. peut s'appliquer à des sols stabilisés à la chaux ou au ciment, donc plus ou moins rigides. Nous avons considéré que les stabilisations envisagées restaient de simples amendements et n'atteignaient jamais des dosages tels qu'on passe à la technique des sols-ciment; par voie de conséquence, nous avons ainsi admis que la méthode C.B.R. restait applicable. D'ailleurs, l'examen des résultats des essais de compression simple montre que dans le cas favorable d'essais à la teneur en eau optimale Proctor, les résistances restent inférieures à 25 kg/cm² valeur au-dessus de laquelle on considère généralement qu'il peut y avoir effet de dalle.

Il nous paraît toutefois utile de signaler ici l'importante étude entreprise récemment par l'AASHO (American Association of States Highway Officials) et fondée sur un critère différent.

Le comportement d'une chaussée a été jugé par un dispositif de cotation appelé "index d'aptitude au service" ou P.S.I. (Present Serviceability Index). Pour une charge déterminée et une fréquence d'application donnée, on fait correspondre au P.S.I. un indice d'épaisseur D, fonction linéaire et homogène des épaisseurs des différentes couches constituant la chaussée. L'indice d'épaisseur étant fixé, il est alors possible de lui faire correspondre un certain nombre de solutions, pratiquement limité, parmi lesquelles on choisira le plus économique, compte tenu des facteurs locaux.

1.3.3. Etude des conditions de mise en oeuvre

Nous nous sommes également attachés à déterminer, suivant les différents sols-types, les engins à utiliser.

Nous avons défini les opérations élémentaires successives qui entrent en ligne de compte dans la réalisation d'un sol stabilisé et nous avons étudié le rendement des engins pour chaque matériau type et pour une opération élémentaire donnée.

1.3.4. Etude Economique

Nous avons enfin entrepris de donner quelques considérations d'ordre économique sur la construction de chaussées en Afrique.

Cette partie analyse les différents postes qui interviennent dans l'estimation du coût d'une solution à partir des essais en laboratoire et des prix et moyens de mise en oeuvre connus, tirés de réalisations déjà effectuées et s'apparentant aux méthodes retenues.

Il est ainsi possible de déterminer d'une façon approchée, des formules générales en fonction des divers paramètres à prendre en considération. Ces paramètres pourront être affectés d'un terme de pondération dépendant des conditions climatiques de la région.

Les formules générales ne constituent évidemment qu'une base d'estimation et elles devront très probablement être corrigées en fonction des sanctions de l'expérience.

L'incidence du facteur géographique est étudié dans l'étude économique; d'autre part, il est évident que certaines sujétions locales peuvent, à elles seules, imposer une solution. Ce sont toutefois des cas d'espèce qu'il est alors malaisé de classer et qui doivent être considérés comme exceptionnels.

1.4 - PLAN DE L'ETUDE

Notre étude sera donc articulée de la façon suivante :

- le chapitre 1, c'est-à-dire le présent chapitre est une introduction une présentation succincte des diverses idées développées par la suite.
- le chapitre 2 contient l'interprétation des essais effectués en laboratoire avec les règles qui en découlent pour la conception du corps de chaussée.
- le chapitre 3 aborde les questions de mise en oeuvre des matériaux et de rendement des engins.
- le chapitre 4 renferme les considérations d'ordre économique sur la constitution des chaussées.

Trois annexes font suite à la rédaction des chapitres.

- dans l'annexe 1, le lecteur trouvera les modes opératoires d'essais ainsi que les résultats bruts de ces essais.
- l'annexe 2 expose les détails de quelques réalisations routières antérieures.

- l'annexe 3 traite des méthodes générales de construction des revêtements superficiels.

Enfin, un questionnaire général est joint à l'étude pour permettre d'une part, de suivre les démarches qui ont conduit à l'élaboration d'une solution, d'autre part, de suivre la tenue de la chaussée.

ETUDE DU CORPS DE CHAUSSEE

2.1 - GENERALITES ET RAPPELS

2.1.1. On a utilisé pour les essais de laboratoires, d'une part une argile latéritique d'Abidjan à indice de plasticité élevé (IP = 31) et d'autre part, un sable de dune fin à équivalent de sable compris entre 58 et 66%. Pour couvrir un fuseau granulométrique étendu (figure 1) trois mélanges de base ont été réalisés dans les proportions suivantes :

- 75% de sable + 25% d'argile : sable argileux
- 50% de sable + 50% d'argile : sable-argile
- 25% de sable + 75% d'argile : argile sableuse

Remarquons tout de suite que nous sommes en présence de sols fins et rappelons que le cas des sols à ossature a déjà été traité par l'A.A.S.H.O.

2.1.2. Tous les résultats qui vont être utilisés dans cette synthèse sont consignés dans l'annexe 1. Les essais réalisés sur les 5 matériaux ont porté sur les stabilisations suivantes :

- stabilisation mécanique
- stabilisation à la chaux
- stabilisation au ciment
- stabilisation aux liants hydrocarbonés

La préparation des matériaux a permis de mettre en lumière de l'influence de certains facteurs tels que le broyage, le malaxage et le temps de diffusion de l'eau de compactage. Les opérations de préparation des mélanges ont en effet été réalisés de deux manières distinctes :

- un broyage et un malaxage mécaniques qui permettent de constituer un matériau qui peut être considéré comme un sol naturel. En effet, ces opérations réalisées mécaniquement sont suffisamment poussées pour être comparables à l'action des différents agents naturels.
- un broyage réalisé au rouleau à main suivi d'un malaxage manuel qui donnera des matériaux semblables à ceux qu'on pourra obtenir sur chantier, par mélange de sols divers, à l'aide des engins traditionnels employés pour la correction granulométrique.

En ce qui concerne la stabilisation mécanique, les essais d'identification généraux, les essais de compactage, les essais C.B.R. à 100, 95 et 90% de l'énergie PROCTOR Modifié, avec et sans imbibition et des essais triaxiaux dans les mêmes conditions, ont été effectués sur chaque matériau type.

La même gamme d'essais a été effectuée sur chaque matériau type après addition de divers pourcentage de ciment ou de chaux.

GRANULOMETRIE DES SOLS TYPES

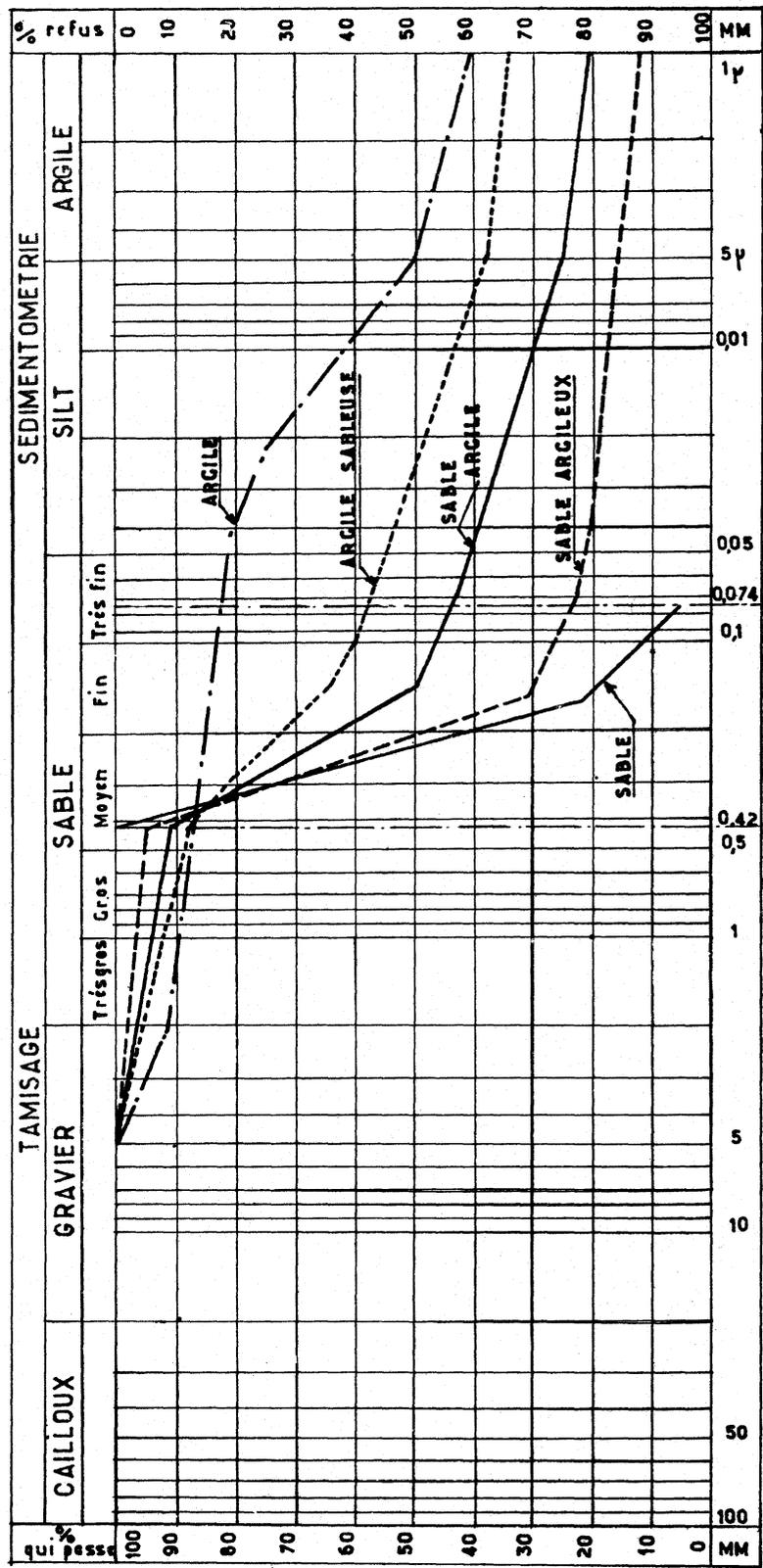


Fig. 1

Les essais C.B.R. sur matériaux non amendés sont toujours exécutés après 4 jours d'impression des échantillons. On peut se demander si ces conditions très sévères, entraînant fatalement des dépenses supplémentaires, restent d'application, lorsque les routes sont bien drainées latéralement. Des essais ont montré qu'en fin de saison des pluies, sous des routes revêtues, l'humidité du sol atteignait quelque 10%, soit une teneur en eau bien inférieure à la saturation. Pour voir l'influence de la teneur en eau sur l'indice C.B.R., les essais ont été effectués d'une part, en imbibant les échantillons durant 4 jours et d'autre part, en les laissant à leur humidité de compactage.

Pour les essais mécaniques sur les matériaux stabilisés à la chaux et au ciment, on a adopté le cycle suivant : 3 jours de prise à l'air humide suivis du poinçonnement pour les échantillons non imbibés, 3 jours de prise à l'air humide suivis de 4 jours d'immersion complète pour les moulages imbibés.

Enfin, l'essai C.B.R. mis au point aux Etats-Unis, ne constitue en fait qu'un essai empirique ne permettant pas d'aborder le problème en dégageant les caractéristiques mécaniques réelles du sol. C'est pourquoi des essais triaxiaux ont été également réalisés (voir annexe 1).

Pour la stabilisation aux liants hydrocarbonés, les essais ont été effectués à partir des 5 matériaux types avec adjonction de divers pourcentages des liants les plus classiques.

Une importante série d'essais de compressibilité en cellule oedométrique ainsi que de nombreuses mesures de perméabilité ont été exécutées suivant des normes spécialement mises au point pour l'étude des sols stabilisés à la chaux et au ciment. Les normes des essais sont décrites en détail dans l'annexe 1.

2.1.3. Tous les graphiques de synthèse portent en abscisses, les différents types de sols. Ceci doit permettre une plus grande utilisation des résultats des essais effectués en laboratoire et limités à cinq types de sols. Il suffira de savoir classer un sol quelconque dans l'échelle des sols étudiés pour bénéficier des renseignements fournis par les essais de laboratoire et on pourra alors en tirer toutes les conclusions relatives à l'emploi d'un tel matériau dans un corps de chaussée.

2.2 - SYNTHESE DES ESSAIS EN LABORATOIRE

2.2.1 - STABILISATION MECANIQUE

1 - ESSAIS DE COMPACTAGE PROCTOR MODIFIE

Les essais de compactage Proctor Modifié sur les cinq sols au mélanges types ont tous été effectués dans des moules C.B.R.

Pour l'argile et les mélanges de sable et d'argile, le mode de préparation du matériau peut avoir une grande influence sur le résultat de l'essai.

Deux procédés ont donc été envisagés :

- a) Un broyage et un malaxage mécaniques conduisant à une argile finement dissociée et à un mélange éventuel très homogène avec le sable.
- b) Un broyage et un malaxage manuels laissant subsister un certain nombre de nodules d'argile et conduisant donc à un mélange plus grossier et moins homogène.

Les caractéristiques Proctor Modifié obtenues aux essais sont données dans le tableau ci-dessous :

Sol ou mélange type étudié	Broyage et malaxage mécaniques		Broyage et malaxage manuels	
	Teneur en eau optimale	Densité sèche maximale T/m ³	Teneur en eau optimale	Densité sèche maximale T/m ³
Sable	13 %	1,71	13 %	1,71
Sable argileux	10,4 %	2,01	13 %	1,91
Sable-argile	14,3 %	1,92	16,5 %	1,86
Argile-sableuse	18,5 %	1,80	20 %	1,77
Argile	26 %	1,61	27 %	1,58

Les courbes Proctor des différents matériaux ont été tracées sur la figure n°2. On constate que toutes les valeurs maximales sont pratiquement situées sur une droite, exception faite du sable. Les densités sèches maximales des mélanges contenant de l'argile varient de 2,01 à 1,58 T/m³, la densité étant d'autant plus basse que le mélange est plus riche en argile.

Le mode de préparation du matériau n'a qu'une faible influence sur les caractéristiques Proctor de l'argile ou de l'argile sableuse. Par contre, les écarts dus au mode de préparation sont plus sensibles pour le sable-argile et surtout pour le sable argileux. Dans un sol où le squelette sableux est prédominant, une dislocation aussi complète que possible des nodules argileux permet en effet une meilleure imbrication des fines argileuses entre les grains de sable et conduit donc à une densité sèche plus élevée.

STABILISATION DES SOLS FINS

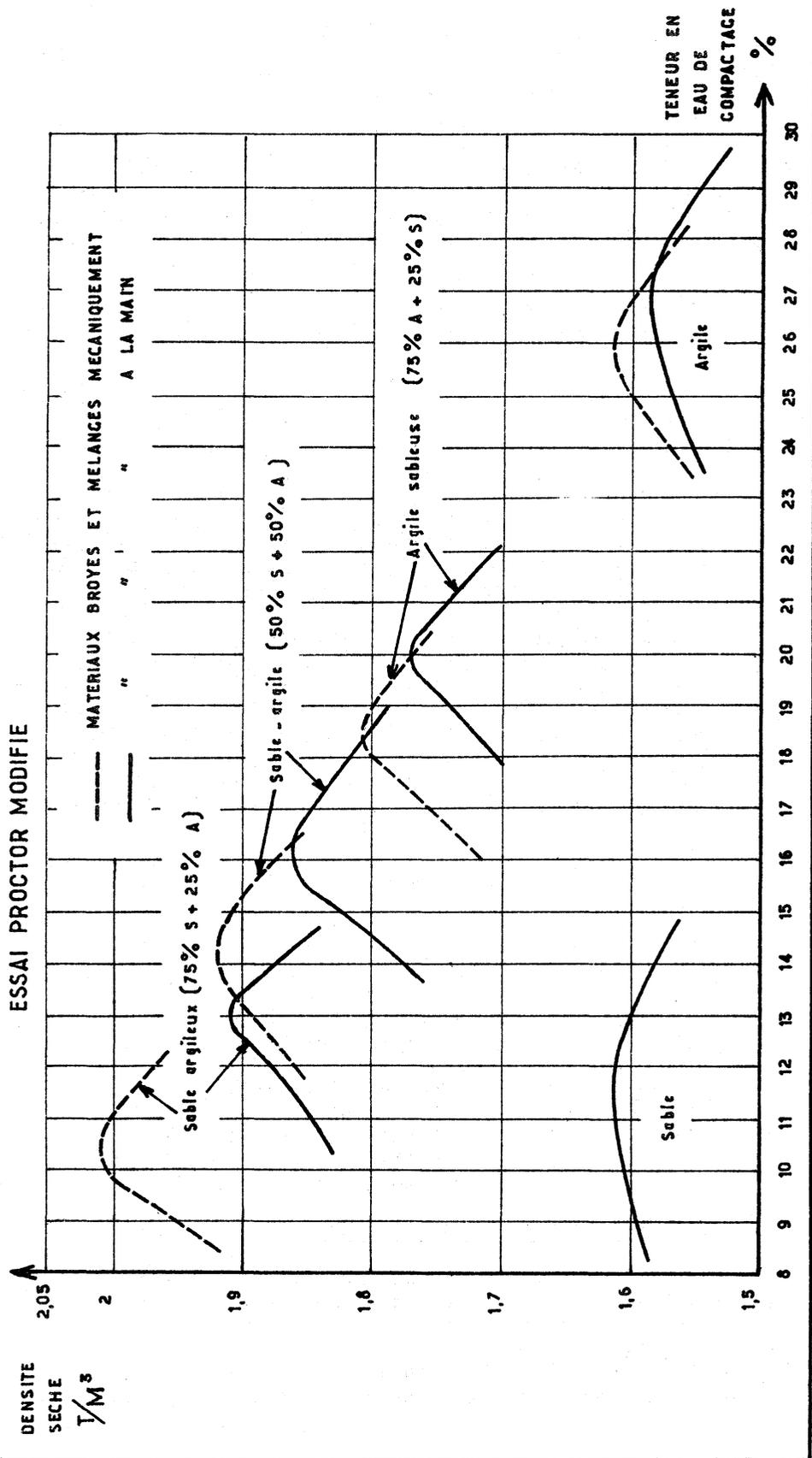


Fig. 2

Cette remarque peut avoir son application pratique sur les chantiers où il y aura intérêt à employer des engins de malaxage très puissants, pour réaliser des améliorations de sol par mélange de sable et d'argile.

.2 - ESSAIS DE PORTANCE C.B.R.

Les indices portants C.B.R. obtenus avec les cinq sols types étudiés ont été reportés sur les figures 3 et 4. L'examen des courbes de variation du C.B.R. en fonction de la nature du sol et de l'intensité de compactage nous conduit aux conclusions suivantes :

- a) Cas des sols sablo-argileux naturels ou des mélanges de sable et d'argile après broyage et malaxage très poussés (fig.3).

Le sol qui possède le meilleur pouvoir portant est celui qui a un squelette sableux important (75% de sable) tout en ayant suffisamment d'argile (25%) pour avoir également une forte cohésion. Le C.B.R. dans ce cas augmente très rapidement avec le compactage et double pratiquement chaque fois que la compacité relative Proctor Modifié augmente de 5 points. En cas d'imbibition, le C.B.R. accuse une baisse d'environ 30% mais conserve une valeur intéressante pour un sol non gravelaux (C.B.R. = 40% pour un compactage 95% PM).

Lorsque le pourcentage d'argile dans le sol augmente, le C.B.R. baisse rapidement surtout après imbibition. Au-delà de 75% d'argile, le C.B.R. au-dessous de 10% pour une compacité de 95% PM. Seuls les très fortes compacités (100% PM) conservent des C.B.R. acceptables après 4 jours d'imbibition. Il est toutefois probable qu'en cas d'imbibition prolongée, les sols argileux perdent également une grande partie de leur pouvoir portant par suite du gonflement du sol.

- b) Cas des mélanges de sols broyés et malaxés plus sommairement (fig.4).

Les mélanges les plus favorables sont ceux qui comportent 50% de sable et 50% d'argile. Les valeurs maximales obtenues avec ou sans imbibition sont toutefois nettement moins élevées que dans le cas des broyages plus poussés. Les C.B.R. dépassent à peine 20% après imbibition à 95% PM.

Lorsque l'on se déplace vers les sols plus argileux (75 et 100% d'argile) le C.B.R. diminue mais les chutes de portance après imbibition sont moins importantes qu'avec les sols finement broyés. L'argile restant en partie sous forme de nodules très durs est moins sensible à l'eau.

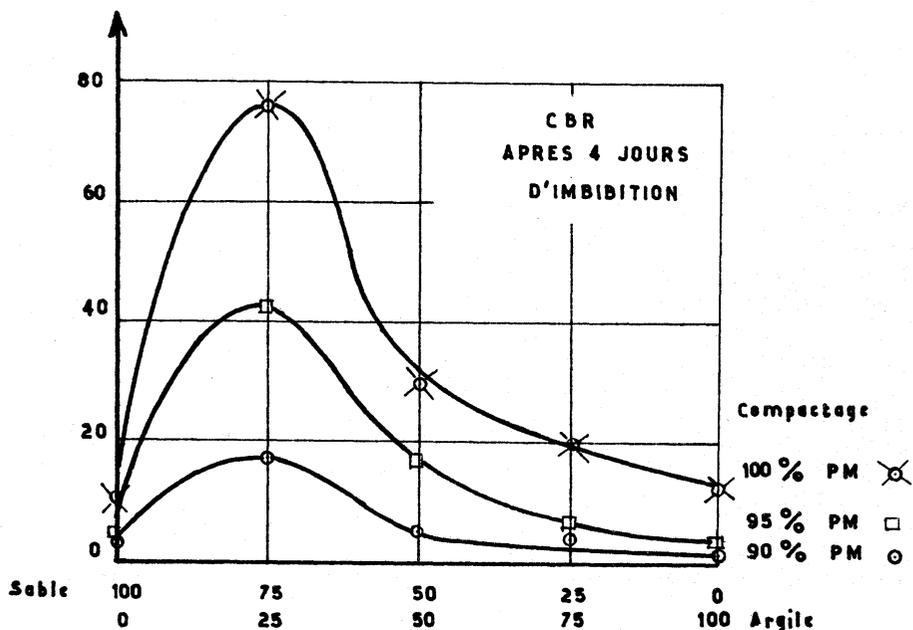
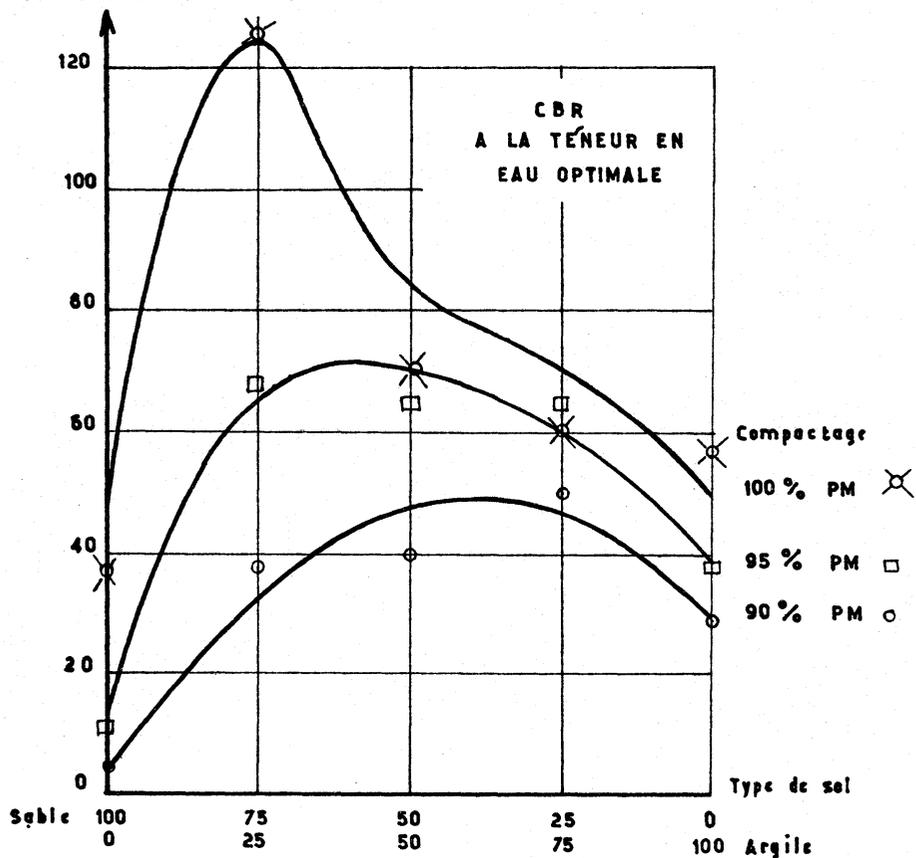
.3 - CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Des essais triaxiaux rapides nous ont permis d'étudier la variation de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction de la nature du sol.

Les résultats détaillés de ces essais ont été reportés à l'annexe 1. Les conclusions principales sont les suivantes :

STABILISATION MECANIQUE DES SOLS FINS

VARIATION DE L'INDICE PORTANT CBR AVEC LA NATURE
DU SOL
MELANGE OBTENU APRES BROYAGE ET MALAXAGE MECANQUES



STABILISATION MECANIQUE DES SOLS FINS

VARIATION DE L'INDICE PORTANT CBR AVEC LA NATURE DU SOL

MELANGE OBTENU APRES BROUAGE ET MALAXAGE MANUELS

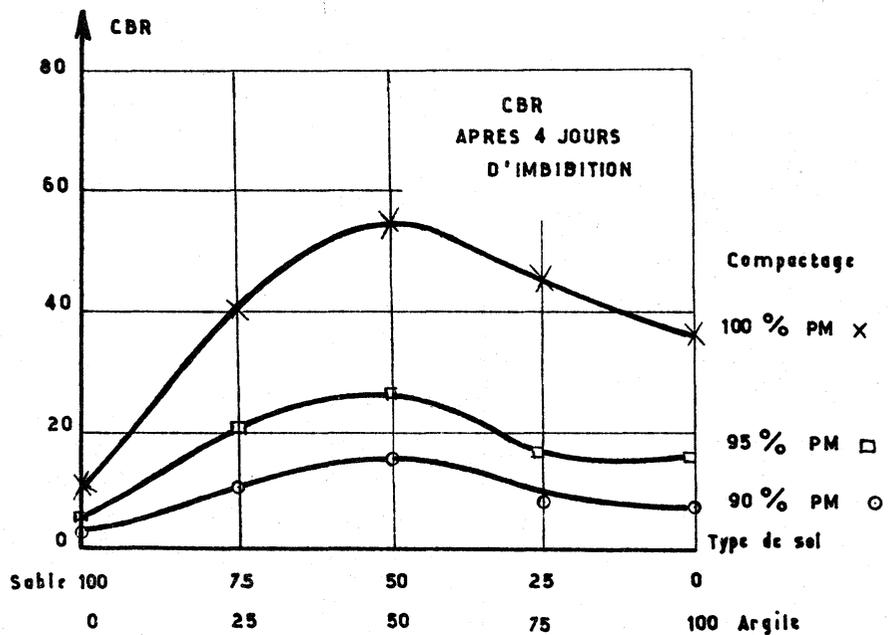
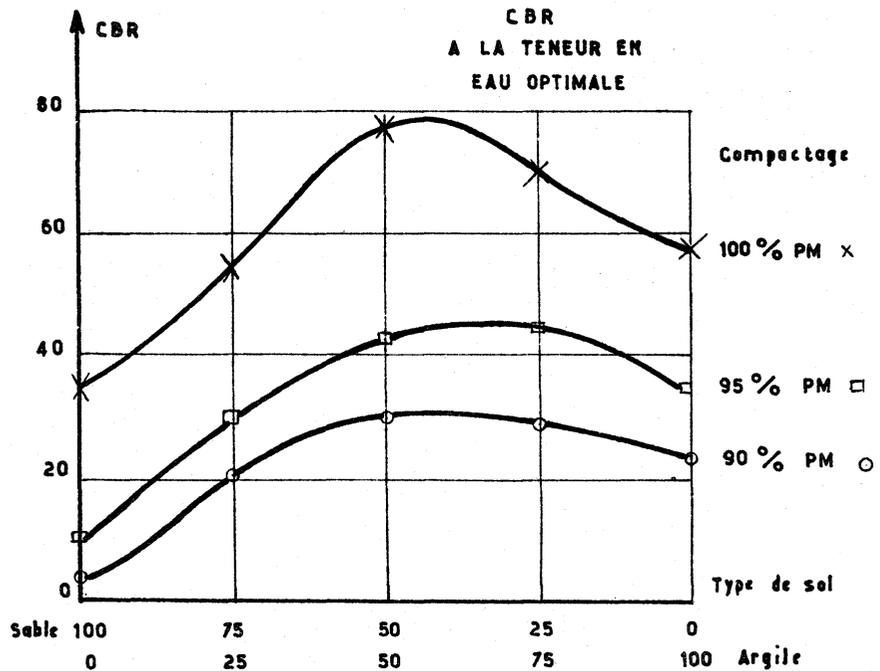
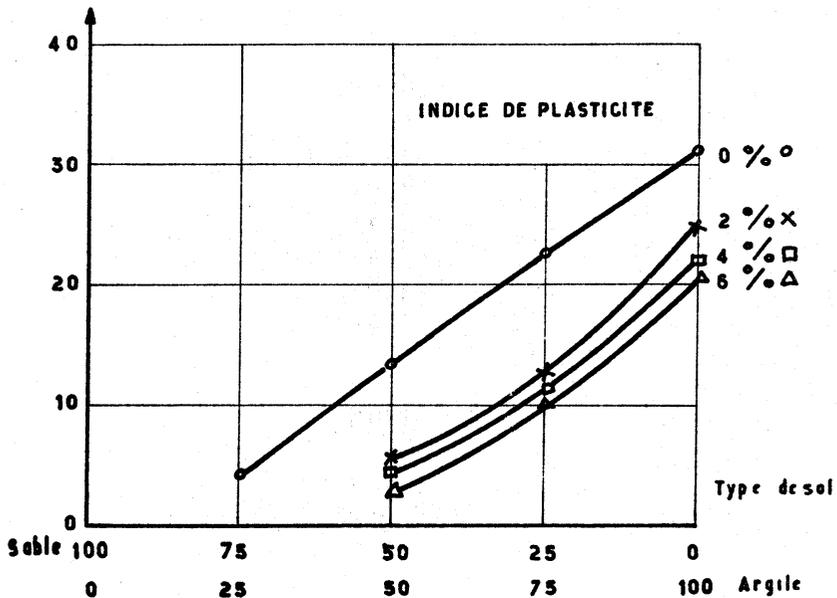
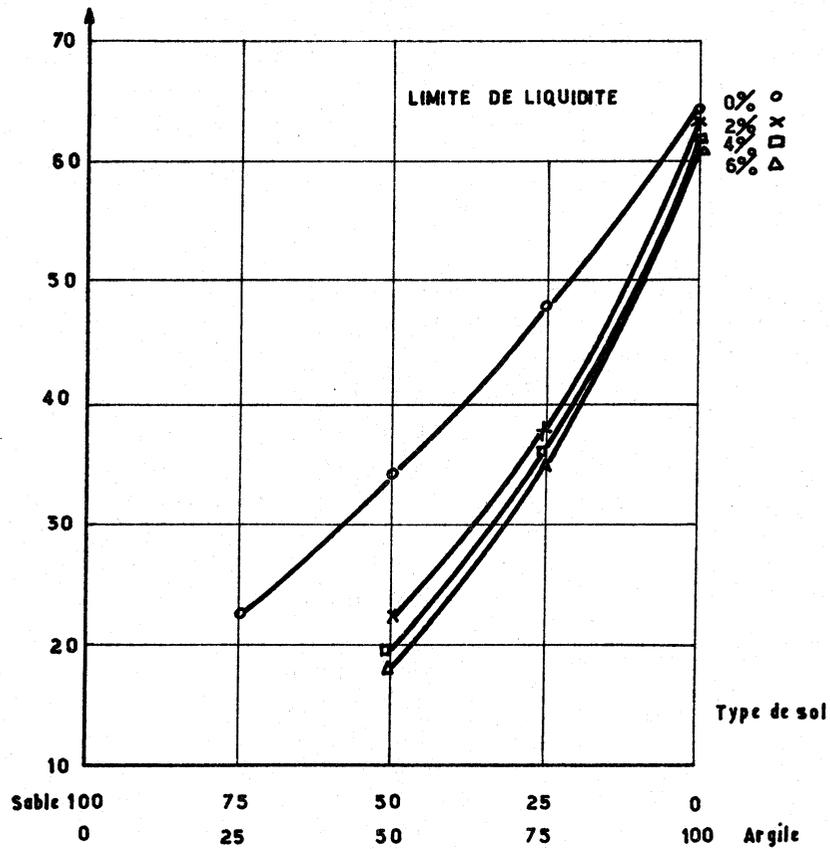


Fig. 4

SOLS STABILISES A LA CHAUX

LIMITES D'ATTERBERG



a) L'angle de frottement interne apparent au cours de sollicitations rapides sur des sols partiellement saturés, passe de 28° ou 35° pour le sable à des valeurs comprises entre 7 et 17° dès que le pourcentage d'argile dans le sol atteint ou dépasse 75%. Cet angle serait probablement encore plus faible si une partie de l'argile ne se trouvait pas sous forme de nodules.

b) Pour le sable, l'angle de frottement interne augmente avec le compactage. Pour les matériaux argileux, au contraire, il diminue avec la compacité. Ceci est dû au fait que pour une teneur en eau donnée, les pressions interstitielles dans les pores sont plus importantes lorsque les vides sont moins nombreux et que, par conséquent, le sol se trouve plus proche de la saturation.

c) La cohésion augmente avec le pourcentage d'argile dans le sol. Elle plafonne toutefois dès que le pourcentage atteint 75%.

La cohésion augmente avec le compactage du sol mais elle baisse d'une façon importante en cas d'imbibition, la perte de valeur pouvant dépasser 50%.

.4 - CONCLUSIONS

Les sols fins étudiés possèdent en général, un pouvoir portant assez médiocre. Ils sont très sensibles à l'action de l'eau et doivent être très soigneusement drainés. Seuls les sables argileux, lorsqu'ils ont une granulométrie favorable peuvent avoir un très bon pouvoir portant à condition d'atteindre des densités sèches assez élevées, de l'ordre de 1,9 à 2 T/m³.

2.2.2 - STABILISATION A LA CHAUX

.1 MODE D'ACTION DE LA CHAUX

La chaux agit surtout par action chimique. Il y a, en présence de particules d'argile, échange de cations dû à l'action de la base alcalino-terreuse Ca (OH)₂ qui provoque une floculation des micelles argileuses.

Il y a aussi une action mécanique qui résulte de la création de liaisons entre les grains de matière.

.2 - INFLUENCE SUR LES LIMITES D'ATTERBERG

On constate (fig.5) un abaissement de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité pour un amendement de 2% de chaux. Ainsi l'indice de plasticité du mélange sable-argile décroît de 8%. Des amendements supérieurs n'accentuent plus que très peu ce phénomène qui est une conséquence directe de la floculation des particules argileuses dont l'affinité pour l'eau se trouve ainsi réduite.

.3 - ESSAIS DE COMPACTAGE PROCTOR MODIFIE

Les essais de compactage Proctor Modifié ont tous été exécutés avec des matériaux broyés et mélangés à la main

Dans les sols sableux, on remarque une augmentation de la densité sèche maximale pouvant aller jusqu'à 8% quand on introduit un certain pourcentage de chaux tandis que la teneur en eau optimale diminue de 1 à 2% maximum.

Du côté des matériaux argileux, il y a diminution des densités sèches maximales et augmentation de la teneur en eau optimale. Dans ce cas, l'amendement à la chaux n'est qu'un apport de "fines" de poids spécifique inférieur.

Pour les sables, la chaux joue le rôle de correctif granulométrique par remplissage des vides du squelette sableux. Ce rôle pourrait être rempli de façon aussi efficace par un matériau inerte ce qui peut présenter un intérêt du point de vue économique.

.4 - ESSAIS DE PORTANCE C.B.R.

Les résultats donnés sur un même graphique se rapportent à un degré de compactage fixe, seul l'amendement change (fig.6 à 11).

- ECHANTILLONS NON IMBIBES

On peut constater que l'effet de la chaux est très marqué pour l' "argile sableuse". De plus le tableau des valeurs C.B.R. donné ci-dessous montre que l'effet de la chaux sur ce matériau augmente rapidement avec le compactage et le pourcentage d'amendement.

compactage % PM	C.B.R. des échantillons amendés					
	chaux 2%		chaux 4%		chaux 6%	
	non imbibés	imbibés	non imbibés	imbibés	non imbibés	imbibés
100% PM	88	57	141	98	176	111
95% PM	53	28	81	62	111	69
90% PM	34	13	53	30	70	39

Lorsque le pourcentage d'additif diminue, les valeurs optimales se rapprochent du "sable-argile".

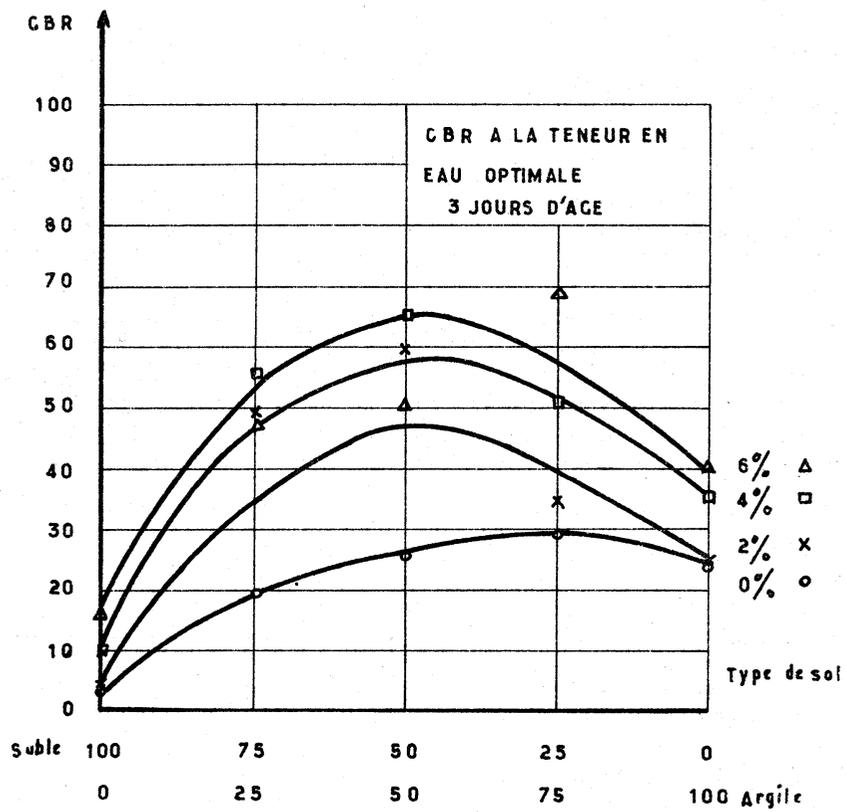
- ECHANTILLONS IMBIBES

L'allure des courbes résultant des essais non imbibés se retrouve à nouveau avec toutefois des valeurs moins accentuées et un déplacement des maxima vers les matériaux plus sableux.

Il semble qu'entre le mélange "sable-argileux" et "argile sableuse" il y ait une zone d'uniformisation des valeurs. Lorsque le pourcentage d'additif diminue, la chute de portance est beaucoup plus marquée, surtout pour les matériaux argileux.

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE



SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE

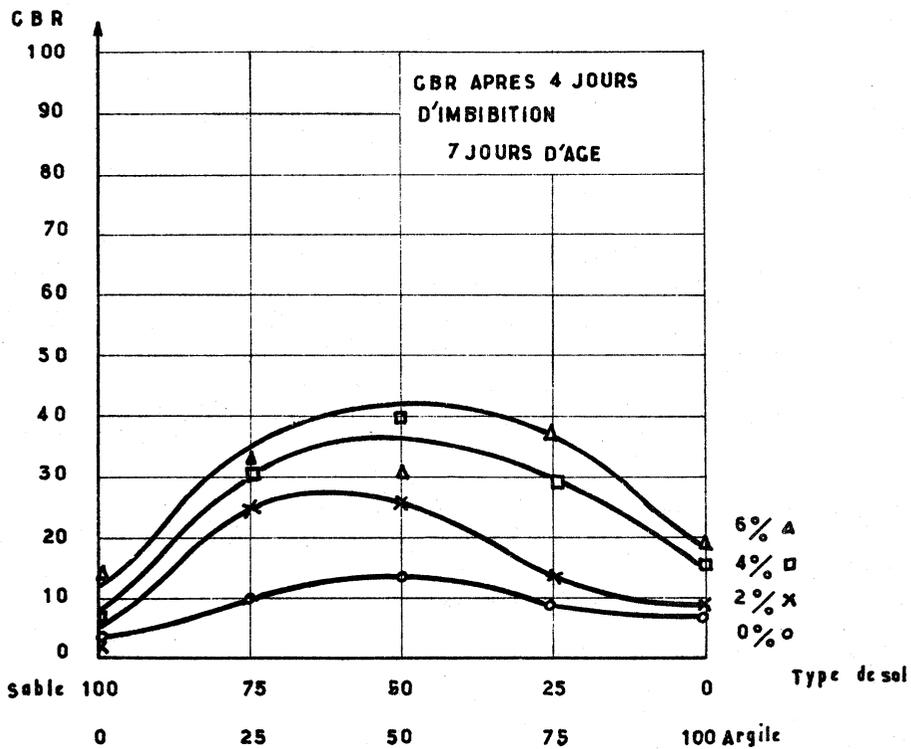


Fig. 7

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

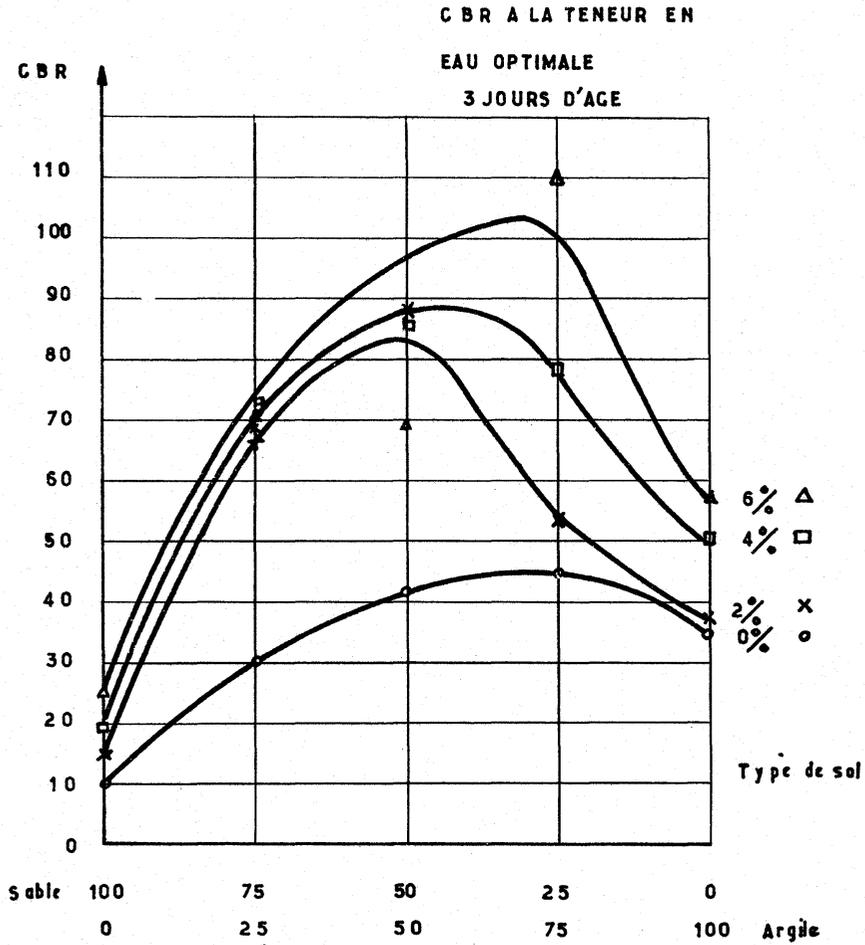


Fig. 8

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

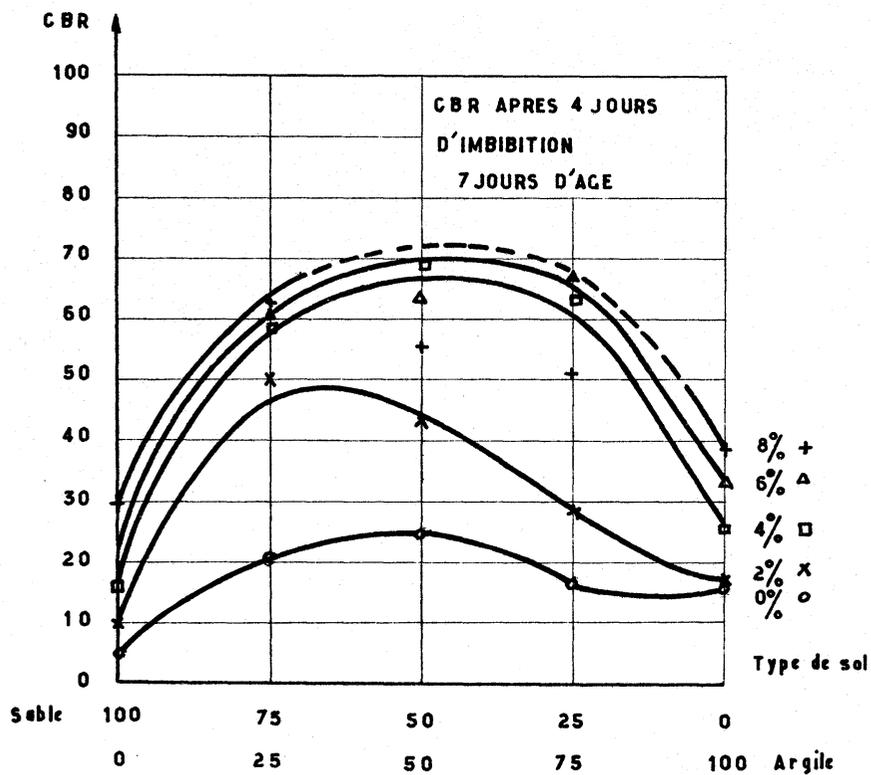


Fig. 9

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE

CBR A LA TENEUR
EN EAU OPTIMALE
3 JOURS D'AGE

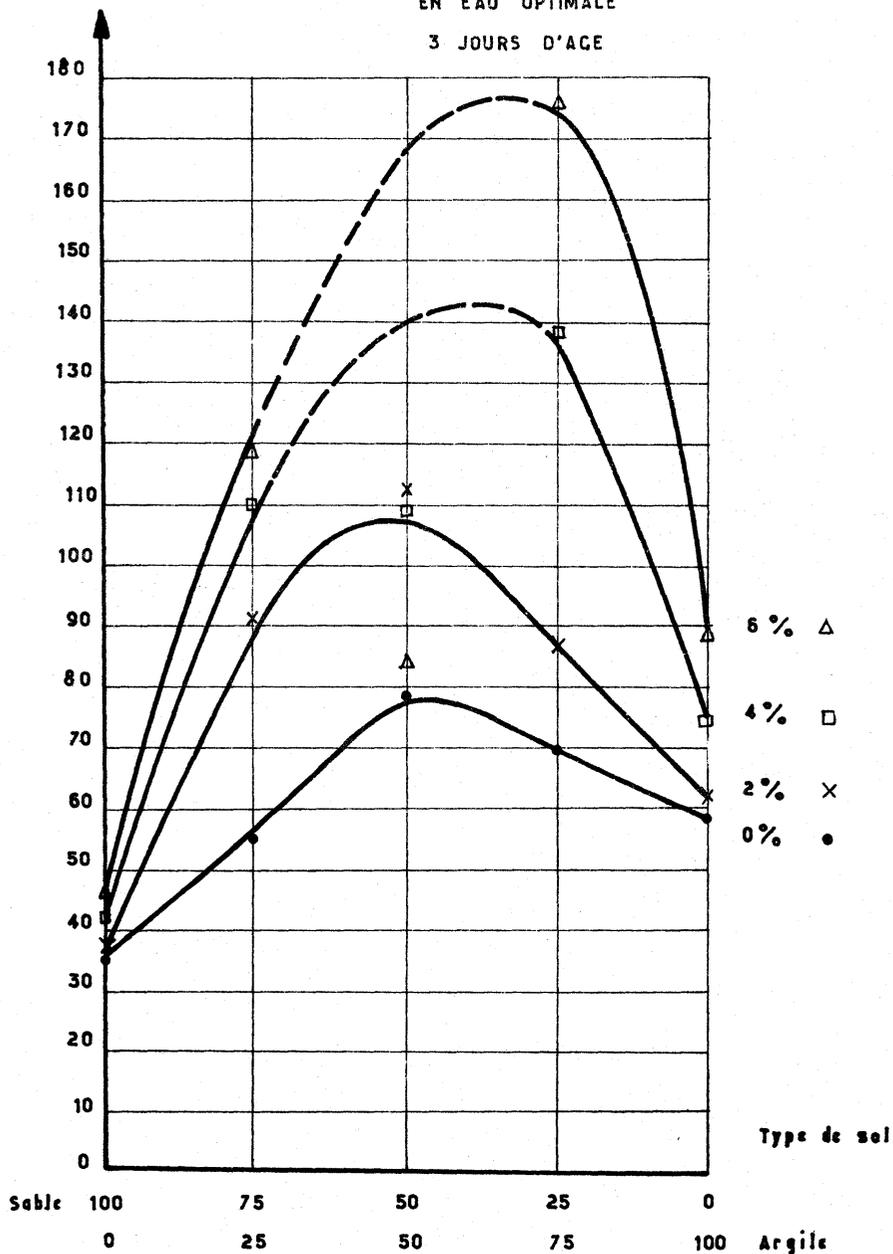


Fig. 10

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE

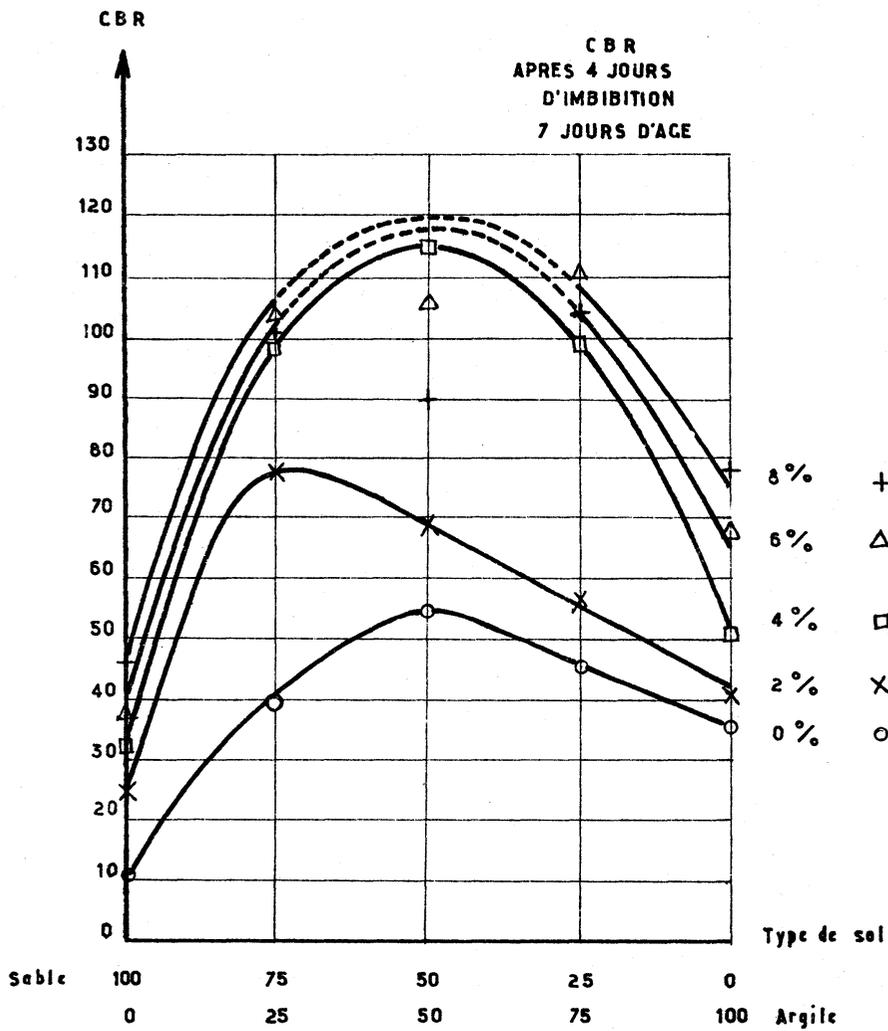


Fig. 11

.5 - CARACTERISTIQUES MECANQUES

Sur les graphiques 12 à 17, nous avons reporté les variations de la résistance à la compression simple pour divers degrés de compactage en fonction du dosage en chaux.

Pour les échantillons non imbibés de 3 jours d'âge, ces courbes présentent un maximum situé entre l'argile et l'argile sableuse; ce maximum atteint 14 kg/cm² pour 90% PM et 26 kg/cm² pour 100% PM avec 6% de chaux alors que pour ce même sol non amendé, nous avons 9 kg/cm² dans le premier cas et 12,5 kg/cm² dans le second cas. Il faut remarquer qu'un apport de 2% de chaux n'a que peu d'influence. Il faut atteindre 4% de chaux pour augmenter fortement les résistances à la compression simple.

Pour les échantillons imbibés et de 7 jours d'âge, les valeurs maximales sont beaucoup plus faibles. Les courbes ont sensiblement la même allure que les précédentes mais avec 6% de chaux nous ne gagnons que 2 à 4 kg/cm², dans le meilleur cas on atteint avec 6% de chaux et 100% PM 14 kg/cm² pour un sol très proche de l'argile sableuse. Il faut noter qu'à 100% PM, nous avons un gain minimum de 2 kg/cm² pour 6% de chaux quel que soit le sol envisagé : ceci est assez important pour les matériaux très sableux.

6 - CONCLUSIONS

L'amendement à la chaux apparaît intéressant dans le cas des matériaux à dominante argileuse, en particulier pour l'argile sableuse étudiée.

L'action sur le sable est peu importante et amènera à rechercher d'autres modes de stabilisation pour ce genre de matériau.

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE

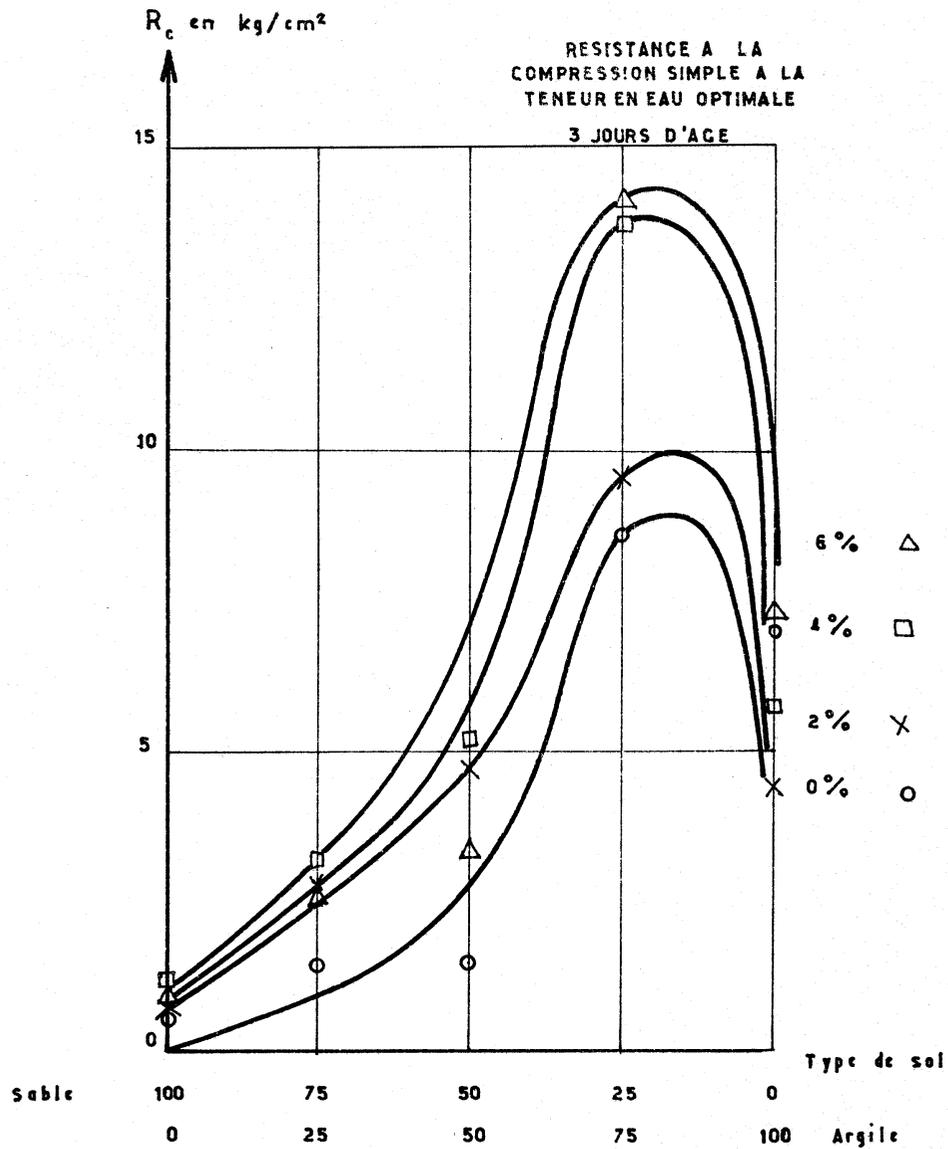
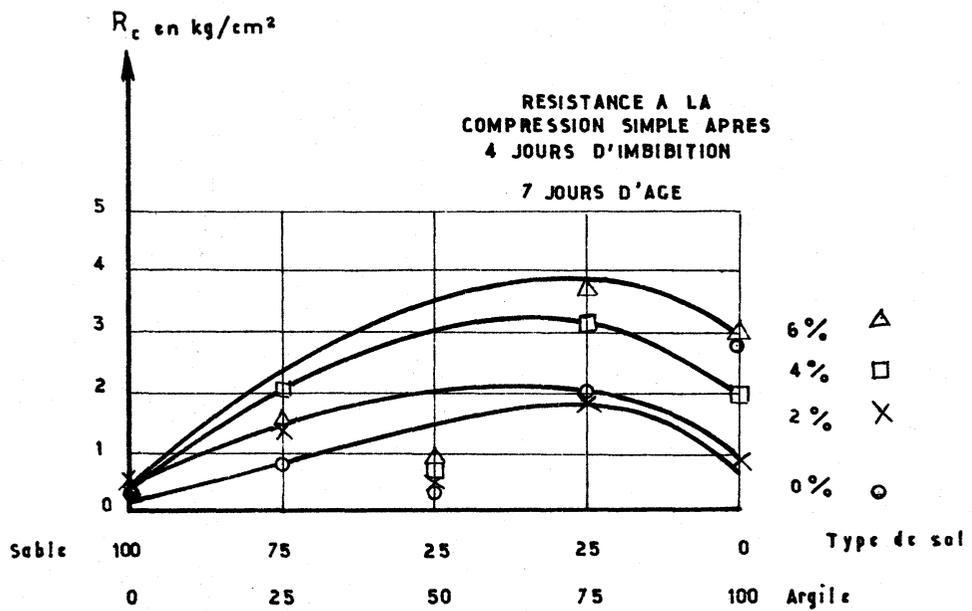


Fig. 12

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE



SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

R_c en kg/cm^2

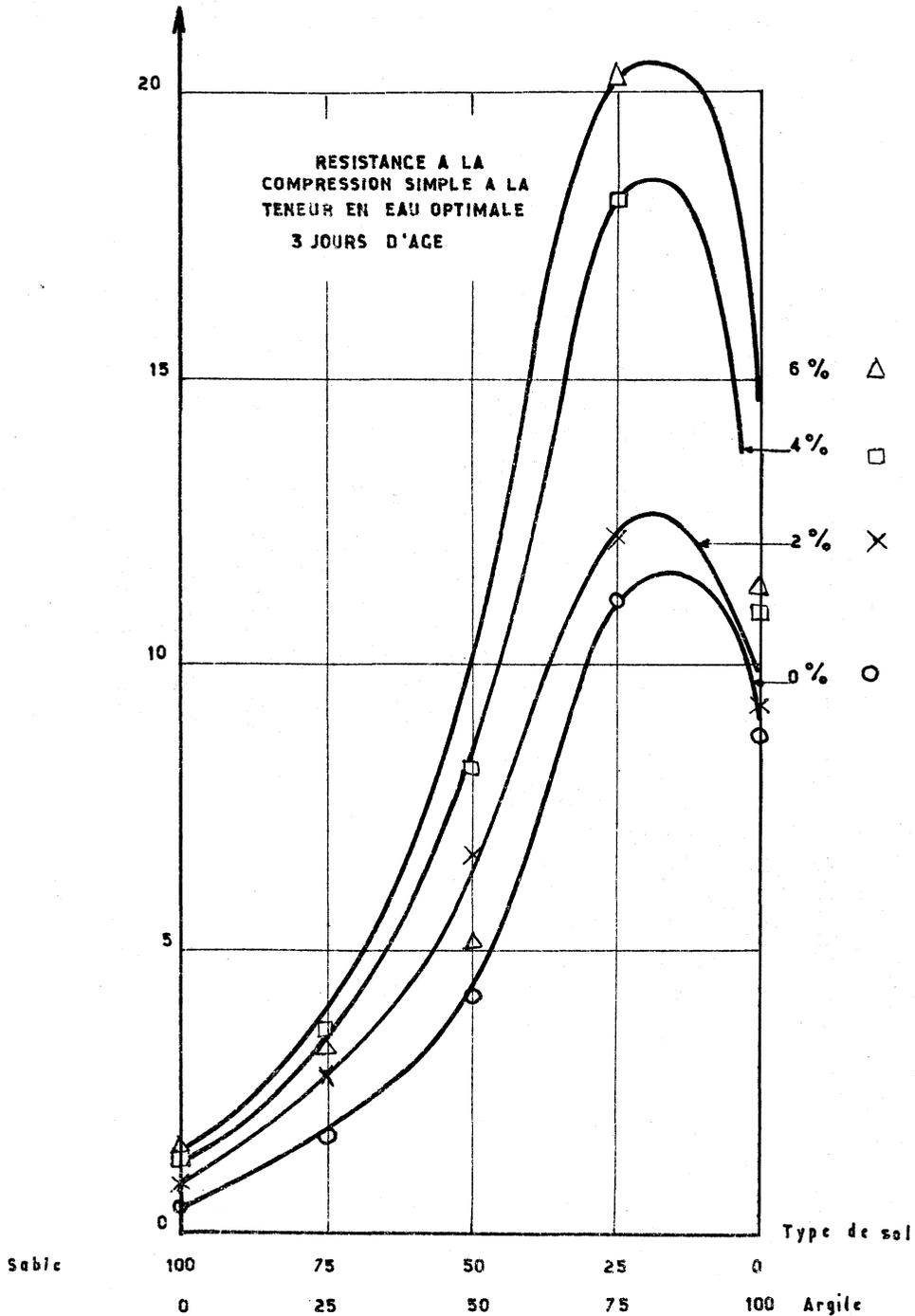


Fig. 14

SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

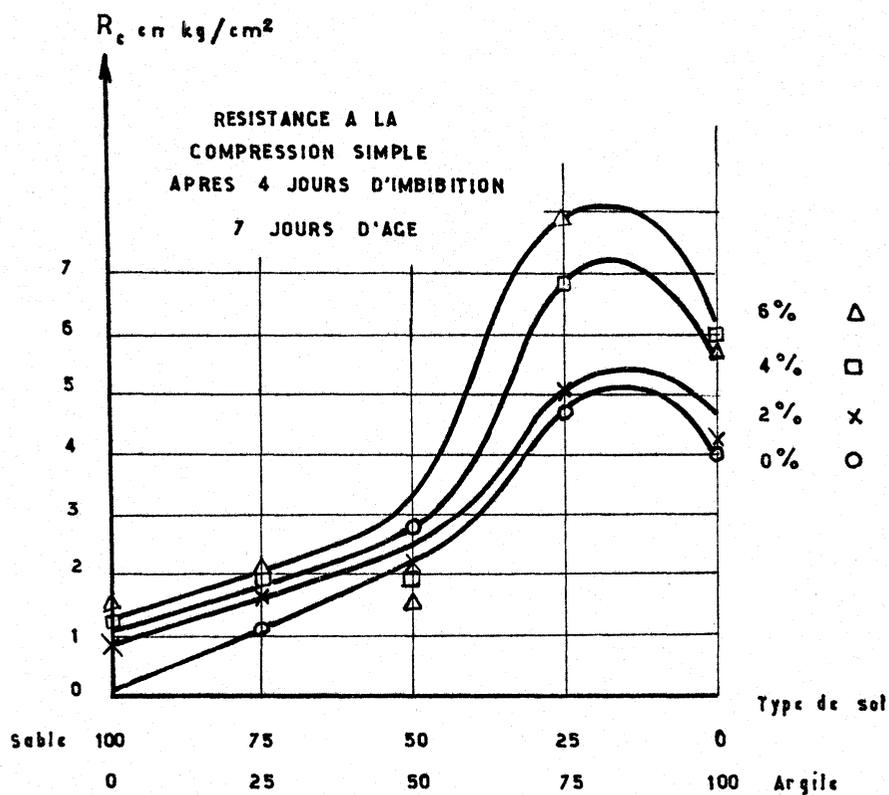
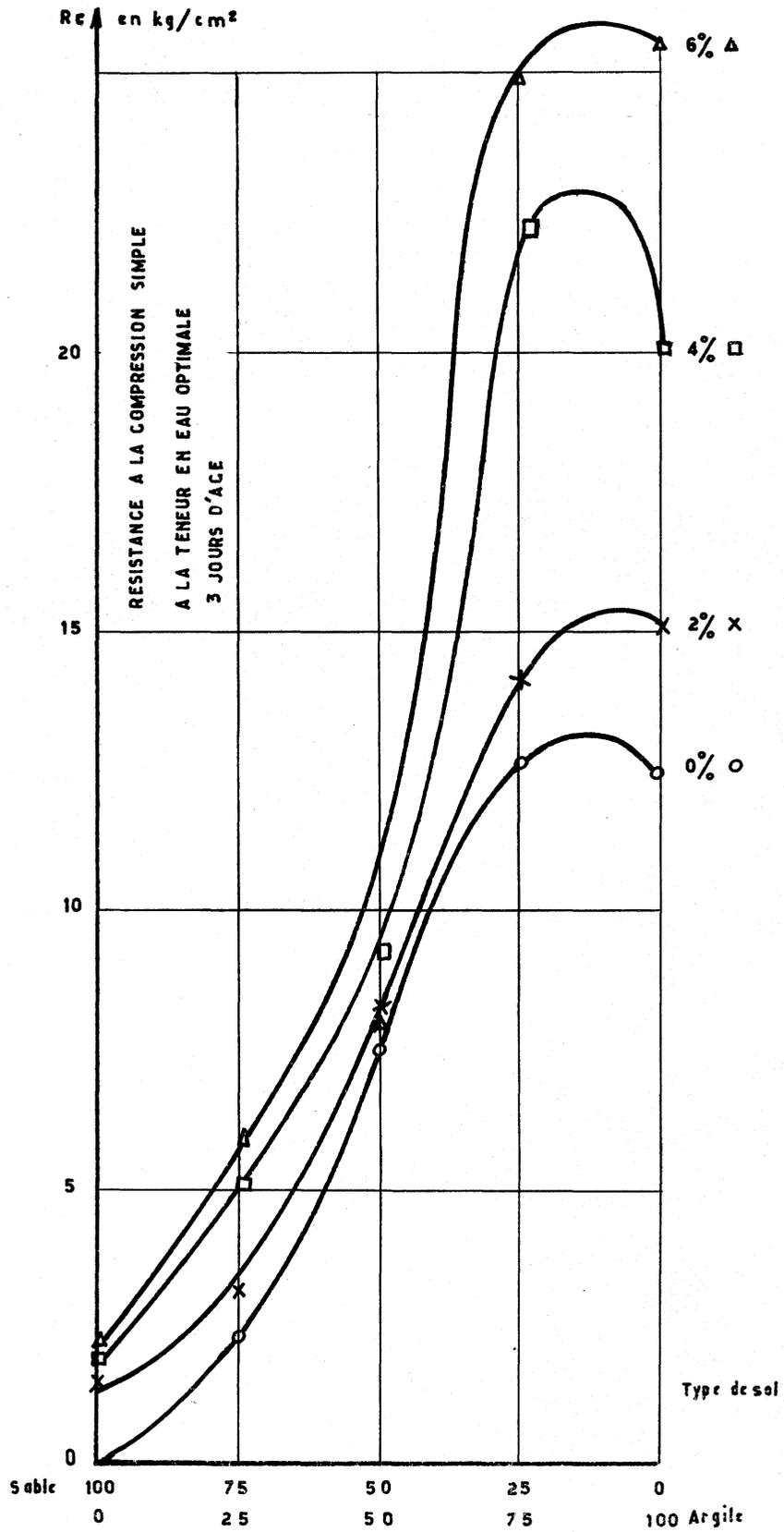


Fig. 15

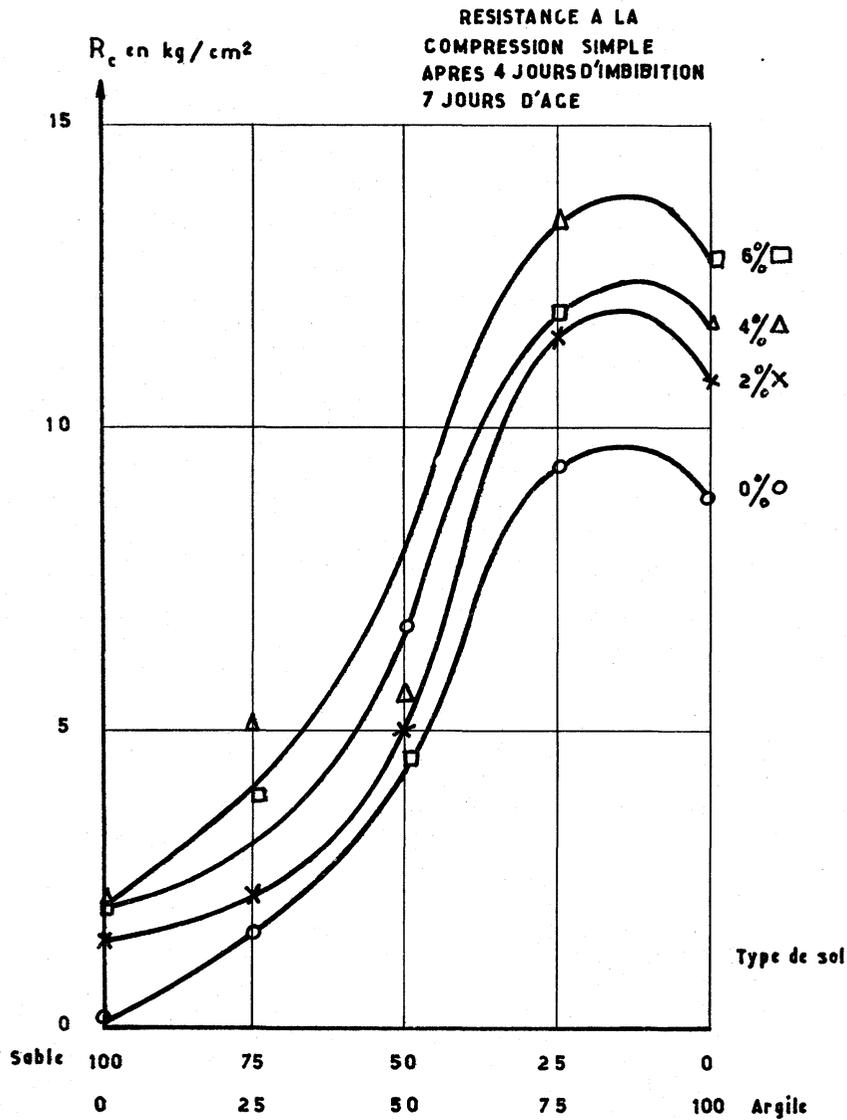
SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE



SOLS STABILISES A LA CHAUX

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE



2.2.3. STABILISATION AU CIMENT

1. MODE D'ACTION DU CIMENT

Le ciment a les mêmes actions que le chaux du point de vue chimique (floculation des particules argileuses) et mécanique (création de liaisons entre les grains). Cependant, le ciment permet une stabilisation plus prolongée par libération durant ce "durcissement" de cations qui agiront sur les particules argileuses en formation à partir des derniers éléments subsistant du feldspath.

2. ACTION SUR LES LIMITES D'ATTERBERG

Les graphiques (fig.18) reprennent les variations de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité en fonction de l'amendement au ciment pour les divers matériaux étudiés.

On note que, pour un matériau donné, la limite de liquidité est une fonction décroissante de l'amendement au ciment. Lorsque l'on amende au ciment, la limite de liquidité de l'argile ne varie pas; mais pour tous les mélanges de sols, un nouvel abaissement de la limite de liquidité est noté. Il atteint 10 points pour le mélange "sable-argile". L'action flocculante du ciment est efficace dès l'addition de 2%, les pourcentages supérieurs ayant une influence à peine plus marquée.

Les variations de l'indice de plasticité se caractérisent par rapport aux matériaux non amendés chimiquement par une baisse de 3 à 8% dès que le pourcentage d'amendement atteint 2%. L'adjonction de 4% de ciment a une action très efficace et donne un indice de plasticité égal à 4 dans le cas du mélange sable-argile.

3. ESSAIS DE COMPACTAGE PROCTOR MODIFIE

Le ciment joue le rôle de "fines" dans les sols sableux : on a donc une augmentation de la densité sèche maximale. La teneur en eau optimale diminue de 1 à 2% maximum. Pour les matériaux argileux, la densité sèche maximale diminue bien que les "fines" ajoutées par le ciment aient un poids spécifique supérieur à celui des particules argileuses. La teneur en eau optimale croît de 1% maximum. Ceci est en rapport avec la création de liaisons internes dans le matériau argile + ciment.

4. ESSAIS DE PORTANCE C.B.R.

Pour les sols non imbibés, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de 3 jours d'âge.

Les graphiques 19, 21 et 23 montrent l'augmentation des indices C.B.R. avec le pourcentage de ciment et la compacité. Un apport de 2% de ciment double la valeur du C.B.R. et avec 4% et 6% de ciment, on la multiplie par 3 et même par 4. Les maxima sont atteints pour les mélanges "sable-argile" et "sable argileux".

Il est à noter que pour le sable, on obtient des résultats très intéressants : un C.B.R. de 40 avec 5% de ciment et 90% du Proctor Modifié, un C.B.R. de 60 avec 4% de ciment et 95% du Proctor Modifié et 110 pour 6% de ciment.

SOLS STABILISES AU CIMENT

LIMITES D'ATTERBERG

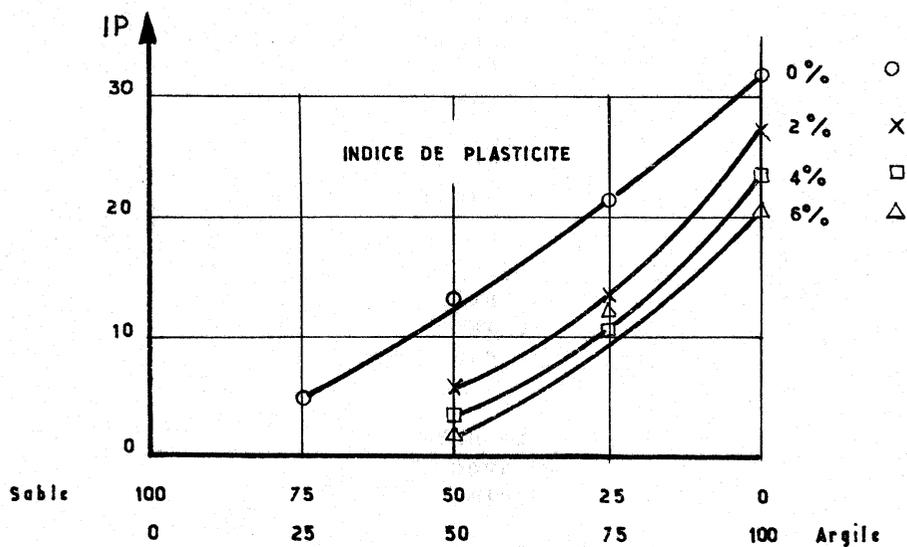
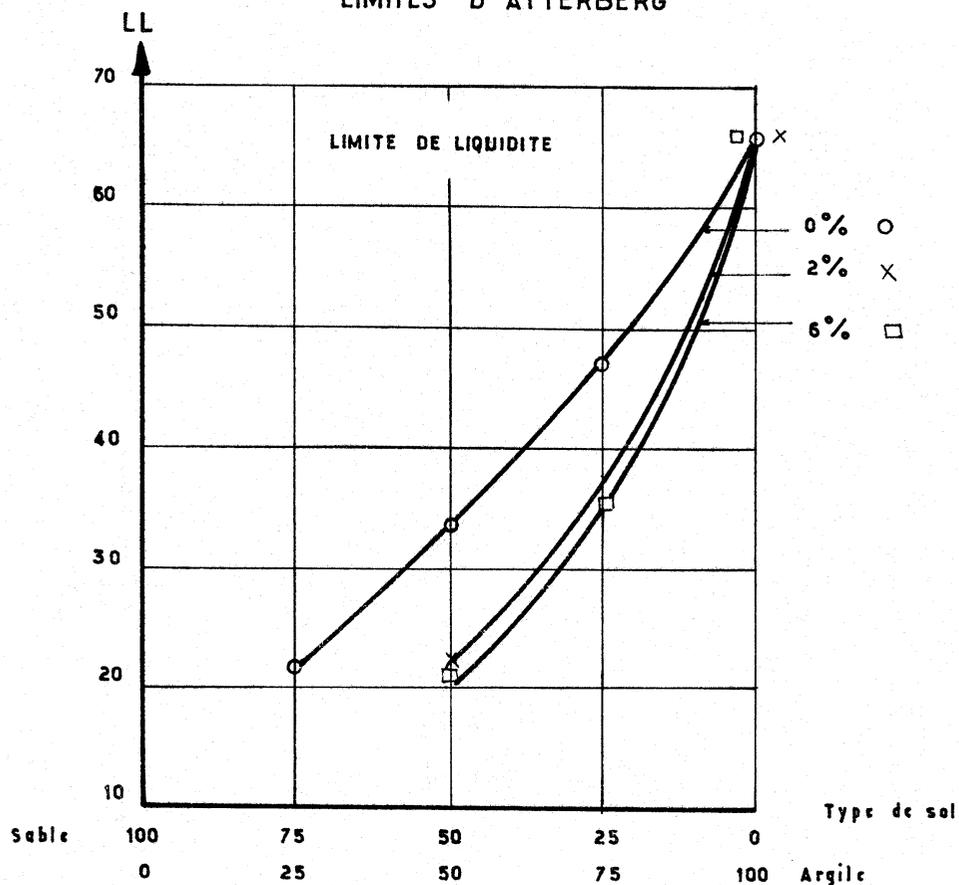


Fig. 18

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE

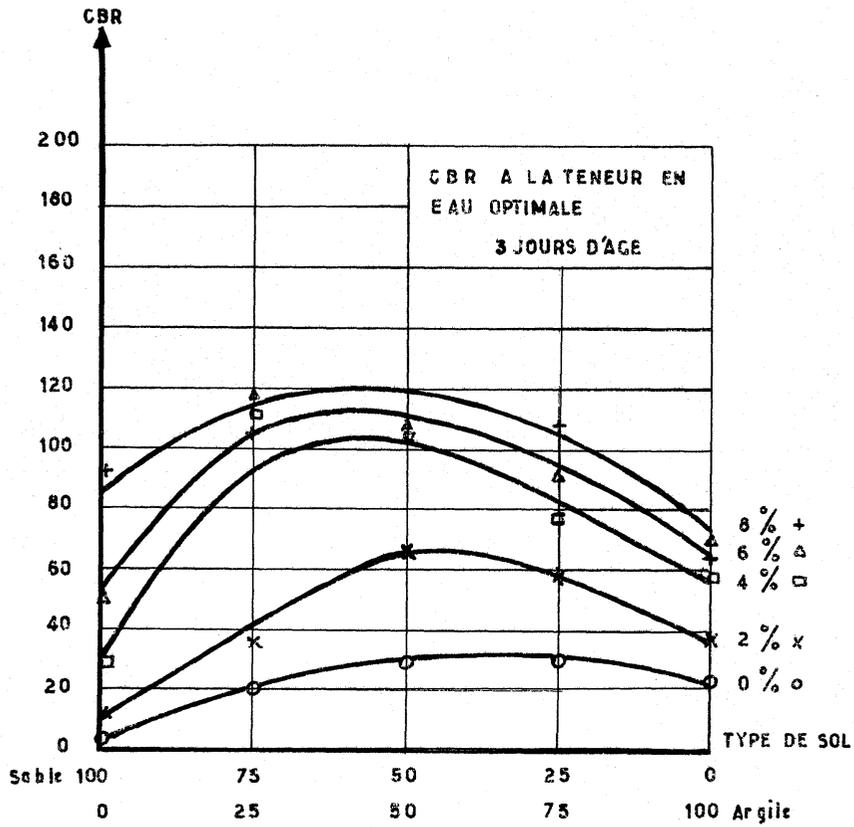
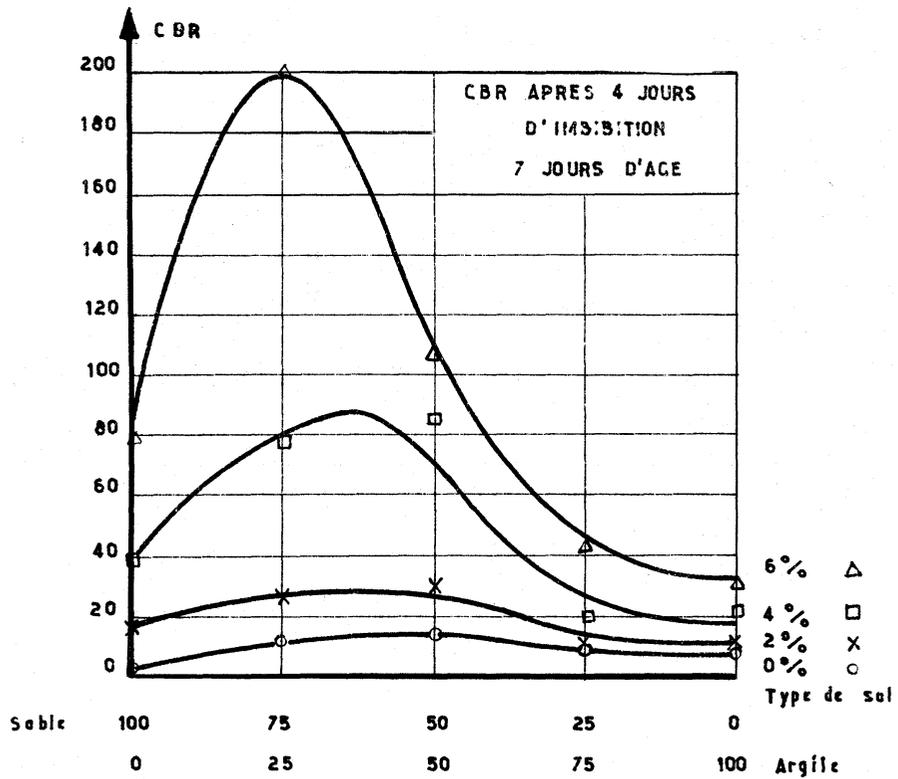


Fig. 19

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE



SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

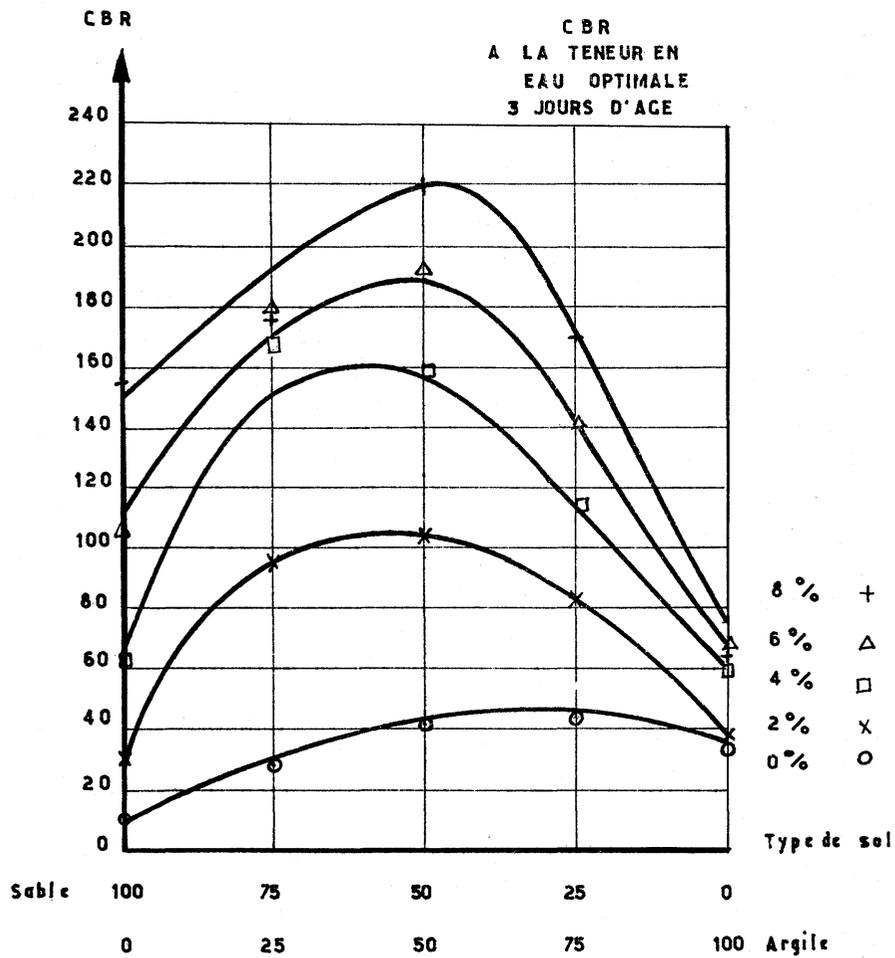


Fig. 21

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

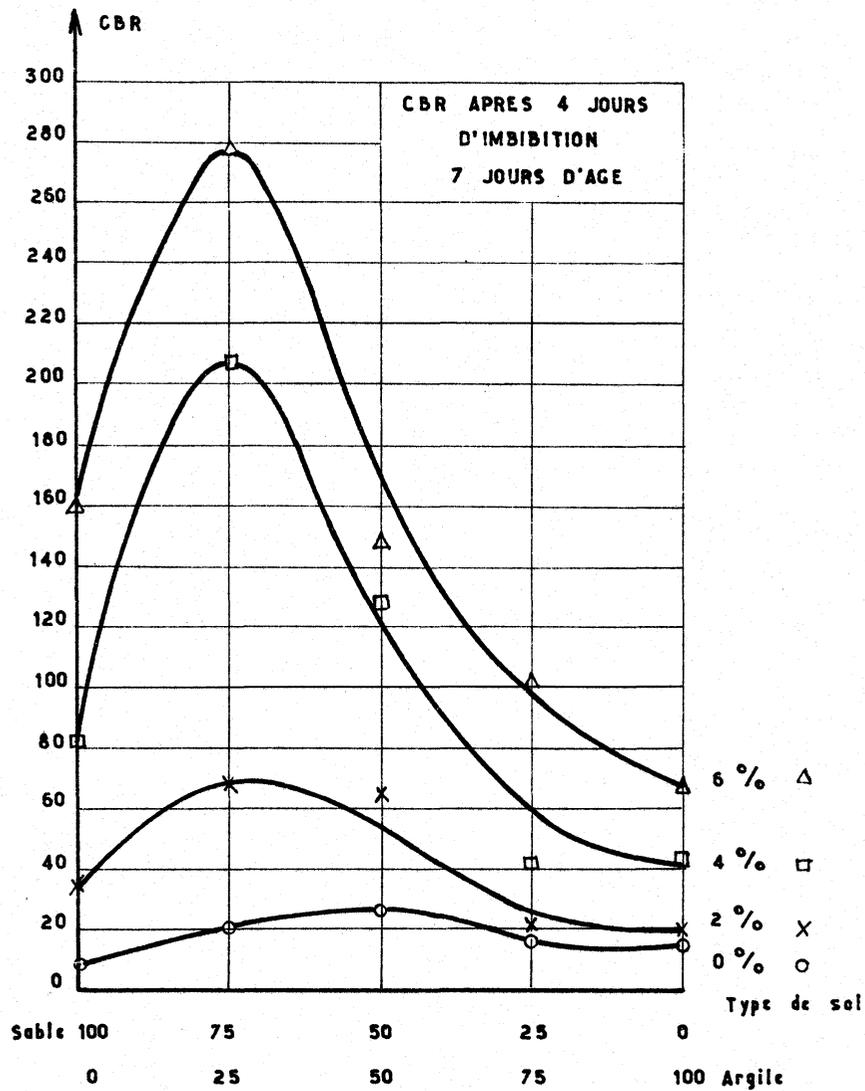


Fig. 22

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 100 % DU PROCTOR MODIFIE

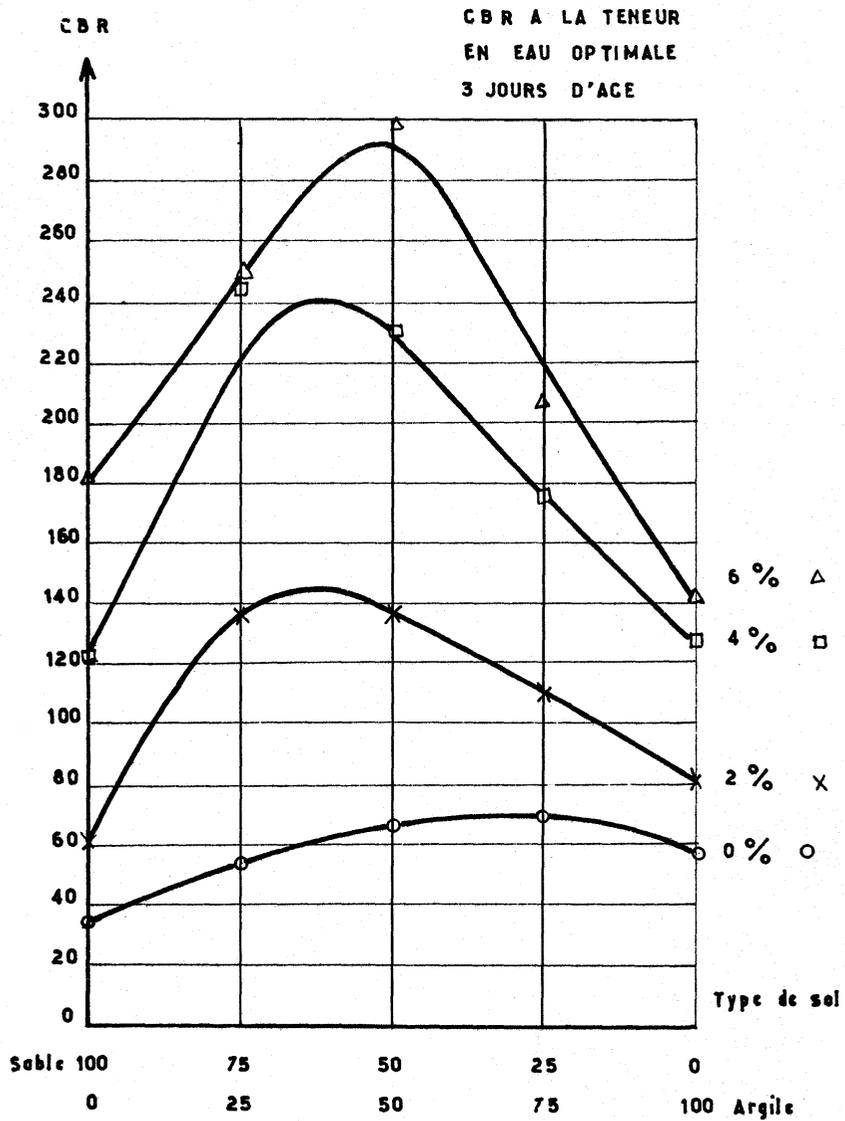


Fig. 23

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE

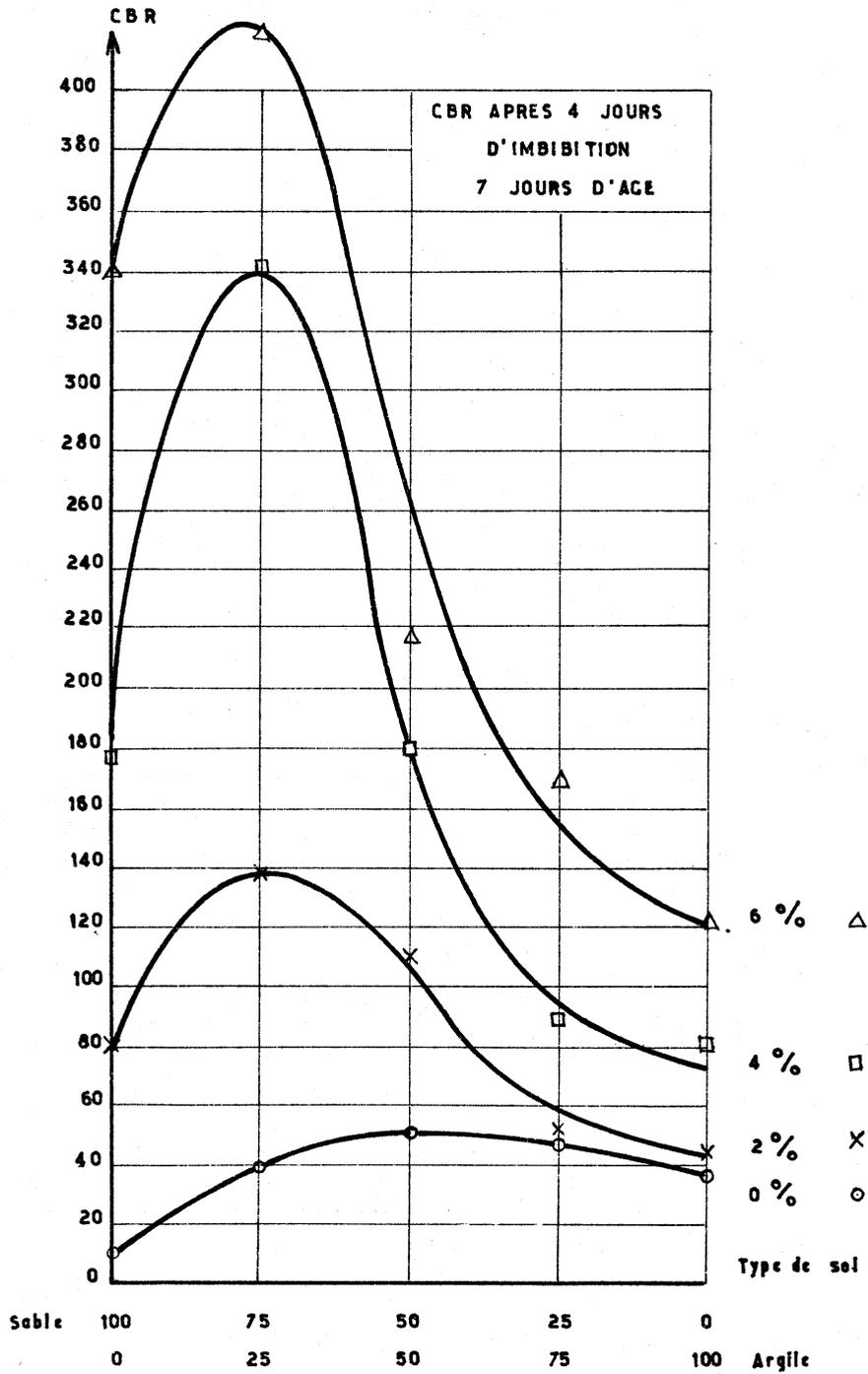


Fig. 24

Pour les échantillons imbibés (figures 20,22 et 24) il faut tout d'abord souligner que le ciment a eu 7 jours pour prendre et nous constatons que cela a suffi à annuler totalement l'effet de l'imbibition. On a même un accroissement de l'indice C.B.R. Le maximum se trouve situé du côté du mélange sable argileux. Le sable garde et même acquiert un indice C.B.R. encore supérieur. La perte de portance est par contre, très nette pour le mélange "argile sableuse" ainsi que pour les sols argileux par rapport aux échantillons non imbibés.

5. CARACTERISTIQUES MECANQUES

Sur les graphiques 25 à 30, nous avons reporté les variations de la résistance à la compression simple pour divers degrés de compactage en fonction du dosage du ciment.

Pour les échantillons non imbibés de 3 jours d'âge, ces courbes présentent un maximum dans le cas du mélange argile sableuse qui atteint 23kg/cm² pour 100% du Proctor Modifié et 4% de ciment alors que l'on avait 13 kg/cm² pour un même sol non amendé.

Pour les échantillons imbibés et de 7 jours d'âge, la résistance à la compression simple varie quasi-linéairement. Les courbes relatives aux divers amendements sont parallèles et ne donnent qu'un faible gain. On atteint pour l'argile, avec 4% de ciment et 100% de P.M., 13 kg/cm², mais pour 90% de P.M., on n'a déjà plus que 3 kg/cm².

La différence entre les valeurs obtenues pour les échantillons imbibés et non imbibés est assez importante, mais elle l'est d'autant moins que le compactage est plus poussé.

Remarque : A titre indicatif, nous avons reporté sur la figure 31 le domaine de variation du coefficient de compressibilité entre 0 et 5% d'amendement pour une énergie de compactage de 95% P.M. On observe que :

- la stabilisation à la chaux conduit à un maximum très accusé de compressibilité pour l'argile sableuse.
- la stabilisation au ciment conduit à un maximum de compressibilité pour le sable-argile.

6. CONCLUSIONS

Tout comme la chaux, le ciment diminue le gonflement des sols en raison des liaisons mécaniques créées. Cependant la stabilisation au ciment C.P.A. de mélanges à dominante argileuse laisse subsister des gonflements assez importants dus à des expansions locales (action du sulfate (2,1%) contenue dans le Portland utilisé sur l'argile en présence de ciment et d'eau).

A ce propos, on peut signaler qu'une étude a été effectuée sur ce sujet par M.P.T. Sherwood du Road Research Laboratory.

Dans tous les cas de réalisation de corps de chaussée en sol amélioré au ciment ou à la chaux, il y aura lieu de s'assurer au préalable de la comptabilité du liant pour le sol et l'eau.

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 90 % DU PROCTOR MODIFIE

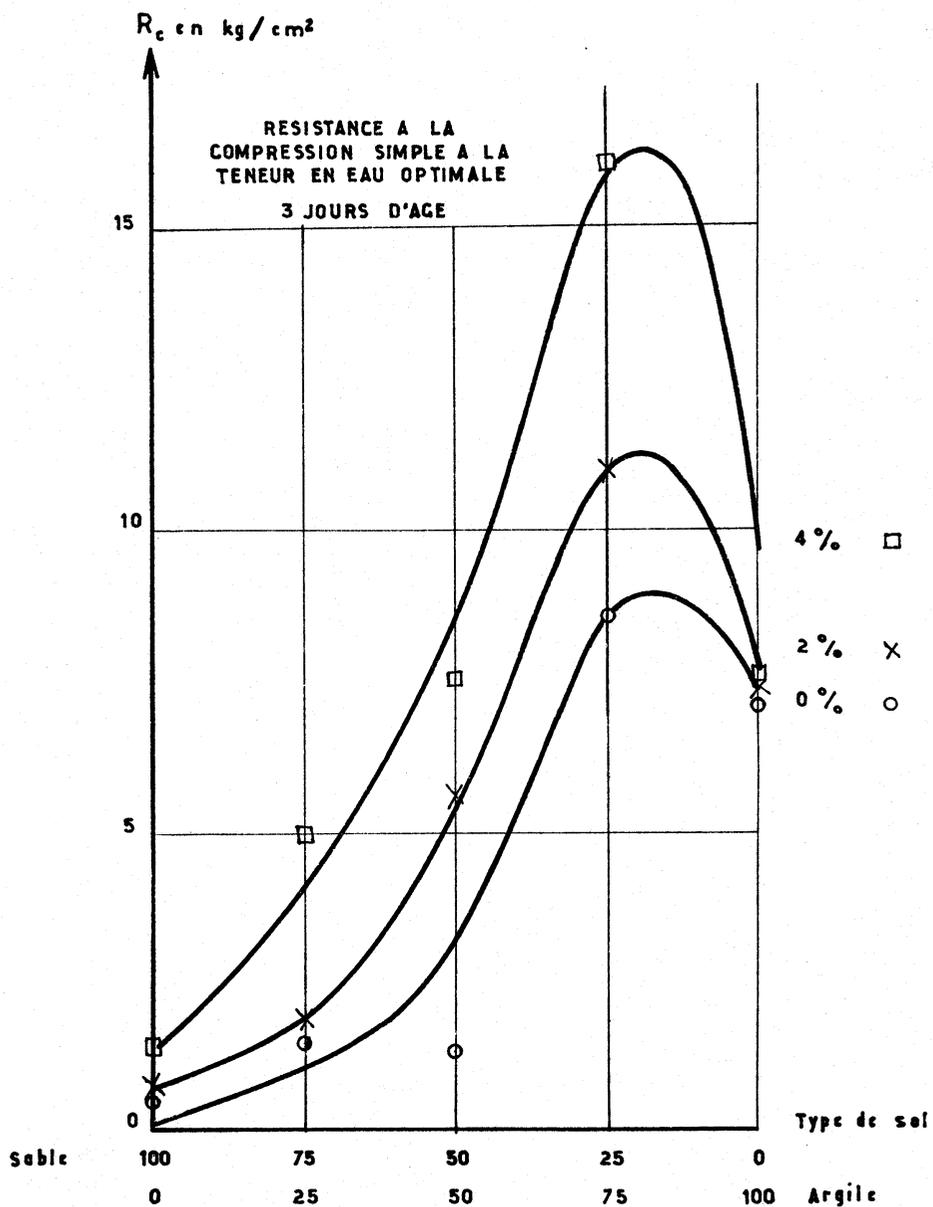


Fig. 25

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 90% DU PROCTOR MODIFIE

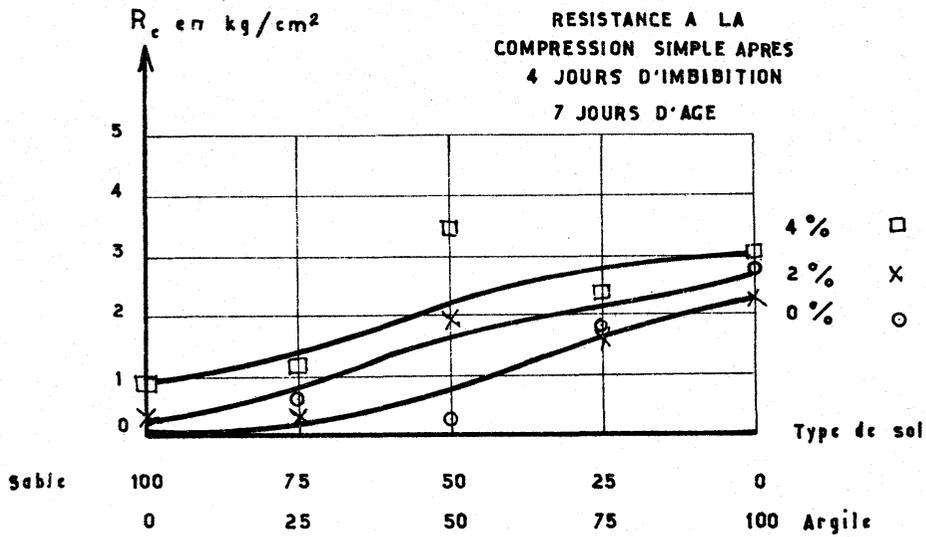


Fig. 26

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

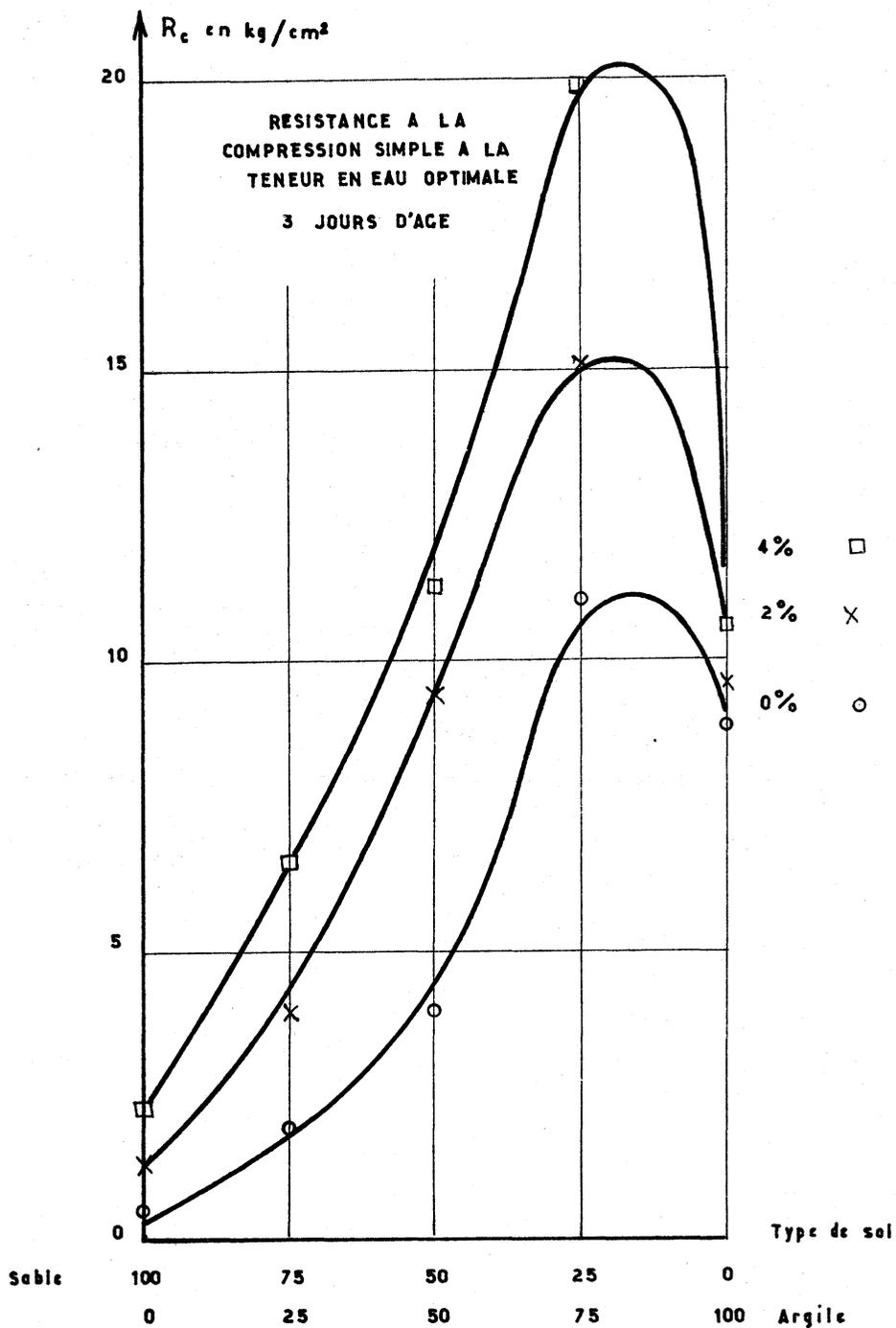


Fig. 27

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 95% DU PROCTOR MODIFIE

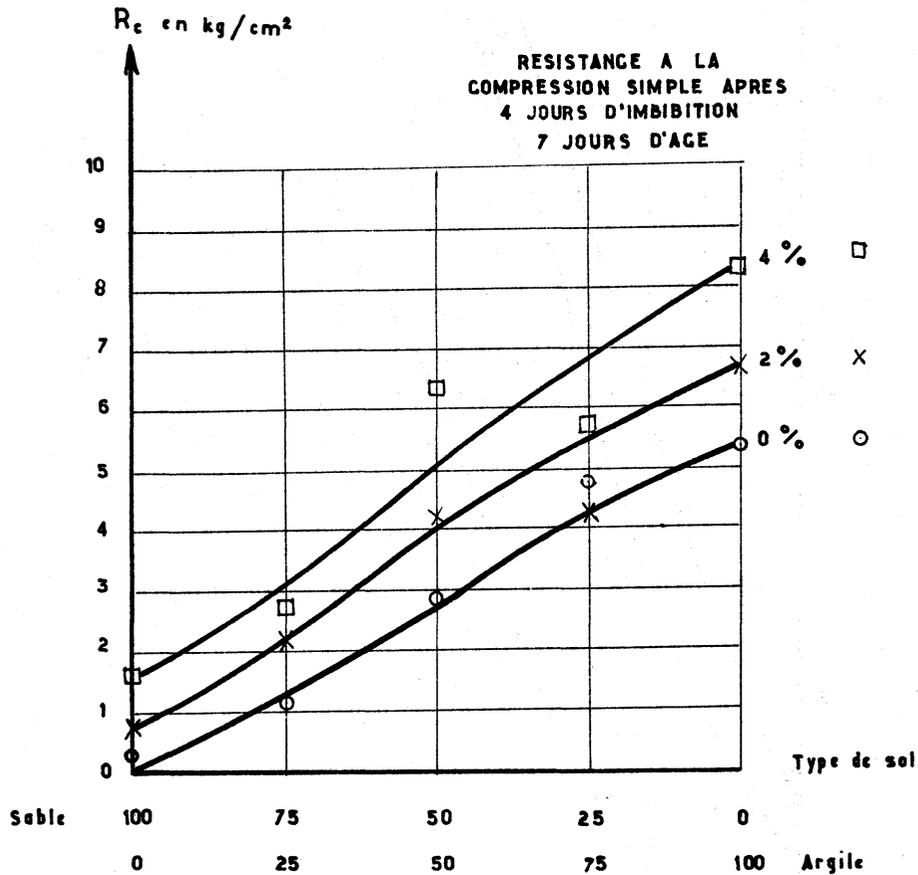


Fig. 28

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE

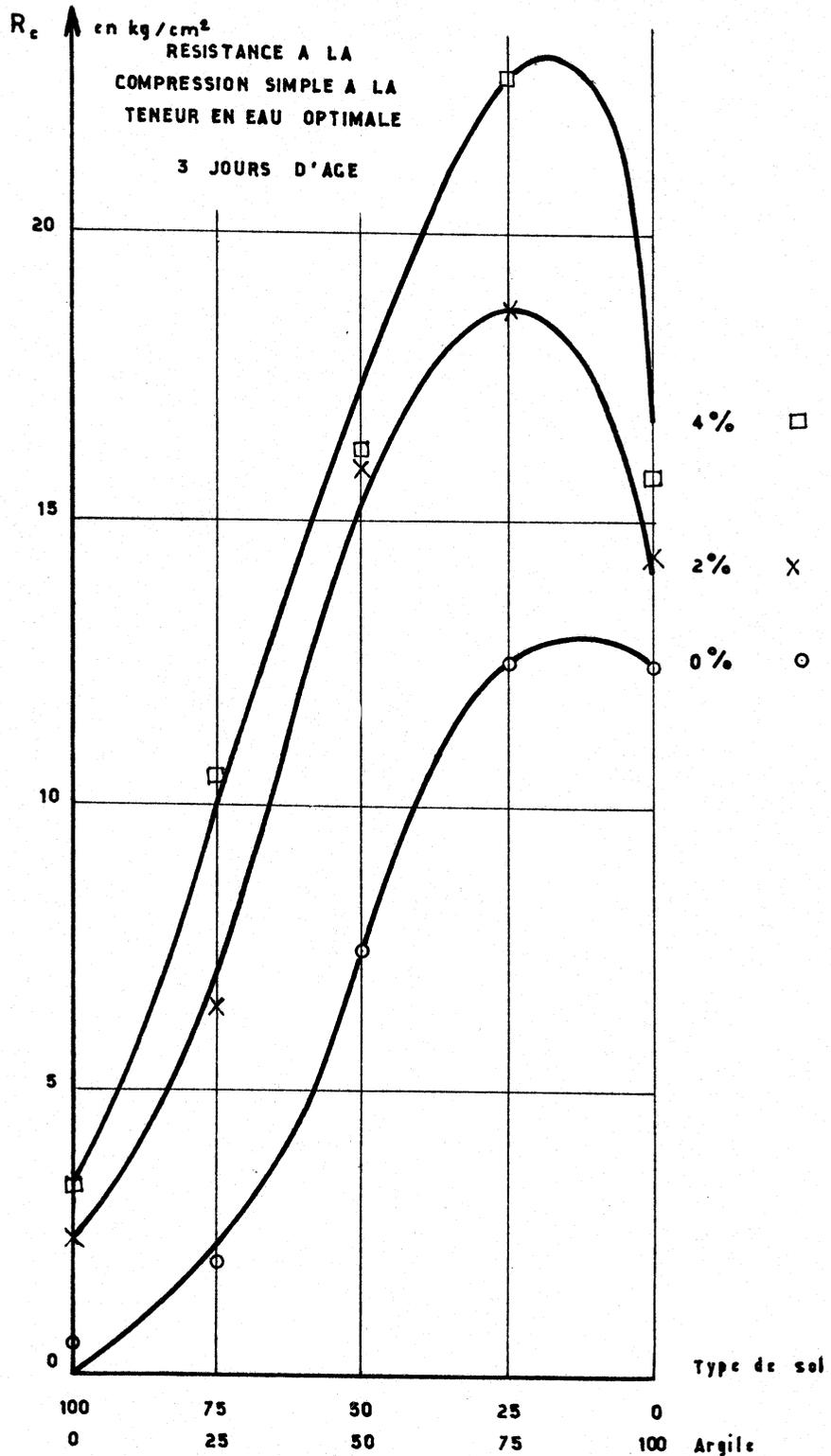


Fig. 29

SOLS STABILISES AU CIMENT

COMPACTAGE A 100% DU PROCTOR MODIFIE

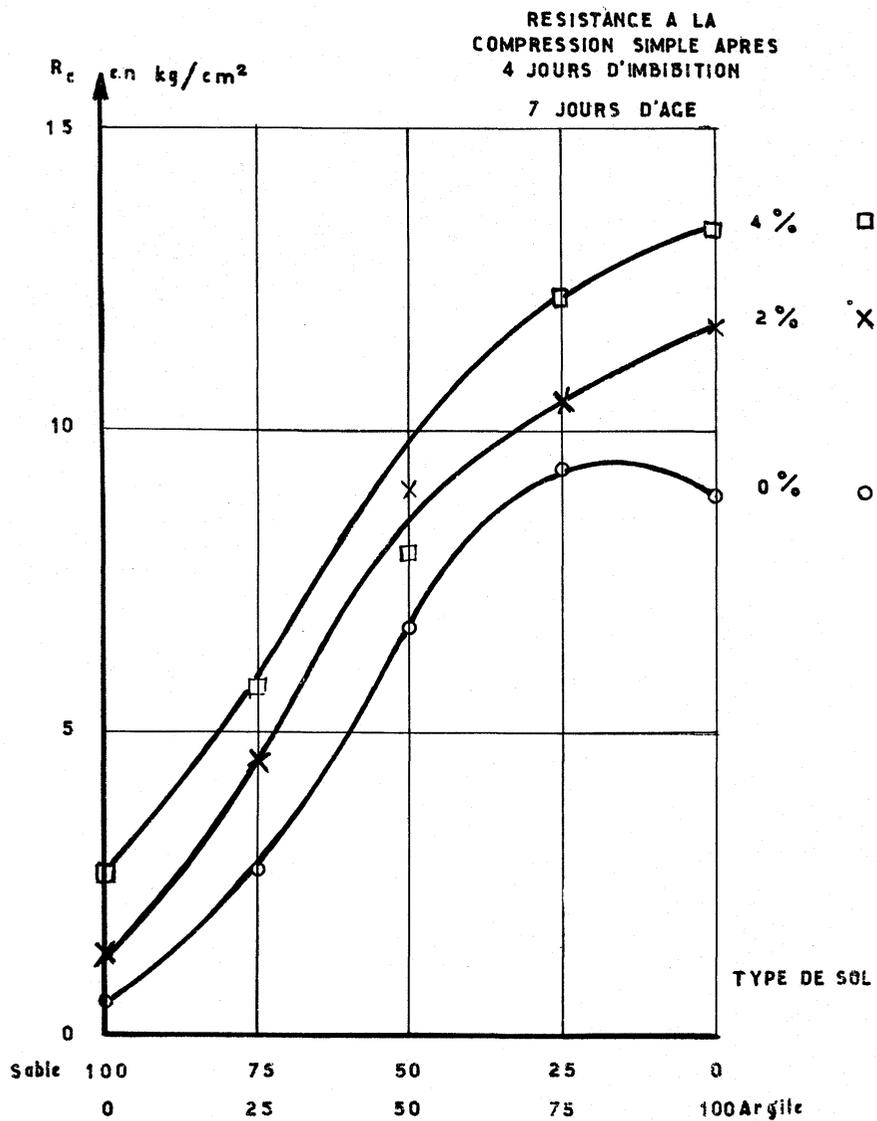


Fig. 30

DOMAINE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITÉ ENTRE 0 ET 5% D'AMENDEMENT

COMPACTAGE A 95 % DU PROCTOR MODIFIÉ

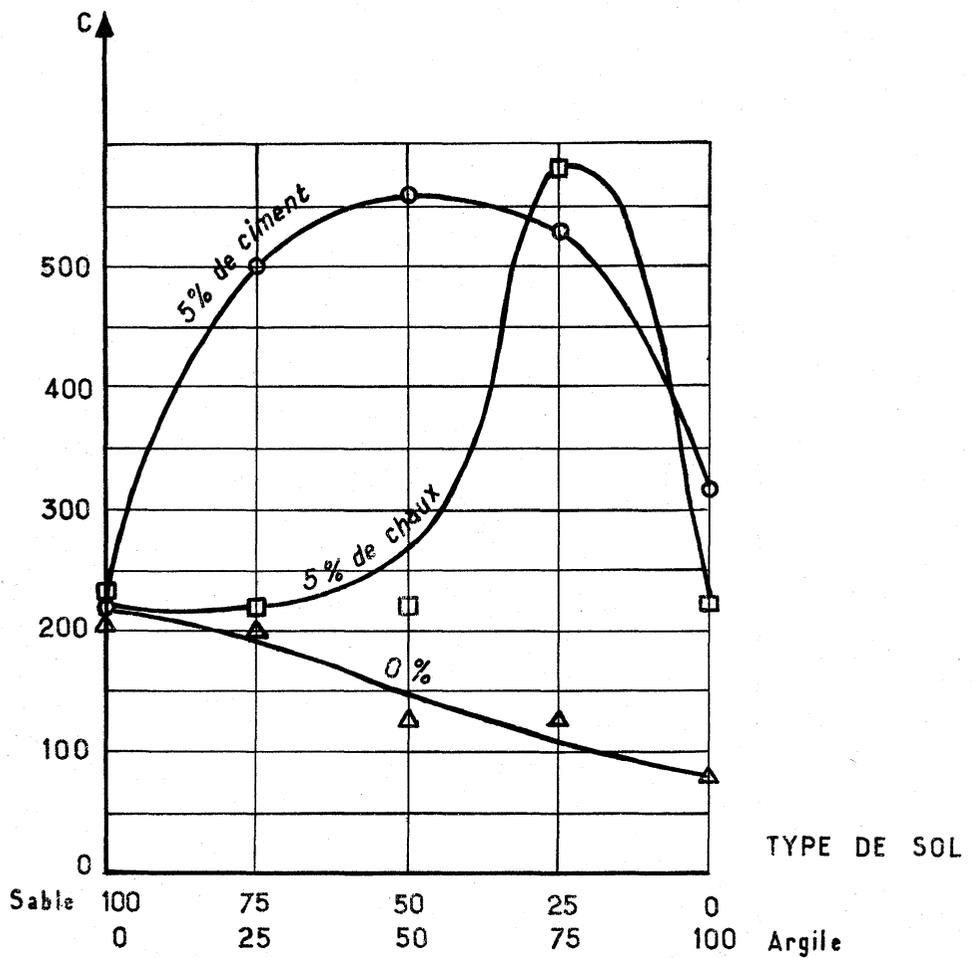


Fig. 31

2.2.4 - STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

.1 - MODE D'ACTION DES LIANTS HYDROCARBONES

- Emploi des Bitumes pour la stabilisation des sols.

Le bitume a été utilisé sous forme de cut-backs et d'émulsions.

Les cuts-backs sont constitués par une solution de bitume dans un solvant qui, selon sa volatilité et les conditions extérieures, s'élimine plus ou moins vite de la solution.

Une émulsion est un mélange intime, mais présentant toutefois des phases séparées, de deux constituants non miscibles l'un à l'autre.

Le liant bitumineux est en suspension, sous forme de gouttelettes sphériques. Pour diminuer la tension interfaciale existant entre l'eau et le liant, on ajoute un émulsif. Quand l'émulsion est au contact du sol, elle s'appauvrit en émulsif et, la tension interfaciale augmentant, il y a finalement rupture brusque de l'émulsion.

- Adhésivité du liant au sol.

Le mouillage d'un granulat du sol par le liant, condition nécessaire de l'adhérence, suppose comme préalable, l'affinité pour un contact moléculaire des deux corps en présence et il nécessite la fluidité du liant pour lui permettre des déplacements faciles et rapides lors de l'étalement en vue de réaliser le contact moléculaire entre les deux corps.

En général les sols rencontrés présentent la plus grande affinité pour le mouillage par l'eau.

Hors de la présence d'eau, les sols pourraient être facilement mouillés par le liant. Mais nous opérons en présence d'eau; or, les produits bitumineux sont anioniques dans ce cas, c'est-à-dire qu'ils présentent en surface, des ions électrisés négativement (anions). Ces corps ont donc une affinité pour les sols, qui mouillés par l'eau, ont une surface cationique, c'est-à-dire, présentent des ions électrisés positivement (cations) : c'est le cas des calcaires. L'affinité des anions pour les cations provoque la soudure normale du liant au sol et même parfois, le déplacement de l'eau par le liant.

S'il s'agit d'un sol anionique (silice, quartz, quartzite) on interpose entre les anions du sol et ceux du liant, des cations qui font la jonction entre le sol et le liant. Ces cations sont introduits par des corps appelés "dopes" ou "hydrophobants".

- Vieillissement des liants.

Les liants vieillissent par pertes d'huiles, par oxydation et par polymérisation, au contact de l'air et sous l'influence de la chaleur et de la lumière. Cela fait progressivement croître l'adhésivité et la cohésivité du liant en même temps qu'il se met à durcir.

Les tableaux qui suivent résumant les résultats obtenus sur les divers matériaux étudiés.

.2 -

- SABLE -

Types de liant utilisés	Résultats obtenus
Cut Back 50/100 (bitume de base 180/200)	Stabilité insuffisante
Emulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100	a) stabilité suffisante b) stabilité satisfaisante (en particulier à 60° et après immersion) après addition de 3% de chaux et avec un dosage de 4% de liant.
Emulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisé	Stabilité insuffisante

.3 -

- SABLE ARGILEUX -

Types de liant utilisés	Résultats obtenus
Cut Back 10/15 (bitume de base 180/200)	Stabilité satisfaisante pour un dosage de 5% W optimum = 7%
Emulsion basique surstabilisée à 60% de bitume	Stabilité insuffisante en climat humide, n'est pas à écarter en climat sec et pour une chaussée bien drainée.
Emulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisé	Absorption et gonflement excessifs. A ne pas envisager, sauf en climat sec et pour une chaussée bien drainée
E.K.2 (Cut Back dopé et émulsifié miscible à l'eau)	Stabilité satisfaisante pour un dosage de 5% W optimum = 5%

Types de liant utilisés	Résultats obtenus
Cut Back 10/15 (bitume de base 180/200)	Stabilité acceptable pour un dosage en liant de 12% et a) 0,1% de dope 4266 pour teneur en eau initiale 35% b) 0,1% de base 3028P pour teneur en eau de 25 à 35%
Emulsion basique surstabilisée à 60% de bitume	Stabilité insuffisante même après addition de dope
Emulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisé	Stabilité insuffisante. Dopage étudié à cause de la médiocrité des résultats obtenus sans dope.
E.K.2 (Cut-back dopé émulsifié miscible à l'eau)	Résultat satisfaisant après addition de 0,2% de dope (stabiram 790 et dope 4266)

Stabilité insuffisante dans tous les cas.

2.3 - CONSTITUTION DU CORPS DE CHAUSSEE

2.3.1 - DETERMINATION DES EPAISSEURS

Généralités

Les essais de portance effectués en laboratoire permettent de déterminer l'épaisseur totale de chaussée à prévoir en fonction du trafic et du C.B.R. du matériau compacté, ce C.B.R. étant lui-même directement lié à la densité du matériau et à sa teneur en eau au moment de l'essai.

Dans l'application pratique aux sols types étudiés, les épaisseurs totales de chaussée ont été calculées en partant d'un trafic de 150 à 450 véhicules par jour, d'un poids en charge supérieur à 3 tonnes, mais d'une charge par roue limitée à 4 Tonnes.

Dans le cas où la route devrait supporter un trafic plus faible ou plus lourd, il suffirait de se reporter aux abaques C.B.R. du Road Research Laboratory (voir Annexe 1, Chapitre 1).

Connaissant la nature du terrain naturel qui constitue la plateforme et sa teneur en eau maximale d'équilibre, il sera donc possible de définir :

- soit l'épaisseur totale de chaussée nécessaire pour un compactage déterminé de la plateforme.
- soit au contraire le compactage à imposer en plateforme pour une épaisseur déterminée de chaussée.

La teneur en eau d'équilibre sous chaussée dépend du drainage et en particulier, de la résistance aux remontées capillaires.

Nous admettrons comme normalement drainés les sols placés dans des conditions telles que leur teneur en eau d'équilibre puisse atteindre la teneur en eau obtenue en laboratoire dans des moules C.B.R. soumis à 4 jours d'imbibition.

Nous admettrons comme soigneusement drainés les sols placés dans des conditions telles que leur teneur en eau d'équilibre ne puisse dépasser la teneur en eau optimale PROCTOR MODIFIE.

Suivant l'épaisseur totale nécessaire, le corps de chaussée proprement dit sera constitué :

- soit par une fondation et une couche de base
- soit par une simple couche de base.

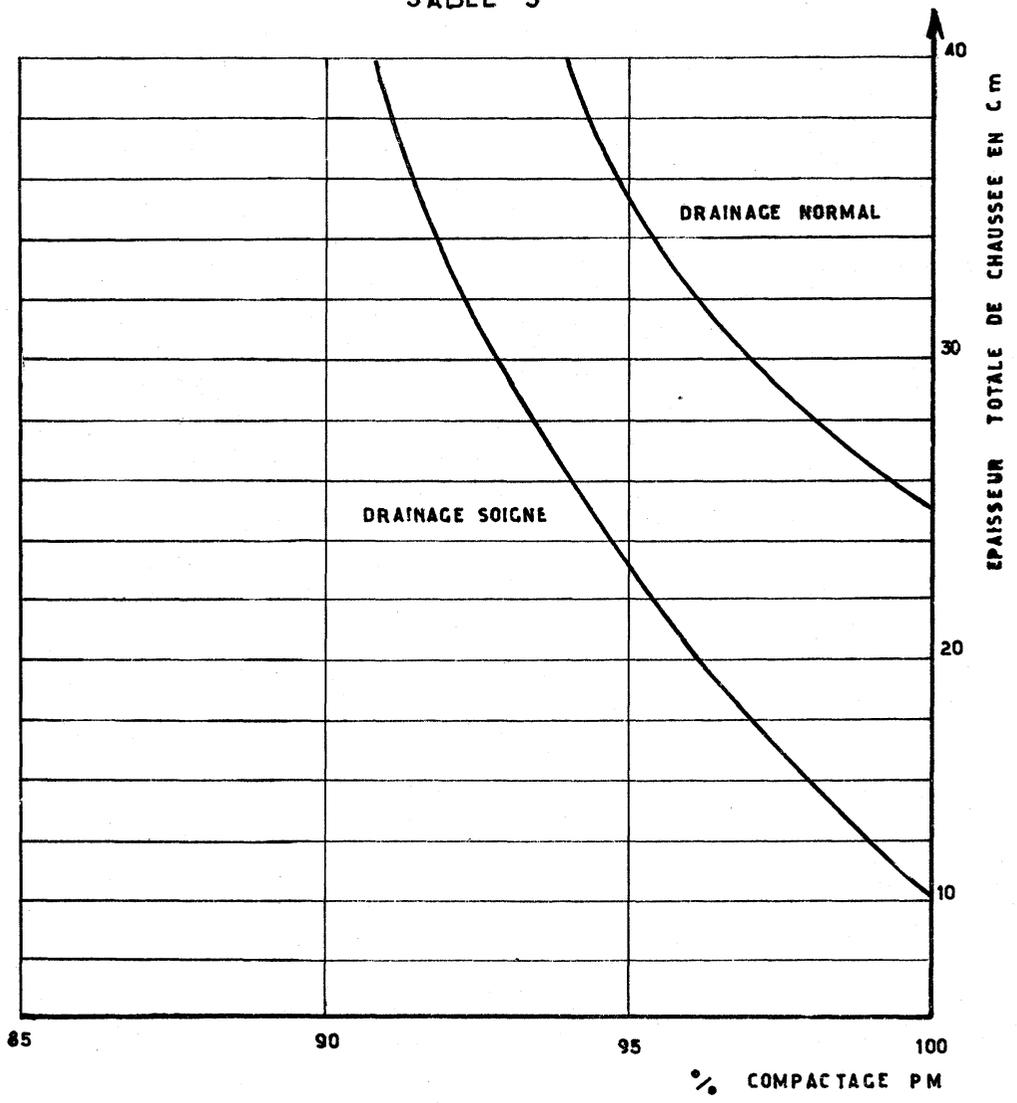
Les épaisseurs habituellement admises pour ces couches sont les suivantes :

Couche de fondation.

- | | |
|--|------------|
| - stabilisation mécanique | 15 à 20 cm |
| - stabilisation aux liants hydrauliques | 12 à 16 cm |
| - stabilisation aux liants hydrocarbonés | 10 à 15 cm |

INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE - FORME SUR L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

SABLE S



Graph. 1

Couche de base

- stabilisation mécanique 12 à 15 cm
- stabilisation aux liants hydrauliques 10 à 15 cm
- stabilisation aux liants hydrocarbonés 8 à 12 cm.

Ces épaisseurs sont conditionnées par les possibilités des engins de malaxage, par la précision à laquelle on peut s'attendre au cours des opérations de réglage et de finition et par les possibilités des engins de compactage.

Par exemple, il n'est pas possible de malaxer au pulvimixer une couche foisonnée de plus de 20 cm d'épaisseur et un train de stabilisation ne peut absorber un cordon de matériaux foisonnés de plus de 1 m³ au mètre linéaire.

De même, l'emploi de la niveleuse ne permet pas d'obtenir une précision de réglage supérieure à 2 cm, alors qu'un répardage à la finisseuse s'effectue dans les meilleures conditions avec une précision de l'ordre du centimètre.

Enfin, compte tenu de la décroissance rapide des contraintes sous un pneu en fonction de la profondeur, il n'est pas possible d'obtenir des compactages homogènes au rouleau à pneus sur des épaisseurs supérieures à 15 cm pour les rouleaux légers, et supérieures à 20 cm pour les rouleaux moyens.

EPAISSEUR DE CHAUSSEE A PREVOIR SUR UNE PLATEFORME EN SABLE

Le graphique n°1 met en évidence l'influence du compactage et des conditions de drainage sur l'épaisseur totale de chaussée à prévoir sur une plateforme en sable.

Etant donné l'allure des courbes Proctor et la très faible variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour une intensité de compactage déterminée, le sable apparaît comme un matériau demandant une énergie de compactage modérée, dès que sa teneur en eau permet le passage des engins. Des compacités relatives de 95% du Proctor Modifié sont très facilement atteintes.

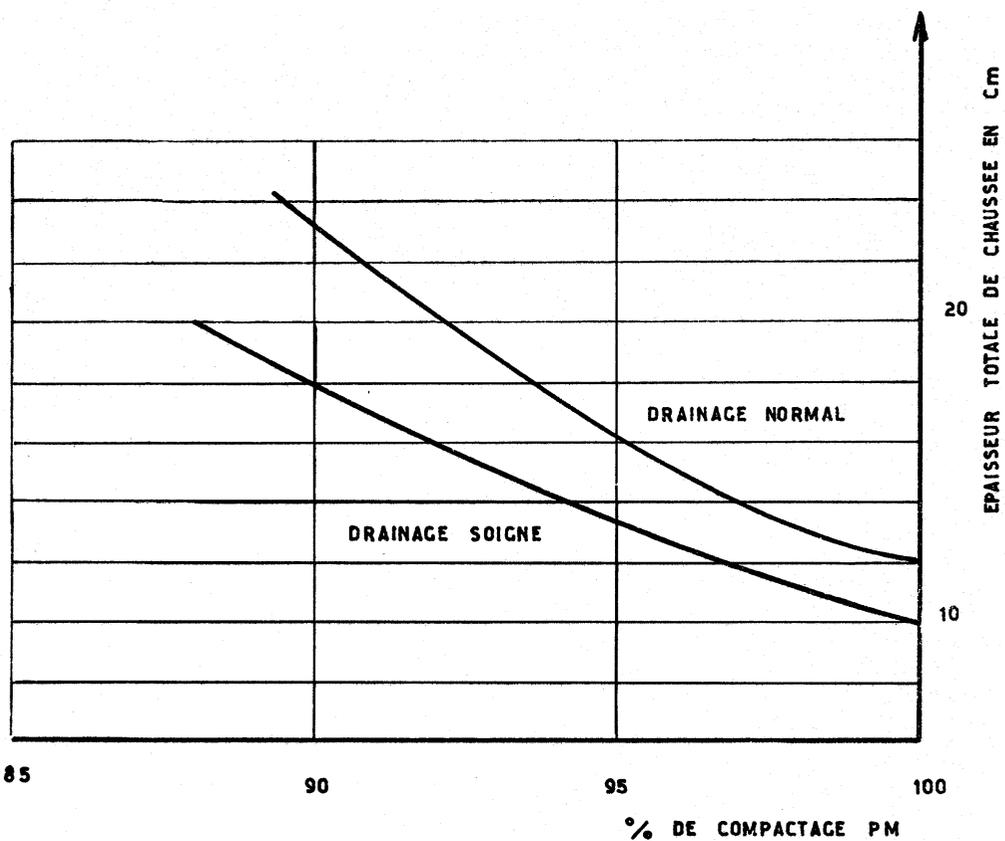
Si on tient compte du fait que l'essai C.B.R. s'applique mal au cas du sable et donne des valeurs de portance pessimistes, on peut admettre que les épaisseurs maximales de chaussée à prévoir seront d'environ 25 cm dans le cas d'une plateforme risquant l'imbibition et de 15 cm dans le cas d'une plateforme bien drainée et non sujette aux remontées capillaires.

Ce deuxième cas est d'ailleurs réalisé si le plan d'eau, situé dans le sable reste toujours à au moins 1 m. de profondeur sous la plateforme.

Dans le cas d'un drainage normal, il sera nécessaire de prévoir une couche de fondation surmontée d'une couche de base alors que dans le cas d'un drainage soigné on pourra se limiter à la réalisation de la seule couche de base à condition toutefois que le compactage de la plateforme soit porté au voisinage de 100% du Proctor Modifié.

INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE - FORME SUR L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

SABLE ARGILEUX
75 % S + 25 % A



85

90

95

100

% DE COMPACTAGE PM

20

10

ÉPAISSEUR TOTALE DE CHAUSSEE EN CM

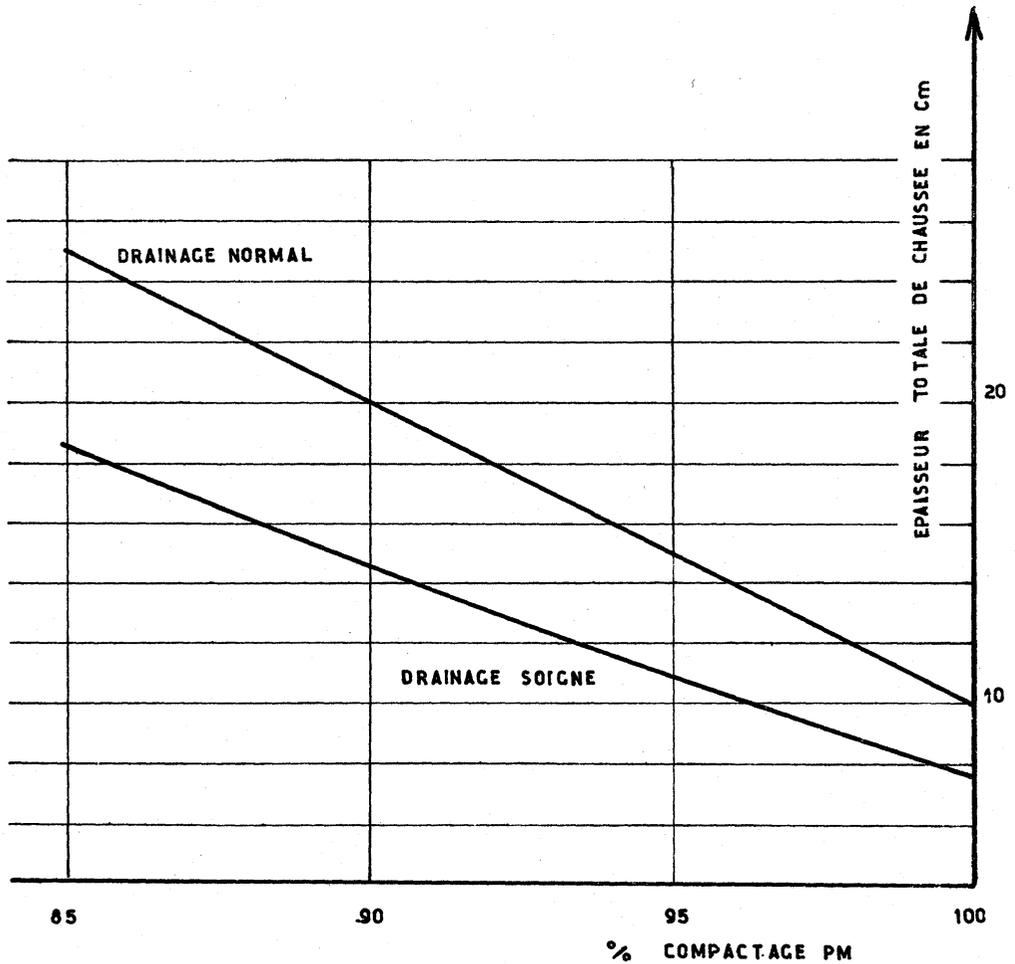
DRAINAGE NORMAL

DRAINAGE SOIGNE

Graph . 2

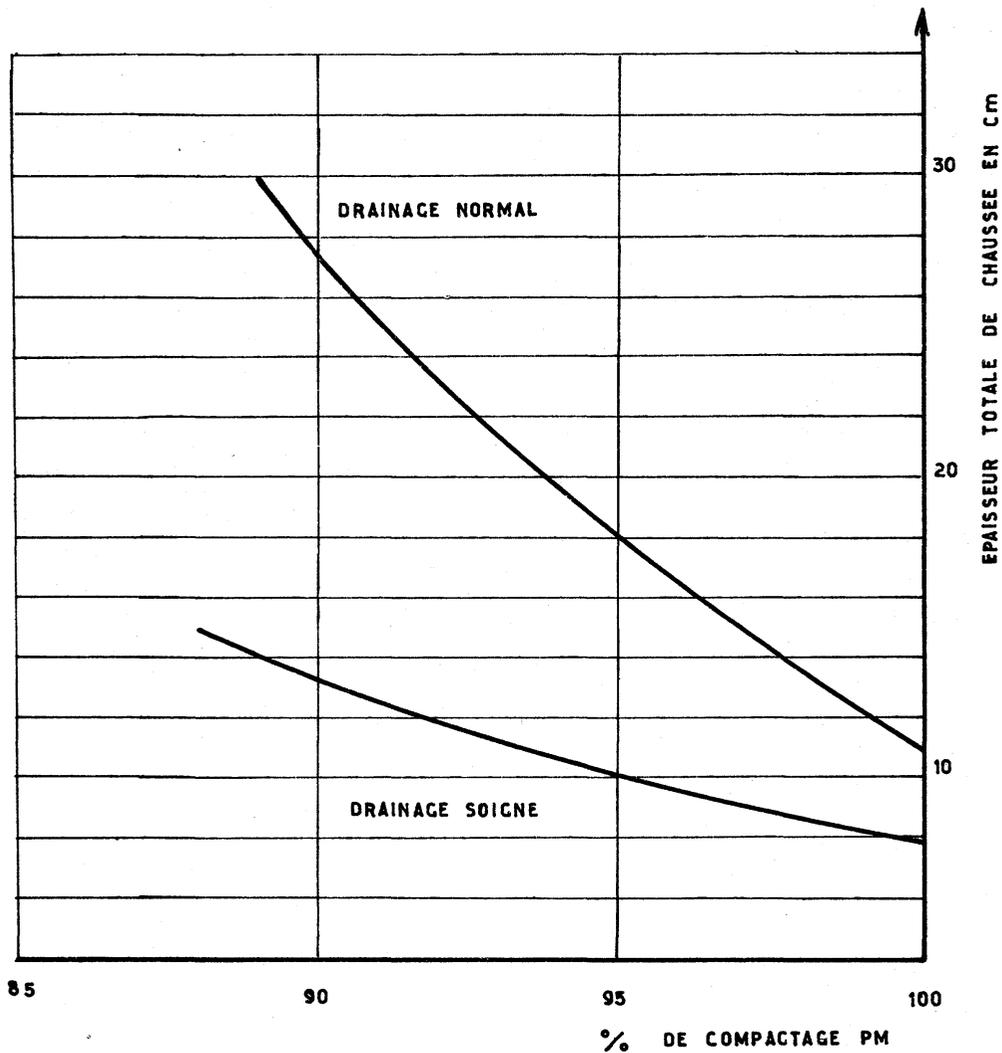
INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE - FORME SUR L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

SABLE ARGILE
50 % S + 50% A



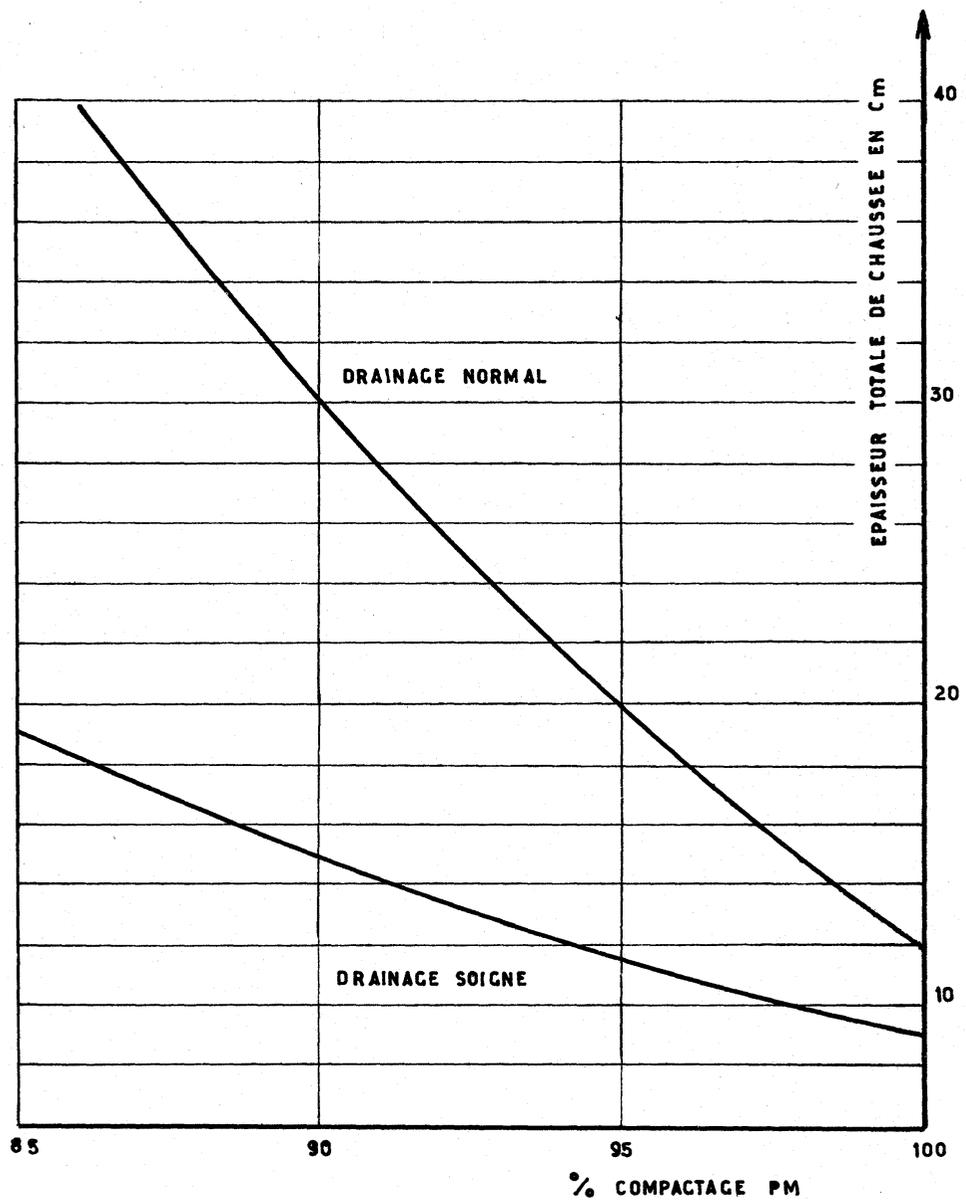
INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE - FORME SUR L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

ARGILE SABLEUSE
75% A + 25% S



INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE-FORME SUR L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

ARGILE A



EPAISSEUR DE CHAUSSEE A PREVOIR SUR UNE PLATE-FORME EN SABLE ARGILEUX

Le graphique n°2 met en évidence l'influence du compactage de la plate-forme et de son drainage sur l'épaisseur totale de chaussée à prévoir.

Dans le cas où la plate-forme est compactée à 95% PM, le corps de chaussée peut être réalisé sans prévoir de couche de fondation à condition que l'épaisseur de la couche de base soit d'au moins 13 cm dans le cas d'un drainage soigné et d'au moins 16 cm dans le cas d'un drainage normal.

Pour un compactage n'atteignant que 90% PM, les épaisseurs totales de chaussées à prévoir sont de 18 ou 23 cm, suivant que la chaussée est soigneusement ou normalement drainée. Pour de telles épaisseurs, il est indispensable de prévoir la réalisation d'une fondation.

Il est à noter que le sable argileux est un matériau facilement compactable à 95% du PM, à condition que la teneur en eau de compactage soit voisine de la teneur en eau optimale.

EPAISSEUR DE CHAUSSEE A PREVOIR SUR UNE PLATE-FORME EN SABLE-ARGILE

Les épaisseurs de chaussées nécessaires, compte tenu du compactage de la plate-forme et de ses conditions de drainage, sont indiquées au graphique n°3.

Dans le cas d'un drainage normal on pourra se contenter d'une couche de base de 15 cm d'épaisseur à condition de compacter la plate-forme à au moins 95% du Proctor Modifié.

La couche de fondation devient nécessaire pour des compactages plus faibles.

Si la plate-forme est soigneusement drainée, on peut éviter la couche de fondation à condition que le compactage de la plate-forme dépasse 90% PM.

EPAISSEUR DE CHAUSSEE A PREVOIR SUR UNE PLATE-FORME EN ARGILE SABLEUSE

Le graphique n°4 met en évidence l'influence du compactage de la plate-forme sur l'épaisseur totale de chaussée.

Dans le cas d'un drainage soigné, le corps de chaussée peut être constitué sans couche de fondation dès que le compactage atteint 90% PM.

Dans le cas où la plate-forme risque d'être soumise à imbibition, cette solution n'est possible que dans le cas où le compactage de la plate-forme atteint 98% PM.

EPAISSEUR DE CHAUSSEE A PREVOIR SUR UNE PLATE-FORME EN ARGILE

Les épaisseurs totales de chaussée en fonction du compactage de la plate-forme sont indiquées au graphique n°5.

Si la plate-forme se trouve dans des conditions telles qu'aucune imbibition ne soit à redouter, on pourra réaliser un corps de chaussée sans fondation à condition que le compactage de la plate-forme dépasse 90% PM.

Par contre, si cette plate-forme risque d'être imbibée, il ne sera pas possible de réaliser un corps de chaussée sans prévoir de couche de fondation anticontaminante. Les épaisseurs totales de chaussée varie alors de 30 à 40 cm pour des compacités relatives de 86 à 90% PM. Des compacités plus élevées risquent d'être illusoire en cas d'imbibition en raison du potentiel de gonflement de l'argile.

2.3.2. CHOIX DU MODE DE STABILISATION ET DES DOSAGES

1.- Généralités

Pour chaque type de sol, les études en laboratoire permettent de fixer, pour un compactage déterminé, le dosage nécessaire et suffisant pour obtenir un indice portant donné.

Les opérations en laboratoire impliquent une pulvérisation parfaite du matériau avant incorporation du liant, une distribution uniforme du liant dans le matériau et un compactage réalisé à la teneur en eau et à l'intensité voulues.

Il n'en est malheureusement pas de même sur chantier et une majoration des dosages proposés par le laboratoire s'avère généralement indispensable (1).

Dans le cas d'une stabilisation mécanique, il faut tenir compte du fait que les teneurs en eau optimales ne peuvent être réalisées qu'à un ou deux points près et que les densités sèches obtenues présentent toujours une certaine dispersion.

Dans le cas de la stabilisation aux liants hydrauliques, le surdosage à admettre sera fonction des possibilités de pulvérisation que permet le matériel utilisé avant incorporation du liant, de la régularité de répannage des distributeurs à liants et de la puissance de brassage du matériel de malaxage.

Le surdosage sera d'autre part fonction de l'importance des variations de résistance qu'entraînent d'éventuels écarts de dosage. Plus ces variations seront grandes, plus le surdosage à prévoir sera grand.

Ainsi quel que soit le type de sol, la sensibilité au dosage est plus grande dans le cas de la stabilisation au ciment que dans le cas de la stabilisation à la chaux. On adoptera donc une plus grande sécurité dans le premier cas.

Dans le cas d'une stabilisation aux liants hydrocarbonés, les dosages en eau et en liants indiqués par le laboratoire constituent des valeurs optimales qu'il y a lieu d'adopter sur le chantier. Un surdosage en liant conduit en effet, dans presque tous les cas, à une chute de la stabilité du mélange et doit donc être évité sur chantier.

2.- STABILISATION DU SABLE

STABILISATION MECANIQUE

La stabilisation mécanique des sables conduit à des valeurs C.B.R. qui restent très faibles. De nombreux auteurs reconnaissent d'ailleurs le caractère pessimiste des essais C.B.R. dans le sable et nous avons admis les valeurs minimales suivantes préconisées par Mr. PELTIER :

COMPACTITE RELATIVE PROCTOR MODIFIE	C.B.R.
100%	20%
95%	12%
90%	8%

(1) Les surdosages sur chantier et les conditions pratiquées minimales à imposer sont examinés au par. 2.3.7.

La stabilisation mécanique d'une plate-forme en sable est donc très souhaitable pour réduire l'épaisseur de la chaussée. Par contre, l'emploi du sable en couche de base est exclu, les indices portants étant trop faibles. En couche de fondation, le sable ne présente que peu d'intérêt sauf éventuellement pour servir de couche anticontaminante au-dessus d'une plate-forme très argileuse. Dans ce cas, il faudra prévoir un compactage compris entre 95 et 100% du Proctor Modifié.

STABILISATION AUX LIANTS HYDRAULIQUES

L'expérience a prouvé qu'en raison du pourcentage important de vides dans le sable pur, il était nécessaire de prévoir des dosages en ciment ou chaux assez élevés pour avoir des résultats satisfaisants.

L'examen des résultats des essais C.B.R. montre pourtant que l'indice portait croît assez rapidement lorsque le dosage en liant augmente surtout lorsque ce liant est du ciment.

A une compacité de 95% PM, on obtient déjà un C.B.R. de 80% avec 4% de ciment.

Le matériau reste cependant très fragile et l'essai C.B.R. doit être considéré comme donnant des résultats optimistes. Les résultats obtenus à la compression simple viennent d'ailleurs confirmer la fragilité des sables stabilisés avec de faibles pourcentages de liant.

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

La stabilisation du sable dunaire au moyen de liants hydrocarbonés fluides, incorporés à froid, se heurte à des difficultés dues aux caractéristiques physiques du sol, à sa granulométrie, à son indice des vides élevé et à son manque de cohésion.

La chute de résistance à 60°C du mélange sable-bitume est importante et les déformations à craindre sont principalement dues au fluage, par temps chaud, du matériau stabilisé.

Sachant que les températures relevées en Afrique sur des revêtements routiers hydrocarbonés atteignent 70° et même 80°C, il ne peut être question de négliger les effets de la température, même pour la couche située sous le revêtement.

Il semble peu probable que l'on puisse stabiliser le sable de dune au moyen de liants hydrocarbonés utilisés à froid, sans adjonction d'un autre matériau.

Par contre, s'il est traité simultanément avec 4% d'une émulsion basique et 3% de chaux, le sable conserve aussi bien à 60°C qu'après immersion, une stabilité acceptable. Ceci correspond à un dosage théorique.

Les dosages pratiques à respecter sur chantier, seront de :

- 5% d'émulsion 3% de chaux et 5 à 7% d'eau en couche de fondation
- 7% d'émulsion 3% de chaux et 5 à 7% d'eau dans la partie supérieure de la chaussée.

.3.- STABILISATION DU SABLE ARGILEUX

STABILISATION MECANIQUE

Par compactage, le sable argileux, normalement drainé, peut atteindre :

Un C.B.R. de 20 avec une compacité de 95% PM

Un C.B.R. de 40 avec une compacité de 100% PM

La stabilisation mécanique d'un sable argileux rencontré en plate-forme doit donc permettre la construction d'une chaussée formée d'une simple couche de base revêtue ayant une épaisseur de 12 à 16 cm suivant l'intensité du compactage de la plate-forme.

L'emploi d'un sable argileux stabilisé mécaniquement peut également être prévu en couche de fondation sur une plate-forme de moins bonne qualité. Par contre, son emploi en couche de base est exclu, les C.B.R. atteints étant généralement trop faibles.

STABILISATION A LA CHAUX

Le sable argileux stabilisé à la chaux peut être utilisé en couche de fondation dès que le compactage dépasse 95% PM. Le dosage pratique à prévoir pour la stabilisation sera, dans ce cas de 4% de chaux environ (1).

Le même matériau pourra être utilisé en couche de base à condition d'avoir un compactage plus poussé (98 à 100% PM) et un dosage en chaux de l'ordre de 5%.

STABILISATION AU CIMENT

Le sable argileux stabilisé au ciment peut être utilisé :

- soit en couche de fondation (compactage à 95% PM et 2% de ciment ou compactage à 90% PM et 4% de ciment)
- soit en couche de base (compactage 95% PM et 4% de ciment).

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

La stabilisation aux liants hydrocarbonés est possible en fondation et en couche de base au moyen de cut-back 10/15 ou de cut-back EK.2. La teneur en eau du sol doit être voisine de 7% pour le 10/15 et 5% pour l'EK.2; quant au dosage en liant, il doit être pratiquement de 5% dans les couches inférieures et de 6% dans les dix centimètres supérieurs de la couche de base.

La stabilisation à l'émulsion acide à 55% de bitume 100/120 est difficile à réaliser, le malaxage ne pouvant se faire qu'en présence d'un excès d'eau. Un séchage est donc nécessaire avant compactage. En climat humide, cette émulsion est donc à éviter.

(1) Nous avons admis qu'un C.B.R. de l'ordre de 40 était un minimum en couche de fondation, un C.B.R. de l'ordre de 80 un minimum en couche de base.

.4.- STABILISATION DU SABLE-ARGILE

STABILISATION MECANIQUE

Le mélange sable-argile stabilisé mécaniquement peut être utilisé soit en plate-forme, soit en couche de fondation.

Les C.B.R. atteints sont de :

- 20% pour une compacité relative de 95% PM
- 40% pour une compacité relative de 98% à 100% PM.

Suivant le cas, il faudra donc prévoir par dessus le sable-argilen soit 16, soit 12 cm de couche de base.

STABILISATION A LA CHAUX

Le sable-argile stabilisé à la chaux peut être utilisé en couche de fondation. Avec un compactage de 95% PM, il faudra prévoir un dosage pratique en chaux de 2% si la chaussée est soigneusement drainée et de 3% si elle est normalement drainée.

En couche de base, la stabilisation avec 4% de chaux donne de bons résultats à condition de pousser le compactage à 100% PM si la chaussée est normalement drainée et à 92 - 95% PM si la chaussée est soigneusement drainée.

STABILISATION AU CIMENT

La stabilisation au ciment est utilisable aussi bien en fondation qu'en couche de base. Avec un compactage de 95% PM il faudra prévoir en couche de base, un apport de 3 ou 4% de ciment suivant les conditions de drainage de la chaussée.

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

Le mélange sable-argile présente une nette tendance à gonfler en présence d'eau. Sa stabilisation ne semble pas possible par la seule utilisation de produits hydrocarbonés. Ceux-ci retardent mais n'empêchent pas la désagrégation du sol en cas d'imbibition. L'addition d'hydrophobants améliore la tenue du sol-bitume à l'eau mais il faut atteindre un dosage de 0,2% de produits par rapport au poids de sol sec pour obtenir une stabilisation satisfaisante.

Dans le cas du sol étudié, l'emploi d'émulsion n'est pas à conseiller. On peut utiliser, soit un cut-back ordinaire à condition que les moyens de malaxage permettent une dispersion satisfaisante de ce produit dans le sol, soit le cut-back dopé et émulsifié EK.2; ce produit est spécialement conçu pour la stabilisation des sols argileux.

Parmi les trois hydrophobants étudiés dont la nature est sensiblement la même mais dont le mode de dispersion est différent le STABIRAM 790 et le DOPE 4266 ont donné satisfaction pour un dosage hydrophobant de 0,2% du poids de sol sec.

La teneur théorique en produits bitumineux ne semble pas devoir être inférieure à 4% et on améliorera sensiblement la stabilité du mélange en adoptant un dosage supérieur. Sur chantier le dosage sera fixé à 5%.

Dans le cas d'un corps de chaussée soigneusement drainé, la stabilisation à la chaux est possible en couche de base et fondation à condition toutefois que la couche de base soit compactée au voisinage de 100% PM.

La stabilisation au ciment est praticable en couche de base et fondation. Dans le cas d'une couche de base sujette aux remontées capillaires, les dosages minimaux à adopter dépendent essentiellement du degré de compactage susceptible d'être réalisé : il devra atteindre pratiquement 100% PM pour un dosage de 7%.

Dans le cas d'une couche de base soigneusement drainée, il n'est pas possible de descendre au-dessous d'un dosage pratique de 5%.

Dans le cas de couche de fondation sujette à imbibition, les dosages pratiques minimaux admissibles passent de 4 à 8% suivant le compactage réalisable.

En aucun cas la stabilisation aux liants hydrocarbonés ne donne de résultats.

Pour l'argile et l'argile sableuse, les moyens de pulvérisation et de malaxage devront être très puissants par suite de la grande cohésion du sol. L'expérience montre que l'on a intérêt à opérer sur un matériau le plus sec possible.

Les conditions optimales d'exécution du sol-bitume consistent à opérer sur un dol dont la teneur en eau naturelle soit inférieur à la teneur en eau prévue pour le compactage. Le produit hydrophobant est dissous dans l'eau d'apport dont la quantité est calculée de telle sorte que le sol puisse être compacté immédiatement après le malaxage ou dans un délai de quelques heures.

Dans le cas des sols humides pour lesquels aucune eau d'apport n'est nécessaire; il faudra mélanger l'hydrophobant avec le cut-back.

5 - STABILISATION DE L'ARGILE SABLEUSE

STABILISATION MECANIQUE

La stabilisation mécanique ne confère pas au matériau une portance suffisante pour que celui-ci puisse être utilisé en couche de base.

En couche de fondation, le matériau est acceptable à condition que la chaussée soit soigneusement drainée et que le compactage atteigne 95%.

STABILISATION A LA CHAUX

La stabilisation à la chaux peut être envisagée en couche de fondation dans les chaussées normalement drainées pour améliorer la tenue à l'eau.

Le dosage pratique à prévoir serait de 6% de chaux avec un compactage de 95% PM.

En couche de base, il serait nécessaire de prévoir 6% de chaux avec un compactage de 95% PM si la chaussée est soigneusement drainée et 6% de chaux avec un compactage de 100% PM, dans le cas d'un drainage normal.

STABILISATION AU CIMENT

La stabilisation au ciment peut être envisagée en couche de fondation sur un sol compacté à 95% avec un dosage de :

- 5% pour une chaussée normalement drainée
- 3% pour une chaussée soigneusement drainée

En couche de base, il n'est pratiquement pas possible de descendre au-dessous de 6% de ciment si l'on veut obtenir une bonne tenue sous un revêtement superficiel léger. Le compactage devra être poussé à environ 100% PM pour une chaussée normalement drainée et à 90-95% PM pour une chaussée soigneusement drainée.

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

Aucun des liants hydrocarbonés utilisés n'a donné de résultats satisfaisants.

6 - STABILISATION DE L'ARGILE

STABILISATION MECANIQUE

Elle est impraticable en couche de base. Elle est possible en fondation et en plate-forme sous réserve qu'il ne se produise pas un gonflement éventuel provoqué par une saturation.

STABILISATION AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Dans le cas d'un corps de chaussée soumis à l'imbibition, la stabilisation à la chaux n'est pas à conseiller en fondation car elle demande un dosage prohibitif en liant, sauf pour un compactage de 100% PM. Elle n'est pas possible en couche de base.

GRANULOMETRIE DES SOLS TYPES

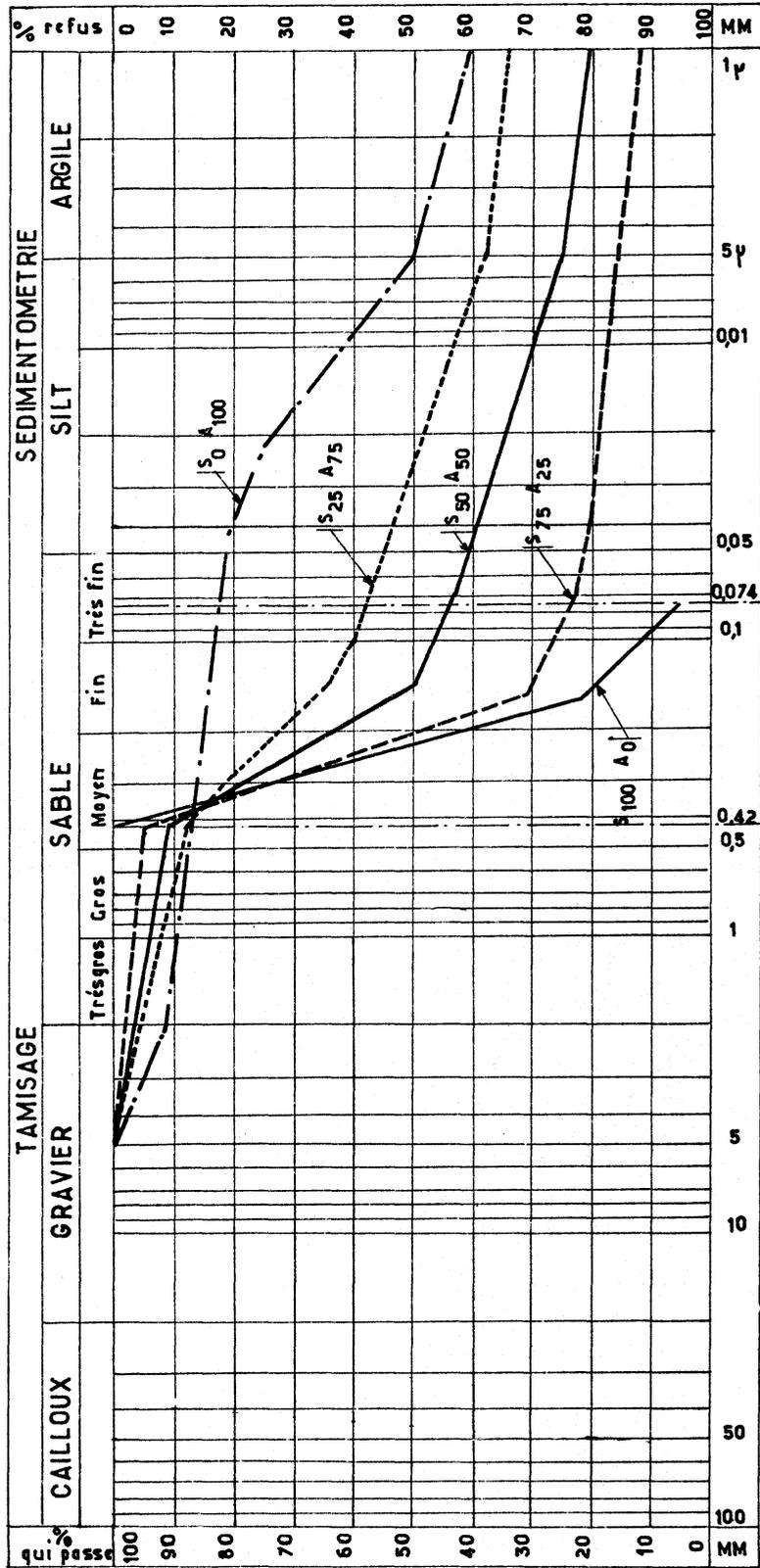
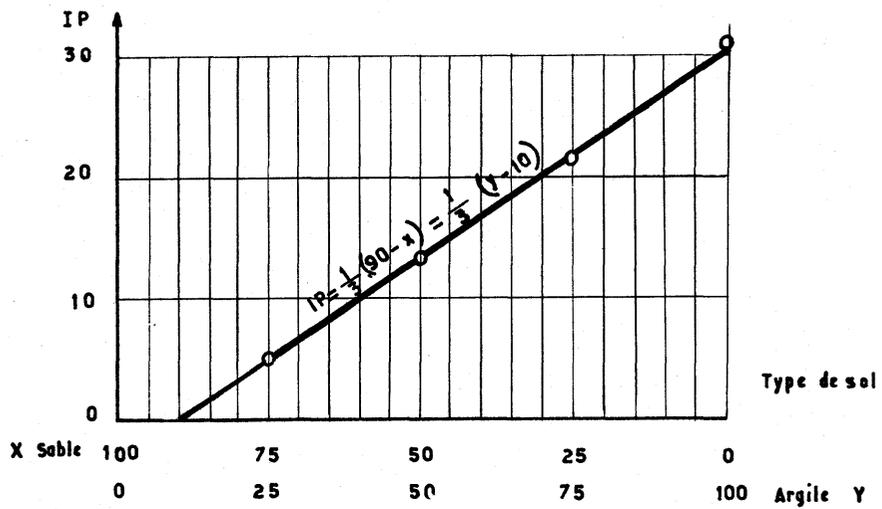
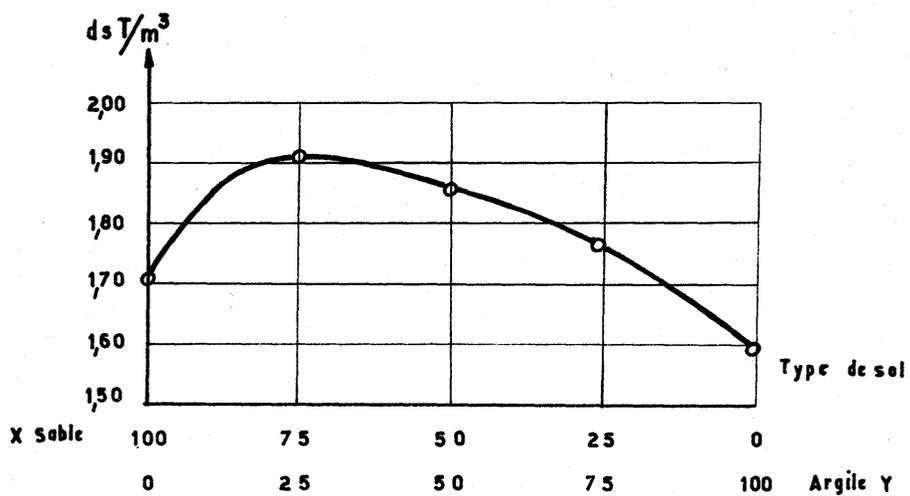


Fig. 1

VARIATION DE L'INDICE DE PLASTICITE EN FONCTION DU SOL SxAy.



VARIATION DE LA DENSITE SECHE MAXIMALE DU PROCTOR MODIFIE



7 - STABILISATION D'UN SOL INTERMEDIAIRE

Nous avons vu jusqu'à présent les règles à adopter dans le choix du mode de stabilisation et des dosages en ce qui concerne les mélanges-types de sols étudiés. Dans certains cas, le sol rencontré se situera entre deux mélanges types. Le présent paragraphe a pour but de préciser, dans la mesure du possible, les règles à observer quand on se trouve dans ces cas.

1°) DETERMINATION DU MELANGE Sx Ay EQUIVALENT AU SOL ETUDIE

Le mélange Sx Ay est tel qu'il contient x% de sable et y% d'argile.

Nous avons étudié, en fonction de x et y, grâce aux résultats que nous possédons, les variations

- de la granulométrie (fig.1)
- de l'indice de plasticité (fig.2)
- de la densité sèche maximale du Proctor Modifié (fig.3)
- de la classe U.S.H.R.B. (United States Highway Research Board)

Soit donc un sol quelconque dont nous connaissons les quatre caractéristiques ci-dessus.

a) Granulométrie

On tracera sur le graphique de la figure 7 la courbe granulométrique (C) du sol étudié. Cette courbe (C) viendra s'intercaler entre celles de deux mélanges-types; x et y seront fixés en interpolant entre les couples de valeurs correspondant aux deux courbes qu'encadrent (C).

Il peut arriver que la courbe (C), au lieu de s'insérer entre les courbes du réseau, les coupe sous un certain angle. Ceci se produira en particulier pour les silts. Il va de soi que, dans ce cas, la méthode ci-dessus n'est pas applicable? Néanmoins, si l'intersection se produit seulement du côté des éléments les plus gros, on pourra pour l'interpolation, ne prendre en compte que les parties de courbes correspondant aux éléments fins.

b) Indice de plasticité

x et y pourront également être déterminés en utilisant les relations

$$IP = \frac{1}{3} (90 - x) = \frac{1}{3} (y - 10)$$

déduites des essais et dont la droite représentative a été portée figure 8.

c) Densité sèche maximale du Proctor Modifié

De la même manière, la courbe de la figure 9 donnera les valeurs de x et y si la densité sèche maximale du Proctor Modifié est connue, sous réserve toutefois que le poids spécifique ne diffère pas trop sensiblement de celui des matériaux examinés dans la présente étude.

STABILISATION MECANIQUE

CONDITIONS PRATIQUES MINIMALES A IMPOSER

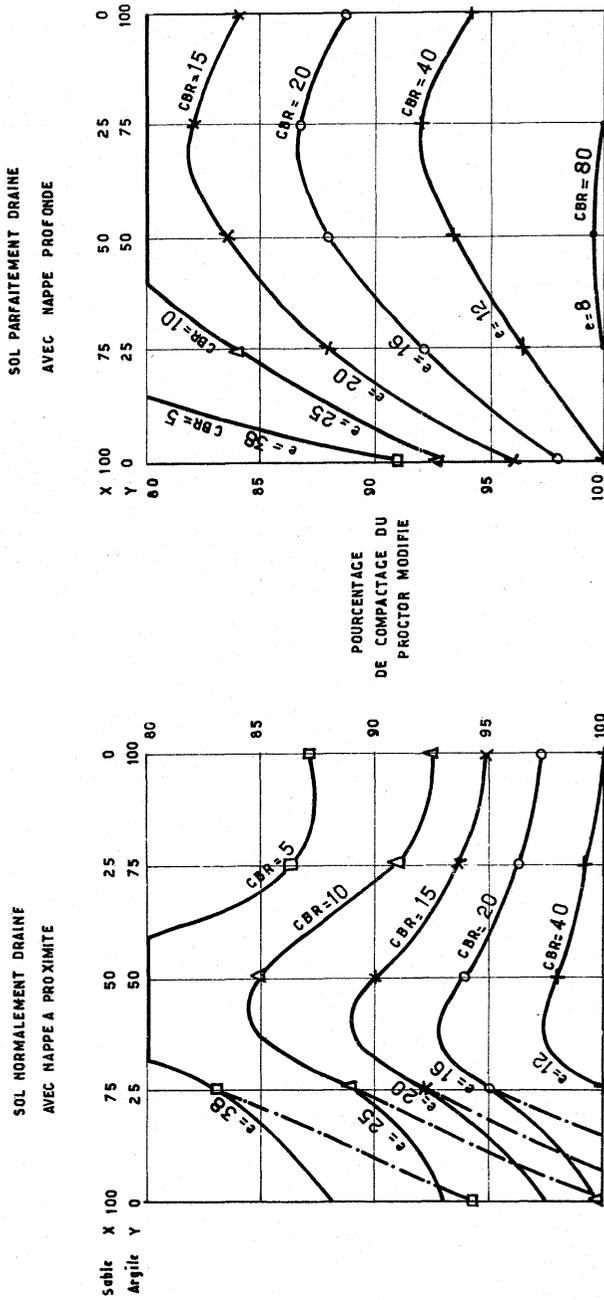


Fig.5

EXEMPLE DE RECHERCHE DU SOL EQUIVALENT

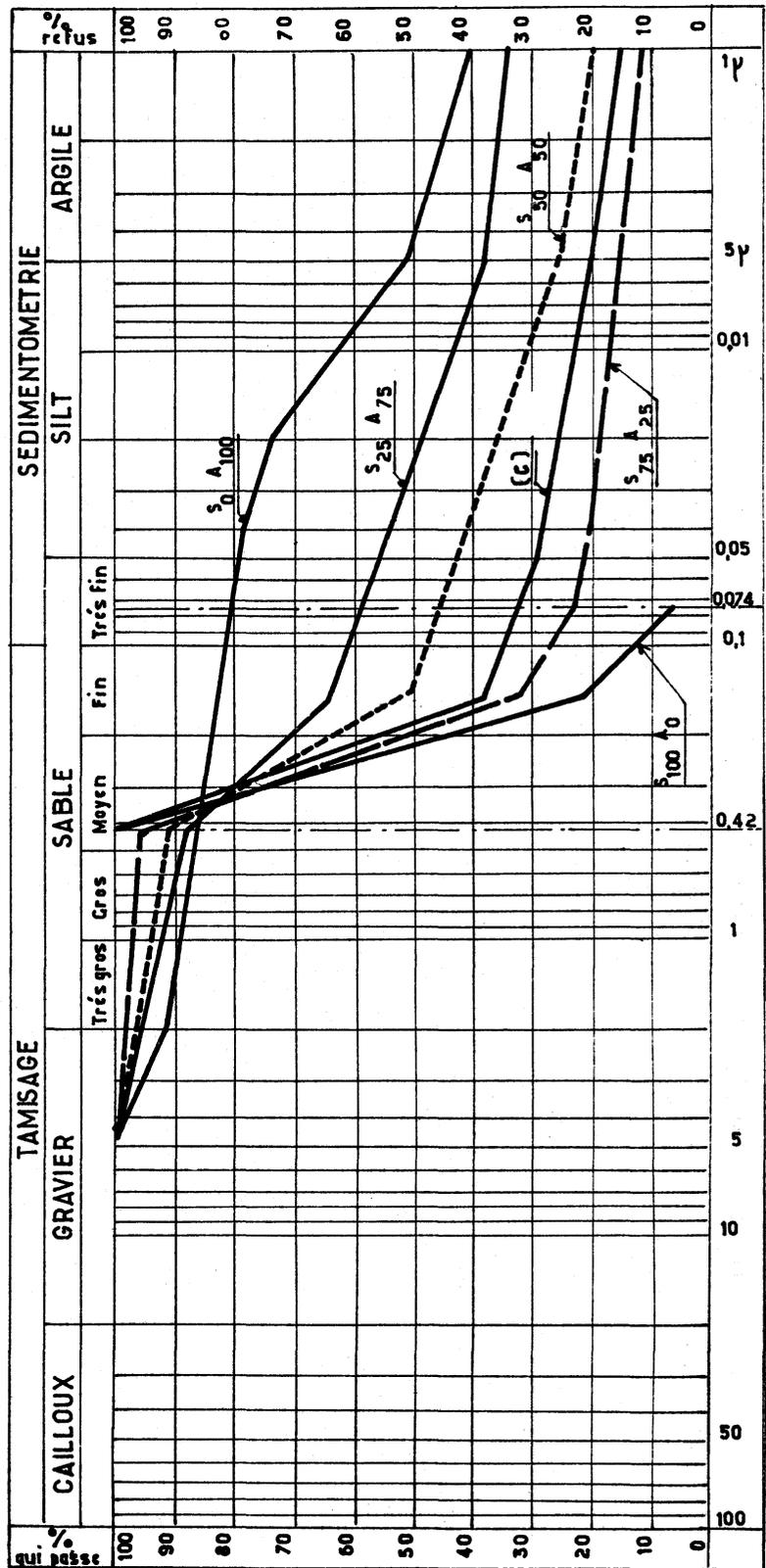


Fig. 4

d) Classe U.S.H.R.B.

Enfin, les valeurs trouvées pourront être recoupées avec celles correspondant aux classes des différents sols-types étudiés :

x	100	75	50	25	0
y	0	25	50	75	100
classe	A ₃	A ₂	A ₆	A ₇	A ₇

Nous supposerons donc que les méthodes exposées ci-dessus ont conduit à adopter pour x et y des valeurs bien déterminées, autrement dit que le mélange Sx Ay équivalent au sol étudié est connu.

Dans cette hypothèse, nous allons étudier les conditions à imposer à ce sol afin qu'il résiste au trafic prévu suivant le type de stabilisation qu'on lui a fait subir.

Mais auparavant, il n'est pas superflu de donner un exemple de recherche de sol équivalent :

EXEMPLE 1

Supposons que les essais sur le sol étudié nous aient fourni :

- la granulométrie représentée sur la fig.4 par la courbe (C)
- l'indice de plasticité : IP = 8 (LL=42)
- la densité maximale du Proctor Modifié : 1,89 T/m³
- la classe U.S.H.R.B. : A₂ - 5

(voir manuel du Laboratoire Routier de Mr. PELTIER page 72)

La figure 4 donne x = 65 y = 35

La figure 3 donne x = 63 y = 37

La figure 2 donne x = 60 y = 40

La classe U.S.H.R.B. A₂ - 5 se recoupe bien avec le tableau du d)

On prendra : x = 63 y = 37

→ Il peut arriver que la détermination de x et y par cette méthode donne des valeurs dispersées.

Dans ce cas, afin d'être du côté de la sécurité, l'on retiendra, faute d'autres éléments, la valeur la plus défavorable.

2°) STABILISATION MECANIQUE

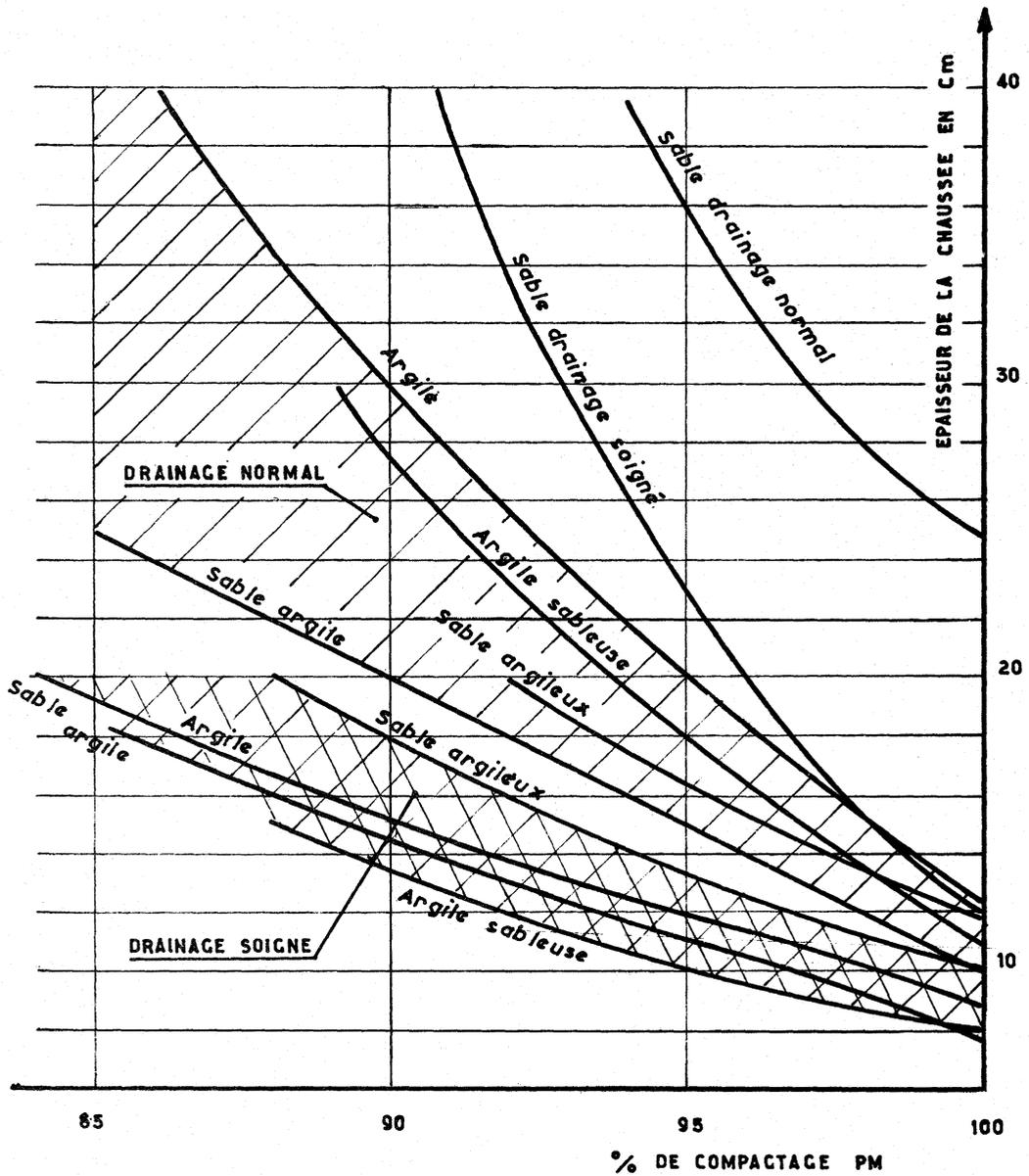
Nous avons reporté figure 5, pour les deux cas de drainage, le pourcentage de compactage du Proctor Modifié en fonction du type de sol rencontré et ceci pour différentes valeurs du C.B.R.

Ces deux réseaux de courbes qui résument les différentes conclusions relatives à chaque sol-type stabilisé mécaniquement, appellent les remarques suivantes :

- e en cm représente l'épaisseur de chaussée surmontant la couche envisagée et correspondant au trafic que l'on s'est ficé (450 véhicules par jour d'un poids en charge supérieur à 3 tonnes).

Les courbes étant repérées également en C.B.R. leur utilisation ne pose pas de difficulté dans le cas d'un changement de trafic.

INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE-FORME SUR L'ÉPAISSEUR TOTALE DE LA CHAUSSEE



Graph. 6

- Par ailleurs, le tracé expérimental (en traits mixtilignes) a été modifié pour $75 < x$, suivant la méthode préconisée par Mr. PELTIER et exposée en 232.
- les courbes ont été poursuivies jusqu'à de faibles valeurs du compactage, ce qui pourra paraître superflu.

Néanmoins, les très fortes teneurs en eau rencontrées dans beaucoup de sols africains et l'impossibilité où l'on se trouve de les ramener à la valeur de l'optimum Proctor par suite de l'humidité ambiante nous ont conduits à considérer ces faibles compactages.

Les abaques de la figure 5 font apparaître clairement que l'optimum se situe vers 60% de sable dans le cas d'un drainage normal et vers 70% d'argile dans le cas d'un drainage soigné.

On aura donc intérêt à étudier d'abord les possibilités de correction granulométrique du sol donné pour le ramener dans chaque cas de drainage, aux valeurs optimales ci-dessus.

En outre, comme un C.B.R. de 80 semble être un minimum pour une couche de base, on voit immédiatement que la stabilisation mécanique n'est possible qu'en plate-forme ou fondation pour un sol normalement drainé. Dans le cas d'un drainage parfait, la stabilisation mécanique peut être envisagée en couche de base si $25 < x < 75$ mais à condition de prévoir pratiquement 100% du PM.

Notons par ailleurs que l'emploi de matériau argileux est à déconseiller d'une façon générale lorsqu'il y a des risques de saturation du sol en raison du potentiel de gonflement des sols argileux qui est d'autant plus élevé que le compactage est plus poussé.

REMARQUE : INFLUENCE DU COMPACTAGE DE LA PLATE-FORME SUR L'ÉPAISSEUR TOTALE DE LA CHAUSSEE

La stabilisation mécanique est la seule à envisager en plate-forme. Le graphique n°6 donne pour chaque type de sol étudié et en fonction des conditions de drainage de la plate-forme, les épaisseurs totales de chaussée nécessaires, compte tenu du compactage de cette plate-forme.

Ce graphique met en évidence le comportement très différent suivant les conditions de drainage de la plate-forme et suivant que le matériau est rigoureusement sans cohésion ou, au contraire, pourvu d'un minimum de cohésion.

Dans le cas où la plate-forme ne présente pas de risque d'imbibition, on constate :

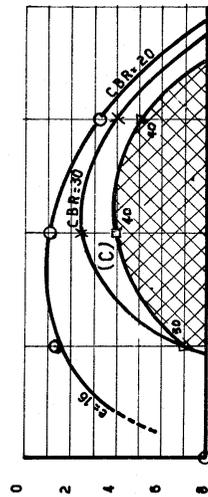
- que les épaisseurs totales de chaussée nécessaires varient très peu suivant la nature du matériau dès que celui-ci possède un minimum de cohésion
- que l'on peut réaliser un corps de chaussée sans fondation dès que le compactage de la plate-forme atteint 95% PM, ce qui est réalisable dans la plupart des cas.

Dans le cas où la plate-forme risque de subir des imbibitions on constate :

STABILISATION A LA CHAUX

CONDITIONS THEORIQUES MINIMALES A IMPOSER

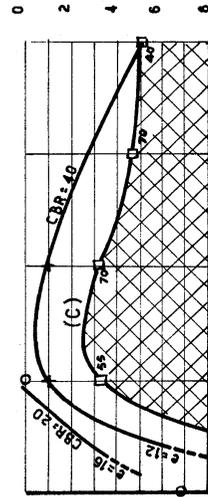
SOL NORMALEMENT DRAINE
AVEC NAPPE A PROXIMITE



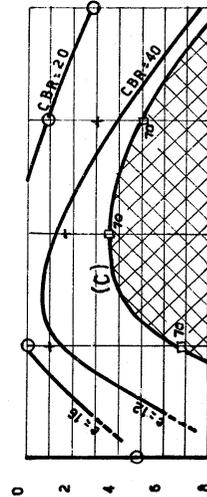
POURCENTAGE DE COMPACTAGE DU PROCTOR MODIFIE

90%

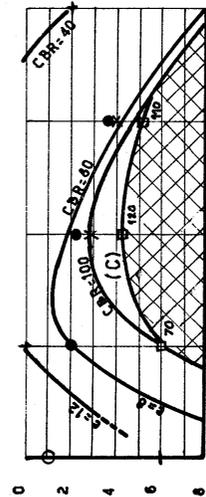
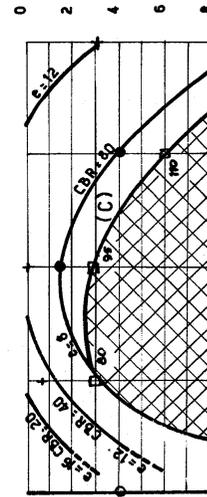
SOL PARFAITEMENT DRAINE
AVEC NAPPE PROFONDE



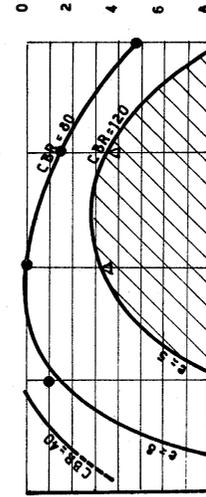
DOSAGE EN CHAUX EN %



95%



100%



Sable X

Sable X

Argile Y

Argile Y

Fig. 6

STABILISATION A LA CHAUX

SURDOSAGE A ADOPTER SUR CHANTIER (1)

Mode de Mise en Oeuvre	Nature du sol	Sable	Sable argileux	Sable argile	Argile sableuse	Argile
MALAXAGE par PASSES MULTIPLES	Niveleuse (déplacement de cordon)		3,0			
	Charrues à disques		2,0	2,5		
	Rotavator porté		2,0	2,5	2,5	
	Pulvimixer		1,5	2,0	2,5	2,5
MALAXAGE par PASSE UNIQUE (Centrales Mobiles)	Trains de stabilisation à palettes		1,5	2,0	2,0	2,5
	Trains de stabilisation à rotors		1,0	1,5	1,5	2,0
MALAXAGE en CENTRALES FIXES	Batterie de Béténnières		1,0	2,5		
	Centrales fixes		1,0	1,5	1,5	2,0

(1) Le dosage pratique ne doit pas être inférieur à 2%.

NOTA: Les surdosages indiqués sont destinés à compenser un éventuel défaut de malaxage, le répandage de liant étant supposé uniforme.

- que l'épaisseur de chaussée nécessaire est beaucoup plus variable suivant la nature du matériau que dans le cas d'un drainage soigné.
- que le compactage a une influence beaucoup plus marquée sur cette épaisseur que dans le cas d'un drainage soigné.
- que même dans le cas d'une plate-forme risquant une imbibition on peut limiter l'épaisseur totale de chaussée à 20 cm, dès que le compactage atteint 95% PM.
- que même s'il existe un risque d'imbibition, on peut éviter la fondation en compactant la plate-forme au voisinage de 100% PM ce qui implique bien entendu, que la teneur en eau de cette plate-forme soit voisine de l'optimum Proctor Modifié.

En résumé on a tout intérêt à prévoir pour la plate-forme le compactage le plus lourd possible et à assurer un drainage soigné de l'ensemble du corps de chaussée, plate-forme comprise.

Ce drainage est réalisable dans la plupart des cas à condition de couper la remontée capillaire et d'empêcher toute pénétration d'eau par les accotements, ce qui conduit à proscrire la réalisation d'encaissements et implique un compactage et une imperméabilisation des accotements.

3°) STABILISATION A LA CHAUX

Sur la figure 6, il a été reporté pour les deux cas de drainage et pour les compactages de 90%, 95% et 100% du Proctor Modifié, le dosage en chaux, en fonction du type de sol rencontré. Nous avons pu tracer ainsi, dans ces différents cas, les courbes d'égal C.B.R. qui résument les différentes conclusions faites pour chaque sol-type stabilisé à la chaux.

Ces réseaux de courbes appellent les remarques suivantes :

- e en cm représente l'épaisseur de chaussée surmontant la couche envisagée et correspondant au trafic que l'on s'est ficé.
- le tracé a été arrêté pour $< x$.

En effet, on a pu se rendre compte dans l'étude du sable, en comparant les résistances à la compression simple et les C.B.R. que ces derniers donnaient des résultats par trop optimistes : en réalité la chaux joue, dans ce cas, un rôle de correcteur granulométrique, ce qui ne correspond pas évidemment, au but recherché. Il est donc exclu pratiquement de l'employer pour un sable pur; il sera bien plus intéressant, comme le démontre clairement les courbes de la figure 6, d'additionner ce sol d'un peu d'argile.

Certaines aones sont hachurées : d'abord celles correspondant à un C.B.R. supérieur à 120 (hachures parallèles).

En effet, pour le trafic étudié, un C.B.R. supérieur à cette valeur ne diminue en rien l'épaisseur de chaussée surmontant la couche ayant un tel C.B.R.

D'autre part, les courbes de variation du C.B.R. en fonction du dosage présentant parfois un maximum, nous avons limité les dosages et obtenu ainsi une courbe (C) des dosages à ne pas dépasser. Le C.B.R. relatif à ce maximum est indiqué, pour chaque sol-type, sur la courbe (C). Les zones correspondantes sont couvertes de hachures croisées.

STABILISATION AU CIMENT

CONDITIONS THEORIQUES MINIMALES A IMPOSER

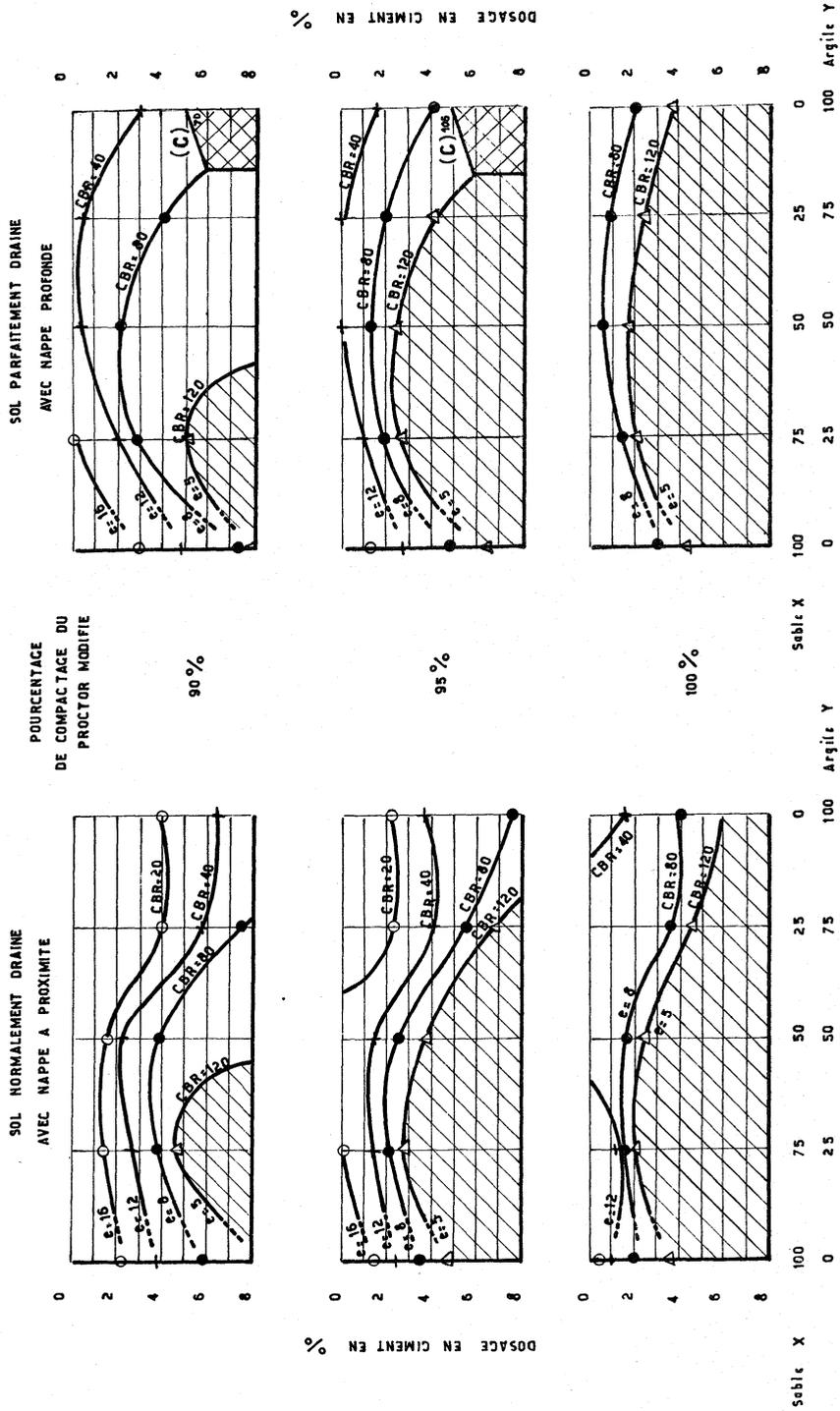


Fig. 7

STABILISATION AU CIMENT

SURDOSAGE A ADOPTER SUR CHANTIER (1)

Mode de Mise en Oeuvre	Nature du sol	Sable			
		Sable argileux.	Sable Argile	Argile sableuse	Argile
MALAXAGE par	Niveleuse (déplacement de cordon	2,0			
	Charrues à disques	1,5	2,5		
	Rotavator porté	1,0	2,0	2,5	
PASSES MULTIPLES	Pulvimixer	0,5	1,5	2,0	2,5
	Trains de stabilisation à palettes	0,5	1,5	2,0	2,5
MALAXAGE par PASSE UNIQUE (Centrales mobiles)	Trains de stabilisation à rotors	0,5	1,0	1,5	2,0
	Batterie de Bétonnières	1,0	2,0		
CENTRALES FIXES	Centrale fixes	0,5	1,0	1,5	2,0

Sable
 Dosage minimal total : 7%
 en couche de base : 5%
 en fondation

(1) Le dosage pratique ne doit pas être inférieur à 1,5%

NOTA : Les surdosages indiqués sont destinés à compenser un éventuel défaut de malaxage, le répannage de liant étant supposé uniforme/

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

CONDITIONS PRATIQUES MINIMALES A IMPOSER

Nature et destination du liant		Nature du Sol		Sable	Sable argileux	Sable Argile	Argile sableuse	Argile
		Couche de base	Fondation					
CUT BACK 50/100	Couche de base	/						
	Fondation	/						
CUT BACK 10/15	Couche de base			6% cut-back 7% eau				
	Fondation			5% cut-back 7% eau				
CUT BACK EK.2	Couche de base			6% EK.2 5% eau		5% EK.2 0,2% Dope 4266 ou 0,2% Stabiram		
	Fondation			5% EK.2 5% eau		5% EK.2 0,2% Dope 4266 ou 0,2% Stabiram		
EMULSION BASIQUE	Couche de base			7% Emulsion 3% chaux 5 à 7% eau				
	Fondation			5% Emulsion 3% chaux 5 à 7% eau				
EMULSION ACIDE	Couche de base				6% Emulsion (Excès d'eau)			
	Fondation				6% Emulsion (Excès d'eau)			

Il faut souligner d'ailleurs que les courbes de la figure 6 sont relatives à des dosages théoriques. Pour passer aux applications de chantier, on sera obligé de surdoser, pour des raisons de mise en oeuvre et de bonne dispersion dans le matériau. Les surdosages à adopter en fonction du mode de mise en oeuvre sont consignés dans le tableau I. En tout état de cause, on ne descendra pas en-dessous d'un dosage pratique de 2%.

D'une façon générale, les sols améliorés à la chaux perdent une partie de leur liant lorsqu'ils sont soumis à une forte circulation d'eau, ce qui se produira en général, dans les conditions d'utilisation. Il est donc souhaitable de les revêtir soit d'un tapis d'enrobés, soit de tout autre revêtement peu perméable.

4°) STABILISATION AU CIMENT

Nous avons établi, pour les deux cas de drainage, des courbes analogues à celles du paragraphe précédent (voir fig.7).

Les remarques à faire sur ces différentes courbes sont semblables à celles du 3°).

Les surdosages à adopter, en fonction du mode de mise en oeuvre sont consignés dans le tableau n°II. On ne descendra pas ici en-dessous d'un dosage pratique de 1,5%. Les dosages maxima sont fixés par des raisons économiques et aussi par le fait que pour les forts pourcentages, on passe à la technique des sols-ciment.

De même que précédemment et pour une raison identique, il sera souhaitable de revêtir les sols amendés au ciment, soit d'un tapis d'enrobés, soit de tout autre revêtement peu perméable.

Les règles de bonne construction des chaussées imposent d'avoir des assises de plus en plus perméables et de moins en moins résistantes quand on descend dans le corps de chaussée.

Par conséquent, les sols stabilisés aux liants hydrauliques formeront, en général, une couche de base. La couche de fondation sera le plus souvent, faite avec le même matériau non amendé dont la résistance est plus faible et dont la perméabilité est équivalente.

5°) STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

Etant donné les nombreuses variables qui entrent en ligne de compte, à savoir :

- la nature du sol,
- le compactage,
- la stabilité Hubbard Field
- le dosage en liant hydrocarboné
- le dosage en eau
- le dosage en dope

Il n'a pas été possible de tracer de courbes continues permettant "l'interpolation" entre deux sols-types. Nous avons simplement relevé dans le tableau III la nature et la destination du liant en fonction du sol-type envisagé.

Il faut noter à propos de ce mode de stabilisation que, pour certains liants, le malaxage ne peut se faire d'une façon satisfaisante qu'en présence d'un excès d'eau. Par conséquent, si l'hygrométrie ambiante le permet, il faudra attendre le séchage, sinon le liant en question sera à écarter.

EXEMPLE 2

Emploi des abaques et des tableaux précédents :

Reprenons le sol de l'emple 1. Nous supposons que le drainage s'effectuera normalement et que les moyens de compactage ne permettent pas de dépasser 95% du Proctor Modifié. Que pouvons-nous envisager comme stabilisation pour un tel sol?

- en plate-forme : la figure 6 nous montre qu'on peut atteindre, pour 95% du PM., un C.B.R. de 25; l'épaisseur totale de la chaussée sera donc de 15 cm.
- en couche de fondation : l'épaisseur totale de chaussée étant de 15 cm, la couche de fondation n'est pas nécessaire.
- en couche de base : un C.B.R. de 80 est un minimum. La stabilisation à la chaux est impossible. La figure 7 montre qu'il faudra un dosage théorique de 2% ciment. En supposant que le malaxage se fasse au pulvimixer, nous voyons que le tableau II impose un surdosage compris entre 0,5% (sable argileux) et 1,5% (sable argile). Nous prendrons 1%. Le dosage pratique sera donc de 3% de ciment.

Le tableau III nous démontre que la stabilisation aux liants hydrocarbonés est également possible : 6% d'EK.2 semble un pourcentage suffisant. Néanmoins, le dosage en dope devra être précisé par une étude particulière.

2.4 - REMARQUES SUR LA STABILISATION AU LIGNO-SULFITE

Nous avons cru bon de signaler ici deux études de stabilisation au ligno-sulfite, entreprises en dehors du cadre que nous nous sommes fixés.

- la première est exposée dans la Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, numéro spécial Sahara n°329. Nous ne ferons que la reprendre.
- la seconde a été entreprise par le laboratoire d'Alger au C.E.B.T.P. en 1959-60. Nous en rappelons les résultats essentiels.

Le ligno-sulfite est le résultat de la déshydratation des lessives acides bisulfiteuses utilisées pour éliminer la lignine dans l'extraction de la cellulose du bois de pin.

C'est une poudre marron foncé de densité 0,5. Ses propriétés agglutinantes sont très remarquables.

Les résultats présentés dans la revue des Routes sont les suivantes :

Temps de séchage à l'étuve à 100° -----	POURCENTAGE DE LIGNO-SULFITE (en poids de matériau sec)					
	0		1		2	
	Rc en kg/cm ²	% d'eau résiduel- le	Rc en kg/cm ²	% d'eau résiduel- le	Rc en kg/cm ²	% d'eau résiduel- le
0 heure	1,8	5,1	2,3	5,2	-	-
7 jours	9,0	0	24,0	0,1	42	0,9
15 jours	9,0	0	26,0	0,1	57,5	0,3
30 jours	32	0	33,7	0,1	65	0,2

Ils sont relatifs à un sable peu cohérent du Gassi-Touil dont la granulométrie est décrite sur la figure 1.

Au laboratoire du C.E.B.T.P. d'Alger, 2 matériaux de granulométrie différente (fig.2 et fig.5) ont été étudiés.

Des essais de résistance à la compression et à la traction ont été effectués sur des éprouvettes de vingt huit jours d'âge à différentes teneurs en ligno-sulfite. Les résultats portés sur la fig.3 correspondent au matériau défini par la granulométrie de la fig.2 et ceux de la fig.6, en matériau défini par la granulométrie fig.5.

On a aussi tracé (fig.4 et 7 avec les mêmes conventions) les variations de module de déformation en fonction du dosage en ligno-sulfite.

On voit qu'un dosage de 1% suffit pour donner des résistances à la compression de l'ordre de 30 kg/cm². Ces résultats sont remarquables; il faut cependant souligner que les modules de déformation croissent aussi de façon très importante et l'on peut être en présence de matériau trop rigide pour certains emplois routiers.

Une remarque s'impose au sujet de ce stabilisant; il semble qu'il soit assez sensible à l'eau ce qui limiterait son application aux régions à climat aride.

Cette stabilisation est une solution possible pour des sols médiocres mais nécessiterait cependant des études spéciales pour définir le domaine de son application.

STABILISATION AU LIGNOSULFITE

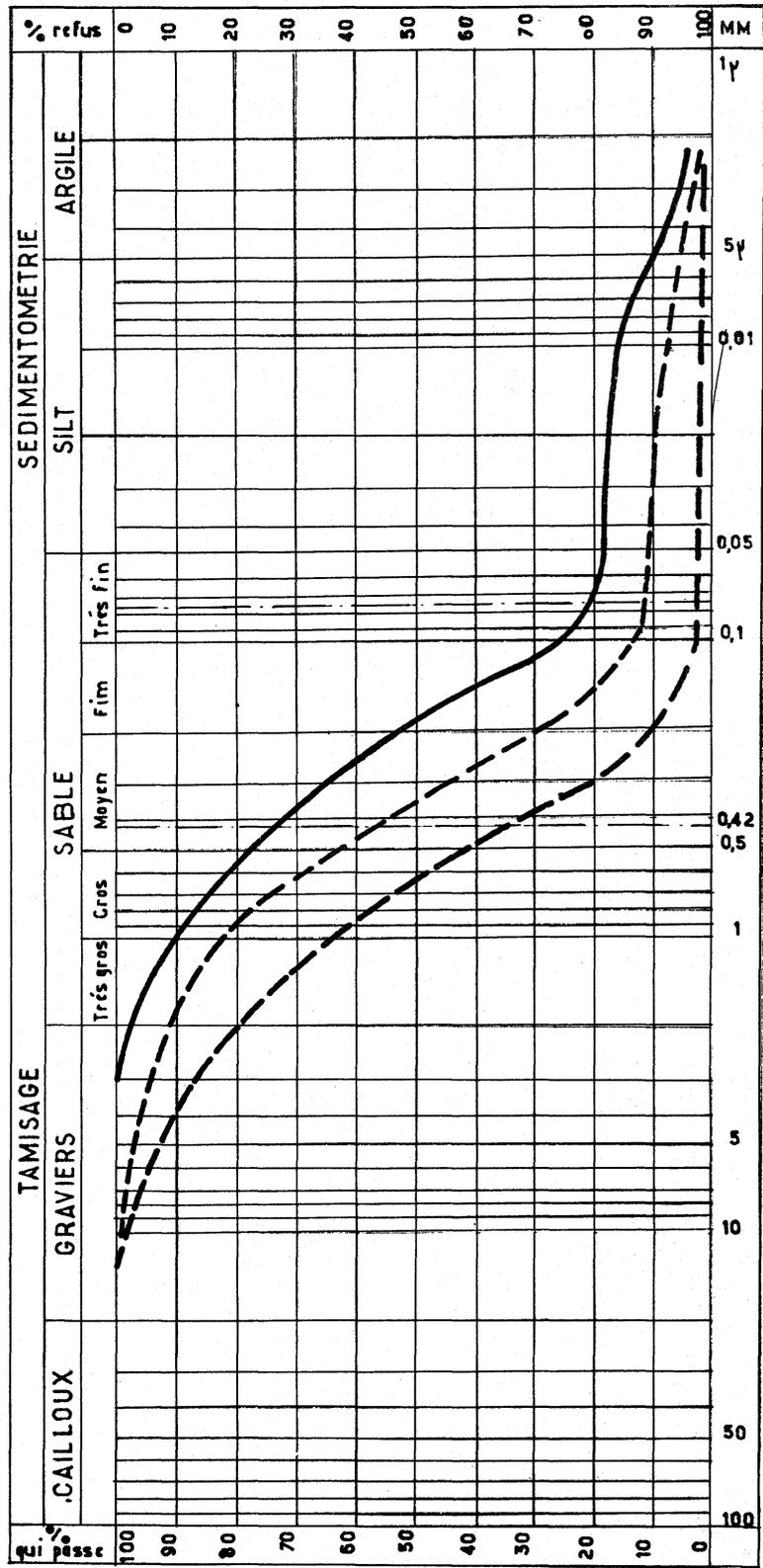


Fig 1

STABILISATION AU LIGNOSULFITE

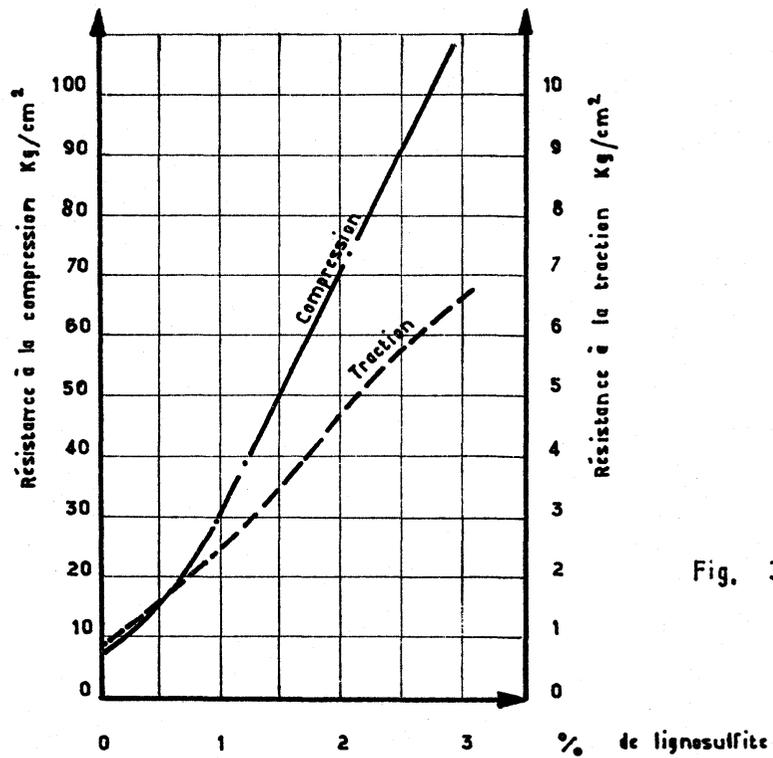


Fig. 3

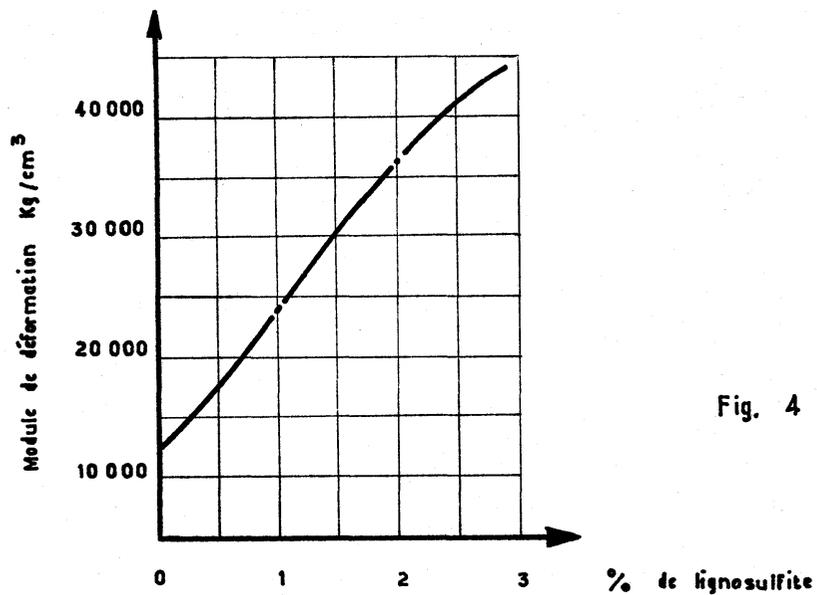


Fig. 4

STABILISATION AU LIGNOSULFITE

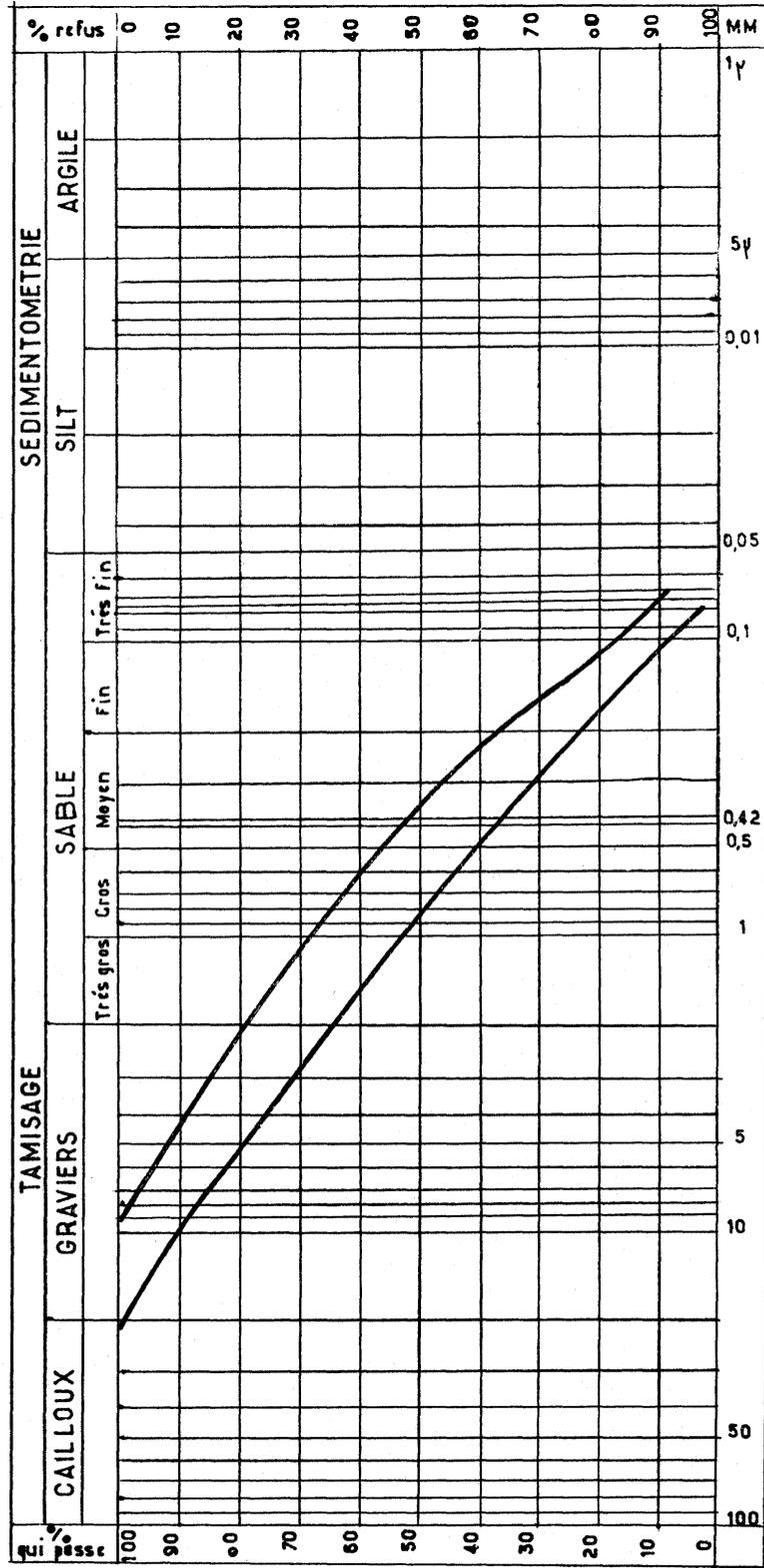


Fig. 5

STABILISATION AU LIGNOSULFITE

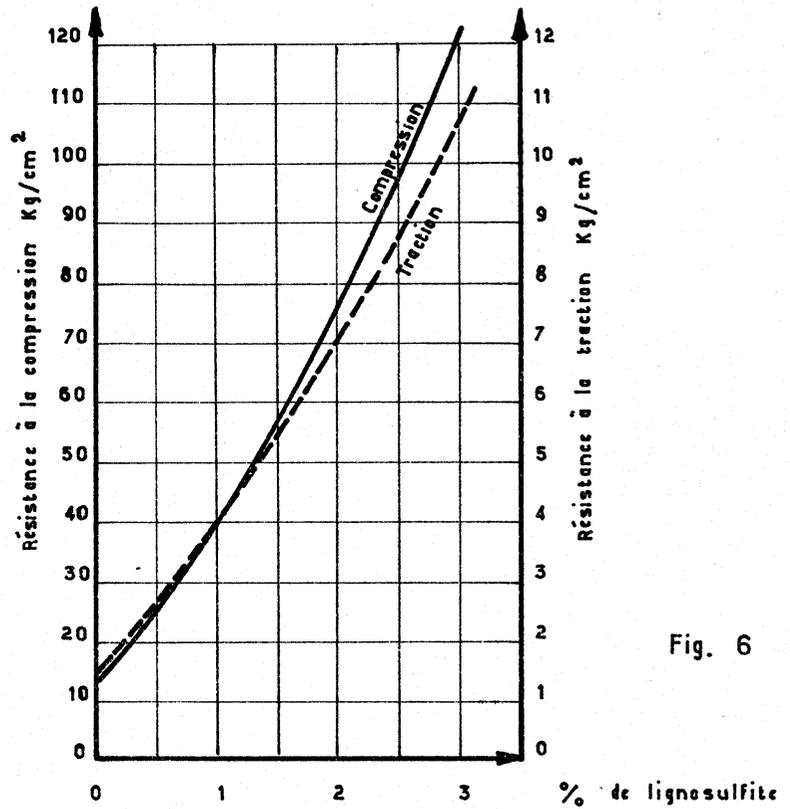


Fig. 6

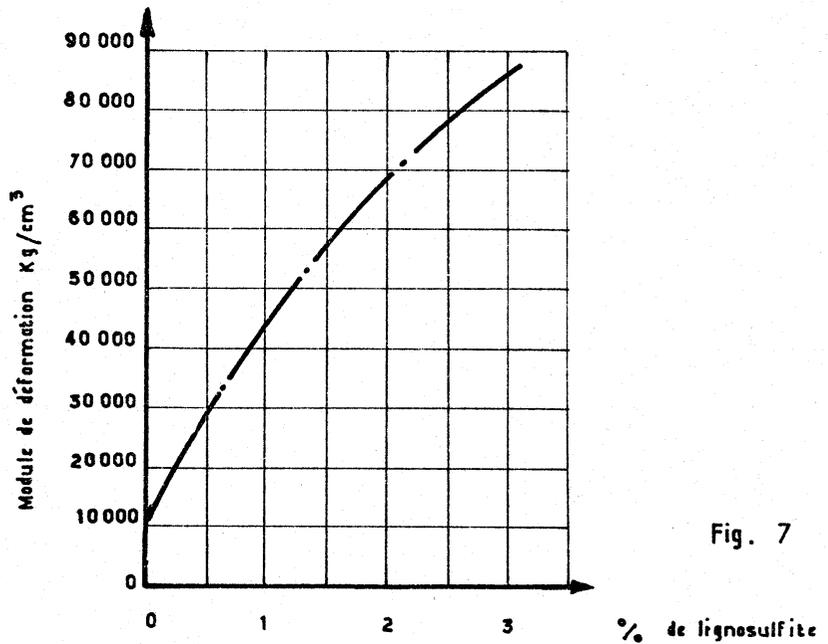


Fig. 7

3.1 - GENERALITES

3.1.1. OPERATIONS ELEMENTAIRES

Dans les tableaux ci-contre sont indiquées les opérations élémentaires nécessaires au traitement de la plate-forme et à la stabilisation des fondations et des couches de base, et ce, quelle que soit la nature du terrain à traiter.

TRAITEMENT DE LA PLATE-FORME

En ce qui concerne le traitement de la plate-forme, les opérations élémentaires indiquées correspondent au cas le plus défavorable, c'est-à-dire au cas où la teneur en eau naturelle du sol constituant la plate-forme est très différente de la teneur optimale Proctor.

Si la teneur en eau naturelle est voisine de la teneur en eau de compactage, il n'est pas nécessaire de prévoir une scarification, une aération ou une humidification.

Il est alors possible de procéder directement au compactage de la plate-forme et à son réglage après compactage.

L'aération est pratiquée si la teneur en eau naturelle est très supérieure à la teneur en eau optimale. Cette opération est d'autant plus facile que le matériau est moins argileux.

Pour qu'elle soit possible, il faut que le degré hygrométrique de l'air ne soit pas trop élevé, ce qui n'est pas toujours réalisé, en particulier en région de forêt.

En climat équatorial très humide, il est fréquemment impossible d'abaisser de plus de 2 points la teneur en eau naturelle et dans ce cas, il vaut souvent mieux ne pas toucher à la plate-forme et augmenter les épaisseurs de chaussée en conséquence.

En ce qui concerne le compactage, les engins seront adaptés au taux de compactage désiré, à la nature du terrain constituant la plate-forme et à l'importance du chantier. Par exemple, les rouleaux ou plaques vibrants seront de préférence, utilisés dans les terrains très sableux. De même les grenouilles ne pourront être utilisées que pour les chantiers de très faible importance ou pour les accotements.

TRAITEMENT DES FONDATIONS ET DES COUCHES DE BASE

L'apport du matériau constitue un des postes essentiels dans la stabilisation des fondations et couches de base.

Les engins utilisés pour le déforestage des emprunts dépendront de la nature de la végétation et de l'épaisseur de la découverte à éliminer.

Les engins de chargement et de transport seront essentiellement fonction de la distance moyenne entre les emprunts et des conditions d'accès à ces emprunts.

La préparation du matériau avant stabilisation doit être de plus en plus soignée lorsque l'on passe du sable à l'argile. Il est, par exemple, pratiquement impossible de pulvériser une argile au moyen des appareils du type agricole. Dans le cas de ce matériau, les possibilités de pulvérisation dépendent essentiellement de la teneur en eau naturelle du matériau.

TRAITEMENT DE LA PLATE-FORME

OPERATIONS ELEMENTAIRES	MATERIELS USUELS
Scarification	Niveleuse, charrues à disques, herse tractées, préparer, concasseurs mobiles (1)
Aération	Niveleuse, pulvimixer
Mise en cordon (2)	Niveleuse, Niveleuse élévatrice
Humidification	Citernes et rampes par passes multiples, citernes et rampes tractées par passe unique, rampe fixe longitudinale, citernes branchées sur l'appareil de malaxage.
Malaxage homogénéisation	Niveleuse (3), charrues à disques, herse, pulvimixer (par roulage : pieds de mouton, pneus, lisses, rouleaux à grilles (par vibration : rouleaux vibrants à pneus ou lisses, plaques vibrantes (par impact : grenouilles
Compactage (4)	Niveleuse
Règlage et finition	Niveleuse

REMARQUES

- (1) Pour réduction des gros éléments et des mottes
- (2) En cas d'utilisation du terrain de la plate-forme en fondation ou couche de base
- (3) Déplacement de cordon
- (4) Y compris précompactage et compactage de finition

APPORT DU MATERIAU

OPERATIONS ELEMENTAIRES	MATERIEL USUEL
Déforestage des emprunts	Manuel, explosifs, Bull et câbles
Débroussage et découverte	Niveleuse Bull, Bull et riper, scraper
Buttage ou mise en cordon	Bull Niveleuse (1)
Chargement	Bull (2), Niveleuse (2), Niveleuse élévatrice (2) élévatrices à godets (2) Pelles, chargeuses à godets élévatrices à godets, élévatrices à bandes, scraper(3) scraper avec pousseuse (3)

REMARQUES : (1) Dans le cas d'un chargement à élévatrice à godets
 (2) Dans le cas d'emprunts latéraux continus
 (3) Emprunts très homogène.

TRAITEMENT DES FONDATIONS ET DES

COUCHES DE BASE

TECHNIQUE	MALAXAGE SUR PLACE (MIX IN PLACE)			MALAXAGE EN CENTRALE FIXE	
	OPERATIONS ELEMENTAIRES	PAR PASSES MULTIPLES PAR COUCHES MATERIAUX ETALES	PAR PASSE UNIQUE (CENTRALE MOBILE)		
			MATERIAUX ETALES		MATERIAUX EN CORDON
1 - PREPARATION DU MATERIAU					
Reprise, réglage	Bull (1) niveleuse		Niveleuse, calibreur de cordon	Bull	
Pulvérisation Homogénéisation aération (2)	Pulvimixer, préparizer, Concasseur mobile niveleuse		Niveleuse	Bull	
Préhumidification(3)	Niveleuse pulvimixer		Niveleuse élévatrice non	non	
Mise en cordon	non	non	Niveleuse calibreur de cordon		
2 - INCORPORATION DU LIANT					
Fourniture et stockage					
Répartition du liant	Camions et manutention	Camions et manutention	Camions et manutention	non	
Répondage du liant	Manuel puis niveleuse ou herse Répandeurs à liant	Manuel puis niveleuse ou herse Répandeurs à liant	Manuel	non	
	Citernes épandues Citernes branchées sur le Malaxeur	Citernes branchées sur le train de stabilisation	Citernes branchées sur le train de stabilisation	Citernes branchées sur la Centrale	
Humidification	Citernes et rampes par passes multiples	Citernes branchées sur le train de stabilisation	idem	idem	
	Citernes et rampes par passe unique				
	Rampe fixe longitudinale				
	Citerne branchée sur le malaxeur				
Malaxage	Niveleuse pulvimixer	Train de stabilisation	Train de stabilisation	Centrale	
Transport	non	non	non	Camions Dumpers tombereaux	
Règlage	Niveleuse	Train de stabilisation	Niveleuse spreaderbox finisseurs	Niveleuse spreaderbox, finisseurs	
3 - COMPACTAGE ET FINITION					
Aération (4)	Niveleuse, pulvimixer	Niveleuse, pulvimixer	Niveleuse, pulvimixer	Niveleuse, pulvimixer	
Compactage	Opérations identiques à celles de la plate-forme				
Règlage et finition					
Protection					
REMARQUES (1) Prérépondage dans le cas de gros tas (2) Dans le cas de matériaux à trop forte teneur en eau (3) Pour faciliter le passage des engins ou dans le cas de conditions climatiques spéciales (4) Evaporation de solvants ou élimination de l'excès d'eau de malaxage					

Les techniques d'incorporation du liant et les matériels correspondants seront choisis en fonction de la nature du terrain, du dosage minimal admissible et de l'importance du chantier.

Le répandage manuel du liant doit être proscrit pour des dosages inférieurs à 4%. Il est par contre admissible dans le cas de petits chantiers utilisant comme matériau de base le sable ou le sable argileux.

Le malaxage au moyen de trains de stabilisation ou de centrales de grande capacité n'est parfaitement adapté que dans le cas de très gros programmes de construction.

Dans ce qui suit et pour chaque sol-type, le détail des opérations élémentaires sera examiné et les observations découlant de la nature particulière du matériau seront formulées.

3.1.2. - CHOIX DES ENGIN

Pour une opération déterminée, il est généralement possible d'utiliser des engins différents. Parmi ces engins et compte tenu de toutes les opérations élémentaires nécessaires, on peut définir un parc d'engins nécessaire à l'ensemble du chantier.

Le choix de ce parc sera fait d'une part, en fonction des normes de mise en oeuvre découlant des essais en laboratoire, (en particulier en ce qui concerne le compactage, la distribution du liant et la préparation des matériaux avant stabilisation) et d'autre part, en fonction de l'importance du chantier et des délais d'exécution.

D'une façon générale, les techniques de stabilisation par passes multiples sont parfaitement adaptées aux chantiers de petite ou moyenne importance, les techniques de stabilisation par centrale mobile ou centrale fixe étant plutôt adaptées aux chantiers de grande envergure et de grand rendement.

3.2 - CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

3.2.1 - OPERATIONS ELEMENTAIRES

1) SABLE

Traitement de la plate-forme

Dans le cas du sable, la pulvérisation et l'aération sont inutiles. Par contre on a tout intérêt à prévoir une préhumidification destinée à permettre la circulation des engins, en conférant au sable une légère cohésion apparente.

Cette préhumidification doit être faite au moyen de rampes longitudinales ou de citernes légères se déplaçant à grande vitesse pour éviter les risques d'ensablement.

Etant donné la faible incidence d'une variation de teneur en eau sur les densités, il est superflu de prévoir un malaxage en place du sable avant compactage.

Le compactage doit être fait au moyen d'engins lourds, ce qui nécessite un précompactage, soit au moyen de rouleaux à pneus légers soit au moyen de plaques vibrantes.

D'une manière générale, la vibration au moyen de plaques lourdes ou de vibrotampers est parfaitement adaptée à la mise en place de ce matériau.

Si le réglage de la plate-forme a été correctement réalisé avant compactage, il est inutile de prévoir un compactage et un réglage de finition.

Une solution intéressante destinée à faciliter la circulation des engins effectuant la réalisation des couches de base, consiste à prévoir sur la plate-forme l'apport d'une faible quantité de matériau cohérent compacté, ce qui permettra un trafic normal des engins de chantiers, sans détérioration de la plate-forme compactée.

Traitement de la fondation et de la couche de base

a) Dans le cas de la stabilisation au ciment, l'homogénéisation, l'aération et la préhumidification du matériau sont inutiles.

L'incorporation du liant devra de préférence être réalisée :

- soit au moyen de trains de stabilisation
- soit en contrale fixe, si les dosages sont inférieurs à 4%.

L'incorporation du liant à la main et le malaxage aux engins nécessitant des passes multiples ne pourront être admis que pour des dosages en liant supérieurs à 4%.

Quel que soit le mode d'incorporation du liant, un précompactage est nécessaire pour permettre la circulation des compacteurs lourds qui seront de préférence, des compacteurs à pneus.

Le compactage au moyen de plaques vibrantes lourdes conduit à d'excellents résultats pour les dosages supérieurs à 4%.

b) Dans le cas d'une stabilisation à l'émulsion, une aération s'avère nécessaire dans le cas où la teneur en eau naturelle du sable est très supérieure à 7%.

L'incorporation du liant peut être réalisée, soit au pulviseur, soit au moyen de trains de stabilisation, soit en centrale fixe.

Le compactage doit être de préférence réalisé aux rouleaux à pneus, l'utilisation d'un rouleau lourd implique un précompactage pour éviter le feuilletage du matériau.

Les compactages de finition peuvent être réalisés soit au rouleau à pneus, soit au rouleau lisse, ce dernier engin étant préférable pour les compactages de finition des couches de base.

2) SABLE ARGILEUX

Traitement de la plate-forme

Si la teneur en eau naturelle est très différente de la teneur en eau optimale PM, il est nécessaire de prévoir une préparation du matériau, soit par aération si cette teneur en eau est trop forte, soit par humidification si cette teneur en eau est trop faible.

L'homogénéisation correspondante peut être faite avec la plupart des engins habituels.

Tous les engins usuels peuvent être employés pour le compactage à l'exclusion toutefois des rouleaux lisses légers même s'ils sont vibrants.

Traitement des fondations et des couches de base

a) Dans le cas de la stabilisation mécanique, les compactages doivent être réalisés au moyen de compacteurs lourds, à pneus, à pied de mouton ou vibrants.

b) Dans le cas de la stabilisation aux liants hydrocarbonés, les liants peuvent être répandus soit à la rampe soit de préférence au moyen de citernes branchées sur le malaxeur.

Les malaxages sont possibles au moyen du pulviseur, ils sont toutefois plus soignés au train de stabilisation ou en centrale.

Les compactages doivent être de préférence, réalisés au moyen de rouleaux à pneus lourds, ce qui nécessite un précompactage au moyen de rouleaux à pneus légers ou de tamper du train de stabilisation.

Les compactages de finition sont à réaliser, soit au rouleau à pneus 9/12 T, soit au rouleau lisse tandem, soit au rouleau vibrant.

3) SABLE ARGILE

Traitement de la plate-forme

Si la teneur en eau naturelle du matériau est très différente de la teneur en eau optimale, du compactage, la pulvérisation et l'homogénéisation suivies soit d'une aération, soit d'une humidification, sont indispensables. Ces opérations peuvent être réalisées avec la plupart des engins habituels. Le précompactage n'est indispensable que si le compactage proprement dit est exécuté au moyen de rouleaux à pneus dépassant 50 Tonnes.

Les compactages proprement dits peuvent être réalisés, soit aux rouleaux à pneus, soit aux rouleaux à pied de mouton.

Les rouleaux lisses légers ainsi que les rouleaux vibrants légers sont inopérants.

Les compactages de finition, s'ils s'avèrent nécessaires, sont réalisables avec le rouleau à pneus de 9/12 T.

Traitement de fondations et des couches de base

La préparation et l'humidification du matériau peuvent s'avérer nécessaires.

Le malaxage à la niveleuse doit être exclu ainsi que le malaxage à la charrue à disques dans le cas d'une stabilisation aux liants hydrauliques à moins de 4%, ou dans le cas d'une stabilisation au cut-back EK.2.

Dans le cas de la stabilisation aux liants hydrauliques, les précompactages et compactages s'effectuent avec les engins habituels, à l'exclusion des rouleaux légers, lisses ou vibrants.

Dans le cas de la stabilisation au cut-back EK.2, les rouleaux à pieds de mouton et les rouleaux très lourds, ne peuvent pas être utilisés.

4) ARGILE SABLEUSE

Traitement de la plate-forme

La préparation du matériau si elle est rendue nécessaire par la différence de teneur en eau, nécessite l'utilisation du pulvimixer ou du préparizer, les engins agricoles ne permettent pas une réduction suffisante des mottes.

Le précompactage est indispensable si le compactage proprement dit est réalisé au moyen de rouleaux à pneus très lourds et cela dans le but d'éviter un feuilletage du matériau. Les compactages doivent être réalisés :

- doit au rouleau à pneus lourds,
- soit au rouleau à pieds de mouton,

Les cylindres lisses et les rouleaux vibrants sont pratiquement inopérants.

Si elle s'avère nécessaire, la finition doit être réalisée aux rouleaux à pneus 9/12 T.

Traitement de fondation et couche de base

La préparation du matériau nécessite l'emploi d'appareils à puissance de pulvérisation élevés.

L'incorporation du liant doit être faite au train de stabilisation ou en centrale di les dosages sont inférieurs à 4%. Pour des dosage supérieurs on peut, à la rigueur, utiliser les répandeurs à liants et le pulvimixer.

Les précompactages sont à réaliser au rouleau à pneus de moins de 15 T. Les appareils vibrants ne donnent pas de bons résultats.

Les compactages proprement dits sont à réaliser au rouleau à pneus de 30 à 45 T ou au rouleau à pieds de mouton lourd.

Les opérations de finition peuvent être entreprises :

- soit au rouleau à pneus légers,
- soit au rouleau lisse Tandem.

5) ARGILE

Traitement de la plate-forme

L'argile est un matériau particulièrement difficile à pulvériser et à travailler. Si la teneur en eau naturelle du matériau constituant la plate-forme est comprise entre 20% et 27% on aura tout intérêt à procéder à un compactage direct de la plate-forme, sans opération de pulvérisation et sans humidification.

La courbe Proctor est en effet très plate dans cette gamme de teneur en eau et le gain de densité ne justifie pas les opérations de malaxage.

Au-dessus de 27% de teneur en eau les densités décroissant rapidement en fonction de la teneur en eau et si la teneur en eau naturelle dépasse 30% il n'est pratiquement plus possible de procéder sur chantier à une aération et il vaut mieux dans ce cas, augmenter l'épaisseur totale de chaussée.

Si l'argile se trouve à une teneur en eau inférieure à 20%, il y a lieu de prévoir une humidification. Cette humidification doit être faite en plusieurs passes suivies d'un malaxage de façon à éviter l'adhérence du matériau aux pneus des engins.

Le compactage doit être précédé d'un précompactage au rouleau à pneus 9/12 T.

Le compactage proprement dit effectué au rouleau à pneus lourds doit être réalisé à faible vitesse de façon à éviter le mise en pression de l'eau interstitielle et par conséquent, tout risque de feuilletage.

Pour éviter ce risque il est préférable d'utiliser des rouleaux à pieds de mouton, à pied tronconique, ce qui permet de plus d'éviter un précompactage.

Traitement de la couche de base et de la fondation

Avant toute incorporation du liant, la préparation du matériau doit être particulièrement soignée afin de faciliter une répartition homogène du liant.

Cette opération ne peut être réalisée par passes multiples qu'en utilisant des appareils de très grosse puissance de pulvérisation.

Le concasseur mobile est bien adapté au cas des argiles très sèches, il devient rigoureusement inopérant dans le cas d'argiles humides.

Ces dernières doivent être traitées au préparizer ou au moyen des rotors des trains de stabilisation.

L'incorporation du liant doit, de préférence, être réalisée au moyen de trains de stabilisation à rotors, les trains de stabilisation à palettes et les centrales fixes n'étant utilisables qu'après une pulvérisation soignée du matériau.

Les compactages peuvent être réalisés :

- soit aux rouleaux à pneus lourds
- soit aux rouleaux à pieds de mouton lourds

Il y a lieu toutefois d'éviter les rouleaux à pneus de plus de 50 T. qui risquent de mettre l'eau interstitielle en pression et de provoquer un feuilletage.

Les opérations de finition sont à réaliser aux rouleaux lisses tandem, les rouleaux lisses vibrants étant inopérants.

3.2.2. - CHOIX DES ENGIN

1) SABLE

Dans le cas de la stabilisation au ciment, il a été noté qu'une bonne répartition du liant nécessitait l'emploi de trains de stabilisation.

Les centrales fixes ne peuvent être utilisées que si elles ont un rendement suffisant pour permettre le répandage, le compactage et la finition, avant tout début de prise du liant.

La stabilisation au moyen d'engins à passes multiples et en particulier du pulvimixer, devra suivre les mêmes règles.

L'utilisation de trains de stabilisation et de centrales fixes implique bien entendu un programme important alors que les engins à passes multiples et les batteries de bétonnières sont surtout applicables à de petits chantiers.

2) SABLE ARGILEUX

Les stabilisations aux liants hydrauliques peuvent être réalisées soit avec des engins multipasses, soit en centrale mobile, soit en centrale fixe.

Les premiers engins donnent de moins bons résultats dans le cas de la stabilisation aux liants hydrocarbonés.

3) SABLE ARGILE

Le sable argile est un matériau qui peut être traité suivant la plupart des techniques habituelles : par passes multiples, en centrale mobile travaillant en cordon ou sur matériaux étalés, en centrale fixe.

Les éléments déterminant la constitution du parc sont principalement l'importance du chantier et les délais d'exécution.

4) ARGILE SABLEUSE

Les techniques de stabilisation les plus adaptées à ce type de matériau sont les stabilisations par train de stabilisation ou en centrale fixe. Les stabilisations par passes multiples nécessitent un grand nombre de passes.

En ce qui concerne les compactages on s'orientera vers l'utilisation des rouleaux à pneus lourds ou des rouleaux à pied de mouton.

Le matériel vibrant n'est pas adapté à la stabilisation de ce type de matériau.

5) ARGILE

Si la teneur en eau naturelle du matériau est très inférieure à la teneur en eau optimale, il est possible d'utiliser des engins du type multipasses. Par contre, si la teneur en eau est plus élevée, la seule solution consiste à traiter les matériaux au moyen de trains de stabilisation à rotor travaillant sur matériaux étalés.

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIS

% < 80 µ : 6 %

IP -

d_{sm} Proctor = 1,71 T/m³

MATÉRIAU

SABLE

	matériel inopérant ou opération contre-indiquée
•	matériel peu efficace (à éviter)
••	matériel à efficacité moyenne
•••	matériel à bonne efficacité
••••	matériel à excellente efficacité
	opération superflue

	Opérations élémentaires	Engins	Couche de fondation				Couche de base								
			stabil. méc.	stabil. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydrocarbonés	stabil. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydrocarbonés				
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques													
		Rotavator													
		Pulvimixer													
		Préparizer													
		Rotor du train de stabilisat.													
	Aération	Concasseur mobile													
		Niveleuse, charrue à disque													
		Pulvimixer													
		Citerne et rampe (passes mult.)	••												
		Citerne et pompe (passe unique)	•												
Préhumidification	Citerne branchée sur malaxeur														
2	Répandage du liant	Manuel ± (herse ou niveleuse)			•	••						•			
		Répandeur à liant			••	•••						•••			
		Citerne épanseuse à rampe							••				•		
		Citerne branchée sur malaxeur							••••				••••		
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	••		••	••						••			
		Citerne et pompe (passe unique)	•		•	•						•			
		Rampe longitudinale	•••		•••	•••						•••			
		Citerne branchée sur malaxeur			••••	••••						••••			
		Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)												
	Charrue à disques											•			
	Rotavator				•	••	•					•			
	Pulvimixer				••	•••	••					••	•		
	Train de stabilisation à pales				••••	••••	••••					••••	••••		
	Train de stabilisation à rotor				••••	••••	••••					••••	••••		
	Centrale fixe (plant)				••••	••••	••••					••••	••••		
	Batteries de bétonnières				••	•••	•					•••	•		
	3		Aération	Niveleuse											•
				Pulvimixer											•••
		Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•		••	••	•••					••	•••	
			Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.	••		•••	•••	••					•••	••	
			Vibro tamper	•••		••••	••••	•••					••••	•••	
			Dameuse mécanique			••	•••	•••					•••	•••	
		Compactage	Rouleau à pneus 9/12 t												•
			Rouleau à pneus 30 à 45 t	•••		•••	•••	••					••••	••••	
			Rouleau à pneus 50 à 100 t	•••••		••	••								
Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t															
Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t															
Fouloir tronconique															
Rouleau lisse 5 t															
Rouleau lisse 15 t										••		•	••		
Rouleau à grilles															
Rouleau à plaques 16,25 t												••			
Rouleau lisse vibrant < 2 t															
Rouleau lisse vibrant 3,6 t															
Rouleau lisse vibrant 4,8 t			•		•	••	••					•			
Plaques vibrantes 0,5/0,7 t															
Plaques vibrantes > 1,7 t			••												
Vibro tamper 2,4 t			•••									•••	•		
Grenouille 0,5 t															
Grenouille 1 t					••	••							••		
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t			•••	•••	••••					•	••		
	Rouleau lisse tandem 12/14 t			•	••	•••					••	•••			
	Rouleau lisse tandem 5/8 t			•••	•••	•••					•••	•••			
	Rouleau vibrant 3,6 t			••••	••••	•					••••	•			
	Rouleau vibrant 4,8 t			••••	••••	•••					••••	•••			

- matériel inopérant ou opération contre-indiquée
- matériel peu efficace (à éviter)
- matériel à efficacité moyenne
- matériel à bonne efficacité
- matériel à excellente efficacité
- opération superflue

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 µ : 23 %

IP - 5

d_{sm} Proctor = 2,01 T/m³

**MATÉRIAU
SABLE ARGILEUX**

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme					Couche de fondation				Couche de base				
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	
1 PRÉPARATION DU MATÉRIAU	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charrue à disques	••	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		Rotavator	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Pulvimixer	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Préparizer														
		Rotor du train de stabilisat.			••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
	Aération	Niveleuse, charrue à disque	•	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Pulvimixer	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)						•••							•••	
		Citerne et pompe (passe unique)						•••							•••	
		Citerne branchée sur malaxeur						••••							••••	
2 INCORPORATION DU LIANT STABILISANT ET DE L'EAU	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)			••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Répandeur à liant			•	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Citerne épandeur à rampe						••							•	
		Citerne branchée sur malaxeur						••••							••••	
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Citerne et pompe (passe unique)	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Rampe longitudinale	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Citerne branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
					••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		Charrue à disques	••	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		Rotavator	••	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		Pulvimixer	••••	••••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Centrale fixe (plant)			••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Batteries de bétonnières			••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
	3 COMPACTAGE ET FINITION	Aération	Niveleuse							•					•	
Pulvimixer								•••						•••		
Précompactage		Rouleau à pneus < 15 t	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	
		Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	
		Vibro tamper	•••	•••	••••	••••	••	••	••••	••••	••	••	••••	••••	••	
Compactage		Danneuse mécanique			••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Rouleau à pneus 9/12 t	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Fouloir tronconique	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
		Rouleau lisse 5 t														
		Rouleau lisse 15 t			•	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
		Rouleau à grilles	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Rouleau à plaques 16,25 t	•••	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
		Rouleau lisse vibrant < 2 t														
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t														
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t					••	••	•	•	•	•	•	•	•	•
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t														
Plaques vibrantes > 1,7 t		•••		••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
Vibro tamper 2,4 t		•••	•••	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
Grenouille 0,5 t				••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
Grenouille 1 t		•••	•••	•••	•••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	
		Rouleau lisse tandem 12/14 t	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
		Rouleau lisse tandem 5/8 t	•	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
		Rouleau vibrant 3,6 t	•	•	••••	••••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
		Rouleau vibrant 4,8 t	••	••	••••	••••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••

 matériel inopérant ou opération contre-indiquée
 • matériel peu efficace (à éviter)
 •• matériel à efficacité moyenne
 ••• matériel à bonne efficacité
 •••• matériel à excellente efficacité
 opération superflue

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 μ : 45 %

IP - 13,5

d_{sm} Proctor = 1,92 T/m³

MATÉRIAU
SABLE ARGILE

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme		Couche de fondation			Couche de base			
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydrauliques < 4%	liants hydrauliques > 4%	liants hydro-carbonés
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charue à disques	••	••	•	•			•	•	
		Rotavator	••	••	••	••	•		••	••	•
		Pulvimixer	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••
		Préparizer	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Rotor du train de stabilisat.			••••	••••	••••		••••	••••	••••
	Aération	Niveleuse, charue à disque	•	•	••	••	••		••	••	••
		Pulvimixer	•••	•••	•••	••••	••••		••••	••••	••••
	Préhumidification	Citene et rampe (passes mult.)					•••				•••
		Citene et pompe (passe unique)					••				••
		Citene branchée sur malaxeur					••••				••••
2	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)				••					
		Répandreur à liant			••	••••					
		Citene épandeur à rampe					•				•
		Citene branchée sur malaxeur					••••				••••
	Humidification	Citene et rampe (passes mult.)	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Citene et pompe (passe unique)	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Rampe longitudinale	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Citene branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••			••••	••••	
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordon)									
		Charue à disques	••	••		•					•
		Rotavator	•••	•••	••	••					••
		Pulvimixer	••••	••••	••	••	•		•	•	•
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Centrale fixe (plant)			••••	••••	••••		••••	••••	••
	Batteries de bétonnières				•					•	
	3	Aération	Niveleuse								
			Pulvimixer					•••			•••
		Précompactage	Rouleau à pneus < 15 t	•••	•••	••••	••••	••		••••	••••
Plaques vibrantes < 1 t ou tamper des trains stab.			•	•	•••	•••	•••		•••	•••	•••
Vibro tamper			••	••	••	••	••		••	••	••
Danseuse mécanique			••	••	•••	•••	•••		•••	•••	•••
Compactage		Rouleau à pneus 9/12 t	••		••	•••	•••		•••	•••	•••
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••	••	••••	••••	••••		••••	••••	••••
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	••••	••••	••••					
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	••		••	••			••	••	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t	••		••	••			••	••	
		Fauloir tronçonne	••••	••	••••	••••			•••	•••	
		Rouleau lisse 5 t									
		Rouleau lisse 15 t	•		•	•	••		•	•	••
		Rouleau à grilles	•		•	•			•	•	
		Rouleau à plaques 16,25 t	•••	•••	•••	•••			•••	•••	
		Rouleau lisse vibrant < 2 t									
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t				•					
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t			•	•	••			•	••
Plaques vibrantes 0,5/0,7 t					•						
Plaques vibrantes > 1,7 t		•		•	••			•	•		
Vibro tamper 2,4 t		••		••	••	•					
Grenouille 0,5 t				••	•••			••	••		
Grenouille 1 t		•••	•••	•••	•••			•••	•••		
Compactage de finition		Rouleau à pneus 9/12 t	••••	••••	••••	••••	••••		••	••	•••
		Rouleau lisse tandem 12/14 t	••	••	••••	••••	••••		•••	•••	•••
		Rouleau lisse tandem 5/8 t	•	•	••••	••••	•••		•••	•••	•••
		Rouleau vibrant 3,6 t	•	•	••••	••••	•		•••	•••	•
		Rouleau vibrant 4,8 t	••	••	••••	••••	•••		••••	••••	•••

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

%₀ < 80 μ : 58 %

IP - 22

d sm Proctor = 1,80 T/m³

MATÉRIAU
ARGILE SABLEUSE

	matériel inopérant ou opération contre-indiquée
•	matériel peu efficace (à éviter)
••	matériel à efficacité moyenne
•••	matériel à bonne efficacité
••••	matériel à excellente efficacité
	opération superflue

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme		Couche de fondation			Couche de base				
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydro-liqués <4%	liants hydro-liqués >4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydro-liqués <4%	liants hydro-liqués >4%	liants hydro-carbonés	
1 PREPARATION DU MATÉRIAU	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charue à disques	•	•								
		Rotavator	•	•	•	•				•	•	
		Pulvimixer	••	••	••	••				••	••	
		Préparizer	•••	•••	•••	•••				•••	•••	
		Rotor du train de stabiliset.			•••	•••				•••	•••	
		Concasseeur mobile										
	Aération	Niveleuse, charue à disque	•	•								
		Pulvimixer	•••	•••	•••	•••				•••	•••	
	Préhumidification	Citerne et rampe (passes mult.)										
		Citerne et pompe (passe unique)										
Citerne branchée sur malaxeur												
2 INCORPORATION DU LIANT STABILISANT ET DE L'EAU	Répandage du liant	Manuel a (herse ou niveleuse)				••					••	
		Répandeur à liant				•	•••			•	•••	
		Citerne épanseuse à rampe										
		Citerne branchée sur malaxeur										
	Humidification	Citerne et rampe (passes mult.)	••	••	••	••				••	••	
		Citerne et pompe (passe unique)	•	•	••	••				••	••	
		Rampe longitudinale	•••	•••	•••	•••				•••	•••	
		Citerne branchée sur malaxeur	••••	••••	••••	••••				••••	••••	
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordan)										
		Charue à disques	•	•								
		Rotavator	•	•	•	•						•
		Pulvimixer	•••	•••	•	•••				•	•••	
		Train de stabilisation à palettes			••••	••••				••••	••••	
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••				••••	••••	
		Centrale fixe (plant)			••••	••••				••••	••••	
Batteries de bétonnières												
3 COMPACTAGE ET FINITION	Aération	Niveleuse										
		Pulvimixer										
	Précompactage	Rouleau à pneus <15 t	•••	•••	•••	•••				•••	•••	
		Plaques vibrantes <1 t ou tamper des trains stab.										
		Vibro tamper										
		Dameuse mécanique			•••	•••				•••	•••	
	Compactage	Rouleau à pneus 9/12 t	••			••					••	
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••••	••••	••••	••••				••••	••••	
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	••••	••••	••	••••				••••	••••	
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t	••	•		•					•	
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t	••	•		•					•	
		Fouloir tranconique	••••	••••	•••	•••				•••	•••	
		Rouleau lisse 5 t										
		Rouleau lisse 15 t										
		Rouleau à grilles										
		Rouleau à plaques 16,25 t	•		••	•••				••	•••	
		Rouleau lisse vibrant <2 t										
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t										
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t										
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t										
	Plaques vibrantes >1,7 t											
	Vibro tamper 2,4 t											
	Grenouille 0,5 t											
	Grenouille 1 t	•••	•••	•••	•••				•••	•••		
	Compactage de finition	Rouleau à pneus 9/12 t	•••	•••	•••	•••				••	••	
		Rouleau lisse tandem 12/14 t	•	•	•••	•••				•••	•••	
		Rouleau lisse tandem 5/8 t			••	••				••	••	
		Rouleau vibrant 3,6 t										
		Rouleau vibrant 4,8 t			••	••				••	••	

OPÉRATIONS DE MISE EN ŒUVRE

CHOIX DES ENGIN

% < 80 μ : 82 %

IP - 31

d sm Proctor = 1,61 T/m³

MATÉRIAU
ARGILE

	Opérations élémentaires	Engins	Plate-forme			Couche de fondation			Couche de base					
			stab. méc.	stab. méc.	liants hydro-liquides <4%	liants hydro-liquides >4%	liants hydro-carbonés	stab. méc.	liants hydro-liquides <4%	liants hydro-liquides >4%	liants hydro-carbonés			
1	Pulvérisation, homogénéisation	Niveleuse, herse, charue à disques	•											
		Rotavator	•											
		Pulvimixer	••		•	•					•			
		Préparizer	•••		•••	•••					•••			
		Rotor du train de stabilisat.			•••	•••					•••			
		Concasseur mobile	••••		••••	••••					••••			
	Aération	Niveleuse, charue à disque	•											
		Pulvimixer	••		•••	•••					•••			
	Préhumidification	Citene et rampe (passes mult.)												
		Citene et pompe (passe unique)												
Citene branchée sur malaxeur														
2	Répandage du liant	Manuel + (herse ou niveleuse)						••						
		Répandeur à liant			•	•••					•••			
		Citene épandeur à rampe												
		Citene branchée sur malaxeur												
	Humidification	Citene et rampe (passes mult.)	••		•	•					•			
		Citene et pompe (passe unique)												
		Rampe longitudinale	•••		•••	•••					•••			
		Citene branchée sur malaxeur	••••		••••	••••					••••			
	Malaxage	Niveleuse (déplacement cordes)												
		Charue à disques												
		Rotavator	•											
		Pulvimixer	•••			•					•			
		Train de stabilisation à palettes			•••	••••					•••			
		Train de stabilisation à rotor			••••	••••					••••			
Centrale fixe (plan)				••••	••••					••••				
Batteries de bétonnières														
3	Aération	Niveleuse												
		Pulvimixer												
	Précompactage	Rouleau à pneus <15 t	••••		•••	•••					•••			
		Plaques vibrantes <1 t ou tamper des trains stab.												
		Vibro tamper												
	Dameuse mécanique			•••	•••					•••				
	Compactage	Rouleau à pneus 9/12 t	••						••					
		Rouleau à pneus 30 à 45 t	••						••••	••••			••••	
		Rouleau à pneus 50 à 100 t	•		•	•								
		Rouleau pieds de mouton à plaques 6 t												
		Rouleau pieds de mouton 7 à 17 t												
		Fauloir tronçanique	••••		•••	•••					•••			
		Rouleau lisse 5 t												
		Rouleau lisse 15 t												
		Rouleau à grilles			••	••								
		Rouleau à plaques 16,25 t	•		•	•								
		Rouleau lisse vibrant <2 t												
		Rouleau lisse vibrant 3,6 t												
		Rouleau lisse vibrant 4,8 t												
		Plaques vibrantes 0,5/0,7 t												
		Plaques vibrantes >1,7 t												
		Vibro tamper 2,4 t												
		Grenouille 0,5 t												
Grenouille 1 t		•••		••	••					•••				
Compactage de finition	Rouleau à pneus 9/12 t	•••		•••	•••					••				
	Rouleau lisse tandem 12/14 t			•••	•••					•••				
	Rouleau lisse tandem 5/8 t			••	••					•				
	Rouleau vibrant 3,6 t													
	Rouleau vibrant 4,8 t			•	•					•				

3.2.3 - ETUDE DU RENDEMENT DES ENGIN

1) Formules générales de production

Dans le cas d'engins travaillant par passe unique, la production utile est donnée par la relation :

$$S = 60 \times V \times L \times \rho$$

ou S = Production en m²/h

V = Vitesse d'avancement en mètre/minute

L = Largeur de travail en mètre

ρ = Coefficient d'utilisation

Ce coefficient d'utilisation a pour expression :

$$\rho = \frac{t - t_0}{t} \quad (1)$$

t étant la durée maximale d'utilisation possible sur chantier et t₀ les temps d'immobilisation pour causes diverses.

Pour les engins travaillant par passes multiples mais à vitesse constante, cette relation devient :

$$S = \frac{60 \text{ VL}}{N} \times \rho$$

N étant le nombre de passes.

Dans le cas des compacteurs et en particulier des compacteurs du type pied de mouton, la relation devient :

$$S = \frac{60 \text{ VL}}{N} \rho n$$

n étant le nombre de rouleaux attelés.

Dans le cas d'engins travaillant par passes multiples, chacune des passes étant effectuée à une vitesse différente, la relation devient :

$$S = \frac{60 \quad L}{\frac{N_1}{V_1} + \frac{N_2}{V_2} + \dots + \frac{N_n}{V_n}} \rho$$

N₁, N₂, ... N_n étant le nombre de passes respectivement effectuées aux vitesses V₁, V₂, ... V_n.

2) Valeurs pratiques du coefficient d'utilisation

Si les coefficients d'utilisation d'engins travaillant sur chantiers de terrassements sont relativement bien connus, il en va tout autrement pour les chantiers de stabilisation.

(1) il s'agit de l'utilisation de l'engin sans aucune perte de temps (arrêt ou manoeuvre) pendant la totalité des heures ouvrables.

Les valeurs moyennes à prendre en considération pour l'Afrique et déduites des expériences tirées de quelques chantiers sont celles du tableau ci-dessous :

Tableau des coefficients d'utilisation	(valeurs pratiques)
Matériel agricole tracté (herse charrues cultivateurs rotavator)	0,20
Niveleuse	0,20
Matériel de pulvérisation à moteur	0,20
Matériel de compactage tracté	0,30
Matériel de compactage automoteur	0,30
Citernes	0,30
Matériel de malaxage tracté	0,50
Matériel de malaxage automoteur	0,50

3) Application en opération élémentaire

A) Préparation du matériau

- Règlage et mise au profil à la niveleuse

Les vitesses de travail des niveleuses sont fonction du type d'appareils utilisés. On peut toutefois admettre les valeurs moyennes suivantes :

Vitesses	Vitesses de travail	
	en km/h	en m/min.
1	3,8	63
2	6	100
3	9,2	153
4	14,2	236
5	20,6	343
6	32	534

Ces valeurs correspondent à la niveleuse Caterpillar n° 12. Pour la mise au profil d'une plateforme on peut admettre pour une chaussée de 6,5m. de largeur 5 passes de niveleuse :

- 2 passes en lère soit 63 m/min.
- 3 " 3ème " 153 m/min.

La leurgeur utile par passe est de l'ordre de 1,20 m.

La production horaire est de :

$$S = \frac{60 \times 1,20 \times 0,20}{\frac{2}{63} + \frac{3}{153}}$$

soit 290 m²/h.

- Scarification de la plateforme

Dans le cas de matériaux argileux, une scarification au moyen du scarificateur de la niveleuse est généralement indispensable surtout dans le cas de matériaux secs.

Le rendement horaire, compte tenu d'un travail en lère et d'une largeur de scarificateur de 1,17 m. est de :

$$S = 900 \text{ m}^2/\text{h}$$

- Répannage et Réglage de matériaux d'apport à la niveleuse

Le réglage de matériaux foisonnés à la niveleuse implique en moyenne deux passes en seconde et une passe en troisième pour une largeur utile de 2,70 m.

Le rendement correspondant est :

$$S = 1.200 \text{ m}^2/\text{h}$$

Il est à noter que les opérations de réglage seront facilitées par un pré-répannage au buldozer lorsque les matériaux d'apport sont approvisionnés en tas.

- Pulvérisation

Les engins indiqués au tableau suivant, classés dans l'ordre de leur efficacité sont susceptibles d'être utilisés :

Engin	Tracteur		Vitesse de travail		largeur utile de travail m.
	Type	Puissance minimale CV	km/h	M/min.	
Cultivateur herse charrue à disque	chenilles	90	4,0 à 8,0	90 à 135	1,80 à 3,00
Rotavator porté	pneus	45	6,0 à 8,0	100 à 135	1,50
Pulvimixer	pneus	45	6,0 à 8,0	100 à 135	1,50
Préparizer	pneus	45	4,0 à 6,0	90 à 100	1,50
Concasseur mobile	chenilles ou pneus	45	4,0	90	1,50

Les paramètres intervenant sur le nombre de passes nécessaires et par conséquent sur la production, sont : la nature du sol, l'épaisseur de la couche à homogénéiser et la teneur en eau du sol.

Plus les matériaux sont secs et plus leur homogénéisation s'avère difficile surtout lorsqu'ils sont argileux.

Les productions utiles exprimées en m²/h, ainsi que le nombre de passes généralement nécessaires sont indiquées au tableau suivant :

Type d'engin	Production utile en m ² /heure				
	Type de sol				
	Sable	Sable argileux 75%S + 25%A	Sable argile 50%S + 50%A	Argile sableuse 25%S + 75%A	Argile 100%
Cultivateur ou charrue à disques		1.000 3 passes	750 4 passes	500 6 passes	375 8 passes
Potavator		1.100 2 passes	1.100 2 passes	720 3 passes	540 4 passes
Pulvimixer		2.100 1 passe	1.100 2 passes	1.100 2 passes	720 3 passes
Préparizer			2.100 1 passe	2.100 1 passe	1.100 2 passes
Concasseur mobile					550 3 passes

- Aération

Les paramètres intervenant dans le prix d'une aération sont les suivants :

Nature du sol, quantité d'eau à éliminer, conditions climatiques, (température et hygrométrie ambiante, vent).

Les productions indiquées au tableau suivant correspondent à une élimination d'environ 4% d'eau pour les matériaux sableux et 2% pour les matériaux argileux.

Type d'engin	Production utile en m ² /heure				
	Type de sol				
	Sable 100%S	Sable argileux 75%S + 25%A	Sable argile 50%S + 50%A	Argile sableuse 25%S + 75%A	Argile 100% A
Niveleuse par déplacement de cordon y compris mise en cordon et réglage		300	240	120	100
Charrue à disque		200	200	140	100
Pulvimixer (capot ouvert)		400 4 passes	400 4 passes	270 6 passes	200 8 passes

- Pré-humidification

La pré-humidification n'est utilisée que dans le cas où le matériau à stabiliser est un sable pulvérulent et dans le but de faciliter le passage des engins de chantier.

La portance du sable s'avère suffisante dès que sa teneur en eau atteint 4%.

Pour éviter un ensablement des citernes répanduses, il est nécessaire de réaliser les arrosages à grande vitesse. Pour les fondations ou les couches de base, les quantités à répandre sont de l'ordre de 8 litres par m², si le matériau naturel est sec, comme c'est souvent le cas en zone séhelienne ou saharienne.

Les rendements au répandage sont de l'ordre de 3.000 m² par heure.

Ils peuvent être sensiblement améliorés à condition d'utiliser des pompes tractées permettant un débit plus important des citernes.

- Mise en cordon

La mise en cordon est pratiquée dans le cas où le malaxage est prévu au moyen de centrales mobiles travaillant en cordon, par exemple Road Mixer Wood ou Travel Plant Barber Green.

Les productions relatives à la mise en cordon dépendent de l'épaisseur de la couche avant compactage et de la largeur de chaussée.

Les centrales mobiles ne peuvent en effet généralement absorber par mètre linéaire de chaussée qu'un volume limité de matériaux foisonnés.

En pratique, pour une chaussée de plus de 6 m de largeur il est nécessaire de réaliser 2 cordons, chaque cordon ayant moins de 800 litres par mètre linéaire.

La mise en cordon est généralement réalisée à la niveleuse; le nombre de passes de niveleuse étant de 4 en moyenne par cordon.

Le calibrage du cordon est réalisé, soit à la main, soit au moyen d'un calibre de cordon tracté.

B) - Incorporation du liant

Nous examinerons sous cette rubrique, d'une part l'incorporation d'agents stabilisants, tels que liants hydrauliques ou liants hydrocarbonés et également l'incorporation d'eau, cette dernière pouvant être considéré comme un liant.

Les opérations correspondantes comprennent : le répandage du liant et dans le cas de l'eau l'humidification, ainsi que le malaxage. Il est à noter que, dans le cas du traitement des plates-formes il n'est pas toujours procédé à un malaxage après humidification.

- Répandage du liant

Dans le cas des liants hydrauliques, les techniciens de répandage du liant sont fonction de la technique de stabilisation employée.

Dans le cas d'engins travaillant sur matériaux étalés, par passes multiples ou par passe unique, les répandages sont réalisés soit à la main, soit au moyen de répandeurs analogues aux semoirs à engrais utilisés en agriculture.

Dans le cas d'une stabilisation au moyen de centrales mobiles travaillant en cordon, le liant est directement répandu sur le cordon ou directement approvisionné à l'entrée du malaxeur.

Dans le cas d'une stabilisation au moyen de centrales fixes, le liant est approvisionné à l'entrée du malaxeur.

En cas de répandage manuel, les rendements sont essentiellement fonction des quantités à répandre au m² ainsi que des dispositions prises pour le stockage sur chantier. Il est pratiquement impossible de donner des valeurs moyennes de rendement.

Dans le cas de l'utilisation des liants hydrocarbonés, deux solutions sont possibles, soit un répandage sur matériaux étalés au moyen de citernes munies de pompe, soit un branchement des citernes directement sur les malaxeurs que ces derniers soient mobiles ou fixes.

Si le liant est répandu sur matériaux étalés, cette opération ne peut être réalisée qu'en plusieurs fois, la quantité répandue restant inférieure à 5 litres par m². et ce, dans le but d'éviter un coulage du liant sur les accotements et une concentration du liant dans les ornières créées par les citernes.

Entre chaque répandage il est indispensable de pratiquer un premier malaxage.

Les rendements des citernes dépendent des quantités totales de liant à incorporer par m² de chaussée et par conséquent de l'épaisseur totale des couches à stabiliser.

- Humidification

Dans le cas d'une stabilisation aux liants hydrauliques, l'humidification est effectuée après répandage du liant. Elle précède ce répandage dans le cas d'une stabilisation aux liants hydrocarbonés.

Dans le cas d'une stabilisation au moyen de centrales mobiles travaillant sur cordon ou de centrales fixes, l'incorporation de l'eau et des liants est faite simultanément.

Les citernes à eau et à liants sont donc directement branchées sur le malaxeur.

L'humidification sur matériaux étalés dépend bien entendu de la teneur en eau naturelle des matériaux et de la teneur en eau optimale déduite des essais en laboratoire; il est difficile de donner des valeurs de rendements, ceux-ci dépendant de ces différents paramètres et des distances de transport de l'eau.

- Malaxage

Le malaxage à la niveleuse, par déplacements successifs de cordon n'est possible que dans le cas de sable ou de sable argileux stabilisé mécaniquement ou à plus de 3% de liants hydrauliques

Trois déplacements successifs d'un même cordon ne dépassant pas 300 litres par mètre linéaire sont nécessaires dans la plupart des cas.

Les rendements correspondants sont faibles : 300 m² par heure au maximum.

Les malaxages à la charrue à disques sont généralement effectués à des vitesses de l'ordre de 90 m/min.

Le nombre de passes nécessaires ainsi que les rendements moyens susceptibles d'être pris en compte sont identiques au tableau suivant.

- Malaxage au Pulvimixer

Il existe actuellement un grand nombre de modèles possédant des largeurs de travail, des profondeurs de coupe et des vitesses d'avancement très différentes. Pour fixer les idées, nous avons indiqué au tableau ci-après les rendements moyens ainsi que le nombre de passes nécessaires pour différents types de stabilisation, aussi bien en fondation qu'en couche de base, au moyen de pulvimixer travaillant à la vitesse de 50 m/min, sur une largeur utile de 1m,80.

- Malaxage au Rotovator

Dans le cas d'un malaxage au moyen d'un rotovator porté par un tracteur à pneus, les rendements à prendre en compte sont environ les 2/3 de ceux d'un malaxeur automoteur, les largeurs de travail étant généralement inférieures.

- Malaxage au train de stabilisation

Il existe actuellement un grand nombre de trains de stabilisation travaillant soit sur matériaux étalés, soit en cordon.

Les appareils du premier type sont à rotors tournant à grande vitesse alors que les matériels travaillant sur cordon sont le plus souvent à palettes tournant à vitesse réduite.

Les rendements à prendre en compte sont variables suivant les types d'engins : les rendements instantanés indiqués par les constructeurs varient de 200 à 500 T/h suivant les engins, ce qui correspond à des productions utiles de 50 à 250 T/h, soit environ 160 à 800 m²/h pour des couches à stabiliser de 15 cm après compactage.

OPERATION : Malaxage à la charrue à disques

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	PLATE-FORME		865 3 passes	865 3 passes	650 4 passes	
	STABILISATION MECANIQUE		865 3 passes	865 3 passes	650 4 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	865 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION MECANIQUE					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	650 4 passes	430 6 passes	430 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					

Vitesse : 90 m/min.
Largeur : 2,40 m

$$S = \frac{60 \times 90 \times 2,40 \times 0,20}{N} = \frac{2.590}{N}$$

Operation
superflue



Operation
inopérante



TYPE DE SOL		SABLE	SABLE ARGILEUX	SABLE ARGILE	ARGILE SABLEUSE	ARGILE
TYPE DE STABILISATION		100% S	75% S + 25% A	50% S + 50% A	25% S + 75% A	100% A
PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE		1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes
	STABILISATION MECANIQUE		1.300 2 passes	1.300 2 passes	1.300 2 passes	
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	650 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	900 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	1.300 2 passes	1.300 2 passes	900 3 passes	900 3 passes	650 4 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	900 3 passes	650 4 passes	650 4 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					

Vitesse : 50 m/min.
Largeur : 1,80 m

$$S = \frac{60 \times 50 \times 1,80 \times 0,50}{N} = \frac{2.700}{N}$$

Opération superflue

Opération inopérante

C) Compactage et Finitions

- Aération

Les opérations d'aération s'avèrent nécessaires dans deux cas :

- lorsque le matériau à compacter présente une teneur en eau naturelle trop élevée,
- lorsqu'un liant hydrocarboné à trop forte teneur en solvant a dû être utilisé pour faciliter l'enrobage ou au cours des opérations de malaxage.

Les rendements à prendre en compte sont extrêmement variables suivant les quantités d'eau ou de solvant à éliminer et suivant les conditions climatiques locales.

Les opérations d'aération peuvent se faire soit à la niveleuse par déplacement de cordon, ce qui correspond à des rendements très bas, soit au moyen de pulvimixers travaillant à grande vitesse d'avancement (plus de 8km/h) et capot ouvert.

- Compactage

Pour un appareil déterminé, le paramètre intervenant le plus sur le rendement est le nombre de passes nécessaires pour obtenir le pourcentage de compactage voulu.

Pour un engin déterminé, le nombre de passes nécessaires est essentiellement fonction de la nature du sol et du pourcentage de compactage imposé.

La pente longitudinale de la section à compacter n'influe que sur la puissance nécessaire pour tracter les engins.

Les puissances nécessaires pour tracter les rouleaux à pneus, les rouleaux pied de mouton et les rouleaux vibrants sont données au tableau suivant :

Type de rouleau	Poids en T.	Tracteur	
		Type	Puissance en CV
Rouleau à pneus	13	pneus	45
"	35	Chenilles ou pneus	100
"	50	Chenilles	150
"	100	Chenilles	200
Rouleau à pieds de mouton (2 en ligne)	2 x 6	Chenilles	80
"	7 x 17	Chenilles	100
Rouleau vibrant	4/8	Pneus	45

Dans le cas des rouleaux à pneus ou à pied de mouton, les vitesses de travail doivent être d'autant plus basses que le matériau est plus sensible au feuilletage.

L'expérience montre que s'il n'existe pas de risque de feuilletage, la vitesse de travail n'influe pratiquement pas sur la densité obtenue.

Les vitesses de travail habituellement admises sont les suivantes :

- rouleau à pneus 4 à 8 km/h
- rouleau pied de mouton 4 km/h
- rouleau lisse 3 à 8 km/h
- rouleau vibrant 2 à 3 km/h

Il est à noter qu'on a tendance actuellement à effectuer les compactages de finition à grande vitesse de façon à se rapprocher des conditions de trafic. Cela implique l'utilisation de compacteurs automoteurs du type pneus.

Les productions utiles de différents types d'appareils de compactage : rouleaux à pneus, lourds et légers, rouleaux à pied de mouton, rouleaux lisses sont indiqués aux tableaux ci-après.

OPERATION : Compactage au rouleau à pneus 9/12 T

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE	SABLE ARGILEUX	SABLE ARGILE	ARGILE SABLEUSE	ARGILE
TYPE DE STABILISATION		100% S	75% S + 25% A	50% S + 50% A	25% S + 75% A	100% A
PLATE-FORME	STABILISATION MECANIQUE		325 10 passes	270 12 passes	200 16 passes	200 16 passes
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		325 10 passes	270 12 passes		
FONDATION	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	405 8 passes	405 8 passes	325 10 passes	200 16 passes	200 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	405 8 passes	405 8 passes	325 10 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		270 12 passes	230 14 passes	200 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	325 10 passes	270 12 passes	230 14 passes	200 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	270 12 passes	325 10 passes	325 10 passes		

Vitesse : 6 km/h S = $\frac{6.000 \times 1,80}{N} \times 0,3 = \frac{3.240}{N}$
 Largeur : 1,80 m

Operation superflue

Operation inopérante

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	PLATE-FORME	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	370 8 passes
	STABILISATION MECANIQUE		540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	
FONDATION	STABILISATION MECANIQUE		540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	360 6 passes	270 8 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes	270 8 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		360 6 passes	360 6 passes	270 8 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	540 4 passes	360 6 passes	360 6 passes	270 8 passes	215 10 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	540 4 passes	540 4 passes	540 4 passes		

Vitesse : 4 km/h S = $\frac{4.000 \times 1,80}{N} \times 0,3 = \frac{2.160}{N}$
 Largeur : 1,80 m



OPERATION : Compactage au rouleau à pieds de mouton 10 T (2 tambours) PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
FONDATION	STABILISATION MECANIQUE		200 10 passes	165 12 passes	140 14 passes	125 16 passes
	STABILISATION MECANIQUE		155 12 passes	140 14 passes	125 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		200 10 passes	200 10 passes	200 16 passes	125 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		250 8 passes	250 8 passes	155 12 passes	125 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION MECANIQUE					
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		155 12 passes	165 12 passes	125 16 passes	
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		200 10 passes	200 10 passes	165 12 passes	125 16 passes
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					
	STABILISATION MECANIQUE					

Vitesse : 3 km/h
 Largeur : 2 x 1,10

$$S = \frac{3.000 \times 2,20}{N} \times 0,3 = \frac{1.980}{N}$$

Operation superflue

Operation inoperante

OPERATION : Compactage au rouleau à pieds de mouton 10 T.
(2 tambours)

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	PLATE-FORME	180 6 passes				
	STABILISATION MECANIQUE	180 6 passes				
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	270 4 passes	270 4 passes	180 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	180 6 passes	180 6 passes	180 6 passes		
COUCHE DE BASE	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		180 6 passes			
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	180 6 passes	180 6 passes	180 8 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES		180 6 passes	135 8 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES					

Vitesse : 2 km/h $S = \frac{2.000 \times 1,80}{N}$ $x 0,3 = \frac{1,080}{N}$
 Largeur : 1,80

Operation
superflue

Operation
inopérante

OPERATION : Compactage au rouleau vibrant 4 T.

PRODUCTION UTILE EN m²/h

TYPE DE SOL		SABLE 100% S	SABLE ARGILEUX 75% S + 25% A	SABLE ARGILE 50% S + 50% A	ARGILE SABLEUSE 25% S + 75% A	ARGILE 100% A
TYPE DE STABILISATION	PLATE-FORME		340 4 passes	340 4 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
FONDATION	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%		225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	225 6 passes	225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					
	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE ≤ 4%		170 8 passes	170 8 passes	170 8 passes	
COUCHE DE BASE	STABILISATION LIANTS HYDRAULIQUES DOSAGE > 4%	170 8 passes	225 6 passes	225 6 passes		
	STABILISATION LIANTS HYDROCARBONES	170 8 passes	170 8 passes	170 8 passes		
	STABILISATION MECANIQUE					

Vitesse : 3 km/h
 Largeur : 1,50 m
 $S = \frac{3.000 \times 1,50}{N} \times 0,5 = \frac{1350}{N}$

Operation
superflue

Operation
inopérante

3.3 - CONCLUSIONS PARTICULIERES

3.3.1 - OPERATIONS ELEMENTAIRES

Traitement de la plate-forme

La préparation du matériau et l'humidification sont essentiellement fonction de la teneur en eau naturelle de la plate-forme.

Dans le cas du sable, ces opérations sont inutiles, les courbes Proctor mettant en évidence une faible variation de densité en fonction de la teneur en eau.

Les difficultés de préparation et d'humidification du matériau augmentent avec sa teneur en argile.

Dans le cas des argiles ces opérations s'avèrent délicates et l'on aurait tout intérêt à effectuer les compactages des plates-formes lorsque la teneur en eau naturelle est la plus voisine possible de la teneur en eau optimale : cela implique la réalisation des compactages à une période bien déterminée de l'année.

Si la teneur en eau naturelle est très supérieure à la teneur en eau optimale, il est pratiquement impossible de faire baisser cette teneur en eau naturelle par une simple aération et dans ce cas, il vaut mieux envisager une surépaisseur du corps de chaussée plutôt qu'une aération.

Les compactages sont à réaliser avec les engins les plus lourds possible, ce qui implique un précompactage destiné à permettre le passage des compacteurs lourds dans le cas du sable et à éviter le feuilletage sous l'effet des compacteurs lourds dans le cas des argiles.

Les compacteurs lourds à pneus sont utilisables dans tous les cas, les appareils travaillant par vibration étant surtout réservés aux sols très sableux et les rouleaux à pieds de mouton aux sols plus argileux.

Traitement des couches de base et des fondations

La préparation des matériaux avant incorporation du liant doit être d'autant plus soignée que le matériau devient plus argileux.

Les matériels du type agricole ne sont utilisables que pour des matériaux contenant moins de 50% d'argile et pour des dosages supérieurs à 4%.

Quelle que soit la nature du liant à incorporer, les appareils de malaxage nécessitent des puissances de brassage d'autant plus élevées que le matériau est plus argileux.

Dans le cas des liants hydrauliques le répandage manuel du liant n'est admissible que pour des dosages supérieurs à 4%.

Comme dans le cas des plates-formes, les fondations et couches de base devront être compactées au maximum d'intensité possible, ce qui permet une stabilisation avec dosage minimum en liant.

3.3.2 - CHOIX DES ENGINES

Mises à part les argiles dont la stabilisation demande une puissance de pulvérisation et de malaxage élevée, les matériaux étudiés peuvent être traités soit :

- par passes multiples
- au moyen de trains de stabilisation, à palettes ou à rotor, travaillant en cordon ou sur matériaux étalés.
- en centrale fixe.

Dans le cas des argiles, les trains de stabilisation à rotor, travaillant sur matériaux étalés sont préférables aux centrales fixes et aux appareils travaillant par passes multiples.

Le choix de la technique de stabilisation et du matériel est surtout fonction du dosage, de l'importance du chantier et des délais d'exécution.

Les trains de stabilisation et les centrales fixes sont adaptés aux chantiers à grand rendement quel que soit le dosage en liant.

Les appareils travaillant par passes multiples, adaptés aux chantiers de faible ou de moyenne importance, impliquent un dosage en liant supérieur à 4%.

Dans le cas de la stabilisation aux liants hydrauliques, il ne faut pas perdre de vue que les opérations d'incorporation du liant de compactage et de finition, doivent être terminées avant le début de prise du liant.

CHAPITRE 4

CONSIDERATIONS D'ORDRE ECONOMIQUE (1)

4.1 - GENERALITES

4.1.1. INTRODUCTION

1) Définitions

- Prix

On appelle PRIX DE REVIENT SEC, le prix qui ne renferme que les éléments de dépense entraînée par la fourniture des matériaux sur chantier ou la marche des engins et des équipes nécessaires à la mise en oeuvre de ces matériaux.

On appelle PRIX DE REVIENT CHANTIER, le prix de revient sec majoré :

- des frais d'installation et de repliement du chantier
- des frais généraux locaux.

Les frais d'installation de chantier comprennent :

- l'amenée, le montage et la réfection du matériel ainsi que son repliement; l'amenée et le retour du personnel,
- l'installation des ateliers et des magasins,
- l'installation des bureaux ou des logements de chantier.

Les frais généraux locaux comprennent :

- les frais de conduite des travaux (conducteurs de travaux, chefs d'équipes, topographes, etc...)
- les frais de direction du chantier (directeur de travaux, ingénieur du matériel, laboratoire de contrôle, etc...).

On appelle PRIX DE REVIENT ENTREPRISE, le prix de revient chantier majoré des frais de siège et, en particulier, la quote-part des frais généraux du siège, les frais d'études, les frais financiers, les aléas, les frais de déplacement du personnel du siège, etc...

On appelle PRIX DE VENTE ENTREPRISE, le prix de revient entreprise majoré des bénéfices de l'entreprise et des taxes auxquelles elle est soumise telles que taxes sur les prestations, taxes locales, etc...

On appelle PRIX DE REVIENT ADMINISTRATION, le prix de vente entreprise majoré des frais d'études de projet et de contrôle engagés en dehors du marché de travaux.

Ces cinq prix sont généralement des prix globaux. On peut toutefois définir de la même façon cinq prix unitaires ramenés à l'unité de travail produit, le mètre carré de chaussée par exemple dans le cas d'une construction routière.

- (1) Pour des commodités de lecture, l'étude du rendement des engins et les considérations d'ordre économique ont été classées en deux chapitres différents. En réalité, ces deux parties sont intimement liées, la première n'étant en somme qu'une introduction à la seconde.

- Production

Il est bien évident que les prix de revient indiqués ci-dessus sont essentiellement fonction des quantités produites et des conditions dans lesquelles ces quantités sont produites. L'examen des données fournies par les constructeurs d'engins et des résultats observés sur différents chantiers routiers montrent que les notions de rendement et de coefficient de rendement doivent être définies avec précision.

On appelle PRODUCTION INSTANTANÉE la quantité produite par une équipe ou un engin pendant 1 heure effective de travail.

Dans le cas des engins, elle coïncide généralement avec le rendement fourni par les constructeurs.

La PRODUCTION UTILE est la quantité effectivement produite pendant un temps déterminé, compte tenu des différents arrêts dus aux conditions de travail des engins. Ces arrêts comprennent en particulier, les petits entretiens et petites réparations sur le tas, les heures d'immobilisation volontaire dues aux travaux simultanés de plusieurs engins sur le chantier, les heures d'immobilisation involontaire dues à l'absence momentanée du conducteur d'un engin, les heures passées à l'atelier pour préparation, les intempéries, etc...

Le rapport entre la production utile et la production instantanée est le COEFFICIENT DE RENDEMENT.

Suivant les différents arrêts pris en considération on peut définir des coefficients de rendement différents :

- un coefficient d' "efficacité" correspondant à un engin neuf travaillant isolément et pour lequel les seuls arrêts à prendre en compte sont les entretiens courants et les casse-croûtes sur le tas.

Dans les meilleures conditions, ce rendement est généralement prix de l'ordre de 0,83, ce qui revient à dire que l'engin produit effectivement 50 minutes sur 60.

- un coefficient d' "adaptation" traduisant le fait que plusieurs engins adaptés à des opérations élémentaires différentes ne peuvent pas travailler simultanément.
- un coefficient de "disponibilité d'engins" tenant compte des immobilisations de matériel en atelier pour réparations.

Ce coefficient sert à évaluer le nombre d'engins à approvisionner pour que le nombre d'engins devant travailler en permanence soit maintenu.

- un coefficient "météorologique" tenant compte des arrêts de chantier dus aux intempéries et servant à estimer les besoins en matériel pour respecter les délais.
- un coefficient de "gestion" tenant compte des capacités des conducteurs de travaux et de l'entreprise en général pour mener à bien un travail déterminé.

Si l'on tient compte de toutes les immobilisations d'un matériel affecté à un chantier routier déterminé, on obtient le COEFFICIENT D'UTILISATION.

ou COEFFICIENT DE RENDEMENT GLOBAL qui n'est autre que le rapport entre la production utile statistique ramenée à 1 heure et la production instantanée théorique fournie par les constructeurs. Il y a lieu de ne pas confondre ce coefficient d'utilisation avec le COEFFICIENT DE MOBILISATION utilisé pour le calcul du taux de location d'un engin et qui représente le nombre de jours d'affectation de cet engin à différents chantiers dans l'année.

2) Méthode pratique du calcul des prix provisionnels.

Pour un travail déterminé lancé à l'adjudication, les entreprises intéressées opèrent généralement de la façon suivante :

L'examen des documents techniques de l'appel d'offre permet de fixer pour chaque opération élémentaire, le type et le nombre d'engins et la constitution des équipes nécessaires; compte tenu du planning d'exécution imposé et des rendements observés sur des chantiers analogues.

La totalisation de ces besoins en matériel permet de fixer un parc de matériel nécessaire à l'ensemble du chantier et de réajuster les conditions d'utilisation des engins dans chacune des opérations élémentaires de façon à garantir une utilisation rationnelle des engins et plus particulièrement des engins de prix de revient élevé.

Le parc en matériel étant fixé, l'ensemble du matériel constituant ce parc est loué au chantier par l'entreprise suivant un barème de location propre à chaque entreprise mais établi sur le même principe que les barèmes officiels.

Connaissant les prix de location des engins, leur rendement instantané et leur coefficient d'utilisation, il est possible de déterminer les prix de revient secs correspondant à chaque poste.

Une étude analogue est faite dans le cas d'opérations élémentaires à réaliser au moyen d'équipes et les besoins globaux en personnel d'exécution chiffrés.

De même, l'estimation des frais de chantier n'est possible qu'après étude des différents postes intervenant dans ces frais tels qu'amenée et repli du matériel et installations de chantier.

Ces frais de chantiers sont considérés soit comme des frais généraux locaux et amortis sur chaque poste du bordereau de prix, soit comme un travail particulier annexe remboursé dans les mêmes conditions que les différents travaux proprement dits.

4.1.2. PARAMETRES INTERVENANT DANS LE CALCUL D'UN PRIX

1) Dépenses en matériaux

Les dépenses en matériaux comprennent les postes suivants :

- l'apport du matériau à stabiliser
- la livraison au chantier des agents stabilisants
- l'apport de l'eau nécessaire au compactage ou au malaxage.

Les dépenses relatives à l'apport du matériau à stabiliser comprennent les frais :

- de déforestation et de découverte des emprunts,
- de préparation éventuelle des matériaux dans l'emprunt,
- de chargement
- de transport

Les dépenses en agents stabilisants tels que ciment, chaux, liants hydrocarbonés, hydrophobants, etc... comprennent d'une part les frais d'achat et d'autre part les frais d'acheminement, de déchargement et de stockage au chantier.

Les dépenses relatives à l'apport d'eau, qui peut d'ailleurs être considéré comme agent stabilisant comprennent :

- les frais d'installation de stations de pompage ou même de réalisation de puits ou de forage
- les frais de transport au chantier
- éventuellement, les frais de stockage.

2) Dépenses de mise en oeuvre

Prix de revient d'une équipe

Les dépenses relatives au fonctionnement d'une équipe comprennent les salaires, les charges sociales et les frais de petit matériel.

Prix de revient d'un engin

D'une façon générale, sur les chantiers de travaux publics le prix de revient d'un engin comprend les frais de personnel de conduite et d'entretien.

Les dépenses correspondantes comprennent :

- les frais de mise à disposition ou de location proprement dite, soit : l'amortissement, les grosses réparations et pièces de rechange, la main-d'oeuvre d'atelier.
- les frais d'exploitation directement liés à la marche de l'engin et comprenant : les pièces d'usure, les carburants, les ingrédients, le personnel de conduite et le petit entretien journalier.

Les frais de mise à disposition sont intégralement supportés par le chantier quelle que soit la production effective des engins alors que les frais d'exploitation sont essentiellement liés à la marche effective des engins.

Frais de chantier

Les frais de chantier comprennent, avons-nous vu :

- les frais d'installation et de repli du chantier proprement dit, atelier, magasin, etc... et les frais d'amenée et de repli du matériel et du personnel.

- les frais généraux locaux correspondant aux frais de conduite des travaux, de direction locale, d'équipes topographiques et de contrôle.

Les frais d'installation de chantier sont, bien entendu, fonction de l'éloignement du chantier et des facilités d'accès.

Il est bien évident que les frais de chantier sont pratiquement indépendants des quantités effectivement produites et que leur incidence sur le prix d'une solution sera d'autant plus grande que le chantier considéré est de moindre importance.

4.1.3 - COMPLEXITE DE L'ETUDE

L'énoncé des différents paramètres intervenant dans une étude de prix met en évidence l'extrême complexité du problème.

1) Incidence des prix des matériaux

Etant donné les différents régimes douaniers existant actuellement en Afrique, les prix de revient des matériaux d'importation sont essentiellement variables suivant les différents territoires. A titre d'exemple, les prix des ciments étaient les suivants aux 2ème trimestre 1962 :

Lieu	Prix (la tonne en francs CFA)
DAKAR	6.623
ABIDJAN	6.700
COTONOU	12.097
NIAMEY	17.400
TANANARIVE	10.450
BAMAKO	20.055
BOBO-DIOULASSO	12.600
YAOUNDE	10.525
FORT-LAMY	24.000
DOUALA	7.250
BANGUI	15.790

Ces différences de prix ne s'expliquent pas par l'incidence du transport maritime ni par l'éloignement de la côte de ces différentes capitales, mais bien plus par l'incidence des droits de douane extrêmement variables d'un territoire à l'autre.

En ce qui concerne le prix de revient des matériaux d'apport, il est bien évident que les paramètres intervenant sont variables dans chaque cas particulier.

En zone de forêt, les dépenses de déforestation grèvent considérablement le prix de revient d'un matériau d'apport.

En zone de savane, les frais de découverte grèvent d'autant plus le prix de revient du matériau que l'épaisseur de découverte est importante par rapport à l'épaisseur de la couche exploitable.

Les distances de transport sont également très variables et fonction de la position des emprunts et des servitudes dues à la présence des riverains : villages, plantations, etc...

Le tableau suivant montre que les variations que peuvent subir les prix des matériaux à l'intérieur d'un même pays, soit en l'occurrence, le Congo Léopoldville :

MATERIAU	UNITE	Coût de l'unité fin 1962/début 1963 (en francs congolais)		
		STANLEYVILLE	ELISABETHVILLE	LEOPOLDVILLE
Chaux	tonne	4.100	1.600	
Ciment	"	4.100	2.205	
Cut-back	"	6.425	5.987	3.985
Bitume	"	5.825	5.987	4.058
Goudron	"	6.425	4.500	
Concassé	m ³	330	550	
Sable	"	125	460	

Par ailleurs, le prix de revient de l'eau, s'il est souvent négligeable dans les pays à climat équatorial, peut, par contre, grèver considérablement le prix de revient d'une couche de base routière comme c'est le cas en zone Saharienne en particulier au Tchad, au Niger, au Soudan et en Mauritanie.

A ce sujet, il est intéressant de noter qu'en zone Saharienne, des forages d'eau ont été spécialement prévus pour la construction de routes et que leur prix ont, par conséquent, été pris en considération dans le calcul des prix de revient des chaussées.

2) Incidence des prix de revient des engins

Les frais fixes et en particulier les amortissements s'avèrent extrêmement variables suivant les territoires du fait, d'une part, des différences dans le prix d'achat des engins suivant les territoires et d'autre part, du fait de coefficients d'utilisation très différents d'un pays à l'autre.

En particulier, les frais de douane et les différentes taxes à l'importation modifient considérablement les prix d'achat d'engins d'un territoire à l'autre.

Le tableau suivant donne par exemple, les droits et taxes supportés lors de l'importation d'un cylindre compresseur dans différents territoires :

PAYS	DROITS DE DOUANE %	TAXES %	NATURE DE LA TAXE
<u>Afrique occidentale</u>			
Sénégal)	15	2,22	forfaitaire
Mauritanie)			
Côte d'Ivoire)			
Niger)			
Haute Volta)			
<u>Afrique Equatoriale</u>			
Congo)	3	8,50	T.C.A. à l'impor- tation
Gabon)			
Tchad)			
République Centrafricaine (
<u>Madagascar</u>	exonéré	3,00	Développement économique

En ce qui concerne le Cameroun, ces types de matériels entraînent en franchise jusqu'au 1er juillet 1962. A partir de cette date, ils sont assujettis à une taxe sur la valeur ajoutée.

Il est donc très difficile de calculer des barèmes de location ou d'utilisation d'engins si l'on ne connaît pas le pays dans lequel le barème doit être appliqué.

En ce qui concerne les frais variables relatifs au fonctionnement proprement dit des engins, on rencontre la même diversité suivant les pays, en particulier, en ce qui concerne les carburants.

A titre d'exemple, les prix des carburants sont actuellement les suivants :

LIEU	ESSENCE	GAS-OIL
DAKAR	4.230 Francs CFA/T	3.480 Francs CFA/T
ABIDJAN	3.090 "	2.270 "
KOTONOU	4.045 "	2.815 "
NIAMEY	4.320 "	3.740 "
STANLEYVILLE	870 Francs congo- lais/m ³	479 Francs congo- lais/m ³

Là encore, les prix suivent plus les fluctuations douanières que les règles relatives au transport de produits.

3) Incidence de la production des engins

Les paramètres influant sur la production des engins sont, d'une part, les données climatiques du pays considéré et d'autre part, les sujétions propres à chaque chantier.

Il est évident que le prix de revient d'une couche de base réalisée en saison de pluies sera plus élevé que celui d'une couche de base réalisée en saison sèche.

D'autre part, le prix de revient d'une chaussée sur laquelle la circulation est maintenue ne peut pas être comparé au prix de revient d'une chaussée à exécuter sur un tracé neuf.

Donc, d'une façon générale, il existe un grand nombre de paramètres particuliers à chaque chantier et intervenant d'une façon très sensible sur le prix de revient :

- éloignement et accès du chantier,
- importance du programme annuel du territoire considéré,
- délais d'exécution fixés pour les travaux,
- importance et disponibilité des parcs de matériels locaux,
- sujétions particulières à chaque chantier.

Dans ces conditions, il peut paraître absolument impossible de déterminer, même de façon approchée, une formule générale faisant intervenir différents facteurs et affectée de termes de pondération dépendant des conditions climatiques ou économiques de la région où la route doit être construite.

Nous essayerons toutefois, dans ce qui suit, d'étudier en détail, pour chaque type de sol, les rendements ou productions auxquels on peut s'attendre, les prix moyens de fonctionnement des engins et des équipes et d'analyser l'incidence des frais de chantier sur le prix total d'une solution déterminée.

4.2. ELEMENTS DU PRIX DE REVIENT D'UNE SOLUTION

4.2.1 - PRIX DE REVIENT DES MATERIAUX

1) Apport du matériau à stabiliser

Les dépenses relatives au matériau d'apport comprennent :

- la découverte des emprunts : décapage et éventuellement déforestation, terrassement de la découverte de matériaux inutilisables.
- la préparation éventuelle des matériaux dans l'emprunt : homogénéisation, buttage.
- le chargement
- le transport

Les paramètres ayant le plus d'influence sur le prix de revient du matériau d'apport, sont d'une part, l'importance de la découverte totale par rapport à l'épaisseur du matériau exploitable et d'autre part, la distance de transport moyenne entre les différents emprunts et les sections à traiter.

Il y a également lieu de tenir compte du coefficient de foisonnement du matériau à extraire et du rapport entre la densité foisonnée de ce matériau et sa densité après compactage.

Les prix de matériau d'apport sont essentiellement variables d'un chantier à un autre. Quelques valeurs, exprimées en prix au m² de couche de base, et en pourcentage du prix total de cette couche de base sont indiquées au tableau suivant :

INFLUENCE DE L'APPORT DU MATERIAU
A STABILISER SUR LE PRIX D'UNE COUCHE DE BASE
(valeur 1961)

PAYS	LOCALITE	TYPE DE STABILISATION	PRIX AU PROFIL		% relatif au prix total de la couche de base sans revêtement
			1e m3	1e m2	
Sénégal			en francs CFA	en francs CFA	
Sénégal	Louga	Sol ciment	185	37	5,1
Côte d'Ivoire	Abidjan	Mécanique	420	63	44,0
"	"	Sol ciment	420	63	10,8
Congo	Brazzaville	Mécanique	350	53	39,5
Congo	Elisabethville	Sol scories	-	7,75 ⁽¹⁾	24,0
Cameroun	Garoua	Sol chaux	990	150	33,0

2) Approvisionnement des liants

Les prix à faire intervenir dans une solution comportant un amendement ou une stabilisation s'entendent rendu magasin du chantier. Ils comprennent :

(1) Franc congolais

- le prix de vente fournisseur
- les frais d'acheminement au magasin
- les frais de manutention et de stockage.

Les paramètres principaux influant sur le prix d'un liant sont : le prix de vente des fournisseurs et les dépenses d'acheminement.

Il y a lieu de tenir compte des pertes en cours de manutention et de stockage, pertes d'autant plus importantes que les ruptures de charges sont plus fréquentes. On admet généralement des pertes de l'ordre de 10% par coulage dans le cas de liants hydrocarbonés et d'environ 5% dans le cas de liants hydrauliques. Ces pertes peuvent être réduites dans le cas de transport en vrac.

3) Approvisionnement de l'eau

Les frais d'approvisionnement de l'eau comprennent :

- l'amortissement des installations de pompage aux points d'eau et éventuellement de stockage au droit de ces points d'eau dans le cas où ceux-ci sont de trop faible débit.
- éventuellement, l'amortissement de forages,
- les frais de transport,
- éventuellement, les frais de stockage sur chantier dans le cas où les points d'eau sont trop éloignés des zones d'utilisation.

Dans les régions à climat tropical humide, les frais d'approvisionnement d'eau sont généralement limités aux frais de transport sur quelques kilomètres et l'incidence sur le prix total des couches de base est généralement très faible. Par contre, en zone saharienne, les dépenses d'approvisionnement en eau peuvent atteindre un pourcentage considérable du prix de la couche de base. Ainsi, dans le cas d'une stabilisation au lignosulfite réalisée au Gassi Touil, les dépenses en approvisionnement d'eau représentaient 12,9% du prix total de la couche de base, soit environ le double du prix de l'agent stabilisant. Ces dépenses comportaient deux parties pratiquement égales : l'amortissement des forages réalisés et le transport de l'eau.

4.2.2. PRIX DE REVIENT D'UNE EQUIPE

Le prix d'une équipe comprend : les salaires, les charges sociales souvent évaluées à 40% des salaires, les frais de petit matériel qui peuvent atteindre 20 à 30% des salaires versés.

Les frais de main-d'oeuvre sont très variables d'un chantier à un autre et dépendent du degré de mécanisation du chantier ainsi que de la technique de stabilisation adoptée.

Les opérations élémentaires nécessitant le plus de main-d'oeuvre sont :

- la préparation du matériau et en particulier, l'élimination à la main de gros éléments ainsi que le calibrage des cordons.
- l'incorporation du liant et en particulier, les répandages manuels et les malaxages en centrale fixe à l'aide de bétonnières ou de batteries de bétonnières.

Quelques valeurs moyennes observées sur différents chantiers sont indiquées ci-dessous :

Technique de stabilisation	Mode de stabilisation	Main-d'oeuvre en Homme/jour/m ²
Par passes multiples	Mécanique	0,014
"	Liants hydrauliques	0,22
Par passe unique sur cordon	"	0,16
En centrale	Liants hydrocarbonés	0,05
Batteries de bétonnières	Liants hydrauliques	0,22

4.2.3. PRIX DE REVIENT D'UN ENGIN

1) Méthodes de calcul d'un prix de revient

Ainsi qu'il a été indiqué au paragraphe 4.1.2, les dépenses de fonctionnement d'un engin comportent :

- des frais fixes pratiquement indépendants du fonctionnement de l'engin et correspondant aux postes suivants :
 - amortissement et intérêt du capital non amorti,
 - pièces de rechange,
 - main-d'oeuvre d'atelier pour réparations et révisions périodiques,
- des frais variables étroitement liés à la marche effective de l'engin et correspondant aux postes suivants :
 - Pièces d'usure,
 - carburant,
 - ingrédient,
 - personnel de conduite,
 - petit entretien.

Les charges d'amortissement ramenées à l'heure effective de travail dépendent de trois paramètres :

- longévité du matériel ou durée d'amortissement
- coefficient de mobilisation des parcs
- coefficient d'utilisation du matériel sur chantier.

Lors des remises de prix faisant suite à un appel d'offres, on assiste très fréquemment à une disparité de prix qui s'explique le plus souvent par des différences d'évaluation du coût de fonctionnement des engins suivant les entreprises et en particulier, en ce qui concerne les charges d'amortissement.

Il est en effet possible à une entreprise, suivant l'opportunité, d'effectuer un travail avec un matériel totalement amorti ou, au contraire, d'amortir sur le chantier considéré, totalité ou partie du matériel. Dans certains cas, les entreprises peuvent même être amenées à reporter l'amortissement de leur matériel sur un travail ultérieur.

Les doctrines et méthodes d'amortissement varient considérablement d'un pays à un autre et d'une entreprise à une autre.

Dans les tarifs de location de matériels pour travaux en régie, les méthodes utilisées par les administrations ne tiennent pas compte des charges d'intérêts sur le capital restant à amortir.

D'autre part, dans le cas des administrations, les amortissements du matériel sont toujours répartis sur un nombre d'heures effectives de travail, alors que les entreprises soumises à des règlements fiscaux ne sont pas maîtres de leurs amortissements et doivent tenir compte du coefficient de mobilisation de leur parc de matériel.

Dans le cas de location de matériel d'administration, la longévité du matériel est exprimée en journées de travail effectives, elle est indépendante du coefficient de mobilisation de ce matériel.

Dans le cas des entreprises travaillant en Afrique et pour lesquelles les coefficients de mobilisation sont inférieurs à ceux des parcs de l'administration, il est nécessaire de limiter la longévité à un nombre déterminé d'années légales si l'on veut éviter que le matériel ne soit pas amorti avant d'être démodé.

Il s'ensuit nécessairement une disproportion entre les tarifs de location des Entreprises à leur chantier et ceux de l'administration amenée à louer du matériel.

Un exemple de durée d'amortissement prise en compte par l'administration et par type de matériel est indiqué au tableau suivant :

CLASSEMENT DU MATERIEL ROUTIER PAR LONGEVITE

(Sénégal)

Longévité en journées de travail effectif	Type d'engins	classe	Désignation du matériel
600	Matériel de bitumage mobile avec moteur	IV	Finisher épandeur, Travel Plant Epandeuse à liant
1.000	Engins de terrassement à chenilles avec moteur	I	Tracteur à chenilles Pelle mécanique
	Engins de terrassement à roues avec moteur	II	Niveleuse Loader Elevating Grader Pulvimixer, Dumper, Camion Diesel Tracteur à roues
	Matériel de bitumage fixe	V	Malaxeur, Centrale fixe, Fondeur
	Matériel de transport avec moteur	IX	Camion benne, Citerne, Camion à plateaux, Semi-remorque avec tracteur
1.200	Matériel avec mouvement mécanique	IX	Bétonnière Groupe Motopompe
1.450	Engins de terrassement sans moteur	III	Scraper, Ripper, Rooter, Rouleau à pneus, Rouleau à pieds de mouton, Niveleuse (tractée)
	Matériel routier	VI	Cylindre, Rouleau à pneus auto-moteur, Gravillonneuse, Spreader
	Matériel de carrière	VII	Chargeur à godets
	Matériel de transport sans moteur	X	Remorque, Porte-char, Plateau ou Citerne
3.600	Matériel d'installation	XII	Roulotte aménagée Baraque de chantier Réservoir à eau

Le coefficient de mobilisation des parcs de matériels est le rapport entre la somme des locations effectuées et la possibilité totale de location. Il est, bien entendu, fonction des disponibilités en matériel de chaque territoire, des programmes de travaux de ces territoires et des conditions climatiques.

Le tableau suivant donne quelques valeurs de coefficients de mobilisation pour différents territoires ou localités :

Pays ou localités	Coefficient de mobilisation des parcs de matériels
Port-Etienne (Mauritanie)	0,82
Mauritanie (moyenne)	0,64
Sénégal	0,54
Gambi	0,52
Guinée	0,48
Côte d'Ivoire (zone maritime)	0,40
Cameroun (zone maritime)	0,25

Les pourcentages relatifs des différents postes intervenant sur le prix total de location d'un engin sont bien entendu, variables suivant la nature de cet engin.

A titre d'exemple, les indices applicables à Dakar au matériel loué par l'administration sont les suivants :

MONTANT DES POURCENTAGES DES DIFFERENTS POSTES ENTRANT
DANS LA LOCATION DU MATERIEL DE T.P. PAR RAPPORT AU

PRIX D'ACHAT

(par journée de travail effectif)

Désignation par Catégories	Frais variables								Total lo- cal avec exploita- tion Postes 1 à 8 en %	Frais généraux
	1	2	3	4	5	6	7	8		
I - Engins de terrassement à chenilles avec moteur	0,1	0,071	0,0583	0,0121	0,0463	0,0218	0,0182	0,0204	0,3481	Les frais généraux sont laissés à l'appréciation du loueur. Toutefois, ils sont fixés à 25% pour les services administratifs
II - Engins de terrassement à roues avec moteur	0,1	0,071	0,0583	0,0152	0,043	0,0129	0,013	0,0195	0,3329	
III - Engins de terrassement sans moteur	0,0689	0,040	0,035	0,026	-	0,023	-	0,0061	0,1783	
IV - Matériel de bitumage com- biné avec moteur	0,1667	0,106	0,060	0,0157	0,017	0,0073	0,038	0,0150	0,4267	
V - Matériel de bitumage fixe	0,1	0,022	0,067	0,006	0,18	0,018	0,022	0,018	0,4330	
VI - Matériel routier	0,0689	0,035	0,024	0,0150	0,028	0,0091	0,013	0,014	0,2070	
VII - Matériel de carrière	0,0689	0,022	0,067	0,006	0,18	0,018	0,022	0,018	0,4019	
VIII - Matériel de manutention et de levage	0,1	0,064	0,0583	0,016	0,08	0,015	0,005	0,016	0,3993	
IX - Matériel de transport avec moteur	0,1	0,064	0,045	0,209	0,11	0,022	0,044	0,018	0,448	
X - Matériel de transport sans moteur	0,0689	0,006	0,0097	0,034	-	0,002	-	0,0025	0,1231	
XI - Matériel Bâtiment et Travaux Publics	0,0834	0,0640	0,0583	-	0,078	0,016	0,079	-	0,3787	
XII - Matériel d'installation de chantier et instruments de mesure	0,0270	0,0020	0,0020	-	-	0,004	-	-	0,035	

Les postes relatifs aux frais fixes sont généralement du même ordre que ceux pris en compte pour des travaux effectués en Europe. Par contre, les frais concernant les carburants, le personnel de conduite et le petit entretien diffèrent sensiblement des frais correspondant à un matériel utilisé en Europe dans les mêmes conditions.

Les frais d'entretien sont généralement très supérieurs en Afrique, ils sont d'ailleurs compensés par des frais de personnel de conduite moins élevés.

Les coûts de fonctionnement des engins à l'heure effective sont souvent exprimés en 1/10.000ème de la valeur du matériel.

Le tableau suivant donne une comparaison entre les tarifs de location à l'heure effective pratiquée par les services administratifs de Dakar et ceux habituellement pratiqués en Europe par les entreprises.

COMPARAISON DES COUTS DE FONCTIONNEMENT A L'HEURE EFFECTIVE en 1/10.000ème de la valeur du matériel		
Désignation du matériel	Dakar S.O.M.	Europe (France) réf. TOFANI
Pelles mécaniques jusqu'à 750 l	4,35	4,5 à 3,5
Tracteurs à chenilles	4,35	5,0 à 7,0
Niveleuses	4,15	4,0 à 6,0
Tombereaux	4,15	4,65 à 6,5
Camions lourds	4,15	3,5 à 5,5

Si les valeurs adoptées à Dakar sont comparables à celles de l'Europe pour les pelles et camions, elles paraissent sous-estimées en ce qui concerne les tracteurs à chenilles et les niveleuses.

Il est à remarquer que ces tarifs correspondent à d'excellents coefficients de mobilisation des parcs et qu'ils ne peuvent pas être extrapolés à d'autres territoires moins favorisés.

2) Exemples de barèmes de locations

Nous avons indiqué au tableau suivant quelques tarifs de location de matériel administratif, à la journée de mise à disposition, les frais de fonctionnement restant à la charge du loueur:

EXEMPLES et COMPARAISONS DES PRIX DE LOCATIONS DE MATERIEL ADMINISTRATIF (Tarif à la journée de 8 heures - Frais fixes)		
Matériel	Dakar en francs CFA 1960	Léopoldville F. Congolais 1959
Tracteur	18.000	2.400
Tracteur 90 CV Bull	13.000	1.840
Niveleuse 100 CV	15.000	1.440
Pulvimixer		2.080
Tracteur 40 CV	3.000	640
Rouleau à pneus 50 T		560
Rouleau à pneus 10 T	1.600	80
Rouleau lisse tricycle 10/12 T	4.880	640
Rouleau vibrant 350 kg		360
Epandeuse à liant		520

Il est bien entendu que ces barèmes ne peuvent pas être extrapolés à d'autres territoires et qu'ils ne sont pas valables dans le cas de travaux confiés à une entreprise travaillant avec son propre matériel.

4.2.4. ANALYSE DES FRAIS DE CHANTIER ET DES FRAIS GENERAUX

1) Frais de chantier

Les frais de chantier comprennent :

- a) - les dépenses d'installation fixes du chantier et éventuellement, du repli de ces installations.

La totalité de ces dépenses n'est pas nécessairement amortie sur les travaux effectués mais fait souvent l'objet d'un prix spécial au bordereau, lorsque l'administration désire conserver à la fin des travaux, la propriété de ces installations dans le cadre de l'équipement des territoires.

- b) - les dépenses d'amenée et de repli du matériel.

Ces dépenses sont essentiellement fonction des difficultés d'accès au chantier et leur incidence sur l'unité de travail produit dépend du volume total de travaux faisant l'objet du marché.

Il est à noter que l'estimation des dépenses d'amenée et de repli d'un matériel déterminé conduit souvent à modifier la constitution du parc d'engins nécessaire pour réaliser un travail déterminé.

Ainsi on préférera souvent réaliser le malaxage d'un sol-ciment au moyen d'un pulvimixer facile à transporter par route ou piste, plutôt que d'approvisionner une centrale mobile encombrante surtout si son transport doit s'effectuer par voie ferrée ou voie fluviale.

L'amenée du matériel peut conduire à des dépenses considérables, surtout lorsqu'il s'agit de matériel lourd.

Comme ordre de grandeur, indiquons les tarifs de transport pratiqués à Dakar par les organismes administratifs loueurs de matériel :

Transports spéciaux d'engins de Génie Civil

Tarif transport sur remorque porte-char y compris frais de chargement et de déchargement par tranche indivisible de 10 km.
(en francs CFA)

Désignation des charges	Tarif forfaitaire lère tranche	Tarif forfaitaire Tranches suivantes
Moins de 10 Tonnes	8.000	3.000
de 10 Tonnes à 20 Tonnes	10.000	4.000
au-dessus de 20 Tonnes	15.000	5.000
Transport d'engins en remorque	5.000	3.000

- c) - Les frais généraux locaux et en particulier les frais de conduite des travaux de topographie et de contrôle.

Les effectifs en personnel d'encadrement sont bien entendu variables d'un chantier à un autre, ils comprennent généralement:

- Un ingénieur directeur de travaux, ne consacrant souvent qu'une partie de son temps au chantier.
- Un conducteur de travaux,

- Un chef de chantier, si le corps de chaussée ne comprend pas de fondation, ou plusieurs dans le cas où le compactage de la plate-forme et la réalisation des fondations sont effectués loin à l'avancement devant le chantier de couche de base.
- un géomètre,
- un chef mécanicien,
- un pointeur,
- plusieurs laborantins souvent dirigés par le géomètre lorsque celui-ci est familiarisé avec les essais de contrôle.

2) Frais généraux entreprise

Les frais généraux d'entreprise sont souvent évalués à 40% du prix de revient sec des travaux, compte tenu de la répartition suivante :

- frais généraux 10%
- quote-part des frais de siège 8%
- frais financiers 4%
- bénéfice 13%
- aléas 5%.

Les marges Frais généraux - bénéfiques des entreprises sont bien entendu très variables d'un chantier à un autre et dépendent des travaux en cours dans un territoire considéré et de la concurrence.

4.2.5. FRAIS D'ETUDES ET DE CONTROLE

Les frais d'études comprennent :

- les études topographiques : couverture par photos aériennes, recherche de tracés, implantation des polygonales de base, levé de la bande d'étude généralement au 1/5.000ème, étude du tracé en plan et profil, levé des emplacements d'ouvrages d'art, généralement au 1/500ème.
- les recherches de matériaux : reconnaissance générale des sols à l'emplacement des tracés possibles, reconnaissance des emprunts et carrières, recensement des points d'eau, reconnaissance des fondations d'ouvrages d'art, étude en laboratoire des stabilisations et des revêtements.
- l'établissement des dossiers techniques et administratifs : projet définitif des terrassements, projet des ouvrages, rédaction du cahier des charges, préparation du dossier d'appel d'offres.

Les frais de contrôle portent sur les contrôles de mise en oeuvre quelquefois sous-traités et sur la surveillance des travaux par du personnel administratif directement payé sur les crédits de construction.

Les frais d'études sont bien entendu très variables d'un territoire à l'autre, suivant les difficultés topographiques, la densité de la végétation, les conditions climatiques et les caractéristiques géométriques de la route à construire.

On consacre, depuis quelques années, des sommes de plus en plus importantes aux études de sol ainsi qu'aux essais de contrôle ce qui s'explique par le fait que les solutions techniques mises en oeuvre laissent de moins en moins de marge de sécurité, en particulier en ce qui concerne les épaisseurs de chaussées et les dosages en agents stabilisants.

Il est difficile de donner des coûts d'études dans différents territoires, toutefois les valeurs moyennes suivantes ont été observées :

Frais d'études :

100.000 à 450.000 Francs CFA par km, soit 15 à 75 Francs CFA par m² de chaussée revêtue.

En ce qui concerne les études de sol, les prix au m² varient de 3,8 à 20,0 francs CFA.

On consacre souvent aux études en laboratoire des budgets correspondant à des pourcentages de 0,5 à 1% du montant des travaux.

4.3.- PRIX DE REVIENT D'UNE SOLUTION

4.3.1 - Coût des opérations élémentaires

Dans ce qui suit sont donnés quelques exemples de prix de revient secs d'opérations élémentaires et la comparaison entre plusieurs solutions possibles.

- Préparation des matériaux :

La pulvérisation des matériaux avant stabilisation peut être faite soit à la charrue à disque, soit au pulvimixer.

Les prix de revient en francs CFA à l'heure effective des engins utilisables dans les deux cas sont les suivants :

Solution charrue à disque	Solution pulvimixer
Un tracteur à chenilles 55 CV 1.875,-	Un tracteur à pneus 45 CV 600,-
Une charrue à disque largeur 2,40 m 190,-	Un pulvimixer ... 2.250,-
total 2.065,-	total 2.850,-

Compte tenu des productions utiles indiquées au chapitre III, les prix de revient au m² seraient les suivants :

Nature du sol	Solution charrue à disque	Solution Pulvimixer
Sable argileux	2,40	2,19
Sable argile	2,40	2,19
Argile sableuse	3,18	2,19

La solution pulvimixer paraît donc plus économique d'autant plus qu'un travail à la charrue à disque amène une perturbation du profil en travers et par conséquent nécessite souvent un passage de niveleuse pour rétablir ce profil.

La solution charrue à disque ne peut se justifier que dans le cas de petits programmes dans des régions où l'on peut disposer sur place de matériel agricole et où, par conséquent, l'amenée d'un pulvimixer ne pourrait être amortie.

La pulvérisation au moyen d'un rotavator, porté et actionné par le tracteur et de prix de location très inférieur à celui d'un pulvimixer se justifie économiquement dans le cas de sable argileux, à condition toutefois qu'il ne s'agisse que d'une stabilisation mécanique.

- Malaxage :

Dans le cas d'une stabilisation par passes multiples, on peut utiliser soit une niveleuse travaillant en cordon, soit une charrue à disques, soit un pulvimixer.

Les prix de revient de ces engins sont les suivants :

	<u>Prix à l'heure effective en Francs</u> <u>CFA</u>
Niveleuse	2.750
Charrue à disques	2.065
Pulvimixer	2.850

Les prix de revient au m² de ces différents engins et pour différents types de stabilisation sont les suivants :

Niveleuse : 8,60 .F.A./m² (pratiquement indépendant du matériau)

Autres engins :

			charrue à disques en francs	Pulvimixer C.F.A./m ²
Stabilisation mécanique (plate-forme ou fondation)	Sable argileux		2,40	2,19
	Sable argile		2,40	2,19
	Argile sableuse		3,20	2,19
Stabilisation aux liants hydrauliques	Sable	fondation	2,40	2,19
		couche de base	3,20	2,19
	Sable argileux	fondation	3,20	2,19
		couche de base	4,00	2,19
	Sable argile	fondation	3,20	3,17
		couche de base	4,00	3,17

Donc, dans l'ordre croissant des prix de revient on trouve : le pulvimixer, la charrue à disques et la niveleuse travaillant en cordon.

- compactage

Les prix de revient à l'heure de travail effective des engins les plus couramment utilisés sont les suivants :

Prix par heure effective francs CFA

1- Rouleau à pneus 9/12 T

Rouleau à pneus	223	
Tracteur pneus 45 CV	<u>600</u>	823

2- Rouleau à pneus 30/45 T

Rouleau à pneus	660	
Tracteur chenille 85 CV	<u>2.070</u>	2.730

3- Rouleau pieds de mouton
(2 éléments)

Rouleau pieds de mouton	140	
Tracteur chenille 55 CV	<u>1.630</u>	1.870

4- Rouleau lisse 10/12 T

960

Dans le cas du compactage des plates-formes, les prix de revient secs au m2 seraient les suivants :

Compacteurs légers :

Rouleau à pneus 9/12 T	1,52 à 2,42 F.F.A.
Rouleau lisse 10/12 T (pour les sables argileux et sable argile	1,72 F.F.A.
Rouleau pieds de mouton 2 éléments ..	5,70 à 9,35 F.F.A.

Compacteur lourd :

Rouleau à pneus 30/45 T	3,03 à 6,05 F.F.A.
-------------------------------	--------------------

Dans le cas de la stabilisation des couches de base au moyen de liants hydrauliques ou de liants hydrocarbonés, les prix de revient au m2 seraient les suivants :

Engins	stabilisation	
	aux liants hydrauliques	aux liants hydrocarbonés
Rouleau à pneus 9/12 T	1,50 à 2,35	1,50 à 1,80
Rouleau lisse 10/12 T	2,50 à 3,35	3,35
Rouleau pieds de mouton 2 éléments	5,70 à 9,40	-
Rouleau à pneus 30/45 T	3,00 à 7,60	3,00

Ces chiffres montrent que s'il n'est pas nécessaire de dépasser une densité de 95% du Proctor, il vaut mieux, du point de vue économique, utiliser des rouleaux à pneus ou même des rouleaux lisses si l'épaisseur des couches le permet, plutôt que des rouleaux à pieds de mouton.

Dans le cas où un compactage lourd est nécessaire, le rouleau à pneus 30/45 T s'avère plus économique que le rouleau à pieds de mouton.

Il est bien évident que les calculs de prix de revient sec indiqués ci-dessus ne sont valables que pour du matériel loué par les services administratifs de la région de Dakar.

Les mêmes calculs peuvent être faits dans d'autres territoires en partant des prix de revient locaux des mêmes engins.

Il n'a pratiquement pas été possible de déduire des exemples de réalisation décrits en annexe II, l'incidence de chacune des opérations élémentaires sur le prix total d'une solution.

Nous donnons ci-dessous, à titre documentaire, deux exemples de décomposition de prix relatives à des stabilisations au ciment, d'une part en Europe et d'autre part en Amérique Latine dans des conditions voisines de celles de l'Afrique Tropicale.

DECOMPOSITION D'UN PRIX DE STABILISATION

(d'après "Journal of Institution of Municipal Engineers" Fev.55)

en % du prix total

1°) Préparation du matériau

Transport du matériau	1,10	
Pulvérisation		
charrue à disques	3,78	
Rotary	4,72	
Tracteur	<u>1,66</u>	10,16
Règlage à la niveleuse	0,82	
Main-d'oeuvre d'appoint	<u>2,23</u>	14,31

2°) Fourniture de liant

ciment	32,22	
chaux	6,62	
Transport	<u>6,02</u>	<u>44,86</u>
Total à reporter		59,17

report 59,17

3°) Incorporation de liant

Répondage

Main-d'oeuvre	13,38	
Spreeder	<u>4,01</u>	17,39
Humidification		4,29
Malaxage Rotary	<u>9,87</u>	31,55

4°) Compactage et Finitions

Rouleau à pneus	0,56	
Rouleau lisse	0,70	
Rouleau léger	0,46	
Tracteur lourd	6,31	
Tracteur léger	1,01	
Réglage niveleuse	<u>0,24</u>	<u>9,28</u>
		100,00

RECAPITULATION

	<u>% avec liant</u>	<u>% liant déduit</u>
- Préparation du matériau	14,31	26,0
- Fourniture du liant	44,86	-
- Incorporation du liant	31,55	57,1
- Compactage et Finitions	<u>9,28</u>	<u>16,9</u>
	100,00	100,00

COUCHE DE BASE SOL-CIMENT

(Association Brésilienne du Ciment Portland 1961)

	en %	
<u>1°) Préparation du matériau</u>		
Règlage de la plate-forme	11,1	
Scarification	20,1	
Pulvérisation	9,9	
Préhumidification	<u>1,6</u>	42,7
 <u>2°) Incorporation du liant</u>		
Répannage du liant	24,8	
Humidification	4,7	
Malaxage	<u>7,5</u>	37,0
 <u>3°) Compactage et finition</u>		
Précompactage	2,8	
Règlage	3,0	
Correction d'humidité	0,8	
Compactage	9,6	
Humidification pour cure	0,9	
Protection de la surface	<u>3,2</u>	<u>20,3</u>
		100,0

Ces exemples montrent que les opérations de compactage et de finition représentent généralement moins de 20% du prix total de mise en oeuvre d'une couche de base.

4.3.2 - Coût d'une solution

Les prix ramenés à l'unité de travail produite, par exemple le m² de couche de base peuvent être exprimés, soit en prix de revient sec, soit en prix de revient chantier, soit en prix de revient global.

Le prix de revient sec a pour expression

$P = aP_a + sP_s + eP_e + \frac{M}{q} + \frac{E}{q}$
Matériaux Mise en oeuvre

avec :

- a = quantité d'apport par m² de prix unitaire Pa (paragraphe 4.2.1.1°)
- s = quantité de produit stabilisant par m² de prix unitaire Ps (paragraphe 4.2.1.2°)
- e = quantité d'eau par m² de prix unitaire Pe (paragraphe 4.2.1.3°)
- M = Coût de location journalière du parc d'engins (paragraphe 4.2.3)
- E = Coût journalier des équipes et du personnel auxiliaire non attaché à un engin (paragraphe 4.2.2)
- q = Production globale journalière en m².

Le prix de revient chantier a pour expression

$$P_c = aP_a + sP_s + eP_e + \frac{M}{q} + \frac{E}{q} + \frac{C}{q} + \frac{I}{Q} + \frac{A}{Q}$$

avec :

- C = Coût journalier de conduite des travaux (paragraphe 4.2.4.1°/c)
- I = Coût total des installations de chantier (paragraphe 4.2.4.1°/a)
- A = Frais d'amenée et de repli du matériel et du personnel (paragraphe 4.2.4.1°/b)
- Q = Quantité totale produite au cours du chantier en m².

Le prix de revient administration a pour expression

$$P_g = (aP_a + sP_s + eP_e + \frac{M + E + C}{q} + \frac{I + A}{Q}) (1 + F_g) + \frac{F_e}{Q}$$

avec :

- F_g = Frais généraux et bénéfiques (paragraphe 4.2.4.2°)
- F_e = Frais d'études et de contrôle (paragraphe 4.2.5)

La formule générale de prix de revient sec peut être utilisée en première approximation pour la comparaison de la plupart des solutions techniquement possibles. En effet, on peut admettre que les frais de chantier (frais de conduite des travaux, frais d'installation de chantier) et les dépenses d'études sont pratiquement indépendants de la solution retenue.

Toutefois, il est indispensable de tenir compte de l'incidence des frais d'amenée et de repli des différents matériels dans le cas de chantier de courte durée et d'accès difficile, en particulier en ce qui concerne les matériels lourds et encombrants, tels que train de stabilisation, centrale fixe et compacteur lourd.

Les incidences relatives des différents postes sont essentiellement fonction de la technique de stabilisation adoptée et des conditions propres à chaque chantier.

Les tableaux suivants indiquent quelques valeurs extrêmes déduites de différents chantiers, les couches de base ayant une épaisseur de l'ordre de 15 cm pour les stabilisations mécaniques ou aux liants hydrauliques et de l'ordre de 12 cm pour les stabilisations aux liants hydrocarbonés.

- Stabilisation mécanique :

	<u>Prix de revient sec au m²</u> <u>en francs CFA</u>
Poste matériau	
Matériau d'apport	30 à 150
Eau'	5 à 30
Poste mise en oeuvre	
Engins	50 à 250
Eau	5 à 30

- Stabilisation aux liants hydrauliques

Poste matériau	
Matériau d'apport	30 à 150
Liant dosage 3%	75 à 240
" 5%	125 à 385
Eau	5 à 30
Poste mise en oeuvre	
Engins	80 à 400
Equipe	10 à 40

- Stabilisation aux liants hydrocarbonés

Poste matériau	
Matériau d'apport	20 à 120
Liant	250 à 560
Eau	5 à 30
Poste mise en oeuvre	
Engins	80 à 400
Equipe	5 à 30

Les quantités de matériaux à mettre en oeuvre pour constituer un corps de chaussée sont essentiellement fonction de l'épaisseur de chaussée à prévoir, donc du compactage de la plate-forme et du drainage de l'ensemble du corps de chaussée (voir chapitre II)

Etant donné la faible incidence des dépenses de compactage, on aura toujours intérêt à réduire au minimum les épaisseurs de chaussée et, par contre, à assurer le compactage le plus énergique possible des plates-formes.

De même, il est presque toujours plus économique de compacter énergiquement une fondation ou une couche de base plutôt que de compenser un défaut de compactage par un surdosage en agents stabilisants.

REMARQUE :

TABLEAU DE CONVERSION DE DIFFERENTES

UNITES MONETAIRES

U E P	Francs CFA	FRANCS CONGOLAIS		FRANCS 1963
		1960	1963	
0,206	50	10,0	55,6	1,00

4.3.3. Application à un cas concret

Nous allons reprendre ici les données techniques de l'exemple du chapitre 2 et moyennant certaines hypothèses et simplifications, traiter un cas concret en adaptant les résultats du chapitre 3 à ce problème particulier.

1) Données du problème :

- le sol envisagé a pour équivalent $S_{63} A_{37}$. Il se situe entre le sable-argile et le sable argileux. Il sera supposé à une teneur en eau naturelle de 4 points inférieure à la teneur en eau optimale. Sa densité maximale sera prise de l'ordre de 1,9 T/m³.
- Etant donné la nature du sol, les engins de compactage permettent d'atteindre sans difficulté 95% du Proctor Modifié.
- il n'y a pas de couche de fondation
- la plate-forme étant normalement drainée, l'épaisseur à donner à la couche de base est de 15 cm.

Elle pourra être stabilisée soit à 3% de ciment,
soit à 6% de cut-back EK2 dopé par
0,1 à 0,2% de stabiram.

Nous supposerons par ailleurs que le tronçon de route à étudier est homogène, que sa longueur est de 100 km et que les délais d'exécution sont de 6 mois, soit environ 125 jours ou 1000 heures ouvrables

La largeur de la plate-forme sera de 10 m, celle de la chaussée de 8 m (1 m d'accotement de part et d'autre). Dans ces conditions, nous avons :

- surface de plate-forme à compacter : $10 \times 100\ 000 = 1\ 000\ 000\ \text{m}^2$
- surface à stabiliser sur 0,13 m d'épaisseur : $8 \times 100\ 000 = 800\ 000\ \text{m}^2$

En supposant la plate-forme compacte sur 15 cm, cela conduit à répandre 11,4 litres d'eau par m².

Le rendement horaire utile nécessaire ramené au m² de plate-forme est :

$$r_1 = \frac{1\ 000\ 000}{1\ 000} = 1\ 000\ \text{m}^2/\text{h}$$

Le rendement horaire utile ramené au m² de chaussée est :

$$r_2 = \frac{800\ 000}{1\ 000} = 800\ \text{m}^2/\text{h}$$

Le rendement journalier correspondant à r_1 est $R_1 = 8\ 000\ \text{m}^2/\text{j}$

Le rendement journalier correspondant à r_2 est $R_2 = 6\ 400\ \text{m}^2/\text{j}$

Enfin, le rendement journalier nécessaire exprimé en mètre linéaire de route terminée est :

$$\frac{100\ 000}{125} = 800\ \text{ml}/\text{j}$$

L'examen des tableaux du chapitre 3 permet de déterminer les engins qu'il est possible de retenir pour effectuer les diverses opérations élémentaires, avec pour chaque engin, une appréciation quant à son efficacité.

2) Traitement de la plate-forme.

Le traitement de la plate-forme exige l'utilisation d'un pulvimixer, éventuellement d'un rotavator et, à la rigueur, d'une charrue à disques pour la pulvérisation du matériau (1) étant donné sa faible teneur en eau naturelle. La scarification peut être considérée comme inutile par suite de la nature peu argileuse du sol.

Les délais imposés nous obligent à ne retenir que des engins à rendement élevé. D'après les tableaux du chapitre 3, nous pouvons escompter les rendements utiles suivants :

- Pulvérisation : au Pulvimixer : 1500 m²/h
- Humidification : par citernes et rampes
- Compactage : par rouleau 30/45 T : 550 m²/h
- Règlage et mise au profil : à la niveleuse : 300 m²/h

Avant de choisir définitivement les engins destinés au traitement de la plate-forme, il est nécessaire d'examiner les conditions d'exécution de la couche de base; en effet, le nombre d'engins résultera de la quantité totale de travail à effectuer.

3) Traitement de la couche de base au ciment et des accotements :

3.1) Détermination des dosages au m² :

Ordre de grandeur de la densité sèche maximale (sol + ciment):
1,9 T/m².

La présence de ciment influe peu en effet sur les données de compactage, d'où la quantité de ciment à mettre en oeuvre :

$$\frac{0,03}{1,03} \times 1\ 900 \times 0,15 = 8,3 \text{ kg/m}^2$$

La quantité d'eau à ajouter doit faire monter la teneur en eau de 4 points. Le poids d'eau est donc :

$$\frac{4}{100} \times 1\ 900 \times 0,15 = 11,4 \text{ l/m}^2$$

3.2) Opérations élémentaires:

- Répandage et réglage du matériau (sur 10 m de large) à la niveleuse, rendement utile : 1 200 m²/h
- Pulvérisation (sur 10 m de large) : au pulvimixer, rendement utile 1 500 m²/h (2)
- Répandage du liant (sur 8 m de large) (1)

Un répandeur à liant précédera l'engin effectuant l'humidification.

- Humidification sur 10 m de large (1)

Le matériel destiné à cette phase de travail (citerne et rampes) devra précéder immédiatement l'engin du malaxage.

Ici, une remarque importante s'impose : compte tenu du temps de prise du liant, il ne faut pas perdre de vue que les opérations de malaxage et de compactage devront être terminées dans les deux heures suivant l'humidification. Pendant ces deux heures, il faut prendre en compte, non pas un rendement utile qui est un rendement statistique englobant tous les arrêts, mais un "rendement effectif" qui doit être très voisin de l'unité et que nous avons supposé égal à 0,9 afin de ne pas négliger le temps perdu par suite des virages ou des manoeuvres éventuelles.

- Malaxage (sur 8 m de large) au pulvimixer :

rendement utile	:	1 100 m ² /h	
rendement effectif	:	$\frac{1\ 100 \times 0,9}{0,5}$	= 2 000 m ² /h

- Compactage du stabilisé : (sur 8 m de large)

- (1) cette opération est suffisamment rapide pour ne pas influencer sur la marche générale du chantier.
- (2) il s'agit de la pulvérisation du matériau d'apport que nous avons supposé pris aux abords mêmes du chantier.

Après le pulvimixer, un précompactage au rouleau 9/12 T s'impose. Le nombre de passe est alors très inférieur à celui que nécessiterait un compactage soigné avec cet engin. En général, deux ou trois passes suffisent. Or, pour 13 passes, le rendement utile est de 250 m²/h.

Par suite, nous aurons pour 3 passes :

$$\text{rendement utile} : \frac{250 \times 13}{3} = 1\ 100 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\text{rendement effectif} : \frac{250 \times 13 \times 0,9}{3 \times 0,3} = 3\ 250 \text{ m}^2/\text{h}$$

Le compactage proprement dit se fera au rouleau 30/45 T. Par suite du compactage, il y a réduction du nombre de passes.

$$\text{rendement utile} : \frac{6}{4} \times 360 = 540 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\text{rendement effectif} : \frac{6}{4} \times \frac{360 \times 0,9}{0,3} = 1\ 600 \text{ m}^2/\text{h}$$

- Compactage des accotements (sur 2 m de large)

Il se fera sans limitation de temps due à la prise du liant

au rouleau 9/12 T : 300 m²/h (rendement utile)

au rouleau 30/45 T : 550 m²/h (rendement utile)

- Compactage de finition. (sur 8 m de large). Il est exécuté à vitesse élevée et avec 3 ou 4 passes au maximum.

au rouleau 9/12 T.

$$\text{rendement utile à 8 km/h} : \frac{250 \times 8 \times 13}{6 \times 4} = 1\ 100 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\text{rendement effectif} : \frac{250 \times 8 \times 13 \times 0,9}{6 \times 4 \times 0,3} = 3\ 250 \text{ m}^2/\text{h}$$

Tout ce qui précède est résumé dans le tableau suivant :

Opérations élémentaires		largeur du travail en m.	rendement nécessaire en m ² /h	rendement en m ² /h par engin	Engin
Plate-forme	Pulvérisation	10	(1) 1 000	(1) 1 500	Pulvimixer rouleau 30/45T
	Compactage	10	1 000	550	
	Réglage et mise au profil	10	1 000	300	niveleuse
couche de base & accotement	Répondage et réglage	10	1 000 (1)	1 200(1)	niveleuse
	Pulvérisation	10	1 000 (1)	1 500(1)	pulvimixer
	malaxage	8	3 200 (2)	2 000(2)	pulvimixer

(1) rendement utile

(2) "rendement effectif" à ne prendre en compte que pendant les deux heures suivant l'humidification

Opérations élémentaires		largeur du travail en m.	rendement nécessaire en m ² /h	rendement en m ² /h par engin	engin
couche de base et accotements	Précompactage de stabilisé	8	3 200 (2)	3 250 (2)	rouleau 9/12 T
	compactage de stabilisé	8	3 200 (2)	1 600 (2)	rouleau 30/45 T
	compactage de finition	8	3 200 (2)	3 250 (2)	rouleau 9/12 T
	compactage des accotements	2	200 (1)	300 (1)	rouleau 9/12 T
				550 (1)	rouleau 30/45 T
<p>(1) rendement utile (2) "rendement effectif" à ne prendre en compte que pendant les deux heures suivant l'humidification</p>					

3.3. Constitution du parc d'engins :

- Pulvimixer : les opérations de pulvérisation imposent la présence de deux pulvimixers : un sur plate-forme et un sur couche de base.

Ces deux engins seront occupés journallement $8 \times \frac{1\ 000}{1\ 500} = 5\ h\ 20'$ (en heure utile)

Ils resteront donc disponibles chacun 2 h 40' d'heure utile, soit

$\frac{2\ h\ 40' \times 0,5}{0,9} = 1\ h\ 30'$ d'heure effective pour le malaxage.

Pendant ce laps de temps, ils ne pourront couvrir que 5 000 m² sur les 6 400 m² nécessaires. Il faut donc prévoir 3 pulvimixers.

- Rouleau 30/45 T :

Le compactage de la plate-forme exige deux rouleaux 30/45 T qui seront pris à peu près à temps complet utile. Le compactage du stabilisé nécessite également la présence de 2 rouleaux 30/45 T utilisés seulement pendant les deux heures suivant l'humidification.

Il faut donc prévoir 4 rouleaux 30/45 T.

- Rouleau 9/12 T.

Le compactage de finition et le précompactage du stabilisé nécessitent chacun la présence d'un rouleau 9/12 T utilisé seulement pendant 2 heures effectives, soit : $\frac{2 \times 0,9}{0,3} = 6$ heures utiles.

Les deux rouleaux ci-dessus resteront donc disponibles 2 heures utiles par jour. Ils ne pourront à eux seuls que couvrir 1 200 m² sur les 1 600 m² nécessaires par jour pour le compactage des accotements.

Néanmoins, les deux rouleaux 30/45 T employés au compactage du stabilisé restent disponibles 2 heures utiles par jour. En deux heures ils peuvent couvrir $2 \times 2 \times 550 = 2200 \text{ m}^2$, ce qui est largement suffisant pour terminer le compactage des accotements. Il suffit de prévoir 2 rouleaux 9/12 T.

- Niveleuse :

Le réglage et la mise au profil de la plate-forme exige :
4 niveleuses qui pourront couvrir $1200 \text{ m}^2/\text{h}$ par jour. Une des niveleuses sera donc disponible $8 \times \frac{200}{300} = 5 \text{ h } 20$ utiles par jour.

Durant ce temps, elle pourra couvrir seulement $1500 \times 5,3 = 6400 \text{ m}^2$ sur les 8000 m^2 nécessaires pour le répandage et le réglage du matériau d'apport. Une niveleuse supplémentaire est donc nécessaire.

Il faudra donc prévoir 5 niveleuses.

Au total, le parc d'engins sera donc le suivant :

- 3 pulvimixers
- 5 niveleuses
- 4 rouleaux 30/45 T.
- 2 rouleaux 9/12 T.
- Une batterie de citernes et de camions pour le transport de l'eau et du stabilisant. L'importance de cette batterie sera fonction de l'éloignement du lieu de prélèvement d'eau et de stockage de liant.
- 3 épandeurs à liant du type semoirs à engrais utilisés en agriculture: un épandeur à liant est à prévoir par pulvimixer car, dans le cas de répandage sur matériaux étalés comme c'est notre cas, cette opération ne peut se faire qu'en plusieurs fois, la quantité répandue restant inférieure à 5 litres par m^2 .

4 - Traitement de la couche de base aux liants hydrocarbonés.

Dosage en liant : 6% de cut-back EK 2 dopé à 0,2% environ par du stabiram ou du Dope 4266.

Ordre de grandeur de la densité sèche maximale (sol + liant):
 $1,9 \text{ T}/\text{m}^2$.

Le poids de liant à répandre au m^2 est donc:

$$\frac{0,06}{1,06} \times 1900 \times 0,15 = 16,1 \text{ kg}/\text{m}^2.$$

En supposant comme précédemment que la quantité d'eau à ajouter doit faire monter la teneur en eau de 4 points, nous aurons à répandre :

$$\frac{4}{100} \times 1900 \times 0,15 = 11,4 \text{ l}/\text{m}^2$$

La détermination du parc d'engins nécessaire au traitement de la couche de base aux liants hydrocarbonés pourra se faire de la même façon que précédemment, le problème étant toutefois simplifié puisque le temps de prise du liant ne viendra pas grever les opérations. Tous les raisonnements se construiront donc en heure utile.

Nous laissons le soin au lecteur de traiter ce cas dans le détail sur les bases déjà définies : il est probable qu'il sera amené à un parc d'engins moins important que pour la stabilisation au ciment.

5 - Comparaison entre le coût des deux stabilisations :

La formule établie précédemment donnant le prix de revient sec ramené au m² de couche de base.

$$P = a P_a + S P_s + e P_e + \frac{M + E}{q}$$

dépense de matériaux dépense de
mise en oeuvre

permet de comparer, moyennant certaines hypothèses, le coût des deux solutions.

$P_a = 0$: le matériau d'apport est pris de part et d'autre de la plate-forme, sans découverte ni servitude quelconque.

$P_e = 0$: l'eau est supposée fournie gratuitement.

Les frais de transport et d'humidification interviennent dans le coût de location du parc de matériel.

5.1. Dépenses de matériaux :

Connaissant le prix à la tonne, du ciment P_{sci} et du cut-back P_{scu} au lieu considéré en francs CFA, il est facile de comparer les dépenses de matériaux correspondant à chaque cas de stabilisation.

Dans le cas de la stabilisation au ciment, celles-ci sont de $0,0083 P_{sci}$ F. CFA, puisqu'il est utilisé 8,3 kg de ciment au m² de couche de base.

Dans le cas de la stabilisation au cut-back, on obtient : $0,0161 P_{scu}$ F. CFA.

5.2. Dépenses de mise en oeuvre :

Connaissant au lieu considéré les coûts de location des engins ramenés au jour ouvrable, on peut aisément chiffrer le terme M en se reportant aux parcs d'engins déterminés comme il a été exposé précédemment.

Si l'on prend comme unité le temps de jour ouvrable, on a :

$$\frac{800\ 000}{125} = 6\ 400 \text{ m}^2/\text{jour} \quad \frac{1}{q} = \frac{125}{800.000} = 0,000156$$

Le terme E qui fait intervenir le coût journalier des équipes non attachées aux engins est malaisé à chiffrer. Toutefois, dans le cas de deux solutions sensiblement identiques du point de vue de la mécanisation, on peut admettre que les écarts sur E sont négligeables

ANNEXES

S O M M A I R E

1 - METHODE ET RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE.

1.1 - Méthodes d'essais et de calculs - Norme utilisées.

1.1.1. Notations

1.1.2. Mode opératoire des essais courants

1. Analyse granulométrique
2. Sédimentométrie
3. Poids spécifique
4. Equivalent de sable
5. Limites d'Atterberg
6. Essai Proctor AASHO modifié
7. Essai C.B.R.
8. Essai de cisaillement
9. Essai triaxial
10. Essai oedométrique - Perméabilité
11. Essai Hubbard Field
12. Essai de Compression - Immersion
13. Essai sur liants bitumineux.

1.1.3. Techniques spéciales des essais sur matériaux amendés à la chaux ou au ciment.

1. Introduction
2. Notion de pourcentage d'additif
3. Essai de compactage
4. Essai C.B.R.
5. Limites d'Atterberg
6. Triaxiaux
7. Essai oedométrique.

1.1.4. Méthode de calculs et normes utilisées.

1. Méthode C.B.R.
2. Facteur de portance
3. Indice de groupe
4. Stabilités Hubbard Field à respecter

1.2 - Résultats des Essais.

1.2.0. Généralités

1.2.1. Sable de Dakar.

1. Description du matériau
2. Stabilisation mécanique
3. Stabilisation à la chaux
4. Stabilisation au ciment
5. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés.

1.2.2. Sable argileux

1. Description du matériau
2. Stabilisation mécanique
3. Stabilisation à la chaux
4. Stabilisation au ciment
5. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés.

1.2.3. Sable-argile

1. Description du matériau
2. Stabilisation mécanique
3. Stabilisation à la chaux
4. Stabilisation au ciment
5. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés
6. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés avec emploi d'hydrophobant.

1.2.4. Argile sableuse

1. Description du matériau
2. Stabilisation mécanique
3. Stabilisation à la chaux
4. Stabilisation au ciment
5. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés.

1.2.5. Argile

1. Description du matériau
2. Stébilisation mécanique
3. Stabilisation à la chaux
4. Stabilisation au ciment
5. Stabilisation au moyen de liants hydrocarbonés.

2 - EXEMPLES DE REALISATIONS DE CHAUSSEES DANS DIVERSES REGIONS D'AFRIQUE.

2.1 - Introduction

2.2 - Exemples de réalisations au SENEGAL.

- 2.2.1. Route de Thies à Saint-Louis
- 2.2.2. Route M'Bour - Kaolack

2.3 - Exemple de réalisations dans la République du CONGO-BRAZZAVILLE.

- 2.3.1. Route de Pointe-Noire - Sounda.

2.4 - Exemple de réalisation dans la République CENTRAFRICAINE.

- 2.4.1. Route Damara à Fort-Sibut.

2.5 - Exemple de réalisation au CAMEROUN.

- 2.5.1. Route Pitoa-Figuil.

2.6 - Exemples de réalisations en COTE D'IVOIRE.

- 2.6.1. Traversée de Toumodi.
- 2.6.2. Route d'Abidjan - Abengourou (tronçon Comoé-Apossou)
- 2.6.3. Traversée de Bongouanou et de Kangandi
- 2.6.4. Tronçon de la sortie de Bouaké.

2.7 - Exemples de réalisations dans la République du CONGO
(Léopoldville)

- 2.7.1. Route Jadotville - Kolwézi
- 2.7.2. Route Elisabethville - Kasumbalesa
- 2.7.3. Artères Urbaines d'Elisabethville
- 2.7.4. Route Kolwézi - N'Zilo
- 2.7.5. Routes Urbaines de la Circonscription de Kolwézi.
- 2.7.6. Route Léopoldville - Kenge

2.8 - Exemple de réalisation en Algérie (Sahara)

- 2.8.1. Route de Gassi-Touil.

3 - REVETEMENTS SUPERFICIELS DE CHAUSSEES A BASE DE LIANTS HYDROCARBONES

3.1 - Généralités.

- 3.1.1. Rôle du revêtement
- 3.1.2. Définitions

- 1. Revêtements superficiels minces
- 2. Revêtements épais ou tapis.

3.2 - Revêtements usuels.

- 3.2.1. Considérations générales
- 3.2.2. Constitution des différentes couches et dosages
- 3.2.3. Mise en oeuvre
- 3.2.4. Tenue et entretien.

3.3 - Exemples de revêtements

3.4.- Etudes et recherches concernant les revêtements.

3.5 - Eléments économiques.

ANNEXE 1

1.1. METHODES D'ESSAIS ET DE CALCUL - Normes utilisées.

1.1.1. Notations.

C.B.R.	Indice portant californien
LL	Limite de liquidité
LP	Limite de plasticité
IP	Indice de plasticité
e	Indice des vides
n	Porosité
u	Pression interstitielle
ds	Densité sèche
C	Cohésion
φ	Angle de frottement
τ	Résistance au cisaillement
K	Coefficient de perméabilité (Darcy)
C'	Cohésion apparente
φ'	Angle de frottement apparent
W	Teneur en eau (à l'étuve à 105°C)
dh	Densité humide
W opt.	Teneur en eau optimale
ds max.	Densité sèche maximale
Co	Coefficient de compressibilité
Gs	Poids spécifique absolu
ES	Equivalent de sable
S	Degré de saturation $\frac{\text{teneur en eau naturelle}}{\text{teneur en eau de saturation}} \times 100\%$

1.1.2 - MODES OPERATOIRES DES ESSAIS COURANTS

1 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1.1. - TAMIS

Les tamis utilisés sont les tamis ASTM n°20 - 40 - 100 et 200

1.2. - MODE OPERATOIRE

On opère sur un poids de matériau sec de 250 gr. que l'on immerge dans l'eau pendant 24 heures.

On tamise le matériau dans un courant d'eau sur le tamis n°200

On sèche à l'étuve à poids constant le refus au tamis n°200

On tamise ce refus, à sec, sur les tamis n° 20 - 40 - 100

On obtient ainsi les poids de matériau retenus sur les différents tamis et l'on exprime ce poids en pourcentage du poids de sol sec initial.

On calcule les refus cumulés et par différence à 100% on obtient le "passing" ou pourcentage de matière (en poids) passant au travers des tamis.

2. - SEDIMENTOMETRIE

L'analyse sédimentométrique est effectuée sur la fraction du sol passant au tamis n°200, par application de la loi de STOKES à une suspension de ces éléments en cours de sédimentation.

2.1 - MODE OPERATOIRE

On opère sur un poids sec de 20 gr. d'éléments inférieurs au tamis n° 200. Cet échantillon est introduit dans de l'eau distillée à laquelle on ajoute 1‰ d'hexamétophosphate de soude. On mélange la solution au moyen d'un agitateur électrique HAMILTON BEACH n°33 pendant 30 secondes. La suspension est ensuite versée dans une éprouvette cylindrique graduée de 1.000 cc. et complétée avec de l'eau distillée.

On agite à nouveau la suspension au moyen d'un agitateur à rondelle déplacé verticalement dans l'éprouvette jusqu'à ce que la solution apparaisse parfaitement homogène, puis on déclenche un chronomètre.

A différents temps, on introduit le densimètre torpille gradué de 995 à 1 030 dans l'éprouvette et on effectue la lecture de la densité, puis on mesure la température de la solution à $\pm 0,1$ degré C. Les lectures sont faites à 15" - 30" - 1' - 2' - 5' - 10' - 20' - 40' - 80' - 2h. - 24h.

On corrige les lectures de la densité en fonction de la température et de la densité de l'eau distillée contenant 1‰ d'hexamétophosphate de soude.

.2.2 - RESULTATS

On calcule par application de la loi de STOKES le diamètre équivalent des éléments et le pourcentage d'éléments inférieurs à ce diamètre. On raccorde ensuite la courbe obtenue à la courbe granulométrique des éléments supérieurs au tamis n° 200.

3 - POIDS SPECIFIQUE (Gs)

Le poids spécifique est le poids de l'unité de volume des grains du sol supposé sans vide. Il se mesure au moyen d'un picnomètre.

3.1 - MODE OPERATOIRE

Une quantité de sol sec d'environ 20 g est introduite dans le picnomètre préalablement lavé et séché. On recouvre d'eau distillée et l'on branche le col du picnomètre sur une trompe à vide jusqu'à désaération complète.

Puis on rajoute de l'eau distillée désaérée jusqu'au repère du picnomètre et l'on pèse l'ensemble picnomètre + sol + eau.

On vide le sol et l'eau dans un creuset et l'on dessèche jusqu'à poids constant (105°C.)

3.2 - RESULTATS

Le poids spécifique est calculé par :

$$Gs = \frac{P_o \cdot d}{(P_o + P_1 - P_2)}$$

d, étant la densité de l'eau à la température considérée.

P_o = poids de l'échantillon sec

P_1 = poids du picnomètre rempli d'eau distillée à la même température que celle de l'essai.

P_2 = poids : picnomètre + sol + eau

P_1 = est mesuré à différentes températures (t) pour l'appareil utilisé et l'on trace la courbe d'étalonnage $P_1 = F(t)$.

Il suffit ensuite de mesurer la température au moment de l'essai pour déterminer P_1 .

4 - EQUIVALENT DE SABLE (ES)

Le principe de l'équivalent de sable consiste à faire flocculer les limons et les argiles du sol à l'aide d'une solution chimique et à mesurer les volumes apparents du dépôt sableux et de la suspension.

On opère dans une éprouvette cylindrique et l'on mesure h_1 : hauteur du sable et de la suspension, h_2 : hauteur du dépôt de sable.

L'équivalent de sable s'exprime par :

$$ES = 100 \times \frac{h_2}{h_1}$$

ES = 100 correspond à un sable pur

ES = 0 correspond à une argile ou à un limon dépourvu de grains sableux.

5 - LIMITES D'ATTERBERG.

5.1 - DEFINITIONS

La limite de liquidité LL est la teneur en eau au-dessus de laquelle le matériau se comporte comme un semi liquide et s'écoule sous son propre poids.

La limite de plasticité LP est la teneur en eau la plus faible pour laquelle le mortier reste plastique sans devenir friable.

L'indice de plasticité IP est la différence entre ces deux limites ; il caractérise l'étendue du domaine de comportement plastique du matériau.

5.2 - MODE OPERATOIRE

Le sol est immergé 24 heures dans de l'eau distillée, puis tamisé par voie humide sur le tamis n°40 (ouverture de maille = 0,42 mm.)

On laisse décanter la solution obtenue, puis après élimination de l'eau en excès on procède à la détermination de la limite de liquidité au moyen de l'appareil d'Atterberg en adoptant une cadence de deux coups par seconde. On trace la courbe de teneur en eau (W) en fonction du nombre de coups (n) nécessaire pour amener en contact, sur 10 mm. les deux bords du sillon tracé au moyen du calibre normalisé. La limite de liquidité est la valeur de W correspondant à n = 25.

6 - ESSAI PROCTOR A A S H O MODIFIE.

6.1 - BUT DE L'ESSAI

Le but de l'essai Proctor est de déterminer les conditions optimales de compactage d'un sol ou d'un matériau, c'est-à-dire :

- La teneur en eau (W) permettant de réaliser la compacité maximale avec une énergie de compactage donnée.
- Les densités apparentes, humide et sèche du sol correspondant à ce maximum de compacité.

6.2.- MODE OPERATOIRE

On compacte le sol dans un moule au moyen de la dame Proctor Modifié de 4,535 kg tombant d'une hauteur de 45,7 cm.

Pour la présente étude, le compactage a été réalisé dans le moule CBR de 15,2 cm de diamètre, en cinq couches d'égale épaisseur recevant chacune 55 coups de dame. La hauteur du moulage compacté est de 12,7 cm

l'épaisseur de chaque couche de 2,5 cm environ. On compacte le sol à des teneurs en eau croissantes en changeant d'échantillon à chaque opération de telle sorte que le matériau ne subisse qu'une seule épreuve de compactage. A chaque fois on mesure la teneur en eau W du sol et sa densité apparente.

On procède ainsi à 5 opérations de compactage de façon à déterminer la variation de dh en fonction de W. On calcule pour chaque valeur de dh et de W la densité sèche du sol ds et l'on trace les deux courbes de variation de ds et de dh en fonction de W.

6.3 - RESULTATS

Le maximum de la courbe de densité sèche définit la teneur en eau optimale.

7 - ESSAI CBR (Californian Bearing Ratio)

7.1 - PRINCIPE DE L'ESSAI

Le principe de l'essai consiste à appliquer sur le sol, au moyen d'un piston circulaire de 2 inches de diamètre, une charge croissante de telle sorte que la vitesse d'enfoncement du piston soit constante et égale à 1,25 mm/minute.

La comparaison des pressions nécessaires pour obtenir un même enfoncement (2,5 ou 5 mm.), dans le sol étudié et dans un sol type, permet de définir l'indice portant CBR.

7.2 - MODE OPERATOIRE

Le sol est compacté à la teneur en eau optimale Proctor avec différentes énergies de compactage de façon à réaliser des densités différentes. On mesure ces densités et l'on contrôle la teneur en eau.

Deux types d'essais sont ensuite effectués :

- un essai immédiat qui consiste à poinçonner le sol aussitôt après compactage, c'est-à-dire à une teneur en eau égale à l'optimum Proctor.
- un essai après 4 jours d'immersion complète du sol. Durant ces 4 jours, le matériau compacté est soumis à une pression égale à celle qui correspond au poids des terres susjacentes et en tout cas, au moins égale à 0,03 kg/cm². On mesure le gonflement du sol au cours de l'imbibition.

Ces deux séries d'essais permettent de fixer la valeur de l'indice portant C.B.R. à adopter pour le sol, compte tenu de sa densité sèche réelle et du degré de saturation le plus défavorable envisagé pour la chaussée.

8 - ESSAI DE CISAILLEMENT

L'essai consiste à soumettre des éprouvettes de sol à des pressions normales variables et à mesurer dans chaque cas la résistance au cisaillement du sol.

Si on a :

τ = résistance au cisaillement

σ = contrainte normale au plan de cisaillement

on peut écrire en l'absence de toute pression interstitielle :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

c = Cohésion du sol

φ = Angle de frottement interne

Dans cette étude, seul le sable "S" a été soumis à un essai de cisaillement. Ce sable a été introduit à l'état pulvérulent dans la machine de cisaillement puis consolidé sous des pressions égales à 1 - 2 et 3 kg/cm².

Dans un cas, on a opéré sur du sable sec, dans l'autre sur du sable saturé. Après un temps de consolidation d'ailleurs très court, on a cisailé les trois éprouvettes maintenues sous des pressions normales égales aux pressions de consolidation ci-dessus. La vitesse de cisaillement était constante et égale à 1,5 mm. par minute.

La valeur maximale de la résistance au cisaillement obtenue sous chacune des trois pressions normales nous donne un point qui doit se trouver sur la droite

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

En raison de la forte perméabilité du sable, il n'y a aucune pression interstitielle et l'essai peut être considéré comme un essai de cisaillement lent drainé.

9 - ESSAI TRIAXIAL

Sur les sols plus argileux et cohérents on a procédé à des essais triaxiaux.

L'essai triaxial consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une compression axiale qui croît jusqu'à la rupture tout en lui appliquant une étreinte latérale constante.

L'interprétation s'effectue par la théorie de MOHR. Connaissant les contraintes principales σ_1 = contrainte verticale, et σ_2 = contrainte latérale, on trace le cercle de MOHR correspondant à la rupture.

Cinq cercles ont ainsi été tracés pour des étreintes latérales de 0, 1, 2, 3 et 4 kg/cm². L'enveloppe de ces 5 cercles est la courbe intrinsèque du matériau et cette courbe qui s'assimile à une droite donne la cohésion du sol et son angle de frottement interne.

Dans le cas présent, on a opéré sur des éprouvettes de 35 mm. de diamètre et 90 mm. de hauteur extraites par carottage dans des moulages C.B.R.. On a opéré comme pour les essais C.B.R. sur des échantillons différemment compactés de telle sorte que le degré de compactage soit successivement égal à 90 - 95 et 100% du Proctor Modifié.

D'autre part, 2 séries d'essais ont été effectuées, l'une à la teneur en eau de compactage, l'autre sur le sol préalablement immergé dans l'eau jusqu'à poids constant afin d'obtenir des éprouvettes qui soient dans un état voisin de la saturation.

A - ESSAIS TRIAXIAUX LENTS DRAINÉS

Dans ces essais, la vitesse d'écrasement des éprouvettes a été choisie de telle sorte qu'aucune pression interstitielle n'apparaisse en cours d'essai.

Tout raccourcissement de l'éprouvette entraînant une augmentation de la section, les corrections suivantes ont été appliquées :

- Cas de déformation en forme de tonneau

$$S \text{ corrigée} : S_0 \times \frac{2 + \epsilon}{2(1 - \epsilon)}$$

- Cas d'une déformation en forme cylindrique :

$$S \text{ corrigée} = S_0 \times \frac{1}{1 - \epsilon}$$

$$\text{avec } \epsilon = \frac{\Delta H}{H}$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= \text{raccourcissement} \\ H &= \text{hauteur initiale} \end{aligned}$$

B - ESSAIS TRIAXIAUX RAPIDES NON DRAINÉS

Les essais triaxiaux rapides sont effectués avec le même appareillage que les essais triaxiaux lents, mais aucun drainage n'est effectué et la vitesse d'écrasement est de 1 mm/mn.

Les carottes utilisées ont subi la même préparation que celles utilisées pour les essais triaxiaux lents.

10 - ESSAIS OEDOMETRIQUES

.10.1 - Les cellules oedométriques ont 70 mm de diamètre et 40 mm de hauteur.

La mise en charge est exécutée par l'intermédiaire de ressorts à boudins tarés dont on mesure l'écrasement pour régler la force de compression. Les ressorts agissent par l'intermédiaire d'un palonnier sur le piston de mise en charge qui surmonte l'échantillon enfermé dans la cellule.

Chaque cellule peut être alimentée en eau par la base de manière à réaliser la mise en saturation du sol.

.10.2 - Les étapes de mise en charge sont les suivantes :
0,5 - 1 - 2 - 4 et 8 kg/cm².

Chaque augmentation de pression est exécutée lorsque la consolidation primaire sous la charge précédente peut être considérée comme achevée. Le déchargement se fait en une seule étape en amenant l'échantillon sous la pression de 0,37 kg/cm², correspondant au poids mort de la partie de l'appareil qui surmonte l'éprouvette.

.10.3 - Les résultats sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique avec les pressions en abscisses suivant une échelle logarithmique et les tassements relatifs en ordonnées à une échelle proportionnelle normale.

.10.4 - COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE

Les essais oedométriques ont permis de calculer un coefficient représentatif de la compressibilité du matériau étudié. Rappelons en effet que TERZAGHI exprime la loi de compressibilité d'échantillon sertis latéralement (c'est le cas de l'oedomètre) par la formule suivante :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{C_c} \times 2,3 \log \frac{P_2 + P_c}{P_1 + P_c}$$

Δh = le tassement de l'échantillon quand la contrainte passe de p_1 à p_2

h = l'épaisseur initiale de l'échantillon sous la contrainte p_1

p_1 = contrainte initiale

p_2 = contrainte finale

p_c = constante ayant les dimensions d'une contrainte (souvent négligeable)

C_c = constante de compressibilité (sans dimensions)

Rappelons que C_c permet de calculer le module oedométrique dit de compressibilité en kg/cm² par la formule :

$$E = C_c (p_1 + P_c)$$

10.5 - MESURES DE PERMEABILITE

Ces mesures ne sont effectuées qu'après établissement d'un régime permanent d'écoulement.

Mesure à niveau constant

Le niveau de charge constant est réalisé par un bac muni d'un déversoir de réglage. Le contrôle du débit de percolation est exécuté par mesures volumétriques (éprouvettes graduées) pour les fortes perméabilités ou par des pesées de l'eau écoulée.

La perméabilité est calculée par la formule :

$$K = \frac{QL}{H S t}$$

K est exprimé en cm/sec.

Q : volume recueilli en cm³ durant le temps t exprimé en secondes

S : section de l'échantillon en cm²

L : Longueur de l'échantillon en cm

H : hauteur de la charge d'eau en cm.

Cette valeur de K donne la perméabilité à la température moyenne T° du sol durant la mesure.

On obtient la valeur corrigée à 20° C en multipliant le K trouvé par le coefficient de correction α , rapport des viscosités de l'eau à T° et à 20°

$$\alpha = \frac{\gamma(T)}{\gamma(20^\circ)}$$

Mesure à niveau variable.

Après que le régime d'écoulement ait été établi, un robinet à trois voies permet d'isoler le tube d'amenée de l'eau du bac à niveau constant à l'échantillon et de mettre l'extrémité supérieure du tube en contact avec la pression atmosphérique. Le tube en matière transparente est muni d'une échelle graduée. La mesure de perméabilité à niveau variable est également dite "à niveau descendant" et consiste à repérer le niveau de l'eau dans le tube à des temps bien déterminés.

La formule de la perméabilité à la température T° s'exprime par la formule :

$$K_{T^\circ} = 2,3 \frac{s}{S} \times \frac{L}{t} \times \log_{10} \frac{H_1}{H_2}$$

A la température de 20° C, nous avons, comme précédemment :

$$K_{20^\circ} = \alpha K_{T^\circ} \text{ avec } \alpha = \frac{\gamma(T^\circ)}{\gamma(20^\circ)}$$

s = section du tube de mesure en cm^2

S = section de l'échantillon

L = hauteur de l'échantillon

H_1 = niveau de charge lu au tube au temps t_1

H_2 = niveau de charge lu au tube au temps t_2

t = $t_2 - t_1$

10.6- CONTROLE DE LA TENEUR EN EAU APRES L'ESSAI

Le contrôle est effectué sur l'échantillon ENTIER, et le calcul se fait comme pour une détermination de teneur en eau habituelle.

.11 - ESSAIS HUBBARD FIELD

.11.1 - PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai HUBBARD FIELD consiste à mesurer la charge sous laquelle une briquette de calibre déterminé, préparée dans des conditions de compression initiale fixées, peut fluer à travers un orifice calibré de diamètre légèrement inférieur à celui de la briquette.

.11.2 - APPAREILLAGE

Il comprend essentiellement :

- une presse hydraulique pouvant développer un effort de 6 tonnes
- deux pilons
- un cylindre d'essai avec piston plongeur et anneau de base.

11.3 - MODE OPERATOIRE

Le mélange sol/bitume est réalisé au moyen d'une spatule. Pour chaque dosage, deux briquettes sont confectionnées, chacune d'elles pesant environ 100 gr. Le mélange est introduit dans le cylindre et tassé au moyen du pilon n°1 (50 coups) puis du pilon n°2 (15 coups)

On place ensuite le piston plongeur et on applique sur celui-ci une pression de 210 kg par cm², ce qui correspond à une charge totale voisine de 4 280 kg. On maintient la pression pendant 5 minutes, puis on démoule la briquette en la chassant hors du cylindre.

L'essai de stabilité proprement dit est effectué dans le cylindre d'essai légèrement conique en plaçant la briquette au-dessus de l'anneau.

La pression est appliquée progressivement de manière à entraîner un déplacement vertical du piston de 1 mm. par seconde; on note la valeur maximale de la charge totale appliquée, qui par définition, est la valeur de la stabilité.

.11.4 - MODE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES

Quatre types d'essais ont été réalisés :

- Essai A - Conservation des éprouvettes à 18°C pendant 7 jours, puis mesure de la stabilité à cette même température.
- Essai B - Séchage des éprouvettes jusqu'à poids constant à 60°C, puis conservation pendant au moins 24 heures à 18°C. et mesure de la stabilité à 18°C.
- Essai C - Séchage des éprouvettes à 60°C. jusqu'à poids constant, puis mesure de la stabilité à cette même température.
- Essai D - Séchage des éprouvettes à 60°C., immersion des éprouvettes sur la moitié de leur hauteur dans de l'eau potable à 18°C pendant 7 jours puis essai dès la sortie de l'eau.

Notons toutefois, qu'en ce qui concerne le séchage, les mélanges confectionnés avec des émulsions n'ont pas été séchés jusqu'à poids constant. Le séchage a été limité de telle sorte que la quantité d'eau évaporée soit comprise entre 80 et 90% de la quantité d'eau totale contenue dans l'éprouvette, compte-tenu de l'eau de l'émulsion.

Dans le cas de l'essai D, on effectue en plus de la mesure de stabilité une mesure du pourcentage d'eau absorbée et du gonflement volumétrique.

Le pourcentage absorbé W' est égal au rapport du poids d'eau absorbée pendant l'immersion, au poids du sol sec contenu dans l'éprouvette. Le gonflement volumétrique est calculé par la formule :

$$g\% = \frac{df^3 - do^3}{do^3} \times 100$$

df = diamètre maximum de l'éprouvette après immersion

do = diamètre de l'éprouvette avant immersion.

Il faut préciser d'ailleurs que tous les dosages en eau ou en liant bitumineux ont été exprimés par rapport au poids de sol sec, déduction faite de la quantité de bitume. Il en est également ainsi de la densité sèche calculée, qui représente la densité du sol en supposant enlevés l'eau et le bitume.

.11.5 - ESSAI D'EXSUDATION

Le mélange contenant un pourcentage de liquide dépassant une certaine limite ne peut être compacté en place. On est donc conduit à définir la valeur d'exsudation comme le pourcentage total d'eau et de liant que le sol peut retenir sans exsudation du liquide sous la pression appliquée.

L'essai est effectué dans les mêmes conditions de compactage que l'essai de stabilité, à cette différence près que la charge appliquée est de 4 540 kg et qu'elle est maintenue pendant 2 minutes. On opère sur des mélanges contenant des quantités égales d'eau et de liant.

12 - ESSAI DE COMPRESSION - IMMERSION

L'essai de compression-immersion ou essai de stabilité DURIEZ consiste à mesurer la résistance à la compression simple du mélange bitumineux compacté dans des conditions déterminées dans un moule de 80 mm. de diamètre.

MODE OPERATOIRE

On confectionne à partir du mélange bitumineux des éprouvettes cylindriques de 80 mm. de diamètre et d'environ 100 mm. de hauteur. Les éprouvettes sont compactées au moyen d'une presse hydraulique sous une pression de 120 kg/cm². On maintient cette pression pendant 5 minutes.

Les éprouvettes sont ensuite extraites du moule puis conservées dans les mêmes conditions que l'essai HUBBARD FIELD décrit ci-dessus. (essais A à D).

Cependant, pour l'essai D, on immerge entièrement les éprouvettes dans l'eau pendant 7 jours. L'essai de compression simple est effectué en imposant à l'éprouvette une vitesse de déformation de 1^{mm}/seconde. On note la résistance maximale atteinte et on la divise par la section de l'éprouvette pour obtenir la stabilité DURIEZ.

Le calcul du pourcentage d'imbibition s'effectue comme pour l'essai HUBBARD FIELD en rapportant le poids d'eau absorbée au poids de sol sec contenu dans l'éprouvette, déduction faite du bitume. Ce calcul est légèrement différent de celui prescrit par la méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, méthode qui consiste à rapporter le poids d'eau absorbée au poids de l'éprouvette avant imbibition, y compris le poids du liant.

De même la densité mesurée est celle du sol seul et non du mélange bitumineux.

1.3.- ESSAIS SUR LIANTS BITUMINEUX

1.3.1.- VISCOSITE

a) Viscosité des cut-backs.

L'appareil utilisé est le viscomètre REDWOOD B.R.T.A. La viscosité est le temps en secondes que met une certaine quantité de produit pour s'écouler à travers un orifice dans des conditions normalisées.

L'essai est effectué à 25° C avec un orifice de 10 mm de diamètre pour tous les cut-backs dont la viscosité est supérieure à 10 secondes, ce qui est le cas des produits utilisés. La quantité de cut-back est de 50 cm³.

b) Viscosité des émulsions.

L'appareil utilisé est le viscomètre ENGLER.

La viscosité ENGLER est égale au rapport du temps d'écoulement du liant au temps d'écoulement de l'eau dans les mêmes conditions.

La quantité d'émulsion utilisée est de 200 cm³, la température de l'essai est de 20°C. et l'orifice a un diamètre de 2,8 mm.

1.3.2.- DISTILLATION FRACTIONNEE.

Le but de cet essai est de déterminer le pourcentage des huiles distillant à des températures déterminées. Ces températures sont les suivantes : 190 - 225 - 315 - 360°C.

Cet essai est effectué uniquement sur des cut-backs. Il est complété par un essai de pénétration DOW sur le bitume résiduel après distillation des huiles à 360°C.

1.3.3.- ESSAI DE PENETRATION SUR LES BITUMES.

La pénétration est l'enfoncement dans le produit, en 1/10e de mm. d'une aiguille chargée à 100 gr. pendant 5 secondes à une température de 25°C. L'appareil utilisé est le pénétromètre de DOW - ASTM.

1.3.4.- TENEUR EN EAU DES EMULSIONS.

On opère par entrainement de l'eau contenue dans l'émulsion au moyen de xylène après condensation des vapeurs, l'eau de densité supérieure à celle du xylène précipité dans le décanteur. Quand le volume d'eau dans le décanteur reste constant on arrête l'essai.

On rapporte le poids de l'eau ainsi recueillie au poids initial de l'émulsion.

L'essai est effectué au moyen de l'appareil DEAN-STARK sur une quantité d'émulsion de 100 gr.

1.3.5.- FINESSE DE DISPERSION DES EMULSIONS.

La finesse de dispersion est le pourcentage de matériau restant sur le tamis ASTM n° 100 après tamisage du produit. On opère sur 100 gr d'émulsion, le résidu bitumineux séché à l'étuve à 110°C. et pesé.

1.3.6.- TYPE DE LIANTS ET HYDRIOHOBANTS EMPLOYES.

- un cut-back 50/100 préparé à partir d'un bitume 180/200
- une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100 (COLSOL)
- une émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisée (TEXACO)
- un liant bitumineux SHELL appelé EK2 qui est un cut-back dopé et émulsifié, miscible à l'eau.
- le STABIRAM 790 (Sté PROCHINOR)
- le DOPE 4266 (Société chimique et routière de la Gironde)
- le chlorhydrate de la base cyclique 3028 P (Sté DOITTAUSOPURA).

Ces trois derniers produits sont des sels de polyamines solubles dans l'eau.

1.1.3 - TECHNIQUES SPECIALES DES ESSAIS SUR MATERIAUX AMENDES A LA CHAUX
OU AU CIMENT.

1 - INTRODUCTION

- La chaux provient des usines de la CIMENKAT à Lubudi (Katanga).
C'est une chaux hydraulique dont la composition est la suivante :

Ca (OH) ₂	: 69,44%
Ca CO ₃	: 12,00%
Si O ₂	: 12,95%
Fe ₂ O ₃	: 1,67%
Al ₂ O ₃	: 3,21%
Indosés	: 0,73%

On a toujours essayé d'obtenir une chaux jeune pour tous les essais.

La qualité de la chaux peut évidemment varier assez fortement d'une fabrication à l'autre; ci-après deux analyses donnant les chiffres extrêmes obtenus :

Ca (OH) ₂	: 60,51%	68,94%
Ca CO ₃	: 12,95%	14,50%
So O ₂	: 16,46%	11,95%
Fe ₂ O ₃	: 0,61%	0,30%
Ca SO ₄	: 1,00%	0,97%
MgO + Al ₂ O ₃	: 6,83%	2,02%
+ indosés		

- Le ciment utilisé est du type Portland Artificiel Normal. Il provient des usines de Lubudi (Katanga)

Les caractéristiques du ciment sont les suivantes :

Si O ₂	: 22,24%
Al ₂ O ₃	: 5,94%
Fe ₂ O ₃	: 2,53%
Ca O	: 61,98%
Mg O	: 1,37%
SO ₃	: 2,10%
Non dosé	: 0,48%
Insolubles	: 0,96%
Perte au feu	: <u>2,50%</u>
	100,00%

. Poids spécifiques absolu : 3,095 T/m³

. Début de prise : 3 h 20 . Fin de prise 4 h 50

. Résistance à la compression :

à 3 jours	: 340 kg/cm ²
à 7 jours	: 420 kg/cm ²
à 28 jours	: 490 kg/cm ²

L'étude de la stabilisation de sols à la chaux ou au ciment nécessite des modifications aux modes opératoires habituels.

On est amené notamment à prévoir un temps de prise avant l'essai C.B.R. et à définir un nouvel horaire pour la recherche des limites d'Atterberg.

Les prélèvements d'échantillons pour essais triaxiaux s'avèrent parfois impossible vu la dureté du matériau. Pour remédier à cela on effectue une reconstitution d'éprouvettes avec un compactage dynamique ou statique.

2 - NOTION DE POURCENTAGE D'ADDITIF

Le pourcentage d'additif est exprimé en % du poids du sol sec:

$$a = \% \text{ additif} = \frac{\text{Poids de chaux ou de ciment}}{\text{Poids du sol sec non amendé}} : 100 \%$$

La teneur en eau déterminée après compactage du sol amendé s'exprime en fonction du poids du sol compte tenu de l'addition de chaux ou de ciment.

$$\% \text{ eau} = \frac{\text{Poids de l'eau}}{\text{sol sec} + \text{poids d'amendement}} \times 100 \%$$

Comme le poids de l'amendement est exprimé en fonction du poids sec, on a donc :

$$\% \text{ eau} = \frac{\text{Poids d'eau}}{\left(1 + \frac{a}{100}\right) \text{ poids du sol sec}} \times 100 \%$$

3 - ESSAIS DE COMPACTAGE

Le matériau d'amendement est ajouté au matériau sec et mélangé intimement afin de réaliser la meilleure dispersion possible de la chaux ou du ciment dans la masse de la terre à stabiliser. Après ce mélange, l'humidification est exécutée à la teneur en eau désirée. Le compactage est ensuite immédiatement réalisé suivant les normes habituelles. Il faut remarquer que dans le diagramme de $f(W)$ la teneur en eau est exprimée par rapport au poids sec du sol amendé. Cette remarque a son importance pour le calcul de l'eau d'imbibition sur le chantier.

Comme les quantités de chaux ou de ciment sont en général faibles (de l'ordre de 1,5 à 6%) une répartition homogène dans la masse du sol à stabiliser est difficile à réaliser.

En particulier, l'humidité naturelle du sol provoque une mise en nodules de la chaux ou du ciment ce qui rend la réalisation d'un bon mélange presque impossible. Il n'est donc pas souhaitable de procéder à une pré-humidification du sol avant l'addition du liant hydraulique.

4 - ESSAIS C.B.R.

En raison de la nécessité d'attendre que le ciment ou la chaux ait fait prise, l'essai C.B.R. à la teneur en eau de compactage n'est réalisé que trois jours après le moulage. L'éprouvette doit évidemment pendant ce temps, être préservée de la dessiccation.

Pour les moulages qui doivent être immergés pendant 4 jours avant poinçonnement, un délai d'attente de 3 jours avant immersion est également observé. Dans ce cas, le C.B.R. est donc mesuré 7 jours après compactage.

Toutes les autres normes habituelles de l'essai C.B.R. demeurent inchangées.

5 - LIMITES D'ATTERBERG

Les éléments inférieurs au tamis ASTM n°40 sont préparés comme pour l'essai normal mais ils sont mis à sécher avant réalisation du mélange avec la chaux ou le ciment.

L'humidification du mélange se fait progressivement et on laisse à l'eau le temps de se diffuser dans la masse sans toutefois dépasser le temps de début de prise du liant.

6 - ESSAIS TRIAXIAUX

Les éprouvettes sont en général, directement prélevées par carottage dans les moulages sur lesquels ont été réalisés les essais C.B.R.

Du fait de la prise du ciment ou de la chaux, le matériau est plus rigide qu'un sol normal et sa rupture se produit rapidement pour une déformation faible de l'éprouvette.

Une grande attention doit donc être portée, dès le départ, au tracé de la courbe effort-déformation.

La dureté en même temps que la fragilité du matériau rendent parfois le carottage impossible. Dans ce cas, on procède au moulage direct d'éprouvettes triaxiales de 35 mm de diamètre et de 85 mm de hauteur. Le compactage direct dans les moules spéciaux se fait en 4 couches par application d'une pression statique jusqu'à ce que la densité voulue soit atteinte.

Les délais d'attente pour la prise et l'immersion sont les mêmes que pour les moulages C.B.R.

7 - ESSAIS OEDOMETRIQUES

Les éprouvettes ont été directement moulées dans la cellule oedométrique et compactées par application d'une pression statique jusqu'à l'obtention de la densité voulue.

Les essais de chargement sont effectués après trois jours d'attente pour permettre la prise du liant.

1.1.4 - METHODES DE CALCUL ET NORMES UTILISEES.

Plusieurs méthodes sont utilisables pour déterminer l'épaisseur à donner à une chaussée souple. Les 3 principales méthodes sont décrites dans ce chapitre.

1 - LA METHODE C.B.R.

Cette méthode mise au point et soigneusement normalisée par les Ingénieurs de Californie, s'est largement développée. Quoique l'essai soit empirique, les résultats obtenus sont intéressants.

On détermine le pouvoir portant d'un sol en le soumettant à un poinçonnement, après compactage; la valeur de la force appliquée sur le piston lorsque son enfoncement dans le sol atteint 2,5 ou 5 mm selon les cas, est comparée à une valeur de référence.

Cette valeur de référence a été obtenue sur un sol californien type dont l'indice C.B.R. a été pris égal à 100.

A partir de l'indice C.B.R. obtenu en laboratoire, on peut calculer l'épaisseur de la couche qui doit surmonter le matériau étudié. Diverses écoles se sont occupées activement de la question. Plusieurs formules et graphiques de calcul ont été proposés. Nous signalerons en premier lieu les nouveaux abaques C.B.R. dans lesquels l'épaisseur totale de la chaussée (en cm) peut être exprimée par la formule ci-après:

$$e = \frac{100 + 150}{\text{CBR} + 5} P \quad (\text{le graphique ci-après rend compte de cette formule})$$

P étant la charge par roue (en tonnes) qui doit être éventuellement majorée lorsque le trafic dépasse une certaine densité estimée à 105 Tonnes par mètre de largeur et par an.

La formule de majoration porte sur la charge et prend la forme ci-après :

$$P = P^5 \frac{T}{T_0} : \frac{T_0}{T} = 10^5 T/m/an$$

T = Trafic effectif en T/m/an

D'autre part, le Road Research Laboratory dans la Road Note n° 29 a normalisé une nouvelle détermination de ces épaisseurs tenant compte de l'importance du trafic. Le graphique ci-après traduit ces résultats.

2 - LE FACTEUR DE PORTANCE

A partir des caractéristiques de plasticité du mortier d'un sol et de la composition granulométrique du matériau, il est possible de déterminer une valeur appelée facteur de portance, qui est calculée de la façon suivante : (suivant Mr. PELTIER)

a) Facteur de portance du mortier $FP_m = \frac{4350}{LL \times IP}$

LL = limite de liquidité

IP = indice de plasticité.

b) Facteur de portance du sol

Pour tenir compte des éléments de diamètre plus grand que 0,42 mm (tamis ASTM n°40) on modifie le FP_m de la manière suivante :

- si le pourcentage d'éléments passant au tamis n°40 est supérieur à 75%.

$$FP = FP_m$$

- si ce pourcentage est compris entre 25 et 75%:

$$FP = FP_m \left(2,5 - \frac{M}{50} \right)$$

$$M = \% \text{ passant au tamis n°40}$$

- si ce pourcentage est inférieur à 25%:

$$F = 40 - \frac{2M}{2,5} (20 - FP_m)$$

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France a constaté une certaine équivalence entre le facteur de portance et l'indice C.B.R.

Ceci permet de calculer les épaisseurs de chaussée à partir du facteur de portance ou de l'indice C.B.R. avec les mêmes abaques (cités précédemment)

3 - L'INDICE DE GROUPE

Partant également des caractéristiques de granulométrie et de plasticité du matériau, il est possible de déterminer une valeur appelée indice de groupe par la formule ci-après:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$$

dans laquelle :

a et b sont fonction du pourcentage de sol passant à travers le tamis ASTM n° 200.

c est fonction de la valeur de la limite de liquidité.

d est fonction de la valeur de l'indice de plasticité.

La détermination de IG peut se faire aisément en utilisant l'abaque de la figure n°2.

Ayant déterminé l'indice de groupe on calcule l'épaisseur de la chaussée en appliquant les abaques de STEELE. (fig. 3)

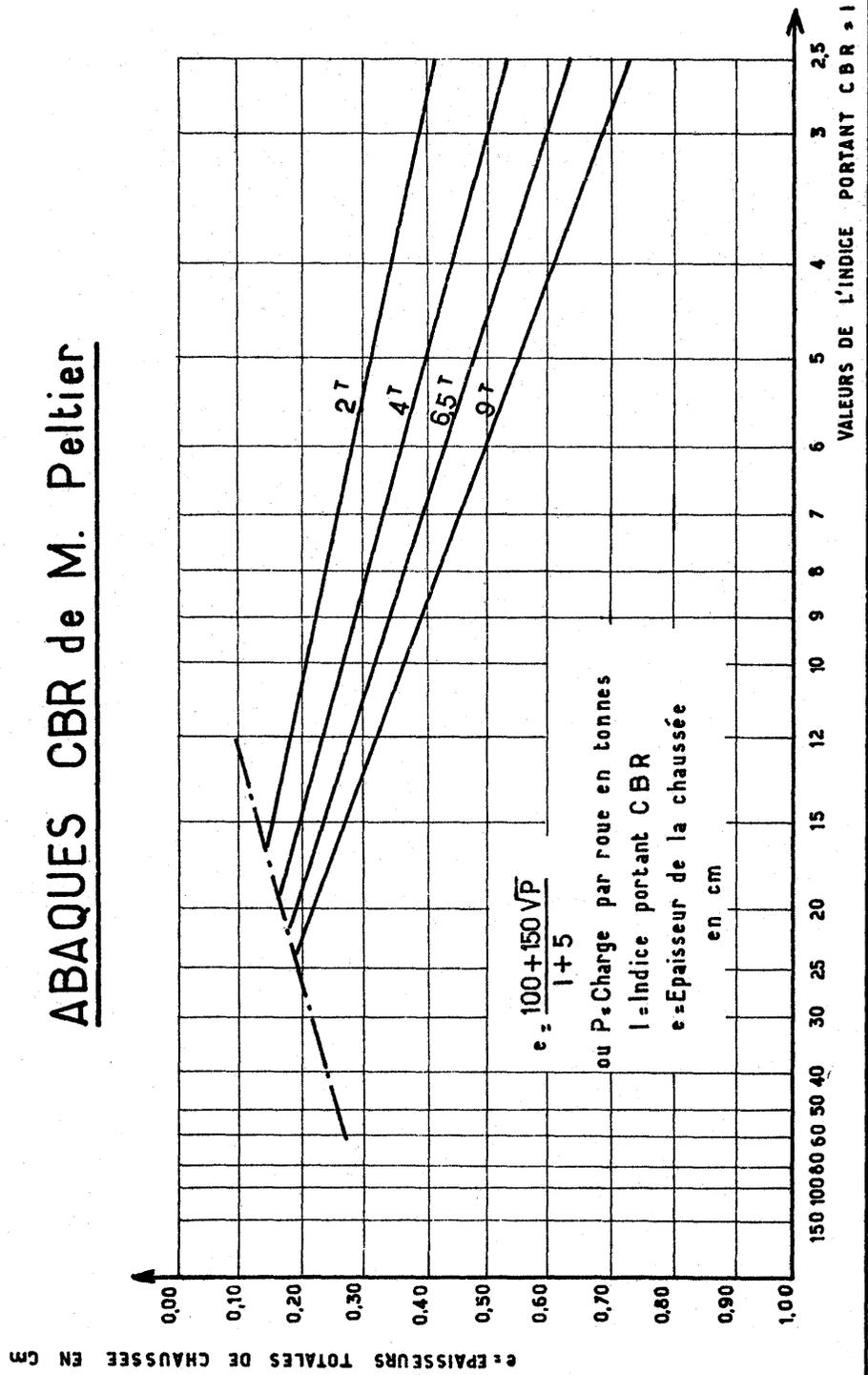
Cette dernière méthode de détermination des épaisseurs de chaussée est de moins en moins utilisée et il semble qu'à l'heure actuelle, la méthode C.B.R. soit la meilleure.

4 - NORMES HUBBARD FIELD A RESPECTER

Le tableau ci-dessous fixe les normes à respecter afin que la stabilisation aux liants hydrocarbonés soit acceptable.

	Stabilité HUBBARD FIELD		Gonflement Absorption
	sans imbibition à 18°C à 60°C	avec imbibition	
Climat sec (sols bien drainés)	450 kg 180 kg	180 kg	à 5% 7,5% pour les matériaux cohérents 12% pour les sables
Climat humide	545 kg 227 kg		

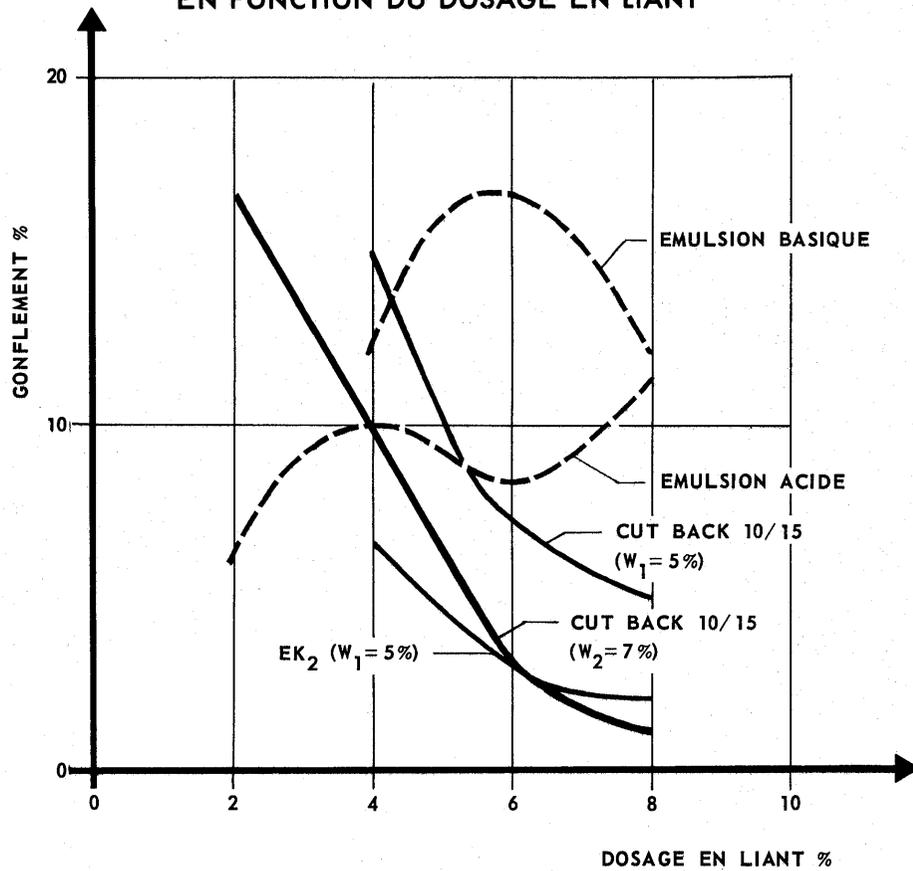
ABAQUES CBR de M. Peltier



A.1.1 Fig.1

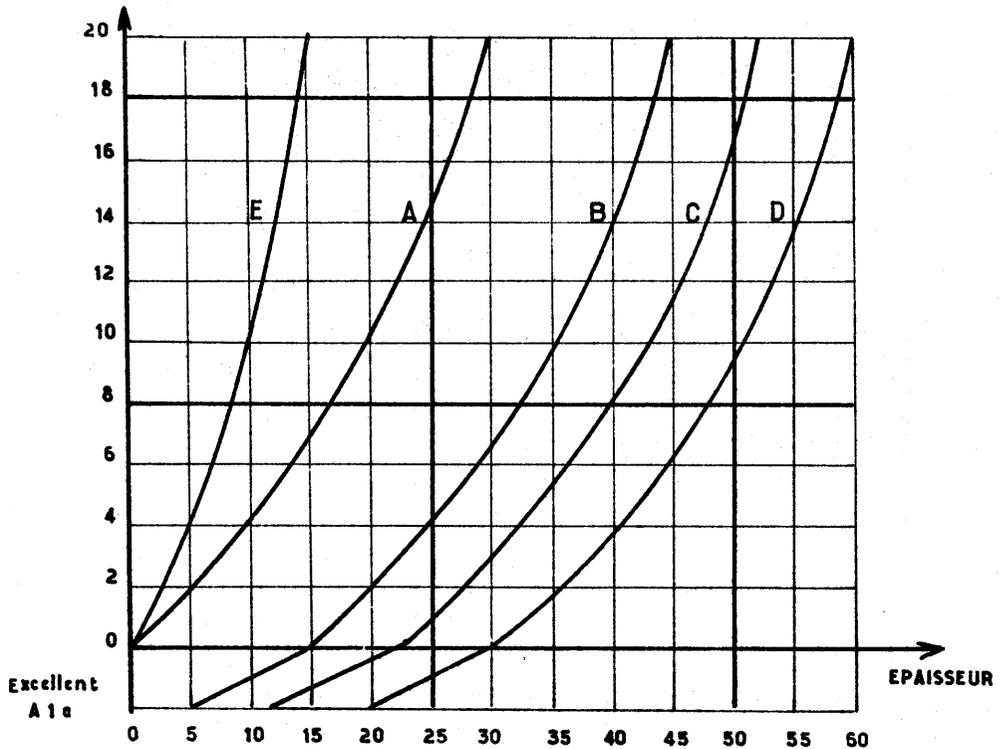
SABLE ARGILEUX stabilisé aux liants hydrocarbonés

VARIATION DU GONFLEMENT VOLUMETRIQUE
APRES 7 JOURS D'IMMERSION
EN FONCTION DU DOSAGE EN LIANT



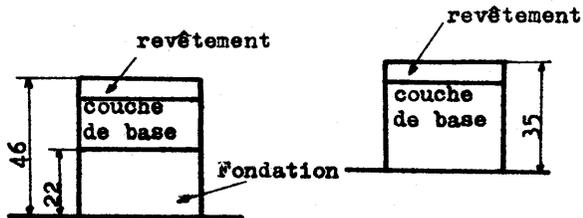
A-1-2 Fig. 32

ABAQUE DE STEELE



- Courbe A - Epaisseur de fondation requise.
- Courbe B - Epaisseur totale de revêtement de couche de base et de fondation Trafic léger
- Courbe C - " " " Trafic moyen
- Courbe D - " " " Trafic lourd
- Courbe E - Epaisseur de couche de base supplémentaire nécessaire pour remplacer la fondation de la courbe A.

Trafic léger < 50 véhicules commerciaux/jour
 Trafic moyen 50/300 " " "
 Trafic lourd > 300 " " "



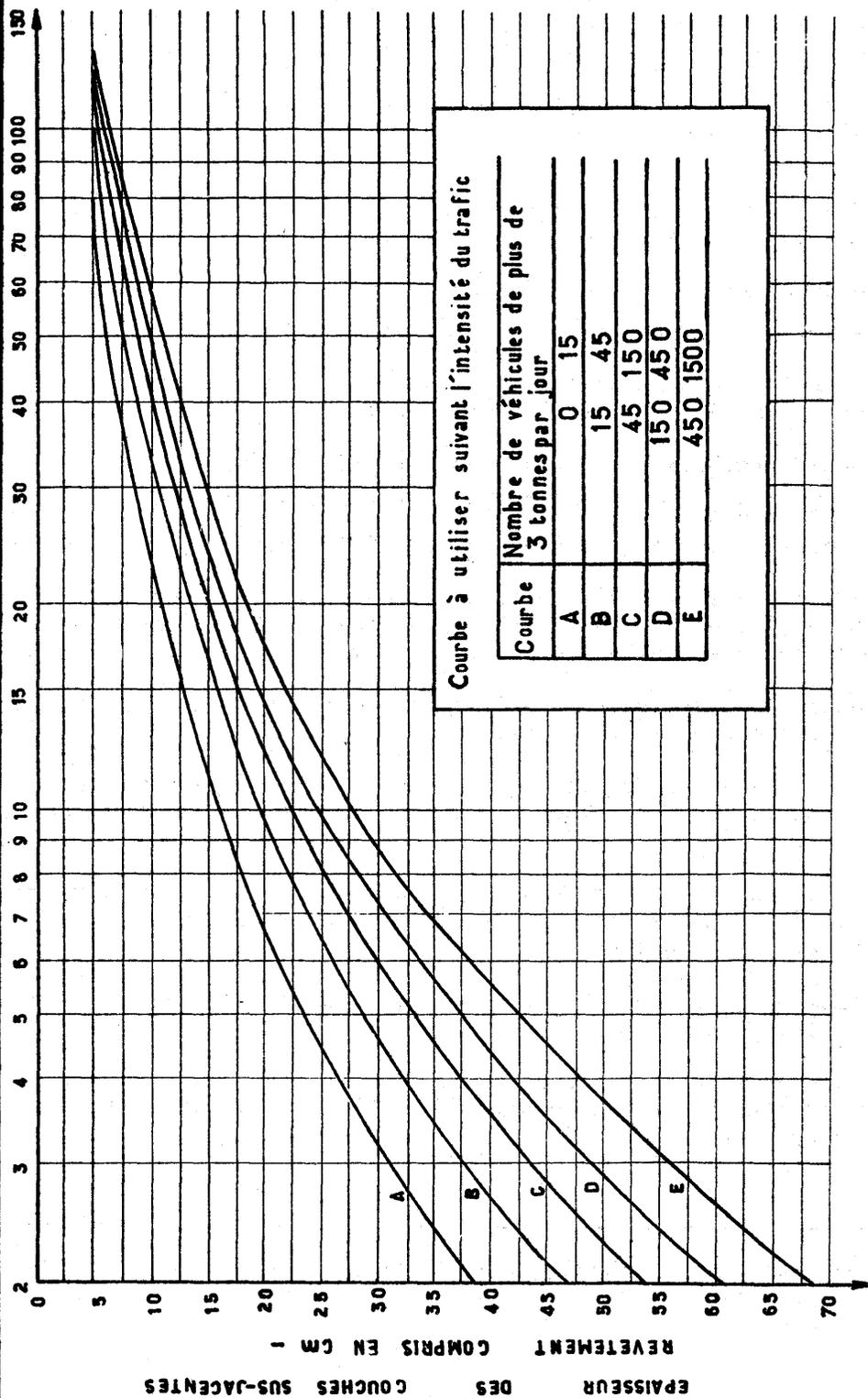
sol naturel A6 IG = 12

Trafic moyen

A 1,1 Fig 3

ABAQUES C B R

- METHODE ANGLAISE -



A1.1 Fig: 4

A.1.2 - RESULTATS DES ESSAIS

1.2 . 0 - GENERALITES - Sols et mélanges - types étudiés.(rappel)

Les sols fins qui vont du sable propre à l'argile franche en passant par tous les mélanges intermédiaires, sable argileux, argile sableuse etc... couvrent une grande partie de l'Afrique.

L'absence de squelette graveleux leur confère en général, de mauvaises qualités routières et rend leur stabilisation indispensable.

Pour l'étude en Laboratoire des possibilités d'amélioration de ces matériaux, nous avons choisi deux sols naturels types :

- un sable dunaire en provenance de Dakar,
- une argile latéritique de la région d'Abidjan.

Pour les sols intermédiaires, trois mélanges des deux sols précédents ont été prévus. Ils ont été dénommés :

Sable argileux	(75% sable + 25% argile)	(1)
Sable argile	(50% sable + 50% argile)	(1)
Argile sableuse	(25% sable + 75% argile)	(1)

En raison de la très forte cohésion de l'argile surtout à l'état sec, il est indispensable de désagréger le matériau avant de le mélanger au sable. Deux modes de préparation ont été envisagés:

- a) désagrégation poussée de façon à reconstituer un sol très homogène voisin d'un sol naturel.

Dans ce cas, l'argile est malaxée dans un broyeur à boulets de telle sorte qu'elle passe en totalité au travers du tamis ASTM n°40 (0,42mm)

- b) désagrégation moins poussée de façon à donner un mélange analogue à celui qui serait réalisé sur un chantier avec les engins habituels de malaxage.

Dans ce cas, l'argile est soumise à un broyage manuel à l'aide de rouleaux en plomb.

Avec ce mode de préparation, il subsiste un certain nombre de nodules d'argile et le mélange éventuel avec le sable est donc moins intime.

(1) Remarque : les chiffres indiqués sont des pourcentages en poids de matériaux secs.

1.2.1 - SABLE DE DAKAR

1 - DESCRIPTION DU MATERIAU

Courbe granulométrique (figure n°1)

Le sable étudié est un sable de dune formé de grains fins et ronds qui ont une granulométrie très serrée. Plus de 80% des grains sont compris entre les tamis de 0,4 et 0,1 mm. Il n'y a que 6% environ de fines passant au tamis de 74 microns.

Limites d'Atterberg

Ces limites ne sont évidemment pas déterminables, le sable n'ayant aucune plasticité.

Equivalent de sable

La mesure de l'équivalent de sable a donné des valeurs comprises entre 58 et 66.

Classification routière

Le matériau peut être classé dans la catégorie A.3 de "l'United States Public Roads Administration"

Poids spécifique

Il a une valeur de 2,65 T/M³

2 - STABILISATION MECANIQUE

Essais de compactage Proctor Modifié

Le compactage à la dame tel qu'il est défini dans l'essai Proctor est mal adapté au compactage de matériaux sableux dépourvus de toute cohésion. La courbe Proctor est donc très plate et la teneur en eau optimale se trouve mal déterminée.

Les valeurs suivantes ont néanmoins été retenues (voir fig.2)

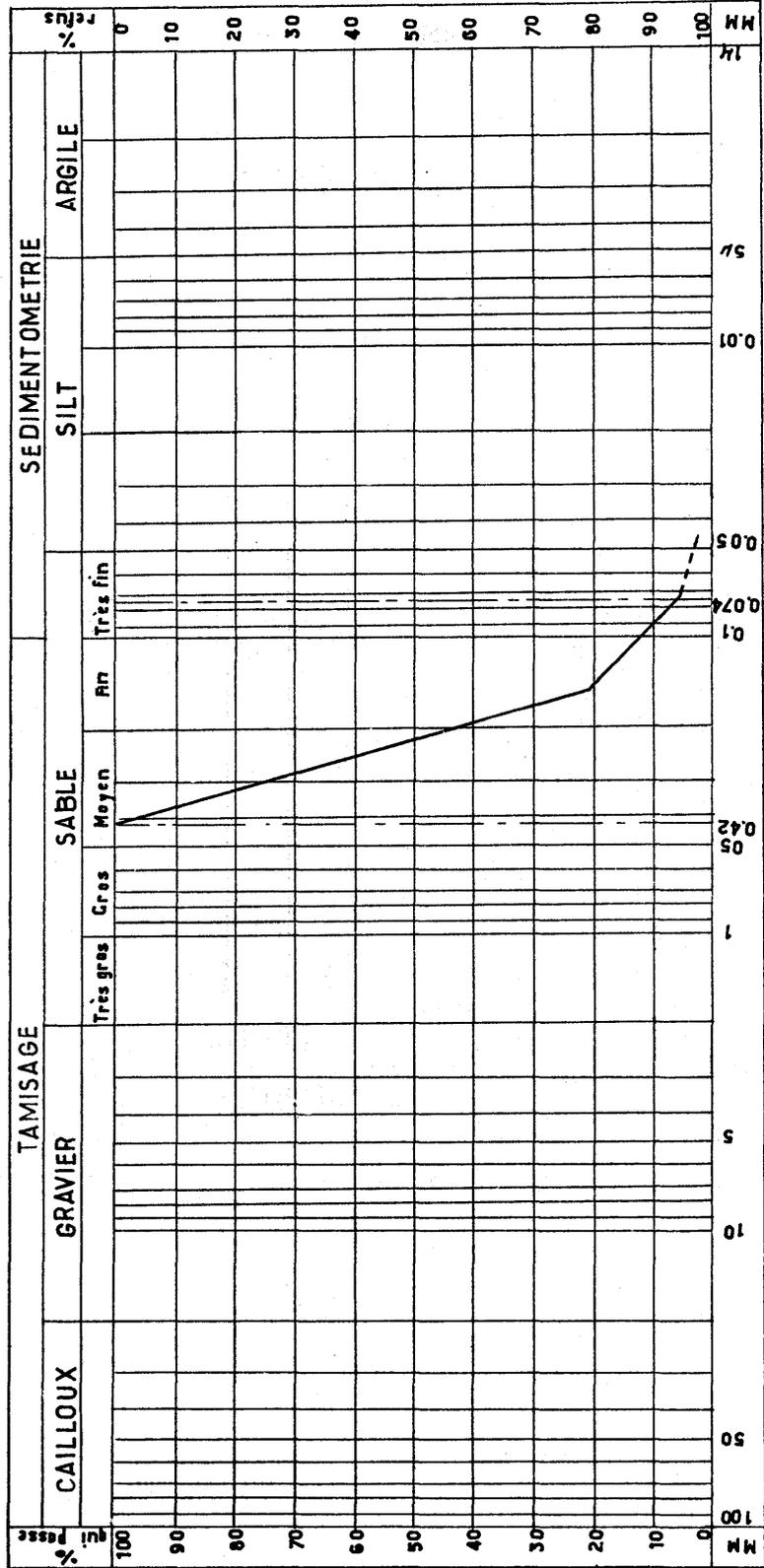
Teneur en eau optimale	12 à 14%
Densité sèche maximale	1,70 à 1,72 T/M ³
Degré de saturation à l'optimum	environ 60%

La densité sèche est peu élevée et laisse 35% de vides dans le volume total du sol. Un peu plus de la moitié de ces vides seulement est occupée par l'eau. Il est donc nécessaire, si l'on veut avoir un mélange plein, de prévoir des apports importants de chaux ou ciment pour la stabilisation.

SABLE

- Matériau S -

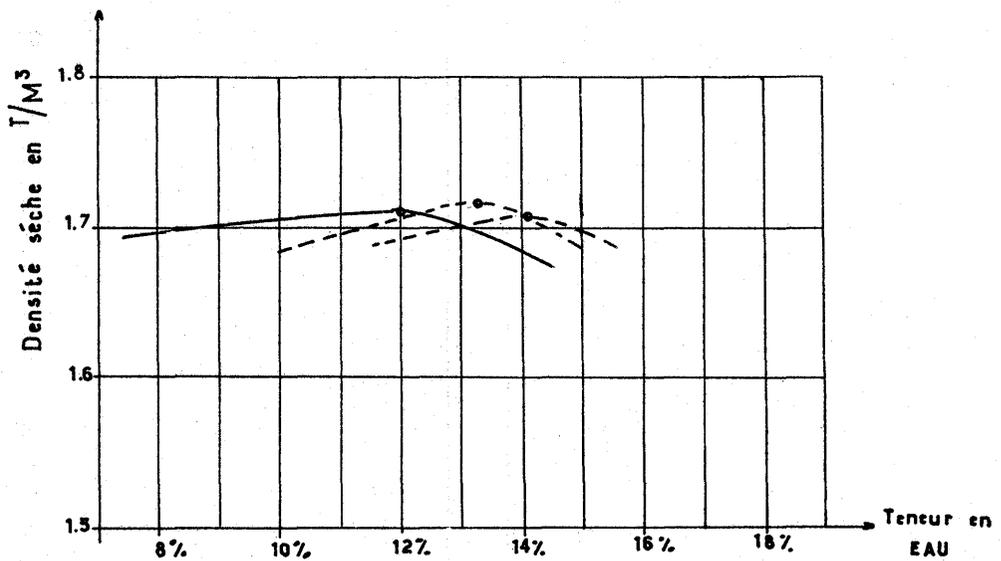
COURBE GRANULOMETRIQUE



A-1.2 Fig 1

SABLE

ESSAI PROCTOR MODIFIE



TENEUR EN EAU OPTIMALE 12 à 14%
DENSITE SECHE MAXIMALE 1,70 à 1,72 T/M³

A .1.2. Fig2

- Essais de portance C.B.R.

Sur le tableau suivant sont reportées les valeurs des indices C.B.R. obtenus sur le sable :

Compactage	C.B.R.	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% PM	35	10
95% PM	10	5
90% PM	3	3

Essais triaxiaux rapides drainés

La cohésion est toujours très faible, mais l'angle de frottement interne varie avec la compacité. Les valeurs suivantes ont été obtenues :

Compactage	Angle de frottement interne
100% PM	37°
95% PM	31°
90% PM	29°

En raison de la très grande perméabilité du sable, les essais rapides ne mobilisent aucune pression interstitielle et donnent donc les mêmes résultats que des essais lents.

3 - STABILISATION A LA CHAUX

Essais de compactage Proctor Modifié

La densité sèche maximale augmente avec le pourcentage de chaux incorporé dans le sable. Ceci est normal puisque nous avons constaté que le sable à sa densité maximale avait de nombreux vides que la chaux pouvait facilement combler.

Nous avons noté les résultats suivants :

% de chaux ajouté au sable	Teneur en eau optimale	Densité sèche maximale T/m ³
0	12%	1,71
2	12%	1,74
4	11,5 %	1,78
6	11,3 %	1,80
10	10,5 %	1,84

REMARQUE.

Rappelons que la densité du matériau amendé s'exprime comme suit :

$$d_s = \frac{P_{\text{sol sec}} + P_{\text{chaux ou ciment}}}{\text{Volume de l'échantillon}}$$

et que la teneur en eau est calculée par la formule ci-après :

$$W = \frac{\text{Poids de l'eau}}{P_{\text{sol sec}} + P_{\text{chaux ou ciment}}}$$

Le compactage est exécuté immédiatement après humidification du sol amendé pour éviter tout phénomène de prise.

Essais de portance C.B.R.

Les essais C.B.R. non imbibés sont effectués 3 jours après le compactage du matériau amendé:

Les essais C.B.R. imbibés sont effectués après 3 jours de repos à l'air + 4 jours d'imbibition.

On constate sur la figure n°3 que les écarts entre les valeurs des C.B.R. pour les échantillons qui ont ou n'ont pas subi d'immersion sont assez réduits.

Les indices C.B.R. restent toutefois faibles, même avec des pourcentages importants de chaux (C.B.R. = 40% pour un compactage de 95% P.M et une addition de 10% de chaux).

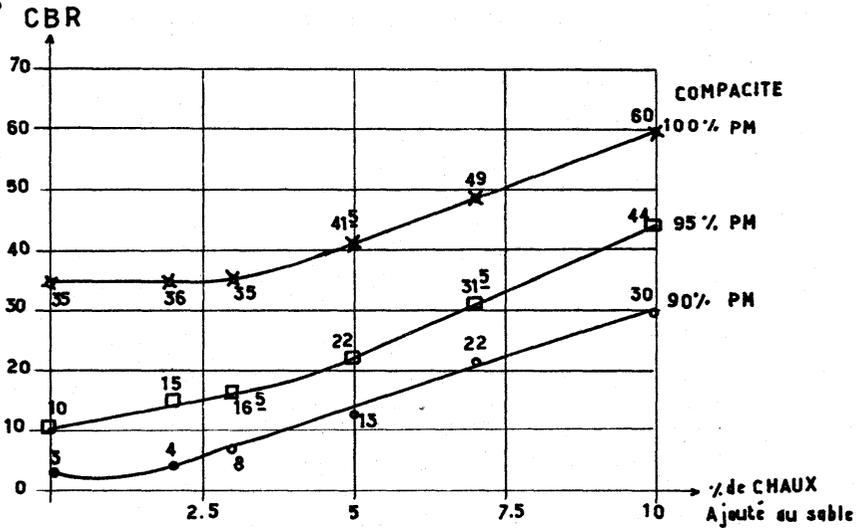
Essais triaxiaux rapides drainés. (fig.n° 4 et 5)

Il y a peu de différence entre les résultats des éprouvettes imbibées ou non imbibées lorsque la compacité ou le pourcentage de chaux sont par ailleurs identiques. Les deux graphiques représentant les variations de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de chaux incorporé au sable groupent donc l'ensemble des résultats sur éprouvettes imbibées ou non.

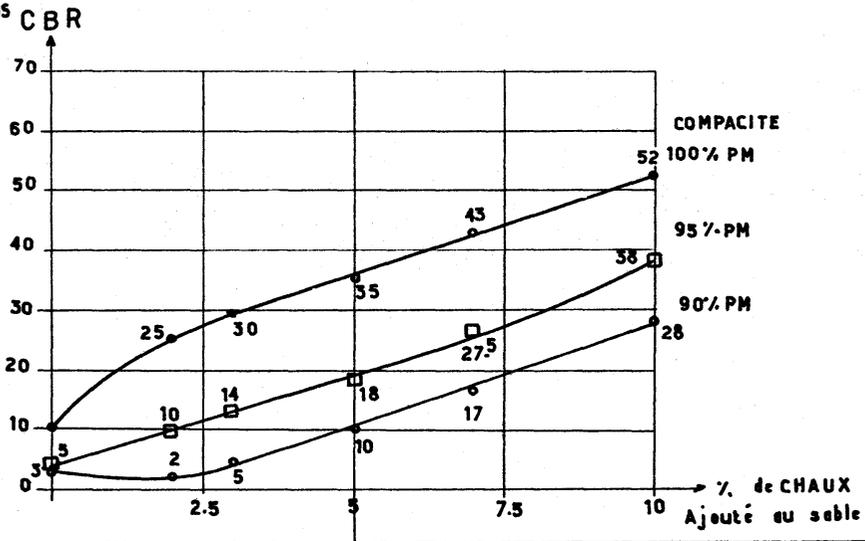
SABLE

INFLUENCE SUR LE CBR DU SABLE DE
L'ADDITION D'UN POURCENTAGE VARIABLE DE CHAUX

CBR
DES ECHANTILLONS
NON IMBIBES



CBR
DES ECHANTILLONS
IMBIBES

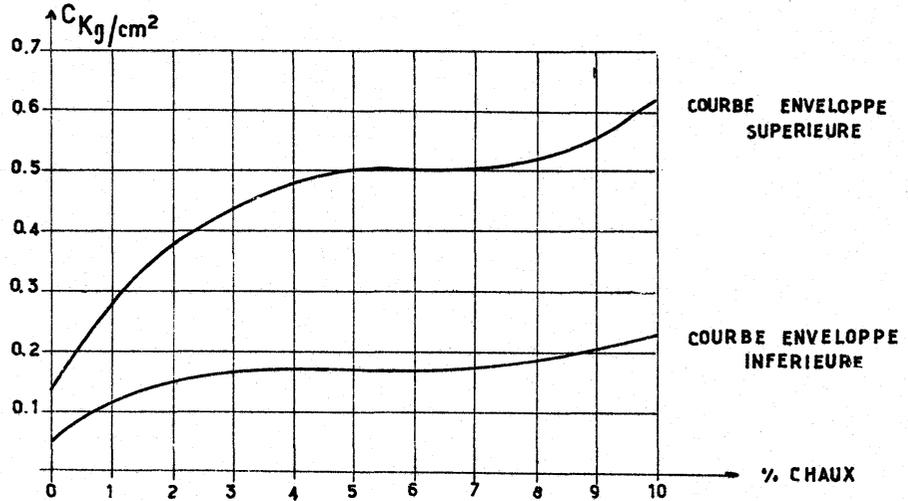


A.1.2 - Fig 3

SABLE

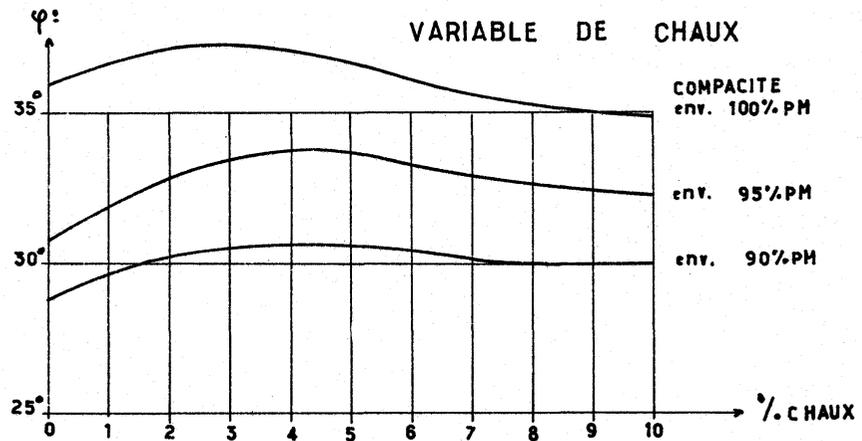
INFLUENCE SUR LA COHESION DU SABLE DE
L'ADDITION D'UN POURCENTAGE VARIABLE DE CHAUX

Echantillons imbibés et non imbibés



LA COURBE SUPERIEURE CORRESPOND A UNE COMPACTITE DE 98 à 101% PM
LA COURBE INFERIEURE CORRESPOND A UNE COMPACTITE DE 89 à 92,5% PM

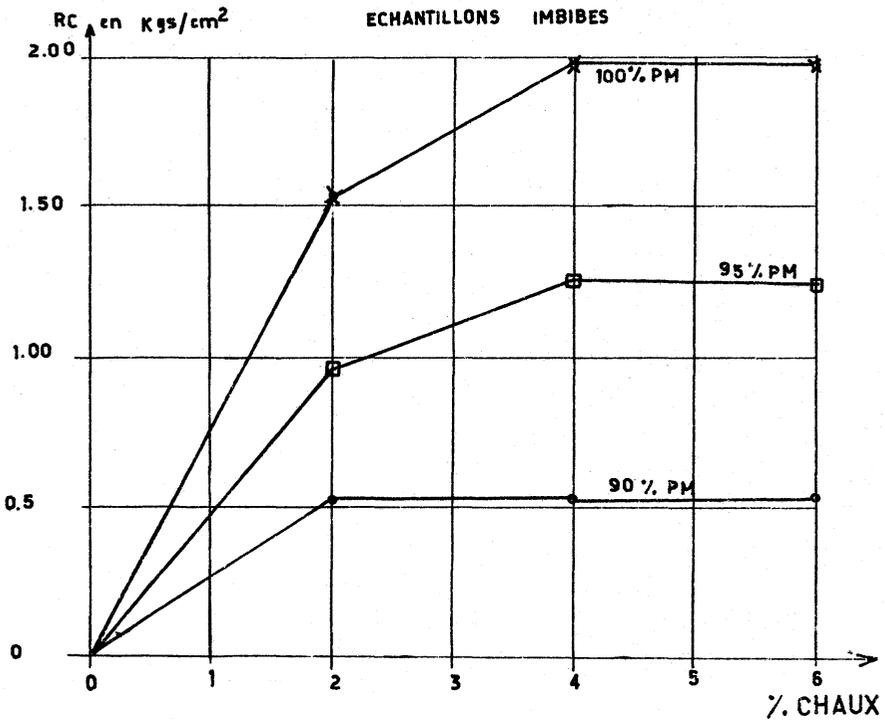
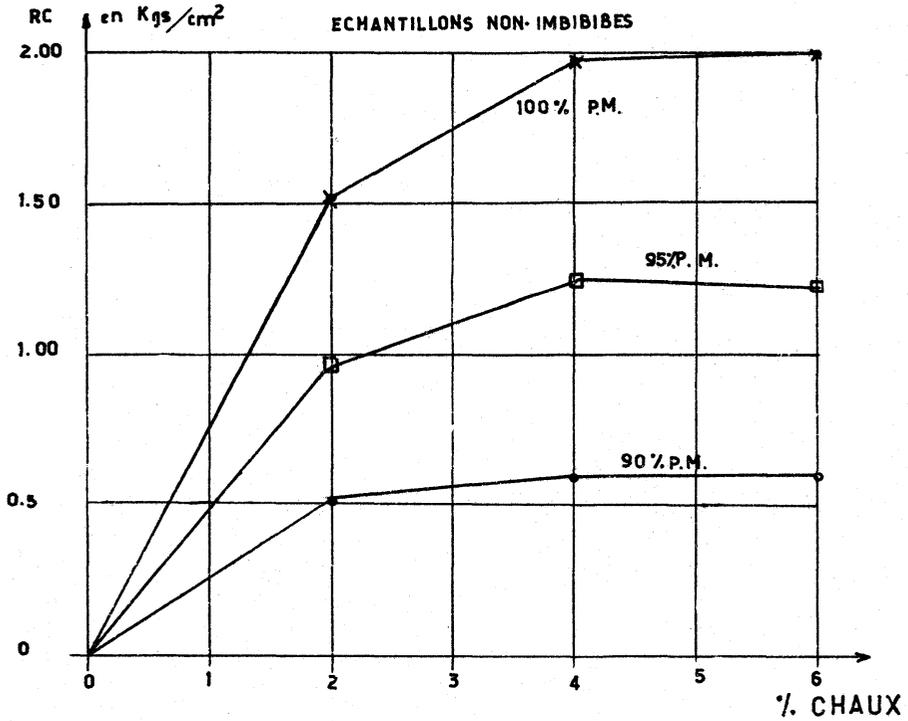
INFLUENCE SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE
DU SABLE DE L'ADDITION D'UN POURCENTAGE
VARIABLE DE CHAUX



ECHANTILLONS IMBIBES ET NON IMBIBES

SABLE

VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN
FONCTION DE L'AMENDEMENT A LA CHAUX ET DU COMPACTAGE



La dispersion pour les cohésions est assez grande mais les courbes enveloppes tracées sur le graphique montrent quand même une croissance très nette de la cohésion qui triple en valeur lorsque le pourcentage de chaux croît de 0 à 4%. Au delà de cette valeur, le gain de cohésion est peu marqué. Dans l'ensemble, les cohésions restent d'ailleurs faibles et dans les meilleures conditions de compactage, elles ne dépassent pas 0,5 kg/cm².

L'angle de frottement interne croît également de 2 à 3° lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 4%. Au delà de cette valeur, il y a une légère chute de l'angle de frottement qui peut être due à l'action plastifiante des fines apportées par la chaux.

Les résistances à la compression simple restent très médiocres (maximum 2 kg/cm²) en raison de la faiblesse des cohésions.

Essais oedométriques.

On constate une stabilité relative du coefficient de compressibilité (C=200) lorsque le pourcentage de chaux augmente. Par contre, la perméabilité du sable diminue sensiblement passant de $K = 4 \times 10^{-4}$ cm/s à 5×10^{-6} cm/s lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 10%.

- CONCLUSION

La chaux n'agit pas comme bon agent stabilisateur sur le matériau sableux puisque seul le rôle de correcteur granulométrique est prépondérant alors qu'il existe d'autres matériaux plus économiques pour être utilisés à cette fin.

4 - STABILISATION AU CIMENT.

- Essai de compactage Proctor Modifié.

Les variations de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale avec l'addition de ciment sont très voisines de celles obtenues avec la chaux.

% ciment	Densité sèche 'maximale en T/m ³ '	Teneur en eau optimale
0	1,71	12
1,5	1,725	11,5
3	1,75	11,5
5	1,78	10,75

L'augmentation de densité montre que les grains fins du ciment se logent entre les grains de sable et en améliorent la granulométrie.

Essai de portance C.B.R.

Les valeurs des C.B.R. augmentent très rapidement avec le pourcentage de ciment (voir figures 6 et 7).

Dès que le dosage dépasse 1,5% le C.B.R. imbibé qui se mesure à 7 jours d'âge devient supérieur au C.B.R. non imbibé qui se mesure à 3 jours. Ceci est évidemment dû au fait que la prise du ciment ne s'effectue que lentement.

Il est donc indispensable, sur le chantier, de maintenir une humidité suffisante dans le sol pour permettre à la prise de s'effectuer complètement.

L'absorption d'eau à la prise est mise en évidence dans le tableau ci-dessous où figurent les teneurs en eau de compactage et celles obtenues 3 jours plus tard, les éprouvettes étant protégées de l'évaporation.

% ciment	teneur en eau de compactage	teneur en eau après 3 jours.
0	11,7	11,7
1,5	10,80	10,40
3	11,40	8,50
5	10,15	7,80
7	10,40	7,2

ESSAIS TRIAXIAUX RAPIDES DRAINÉS

L'addition de ciment au sable provoque une amélioration sensible de la cohésion qui toutefois ne dépasse pas 1 kg/cm² avec 5% de ciment dans les conditions les plus favorables de compactage (voir figure 8).

On constate également sur la figure 8 que l'angle de frottement interne n'est pratiquement pas modifié par l'addition de ciment.

La résistance à la compression simple, tout en croissant régulièrement avec le pourcentage de ciment, reste médiocre et ne dépasse pas 3 à 4 kg/cm² avec 5% de ciment (voir figure 9).

ESSAIS OEDOMETRIQUES.

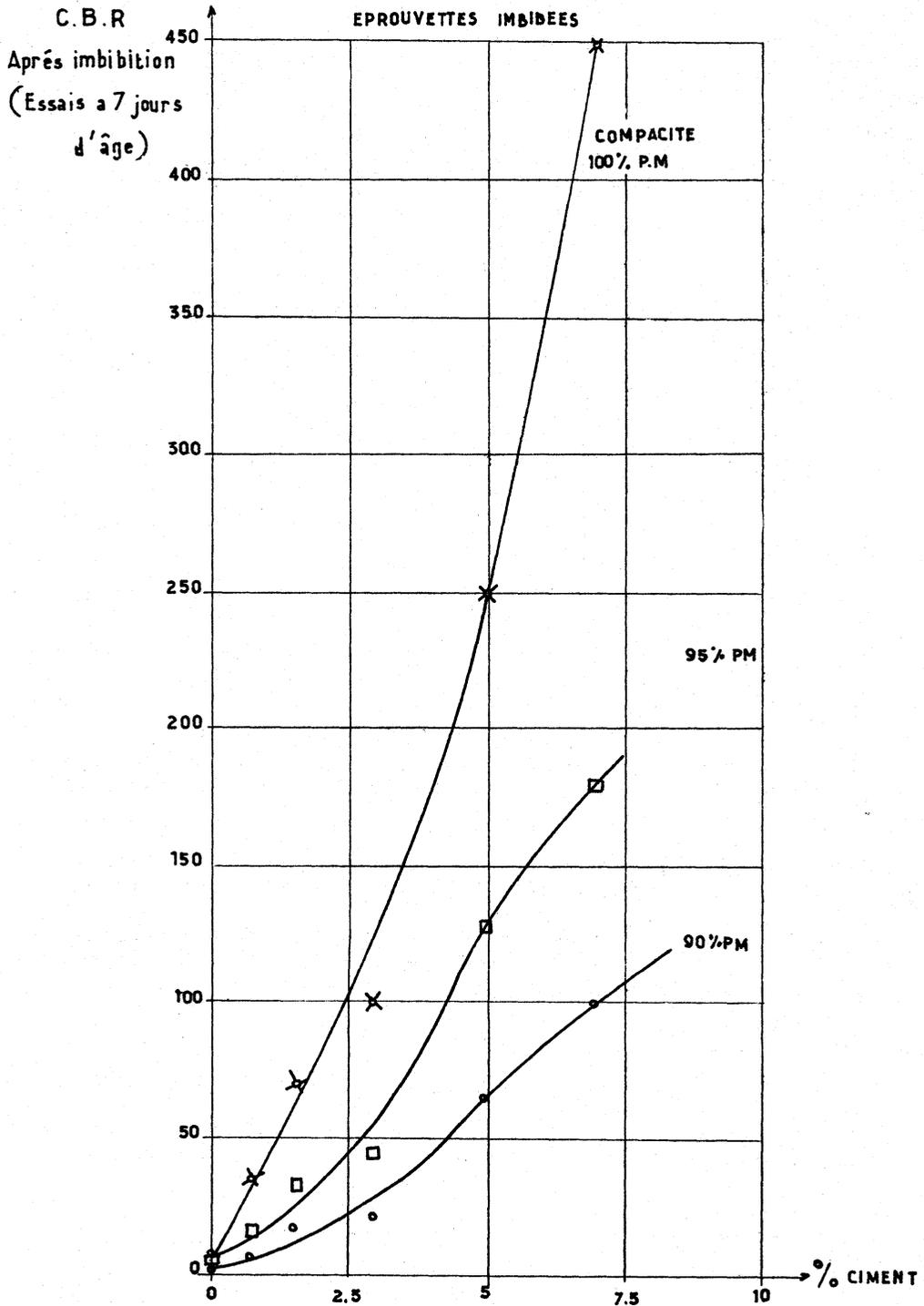
Les valeurs obtenues pour le coefficient de compressibilité C défini au chapitre précédent sont les suivantes :

% de ciment	0	1,5	3	5	7
Coefficient C	210	212	197	194	292

SABLE

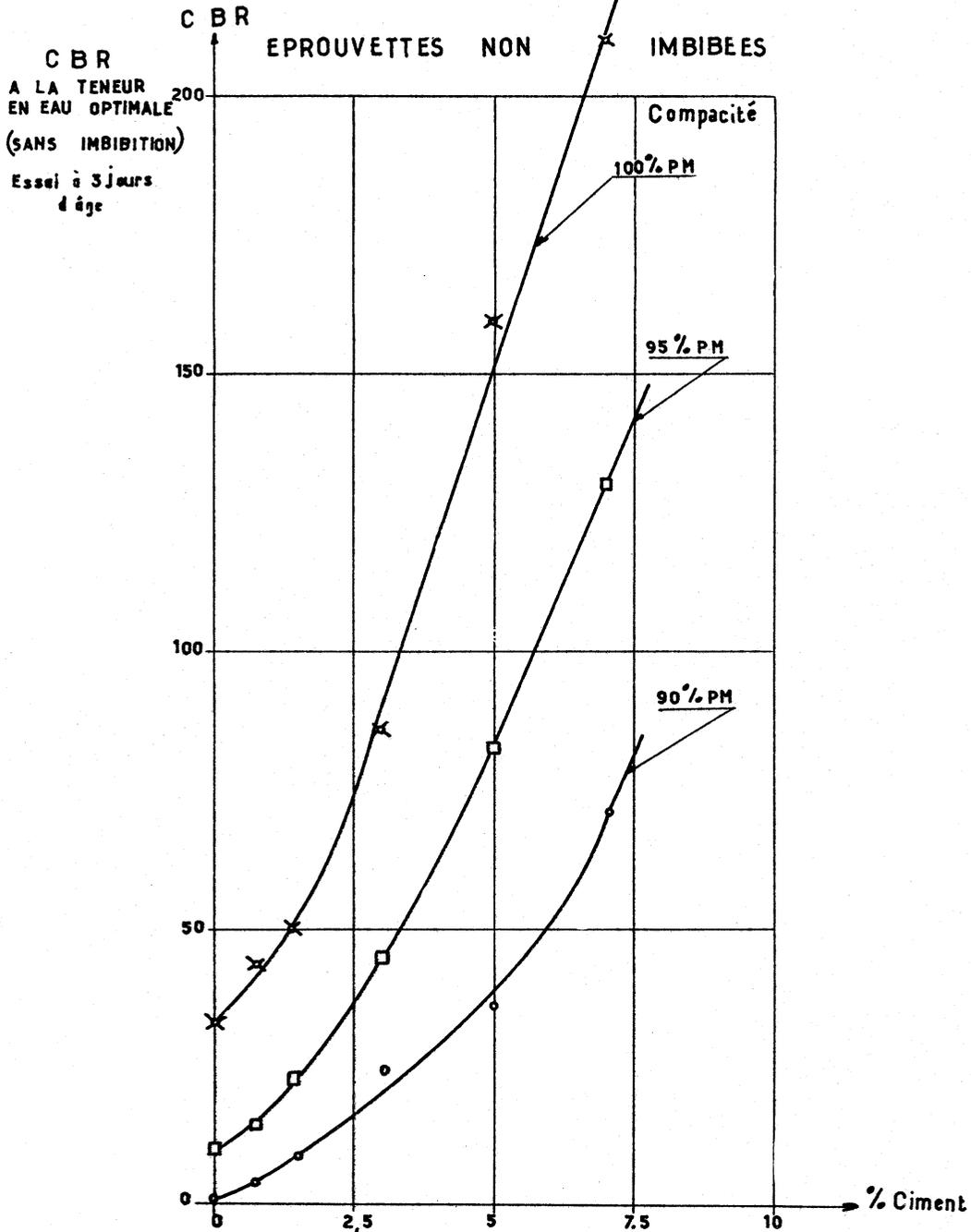
INFLUENCE SUR LE C.B.R DU SABLE DE L'ADDITION
D'UN POURCENTAGE VARIABLE DE CIMENT

J.P. LAMOUR



A .1-2. Fig 6

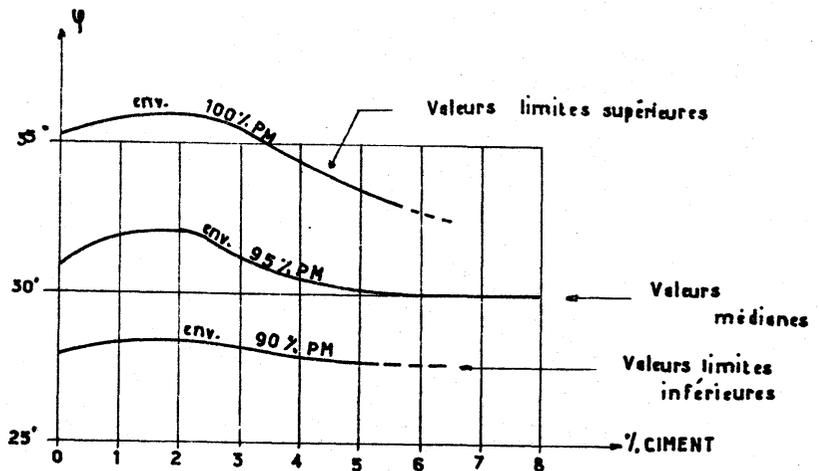
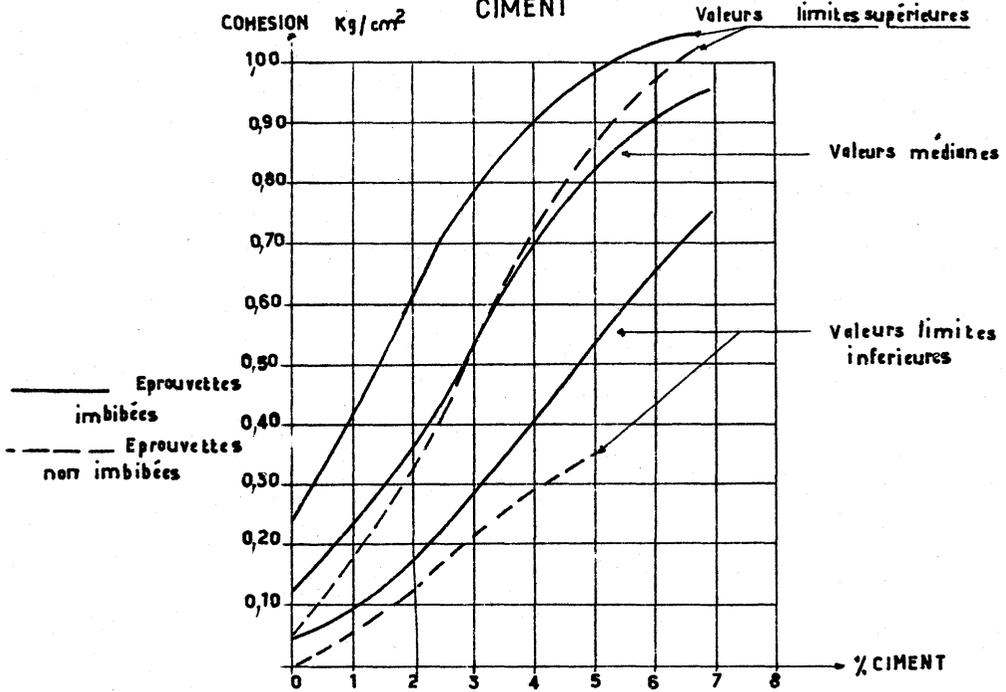
SABLE



INFLUENCE SUR LE CBR DE L'ADDITION D'UN
POURCENTAGE VARIABLE DE CIMENT

SABLE

INFLUENCE SUR LA COHESION ET L'ANGLE DE FROTTEMENT
INTERNE DU SABLE DE L'ADDITION D'UN POURCENTAGE VARIABLE DE
CIMENT

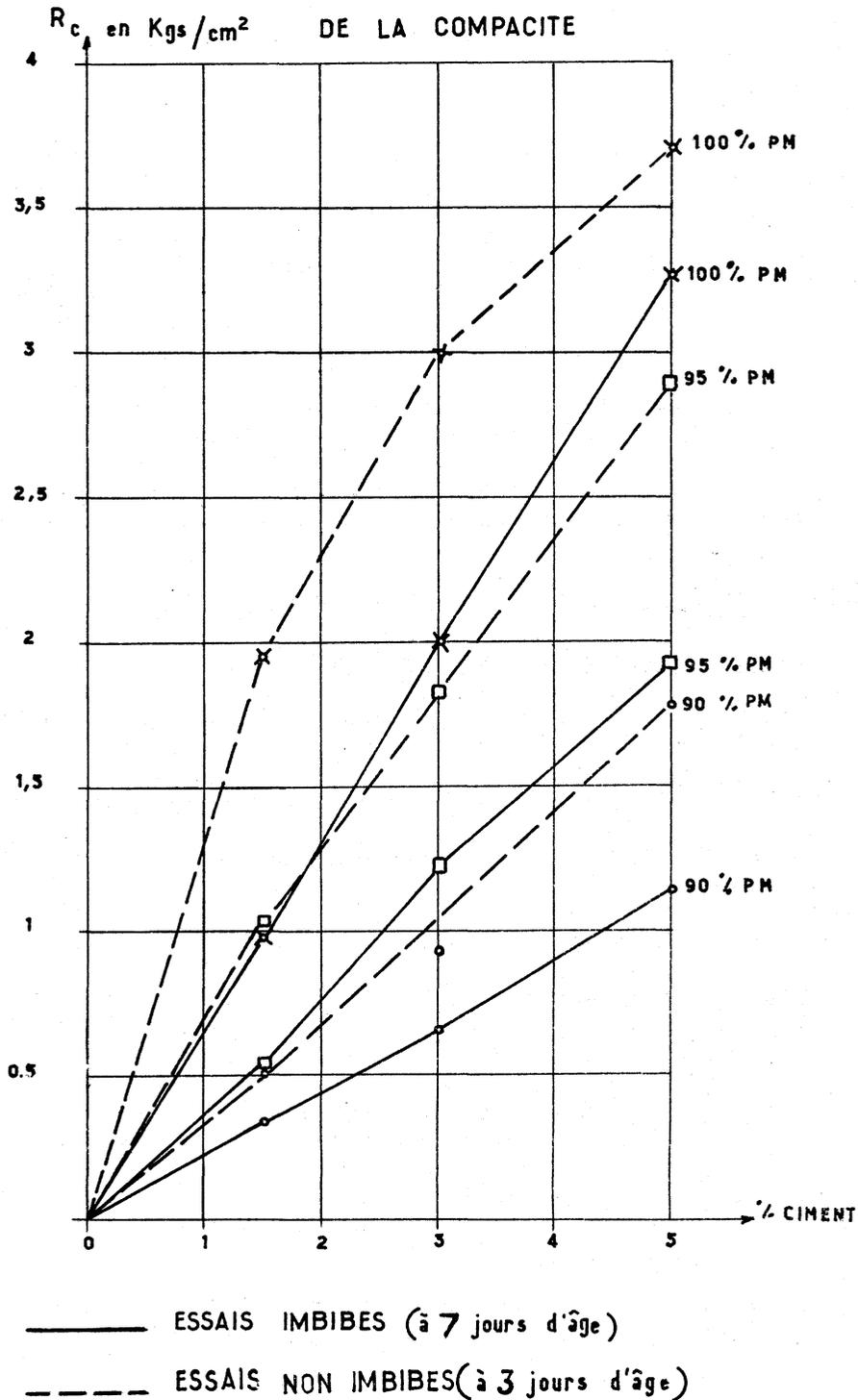


A .1.2..Fig 8

SABLE

VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN
FONCTION DE L'ADDITION DE CIMENT POUR DIVERSES VALEURS

J.P. LAMOUR



Pour les dosages inférieurs à 5%, le coefficient C est donc très stable. Le sable est peu compressible et de faibles additions de ciment ne modifient pas cette compressibilité. Pour les dosages plus élevés, le mélange devient toutefois plus rigide car on se rapproche peu à peu d'un mortier maigre.

De son côté, la perméabilité diminue légèrement lorsque le pourcentage de ciment augmente. Elle passe en effet de 4×10^{-4} cm/s sans ciment à $1,5 \times 10^{-5}$ cm/s avec 5% de ciment.

CONCLUSIONS

Le ciment, comme la chaux, joue un rôle de correcteur granulométrique en apportant un complément de fines au sable, ce qui diminue l'indice des vides.

Le rôle principal du ciment est cependant de consolider le squelette du sable en soudant les grains les uns aux autres, grâce à la prise du liant. Il en résulte une augmentation très sensible de la résistance au poinçonnement du sol.

En contre-partie, le sol-ciment perd ainsi de la souplesse et risque de se fissurer rapidement sous la circulation.

Il est donc nécessaire d'adopter un dosage en ciment qui améliore la portance sans donner trop de rigidité au mélange après prise.

5 - STABILISATION AU MOYEN DE LIANTS HYDROCARBONES.

Liants utilisés et essais effectués.

Trois types de liants bitumineux ont été utilisés pour l'étude de la stabilisation du sable.

- Un cut-back 50/100 préparé à partir d'un bitume 180/200
- Une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100 (COLSOL)
- Une émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisée.

Les essais effectués sur le matériau additionné d'un liant hydrocarboné sont les essais Hubbard Field et les essais LCPC. Quatre modes de conservation des éprouvettes ont été prévus :

Essai A : Conservation des éprouvettes à l'air à 18°C. pendant 7 jours, puis mesure de la stabilité à cette température.

Essai B : Sèchage des éprouvettes à 60°C. jusqu'à poids constant puis conservation pendant 24 heures à 18°C. et mesure de la stabilité à 18°C.

Essai C : Sèchage des éprouvettes à 60°C. jusqu'à poids constant puis mesure de la stabilité à 60°C.

Essai D : Sèchage des éprouvettes à 60°C. immersion des éprouvettes sur la moitié de la hauteur dans de l'eau potable à 18°C. pendant 7 jours, puis essai dès la sortie de l'eau.

Stabilisation au cut-back 50/100

Le liant a été légèrement chauffé (60 à 70°C.) puis incorporé au sable humide.

La valeur d'exsudation est 16% d'eau + bitume.

Les résultats obtenus aux essais sont les suivants :

teneur en eau du sol	dosage en cut-back b%	2	4	6	8
	Densité sèche H.F.	1,69	1,70	1,70	1,72
	Densité sèche L.C.P.C.	1,64	1,64	1,63	1,63
	Absorption H.F. w%	0,70	1,50	1,40	1,60
	Absorption L.C.P.C. w%	3,30	3,00	2,50	1,80
	Stabilité H.F. (Kg.)				
6%	A (sèchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C.	75	85	55	50
	B (sèchage complet à 60°C. (stabilité à 18°C.	240	220	200	180
	C (sèchage complet à 60°C. (stabilité à 60°C.	85	80	70	55
	D (sèchage complet à 60°C. (stabilité après immersion à 18°C.	330	374	310	310
	Résistance L.C.P.C. (kg/cm ²)				
	A (sèchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C.	1,3	0,9	1,0	0,5
	B (sèchage complet à 60°C. (stabilité à 18°C.	3,1	2,4	2,0	1,6
	C (sèchage complet à 60°C. (stabilité à 60°C.	1,0	0,8	0,4	0,3
D (sèchage complet à 60°C. (stabilité après immersion à 18°C.	3,3	3,0	2,5	1,8	

teneur en		dosage en cut-back b%			
eau du sol		2	4	6	8
	Densité sèche H.F.	1,70	1,68	1,70	1,67
	Densité sèche L.C.P.C.	1,64	1,63	1,64	1,64
	Absorption H.F. w%	0,60	0,60	-	1,70
	Absorption L.C.P.C. w%	4,10	4,20	3,30	2,00
	Stabilité H.F. (kg.)				
8%	A (séchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C.	125	80	60	50
	B (séchage complet à 60°C. (stabilité à 18°C.	260	190	145	120
	C (séchage complet à 60°C. (stabilité à 60°C.	85	70	55	40
	D (séchage complet à 60°C. (stabilité après immersion à 18°C.	295	290	300	225
	Résistance L.C.P.C. (kg/cm ²)				
	A (séchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C.	1,7	1,1	1,0	0,5
	B (séchage complet à 60°C. (stabilité à 18°C.	5,3	4,4	3,7	2,6
	C (séchage complet à 60° (stabilité à 60°C.	1,3	1,0	0,9	0,7
D (séchage complet à 60°C. (stabilité après immersion à 18°C.	4,1	4,2	3,3	2,0	

Le gonflement au cours de l'imbibition est nul dans tous les cas.

Stabilisation à l'émulsion basique (COLSOL)

L'enrobage s'effectue aisément sans rupture de l'émulsion.

La valeur de l'exsudation a l'essai Hubbard Field est de 11%.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau du sol	Dosage en émulsion b%	2	4	6	8
3%	Densité sèche H.F.	1,62	1,64	1,63	1,58
	Densité sèche L.C.P.C.	1,60	1,61	1,61	1,62
	Absorption H.F.	w' % 17,7	5,5	3,1	7,2
	Absorption L.C.P.C.	w' % 18,5	12,8	10,5	9,6
	Stabilité H.F (kg)				
	A (sèchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C.	170	230	505	440
	B (sèchage complet à 60°C (stabilité à 18°C.	130	280	510	480
	C (sèchage complet à 60°C (stabilité à 60°C	50	50	45	40
	D (sèchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C	70	170	525	250
	Résistance L.C.P.C. (kg/cm ²)				
	A (sèchage partiel à 18°C. (stabilité à 18°C	3,2	4,0	6,7	6,1
	B (sèchage complet à 60°C (stabilité à 18°C	3,2	5,3	6,1	5,2
	C (sèchage complet à 60°C (stabilité à 60°C	0,8	1,0	1,0	0,7
	D (sèchage complet à 60°C. (stabilité après immersion à 18°C	0,6	2,0	2,7	3,2

teneur en eau du sol		Dosage en émulsion b%	2	4	6	8
	Densité sèche H.F.		1,60	1,61	1,61	-
	Densité sèche L.C.P.C.		1,62	1,62	1,62	-
	Absorption H.F.	w'%	13,7	8,7	10,0	-
	Absorption L.C.P.C.	w'%	(1)	4,3	6,0	-
	Stabilité H.F. (kg)					
5%	A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)		240	370	390	-
	B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)		240	400	530	
	C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)		60	65	70	-
	D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)		120	230	250	-
	Résistance L.C.P.C. (kg/cm ²)					
	A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)		3,4	3,0	2,7	
	B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)		4,3	7,4	8,4	
	C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)		1,2	1,0	1,0	
	D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)		0,0	7,0	7,5	

(1) éprouvette détériorée.

Stabilisation à l'émulsion basique avec incorporation de 3% de chaux

Les résultats ci-dessus s'étant révélés médiocres, notamment ceux de l'essai à 60°C, on a étudié l'influence d'une addition de chaux ordinaire au sol, avant l'enrobage à l'émulsion.

Une première série d'essais réalisés avec 1% et 2% de chaux et 6% de ColSol a montré que l'addition de chaux améliorerait nettement les caractéristiques du mélange, mais que la stabilité à 60°C. (Essai C) demeurerait insuffisante.

On a ainsi été amené à envisager l'addition de 3% de chaux.

La valeur d'exsudation du mélange sol-chaux-émulsion est de 14%

Les résultats obtenus sont les suivants :

teneur en eau du sol	Dosage en émulsion b%		2	4	6	8
5%	Densité sèche H.F.	ds	1,70	1,70	1,70	1,70
	Absorption H.F.	w' %	7,6	0,7	0,7	0,7
	Gonflement	g' %	1,5	3,0	1,5	2,3
	Stabilité H.F. (kg)					
	A (séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C.		510	570	610	680
	B (séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C		450	580	630	720
	C (séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C		220	210	230	280
D (séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C		265	430	560	650	
7%	Densité sèche H.F.	ds	1,67	1,70	1,71	-
	Absorption H.F.	w' %	6,5	1,0	1,2	-
	Gonflement H.F.	g %	2,3	2,7	1,9	-
	Stabilité H.F (kg)					
	A (séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C		490	560	570	-
	B (séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C		430	550	580	-
	C (séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C		230	250	220	-
D (séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C		320	480	600	-	

Stabilisation à l'émulsion acide.

Pour obtenir une bonne dispersion de l'émulsion avant rupture, il s'est avéré nécessaire d'opérer le malaxage du sol et de l'émulsion en présence d'un excès d'eau.

Un séchage est nécessaire avant compactage.

Les résultats obtenus sont les suivants :

	teneur en eau	w%	8,4	7,2	6,7	6,9
	dosage en bitume	b%	2	4	6	8
	Densité sèche H.F	ds	1,66	1,66	1,64	1,66
	Absorption H.F	w'%	1,1	0,5	4,6	2,1
	Gonflement H.F	g %	1,9	1,9	1,5	1,5
	Stabilité H.F (kg)					
A	(séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C		150	170	200	170
B	(séchage complet à 60°C stabilité à 18°C		200	250	190 ⁺	310
C	(séchage complet à 60°C stabilité à 60°C		40	50	50	60
D	(séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C		160	190	240	360

+ Séchage insuffisant

Comparaison des résultats obtenus avec les divers liants hydrocarbonés.

Une première série de constatations peut être faite sur l'influence du séchage, de la température et de l'imbibition.

- a) Le séchage à 60°C est plus favorable que celui effectué à 18°C dans le cas du cut-back 50/100. Les résultats sont par contre les mêmes dans le cas des émulsions.
- b) La stabilité diminue fortement lorsque la température passe de 18°C à 60°C et ceci, quel que soit le type de liant adopté.

Cette chute brutale des caractéristiques mécaniques est l'inconvénient majeur rencontré dans la stabilisation du sable de dune au moyen de liants hydrocarbonés.

Il y a lieu toutefois de signaler que l'addition de chaux à l'émulsion basique a donné une nette amélioration des résistances Hubbard Field.

Pour comparer les liants entre eux, on a représenté sur les figures 10 à 13, les stabilités Hubbard Field par type d'essai.

ESSAI A. (fig.10) Eprouvettes essayées à 18°C après 7 jours de séchage à 18°C.

La stabilisation au cut-back donne des résultats très médiocres. L'émulsion acide confère au sable des stabilités plus élevées, mais cependant insuffisantes.

Dans le cas de l'émulsion basique, sans addition de chaux, la stabilité présente un maximum particulièrement marqué lorsque le taux d'humidité du sol est de 3%. Ce maximum correspond à un dosage en émulsion de 6%.

L'addition de 3% de chaux provoque un accroissement de la stabilité notamment pour les faibles dosages en liant.

ESSAI B. (fig.11) Eprouvettes essayées à 18°C après séchage complet à 60°C.

Le cut-back 50/100 et l'émulsion acide donnent des stabilités insuffisantes bien qu'elles soient améliorées par le séchage à 60°C.

Dans le cas de l'émulsion basique avec ou sans chaux, les résultats sont très voisins de ceux qui ont été enregistrés à l'essai A.

ESSAI C. (fig.12) Eprouvettes essayées à 60°C. après séchage complet à 60°C.

Seule la stabilisation au Colsol avec addition de 3% de chaux donne des stabilités supérieures à 200 kg.

Les essais effectués avec 1 et 2% de chaux pour 6% de Colsol avaient accusé des stabilités respectivement égales à 125 et 180 kg.

Il y a donc amélioration de la stabilité lorsque le dosage en chaux croît.

ESSAI D (fig.13) Eprouvettes essayées à 18°C après séchage à 60°C. puis immersion à 18°C.

L'essai C ne laisse subsister comme méthode de stabilisation valable pour le sable que celle qui consiste à traiter le sol au moyen de l'émulsion basique avec une addition de chaux.

Après imbibition, la stabilité de ce mélange reste très bonne et croît régulièrement lorsque le dosage en émulsion passe de 2 à 6%.

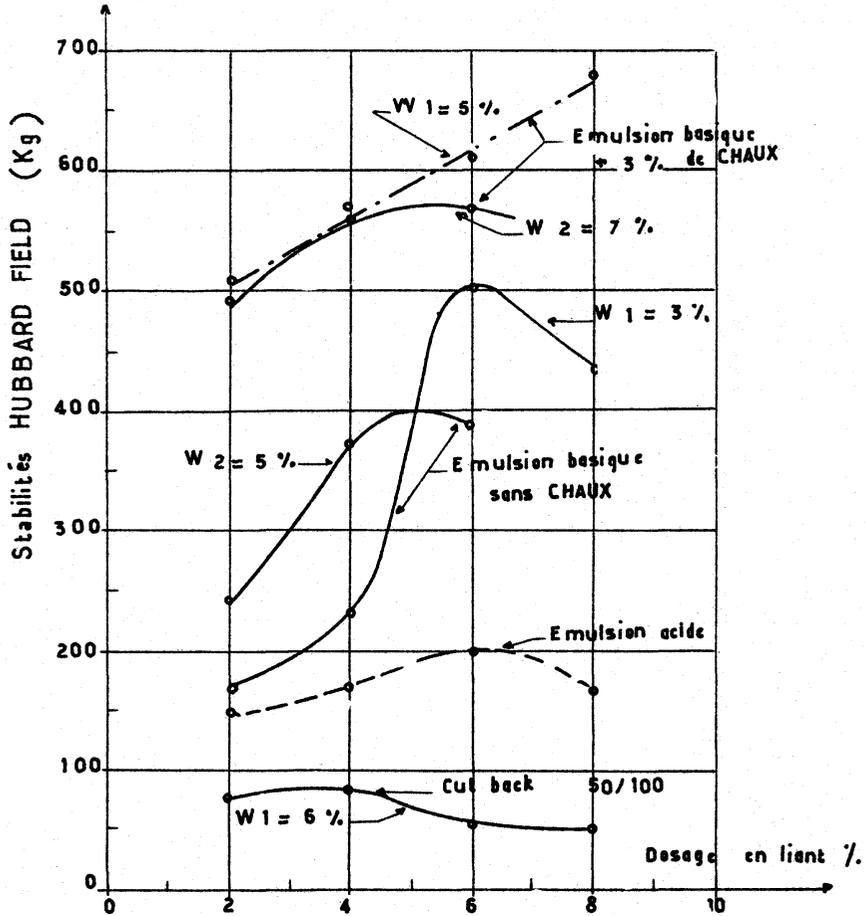
Pour un taux d'humidité du sol de 7% et un dosage en émulsion de 4%, la stabilité obtenue après immersion est égale à 480 kg.

L'absorption d'eau et le gonflement ne constituent pas, dans le cas du sable, des critères importants pour le choix du mode de stabilisation.

Cependant, pour les essais au Colsol, avec addition de chaux, on observe, lorsque le dosage en liant passe de 2% à 4%, une diminution très sensible du pourcentage d'eau absorbée. Parallèlement, la stabilité augmente de 150 kg environ. Il y aura donc intérêt à ne pas descendre au-dessous d'un dosage minimal de 4% d'émulsion.

SABLE ESSAIS Type A

STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ADDITIONNE DE
DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES

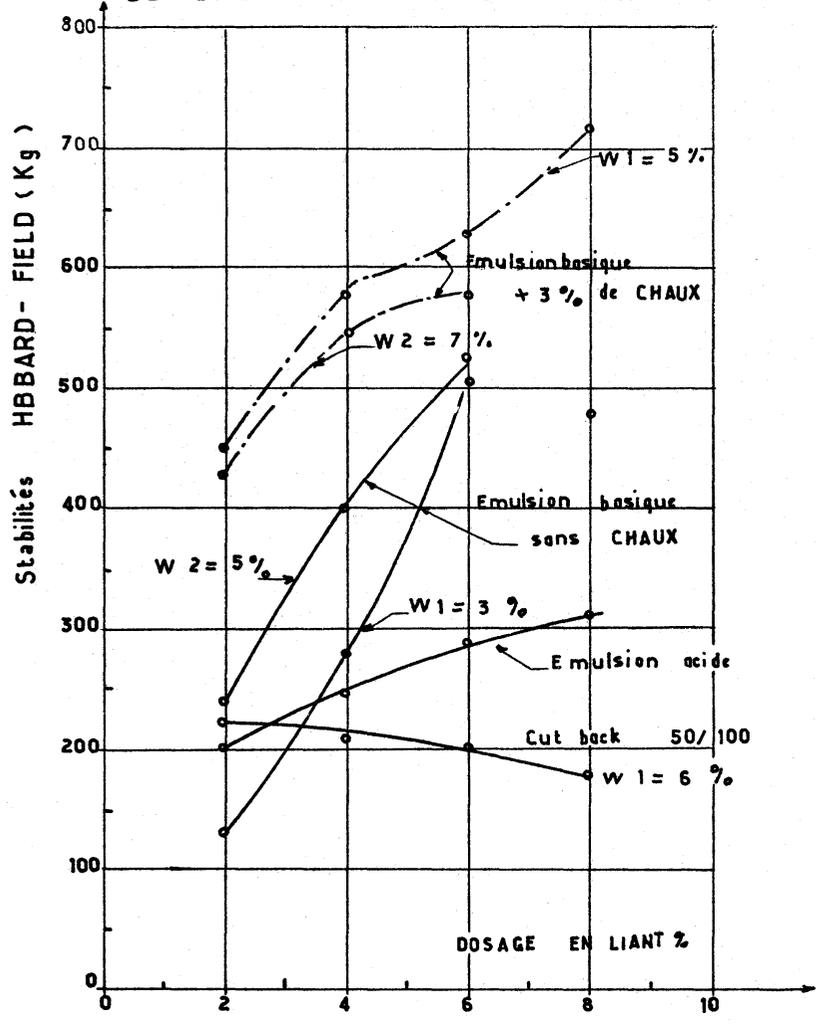


Stabilités HUBBARD - Field à 18° après séchage
à l'air pendant 7 jours

A.1.2-Fig10

SABLE ESSAIS Type B

STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ADDITIONNE
DE DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES

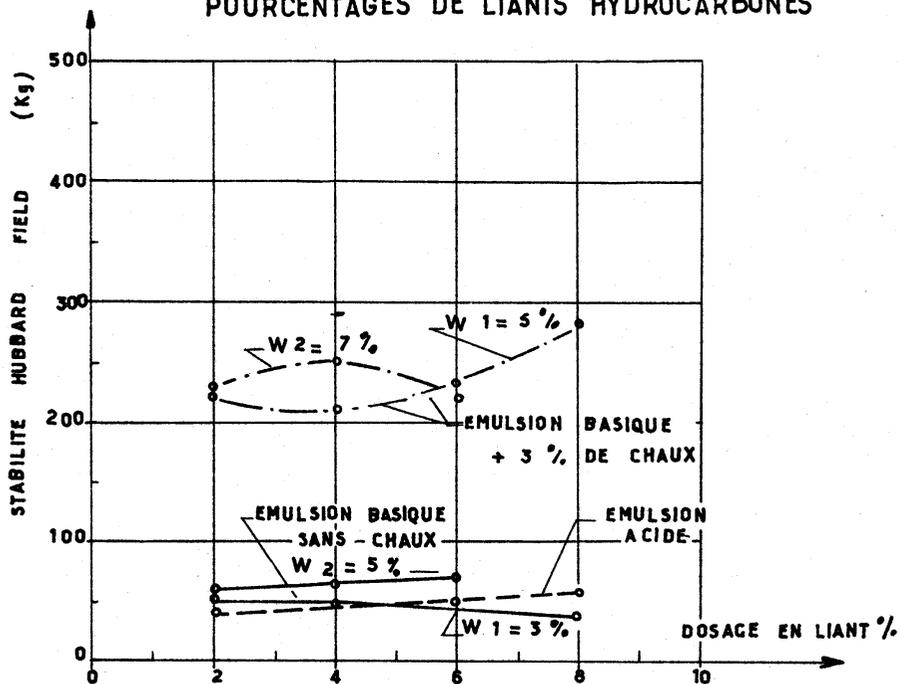


Stabilités HUBBARD-FIELD à 18° c
après séchage à 60° c

A_1.2_Fig11

SABLE ESSAIS Type C

STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ADDITIONNE DE
POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES



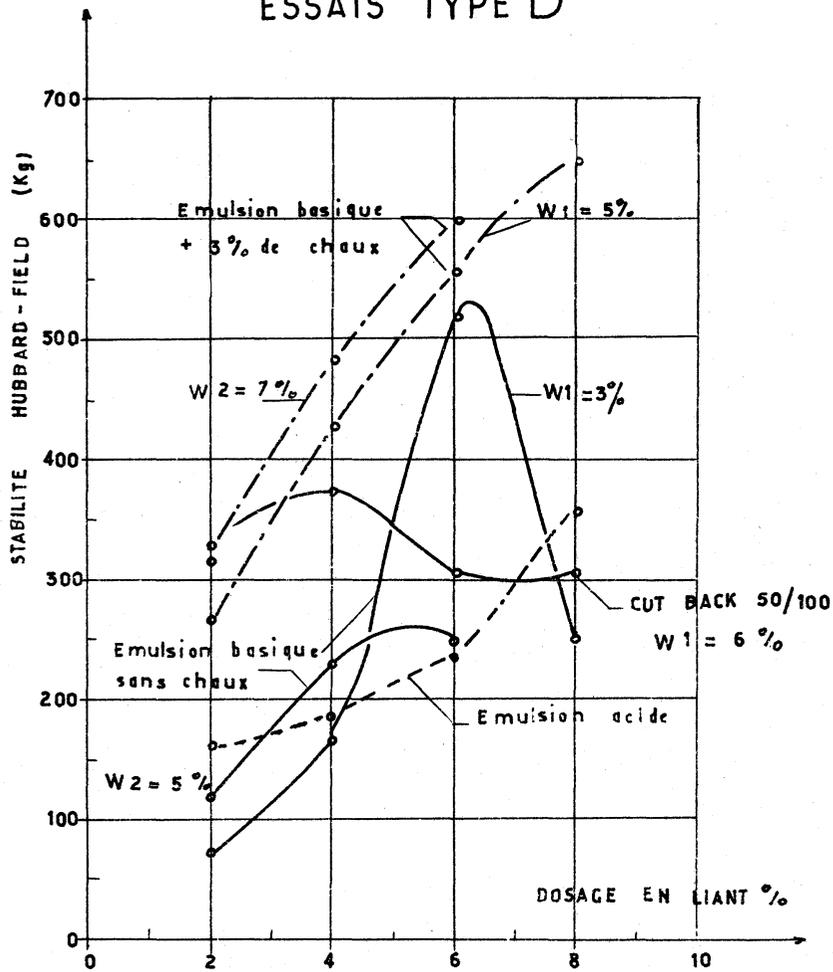
STABILITES HUBBARD - FIELD A 80° c
APRES SECHAGE A 60° c

A -1.a - Fig12

SABLE

STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

ESSAIS TYPE D



STABILITES HUBBARD - FIELD A 18°C
 APRES 7 JOURS D'IMBIBITION 18°C

J.P. LAMOUR

A -1-2 Fig 13

1.2.2 - SABLE ARGILEUX

1- DESCRIPTION DU MATERIAU

Courbe granulométrique

Le sable argileux étudié est composé d'un mélange de 75% de sable de dune et de 25% d'argile.

La courbe granulométrique correspondante est représentée sur la figure n°14.

Le pourcentage d'éléments passant au tamis n°40 (0,42mm) est de 95%

Le pourcentage passant au tamis n°200 (0,07mm) est de 23%.

Limites d'Atterberg. Classification routière.

Limite de liquidité : LL = 22%

Limite de plasticité: LP = 17%

Indice de plasticité: IP = 5%.

On peut classer le matériau dans le groupe A - 2 - 4

Cette catégorie de sol est caractérisée par une faible plasticité due à l'apport de sable moyen et fin qui amaigrit considérablement l'argile.

Poids spécifique

Au pycnomètre sous vide, on obtient un poids spécifique de 2,70 T/M³.

2 - STABILISATION MECANIQUE

Essais de compactage Proctor.

Les résultats des essais de compactage sont nettement influencés par le mode de préparation de l'argile.

Pour le sable mélangé à de l'argile finement broyée, avec malaxage poussé et diffusion pendant 24 heures de l'eau d'humidification, nous trouvons les caractéristiques Proctor suivantes :

Densité sèche maximale Proctor Modifié , 2.01 T/M³

Teneur en eau optimale 10,4%

Pour le sable mélangé à de l'argile broyée à la main, les caractéristiques sont les suivantes :

Densité sèche maximale Proctor Modifié 1,91 T/M³

Teneur en eau optimale 13%

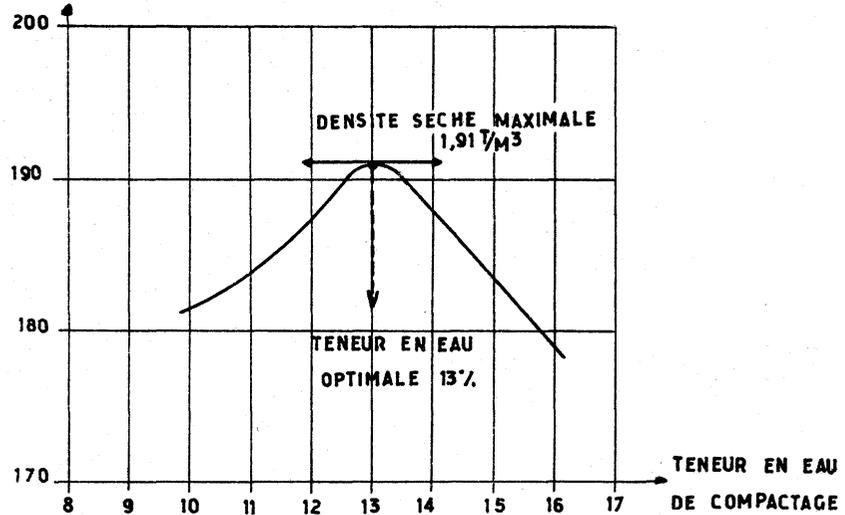
On voit nettement que le broyage poussé permet à l'argile de se loger plus facilement entre les grains de sable, ce qui augmente en conséquence la densité du mélange.

JP. LAMOUR

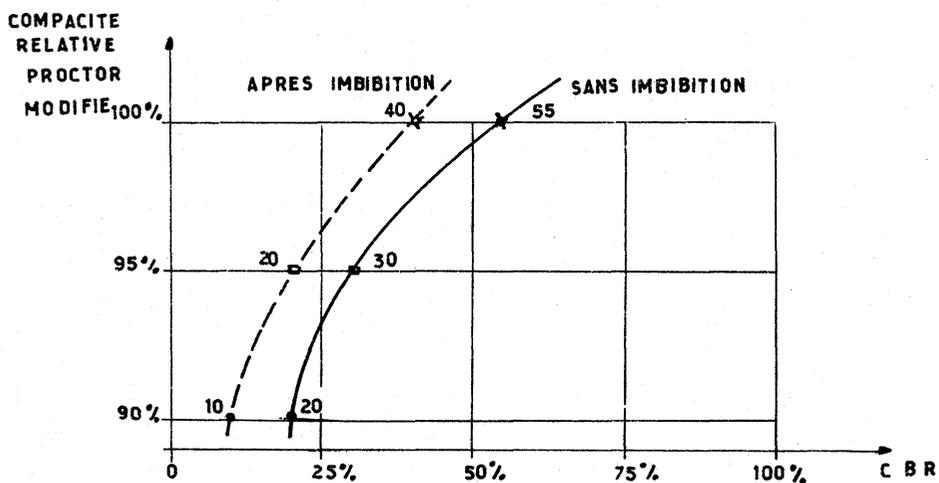
SABLE ARGILEUX

DENSITE SECHE
EN T/M^3

ESSAI PROCTOR MODIFIE



INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR L'INDICE
C B R DU SABLE ARGILEUX



A - 1.2 - Fig 15

Essais de portance C.B.R.

Les valeurs obtenues pour les indices portants C.B.R. sont les suivantes :

Echantillons préparés avec l'argile finement broyée (mécaniquement)

Compactage	CBR non imbibés.	CBR imbibés.
100% PM	125	76
95% PM	68	43
90% PM	38	18

Echantillons préparés avec l'argile broyée manuellement

Compactage	CBR non imbibés.	CBR imbibés.
100% PM	55	40
95% PM	30	20
90% PM	20	10

Les gonflements observés après imbibition sont très faibles ou pratiquement nuls et pourtant, l'immersion provoque une chute de portance qui, en valeur relative, est particulièrement importante pour les faibles compacités.

On remarquera également que les C.B.R. avec l'argile finement broyée sont nettement plus élevées en raison des densités plus élevées qui sont atteintes dans ce cas sur le mélange du sable avec l'argile.

Essais triaxiaux

Des essais triaxiaux lents avec drainage sur le sable argileux obtenu par mélange du sable avec l'argile finement broyée, ont donné les résultats suivants :

Compactage	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	cohésion en kg/cm ²	ψ en degrés	cohésion en kg/cm ²	ψ en degrés
100% PM	1	39	1	38
95% PM	0,8	36	0,5	34
90% PM	0,5	36	0,5	29

Des essais rapides sur le même mélange mais avec de l'argile broyée manuellement ont donné :

Compactage	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	Cohésion en Kg/cm ²	φ' degrés	Cohésion en Kg/cm ²	φ' degrés
100% PM	0,61	32	0,45	33
95% PM	0,5	33	0,28	33

On remarquera que l'angle de frottement interne conserve toujours une valeur assez élevée, mais la cohésion baisse sensiblement en cas d'imbibition ou de faible compactage.

3 - STABILISATION A LA CHAUX

Limites d'Atterberg - Plasticité.

La limite de plasticité devient difficilement mesurable, on ne peut plus donner de chiffres valables. L'indice est donc certainement inférieur à 5.

Essais de compactage Proctor Modifié.

La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale varient peu lorsque le pourcentage de chaux ajouté au sable argileux augmente. Nous avons en effet relevé les chiffres suivants :

% de chaux	Densité sèche maximale en T/M ³	Teneur en eau optimale
0	1,91	13%
2,5%	1,91 ⁵	13%
5%	1,93	12,75%
7,5%	1,91 ⁵	12,5%

Essais de portance C.B.R.

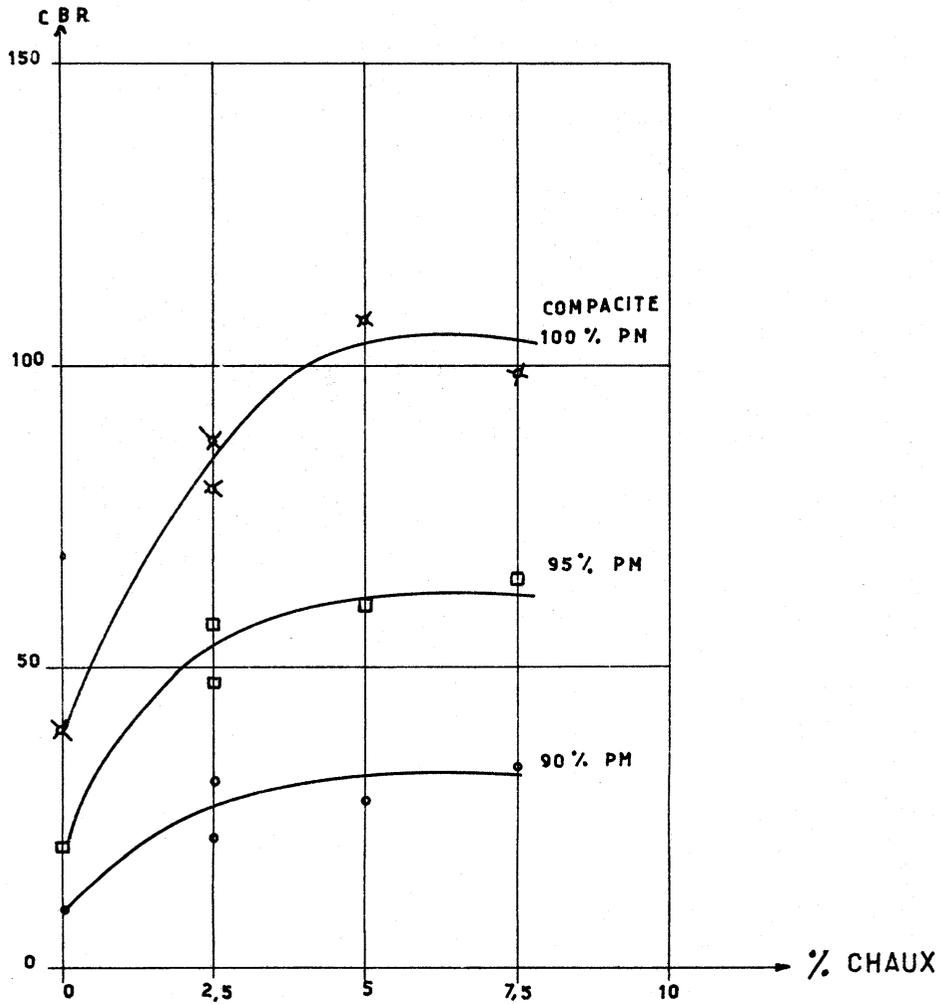
Les résultats des essais C.B.R. sur échantillons imbibés ont été reportés sur la figure 16.

On voit que l'augmentation de portance est très nette pour les pourcentages de chaux inférieurs à 5%. Pour cette dernière valeur, le C.B.R. a pratiquement triplé, dépassant les 100% dans les meilleures conditions de compactage.

Pour des additions de chaux dépassant 5%, on ne constate pratiquement plus de gain supplémentaire de portance.

SABLE - ARGILEUX

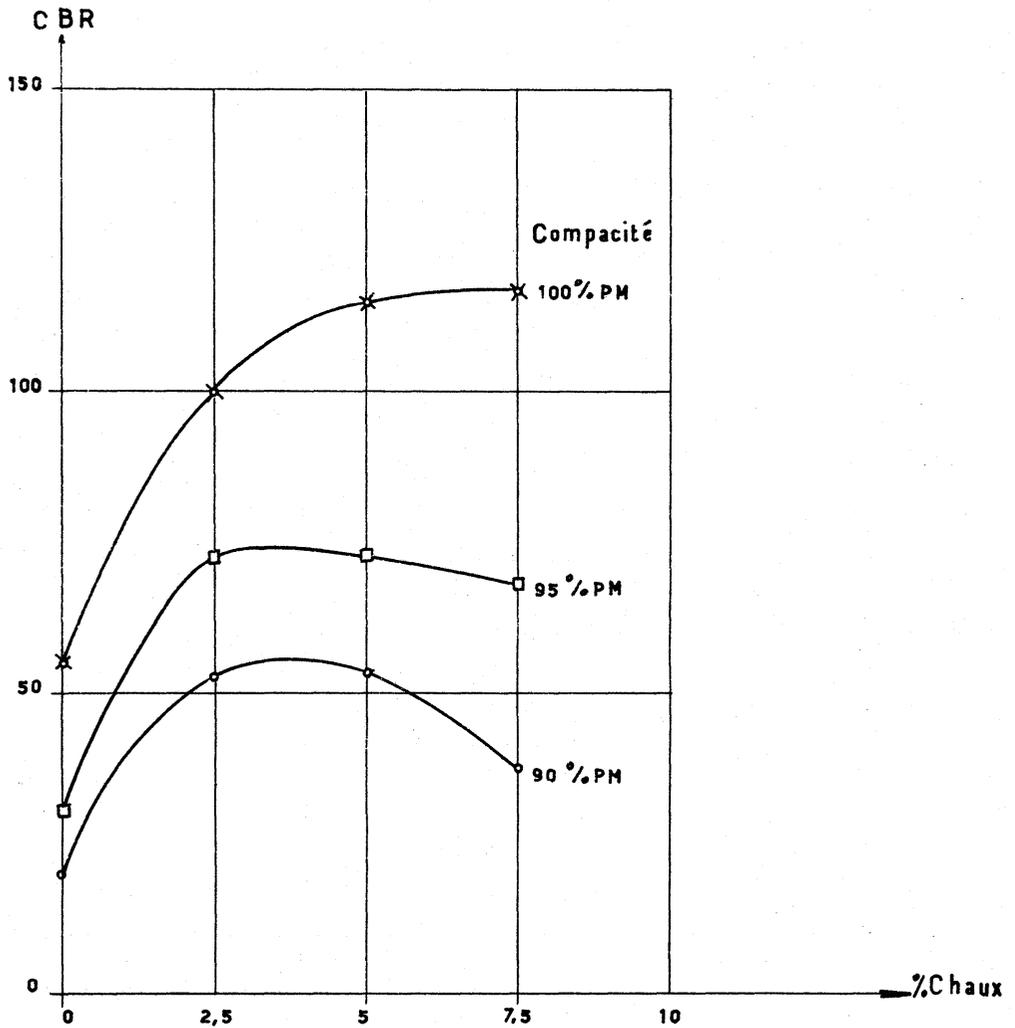
INFLUENCE SUR L'INDICE CBR APRES IMBIBITION
DE L'ADDITION D'UN POURCENTAGE VARIABLE DE CHAUX



SABLE ARGILEUX

INFLUENCE DE L'ADDITION D'UN POURCENTAGE
VARIABLE DE CHAUX SUR L'INDICE CBR DU
SOL NON IMBIBE

J.P. LAMOUR



Les résultats des essais C.B.R. sur éprouvettes non imbibées sont légèrement supérieurs aux précédents. L'effet néfaste habituel de l'eau de saturation sur les sols a en effet été en partie compensé par une amélioration de la prise de la chaux. Ce dernier phénomène a été mis en évidence sur des moulages supplémentaires avec 2,5% de chaux qui sont restés en imbibition pendant 23 jours.

Les indices C.B.R. obtenus sont les suivants :

Compacité relative P.M	Eprouvettes avec 2,5% de chaux	
	C.B.R. après 4 jours d'imbibition	C.B.R. après 23 jours d'imbibition
100%	85%	120%
95%	55%	70%
90%	25%	40%

Essais triaxiaux rapides

Les résultats obtenus ont été reportés sur la figure n°18 pour les cohésions et sur la figure n°19 pour l'angle de frottement interne apparent.

Dans l'ensemble, on constate une amélioration des cohésions qui doublent ou triplent même entre 0 et 5% de chaux. Au delà de 5%, l'addition de chaux supplémentaire n'amène plus aucun gain de cohésion.

L'angle de frottement interne du matériau reste pratiquement constant au voisinage de 32° quelle que soit la teneur en chaux des mélanges étudiés.

Les résistances à la compression simple (Fig.20) varient évidemment dans ces conditions comme les cohésions. On constatera toutefois qu'elles restent assez faibles; avec 5% de chaux, on obtient 2 à 3 kg/cm² pour les compactages moyens, 5 à 6 kg/cm² pour les meilleurs compactages.

Essais oedométriques.

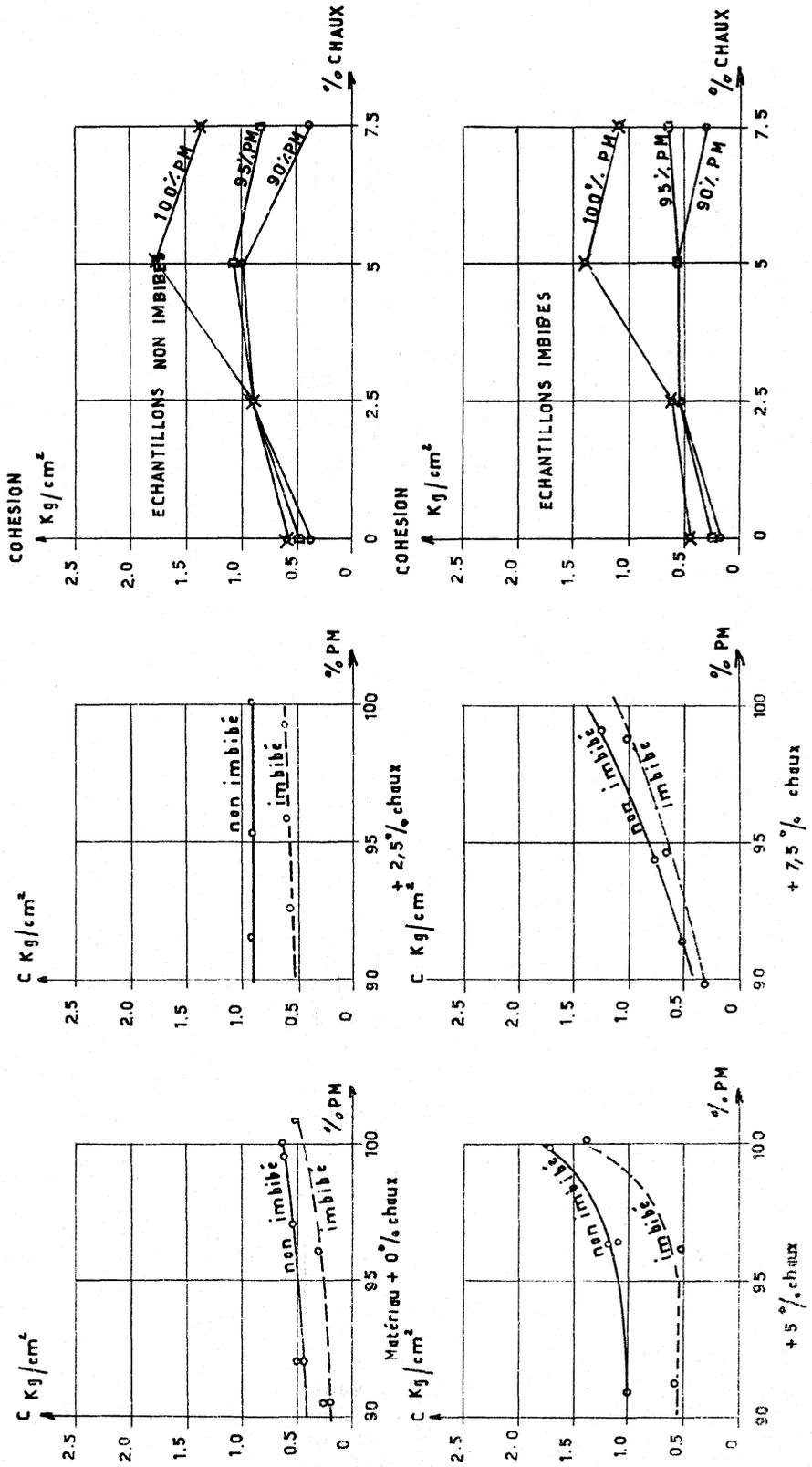
Les coefficients de compressibilité obtenus pour les divers amendements à la chaux ont été reportés dans le tableau ci-dessous :

% chaux	0	2,5%	5%	7,5%
Coefficient de compressibilité C_c	180	160	208	240

On constate que les variations sont faibles. La compressibilité diminue légèrement pour des dosages assez élevés en chaux. De son côté, le coefficient de perméabilité K diminue lorsque le pourcentage de chaux augmente. Il passe en effet d'une valeur de $2 \cdot 10^{-5}$ cm/s sur le matériau non amendé à un minimum de $1,5 \times 10^{-6}$ cm/s.

SABLE ARGILEUX

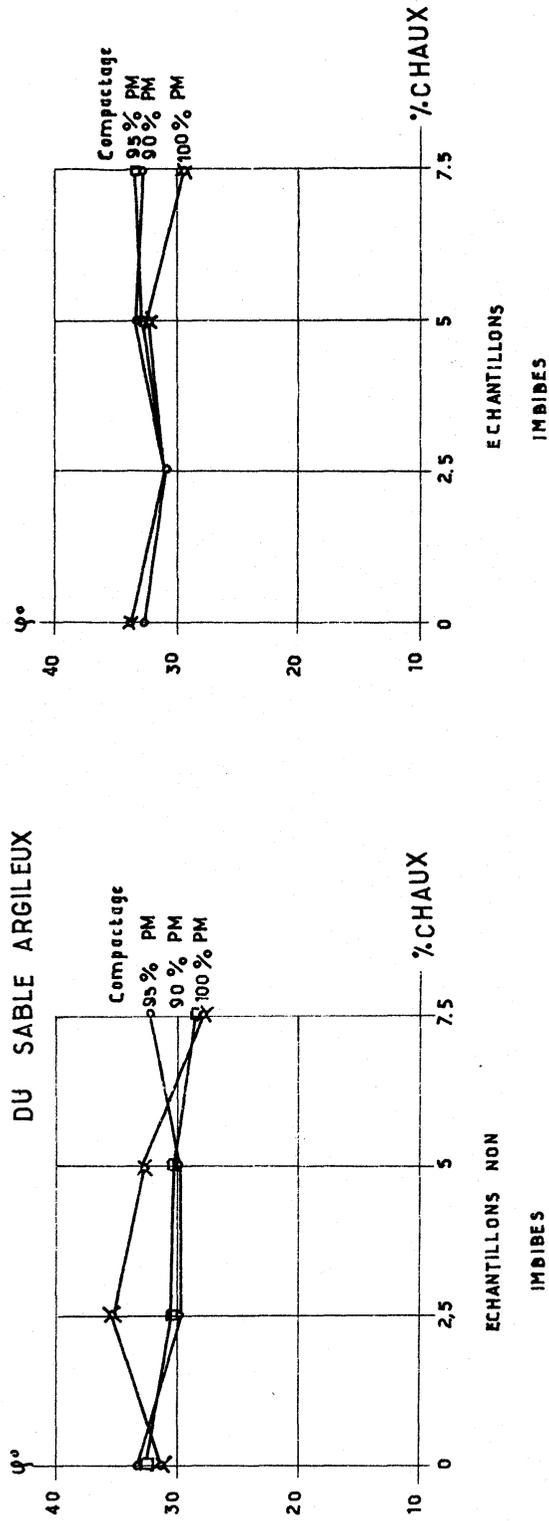
VARIATION DE LA COHESION AVEC LE COMPACTAGE ET L'AMENDEMENT A LA CHAUX



SABLE ARGILEUX

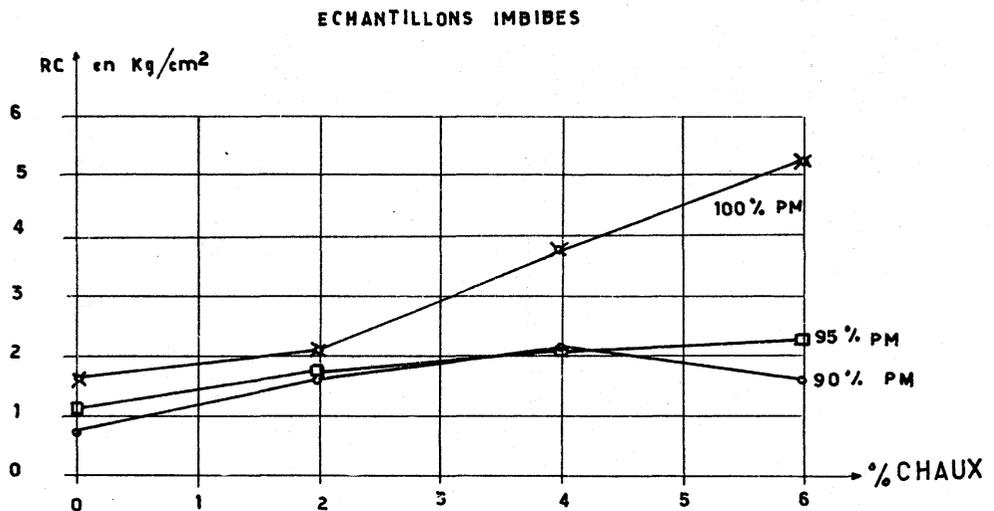
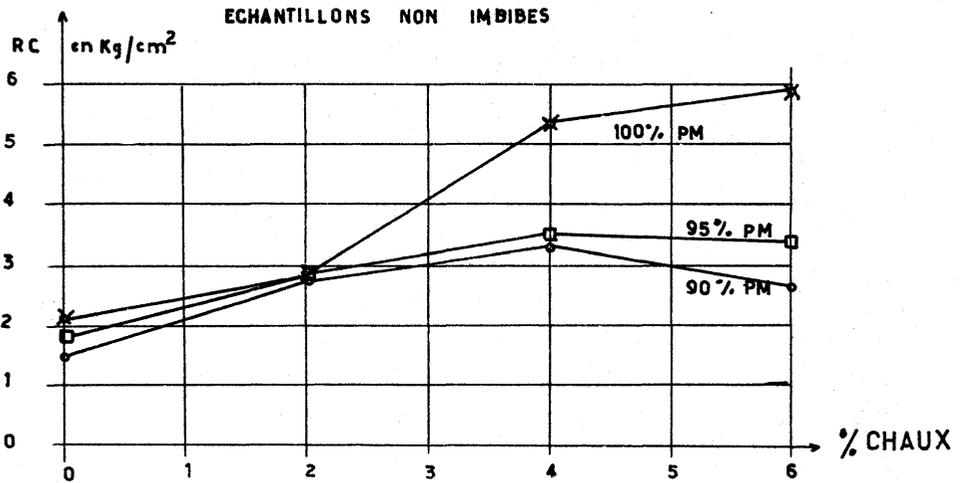
INFLUENCE DE L'ADDITION D'UN POURCENTAGE

VARIABLE DE CHAUX SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE
DU SABLE ARGILEUX



SABLE ARGILEUX

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION DE
L'AMENDEMENT EN CHAUX ET DU COMPACTAGE



A -1-2. Fig 20

4 - STABILISATION AU CIMENT

Limites d'Atterberg.

L'indice de plasticité qui était de 5% sur le sable argileux diminue après addition de ciment et ne devient plus mesurable.

Compactage Proctor Modifié.

Les caractéristiques Proctor varient peu comme on le constate dans le tableau ci-dessous :

% de ciment	Densité sèche maximale en T/M3	Teneur en eau optimale
0	1,91	13%
1,5	1,94	12,5%
3	1,95	12%
5	1,92	12%

Essais de portance C.B.R.

Les résultats des essais C.B.R. sont reportés sur les figures 21 et 22.

On constate une augmentation très sensible de l'indice portant C.B.R. dès que le pourcentage de ciment dépasse 1,5%.

Pour un compactage moyen (95% P/M) le C.B.R. de 100% est dépassé avec 2% de ciment si le moulage n'est pas imbibé et avec 2,5% de ciment si le sol est imbibé.

Pour les dosages élevés, les essais après imbibition effectués à 7 jours d'âge donnent des C.B.R. plus favorables que les essais sans imbibition, effectués à 3 jours, donc avec une prise moins complète du ciment.

Essais triaxiaux rapides.

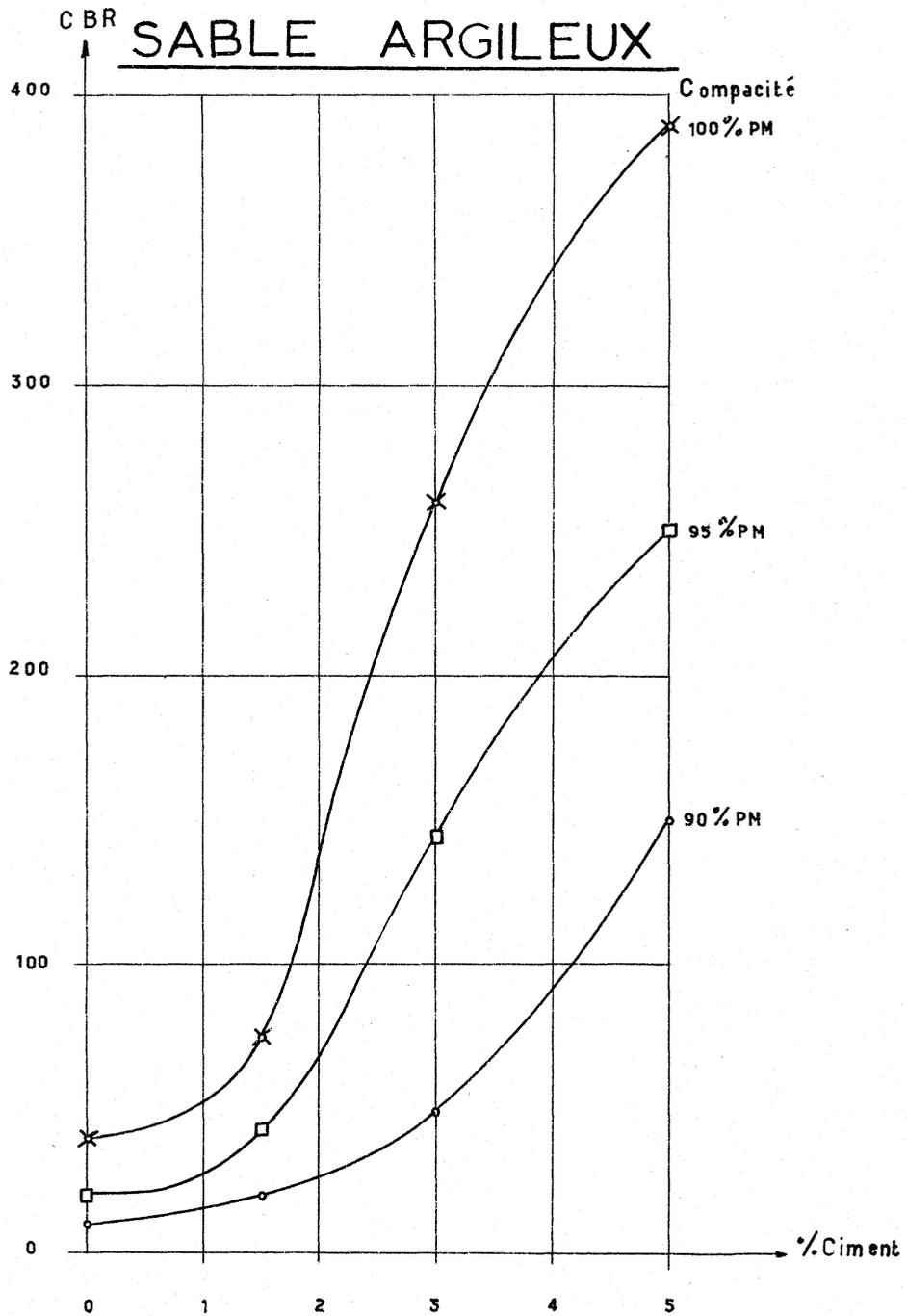
Les valeurs des cohésions et des angles de frottement ont été reportées sur les figures 23, 24 et 25.

Comme dans le cas des amendements à la chaux, on constate une stabilité relative de l'angle de frottement interne aux environs de 30 à 32°.

Les résistances à la compression simples comme les cohésions augmentent régulièrement avec le pourcentage de ciment mais l'imbibition a une influence très néfaste.

C'est ainsi que pour le sable argileux additionné de 5% de ciment, la résistance à la compression simple tombe après imbibition :

de 10 à 7 kg/cm² aux fortes compacités (100% PM)
et de 7 à 2 kg/cm² aux compacités moyennes (90-95%PM)

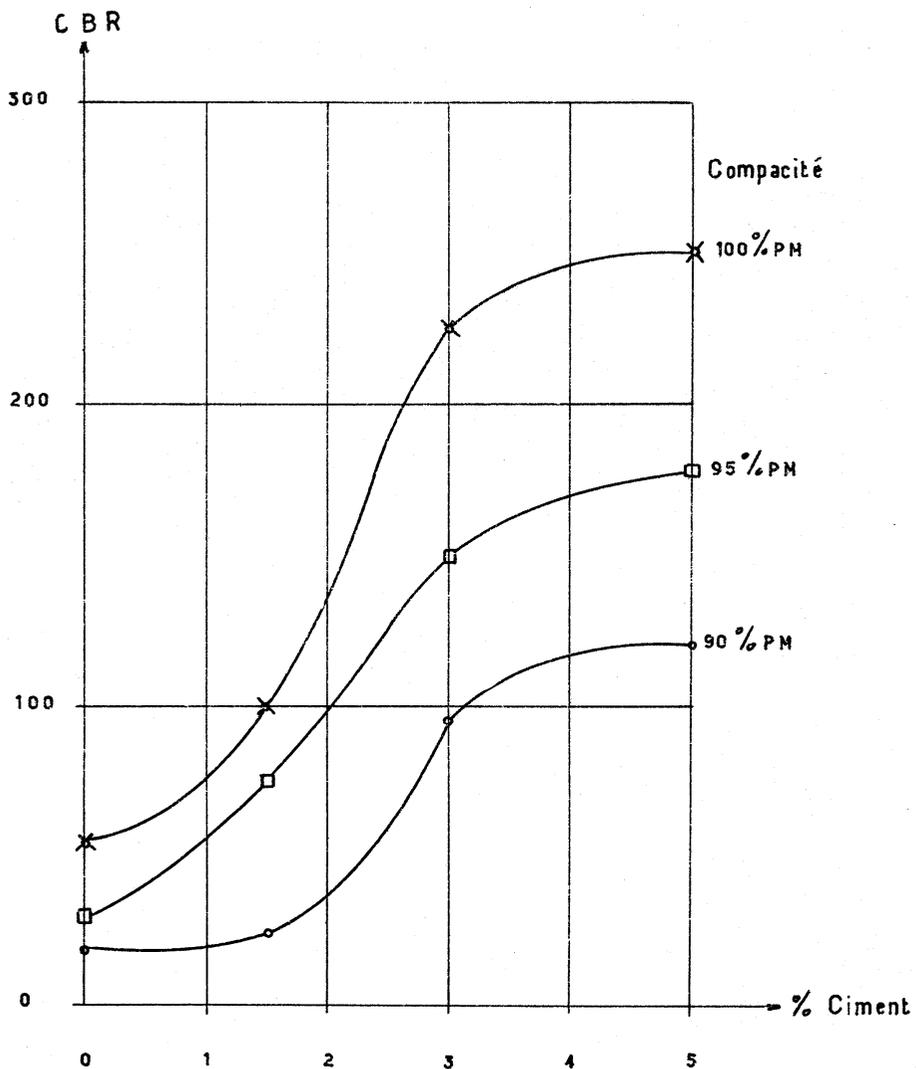


INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT
SUR L'INDICE CBR DU SOL IMBIBE

A.1.2 Fig 21

SABLE ARGILEUX

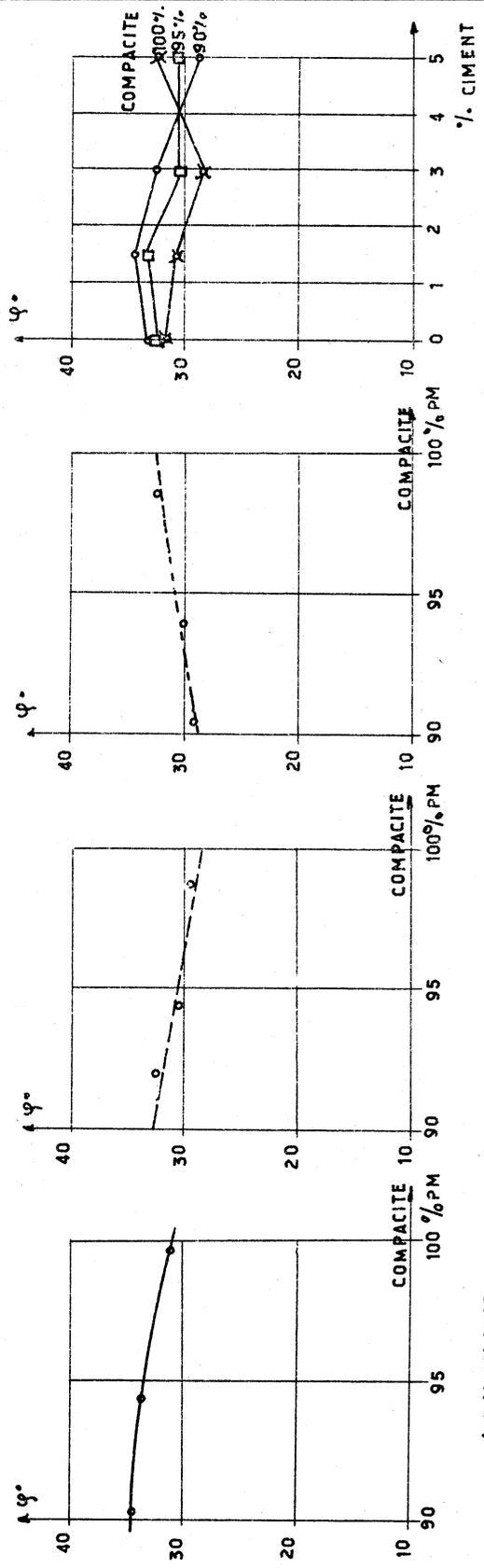
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR
L'INDICE C B R DU SOL NON IMBIBE



SABLE ARGILEUX

STABILISE AU CIMENT

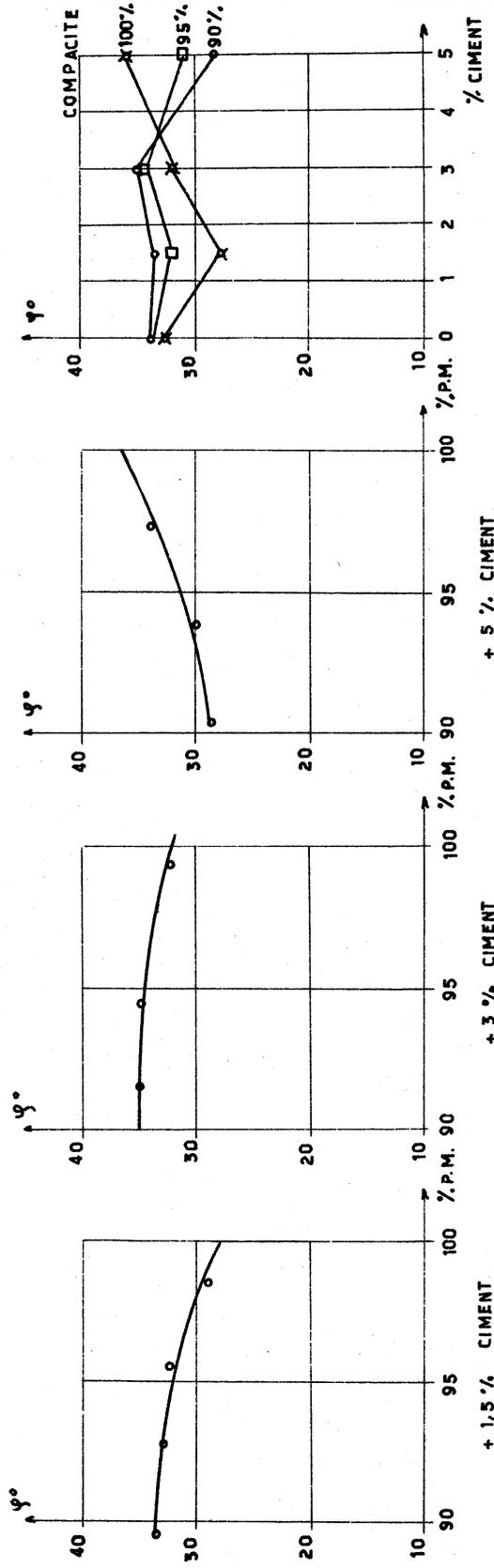
VARIATION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT APPARENT EPROUVETTES SANS IMBIBITION



A .1-2. Fig 23

SABLE ARGILEUX STABILISE AU CIMENT

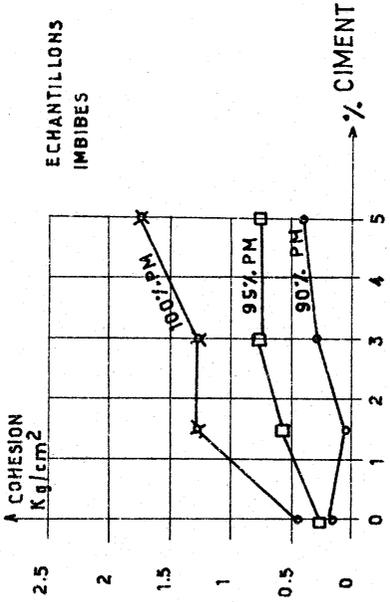
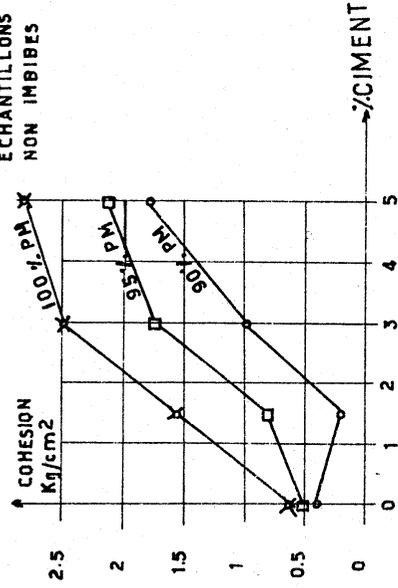
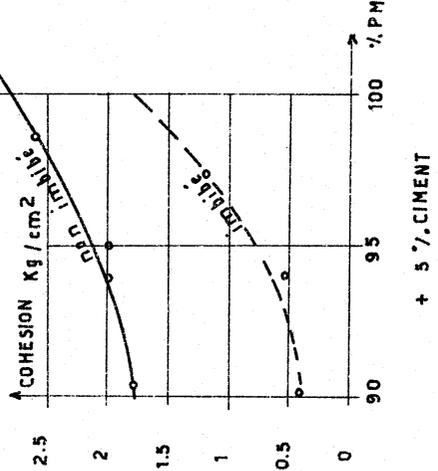
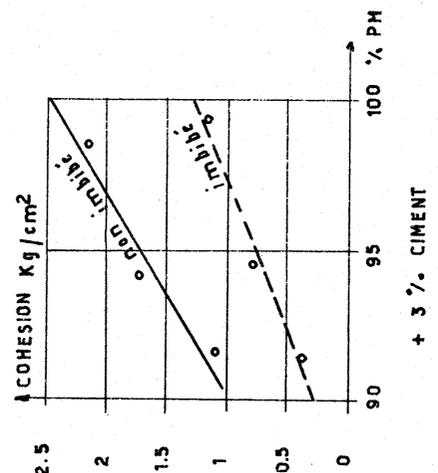
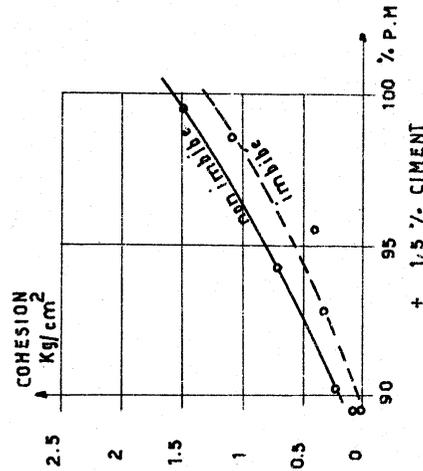
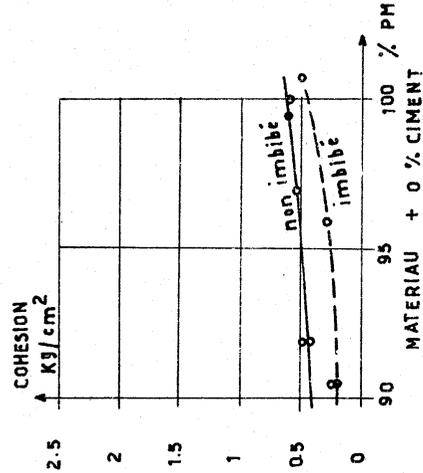
VARIATION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT APPARENT
EPROUVETTES AVEC IMBIBITION



SABLE - ARGILEUX

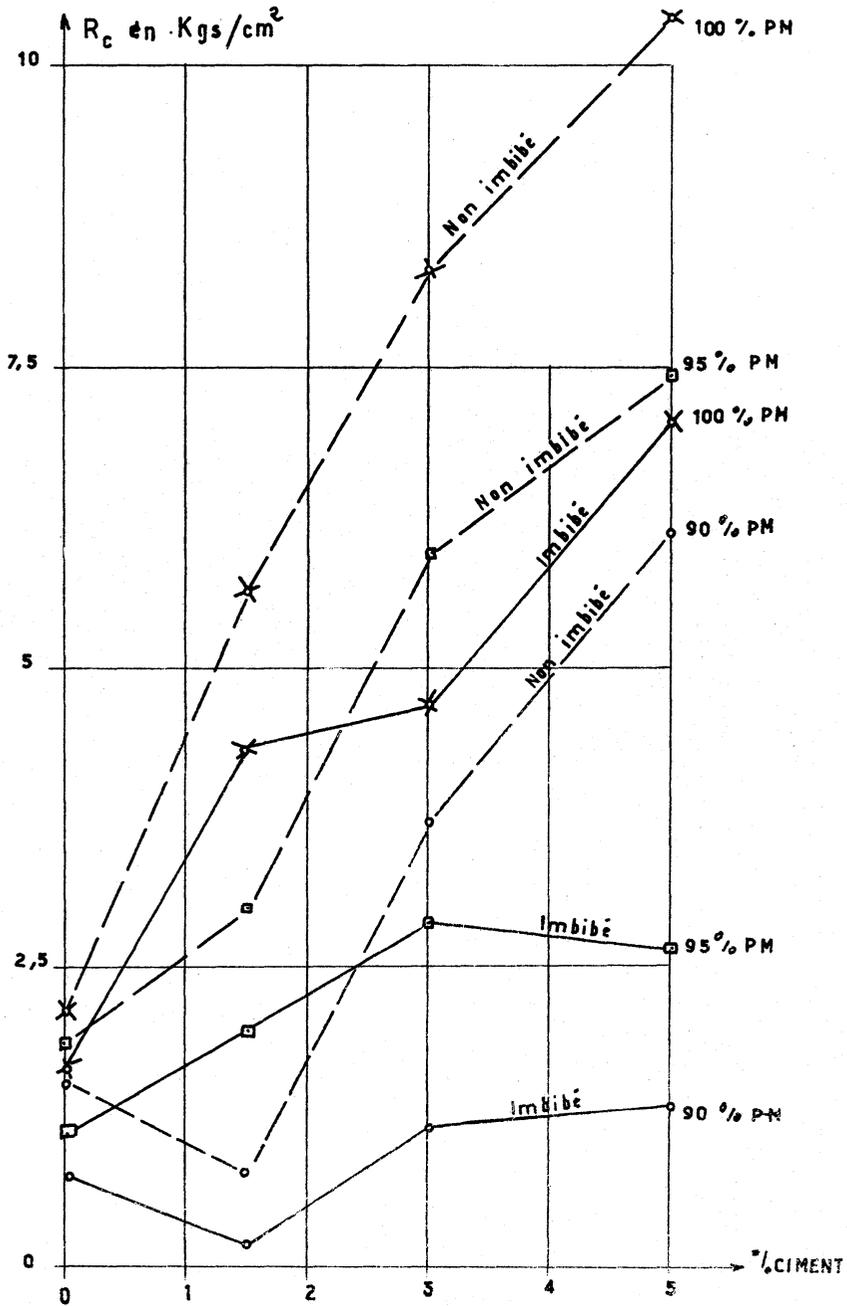
STABILISE AU CIMENT

VARIATION DE LA COHESION AVEC LE COMPACTAGE ET L'AMENDEMENT AU CIMENT



SABLE ARGILEUX

VARIATION DE LA
RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION DU
POURCENTAGE D'ADDITION DE CIMENT ET DU COMPACTAGE



A - 1.2 Fig 26

Essais Oedométriques.

Le coefficient de compressibilité G_c reste stable aux environs de 200 aussi longtemps que le pourcentage de ciment ne dépasse pas 3%. Ensuite, il augmente très vite atteignant 500 pour 5% de ciment.

5 - STABILISATION DU SABLE ARGILEUX AVEC LES LIANTS HYDROCARBONES.

Liants utilisés et essais effectués.

Quatre types de liants ont été utilisés pour l'étude de la stabilisation du sable argileux.

- un cut-back 10/15 préparé à partir d'un bitume 180/200.
- un liant bitumineux SHELL, appelé EK.2 qui est un cut-back dopé et émulsifié, miscible à l'eau.
- une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100 (COLSOL)
- une émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisé (TEXACO).

Les essais effectués en laboratoire sont des essais Hubbard Field . Quatre modes de conservation ont été prévus :

ESSAI A : Conservation des éprouvettes à 18°C pendant 7 jours, puis mesure de la stabilité à cette même température.

ESSAI B : Sèchage des éprouvettes à poids constant à 60°C, puis conservation pendant 24 heures à 18°C et mesure de la stabilité à 18°C.

ESSAI C : Sèchage des éprouvettes à 60°C jusqu'à poids constant, puis mesure de la stabilité à cette même température.

ESSAI D : Sèchage des éprouvettes à 60°C, immersion des éprouvettes sur la moitié de leur hauteur dans de l'eau potable à 18°C pendant 7 jours, puis essai dès la sortie de l'eau.

Stabilisation au cut-back 10/15.

Ce liant bitumineux s'est avéré utilisable après chauffage entre 60 et 70°.

Le malaxage s'effectue sans difficulté et la dispersion du liant est très satisfaisante. Le sol bitume est compacté immédiatement, sans séchage préalable.

La valeur d'exsudation du mélange est égale à 15%.

Les résultats obtenus aux essais sont les suivants :

Teneur en eau du sol W	Dosage en cut-back b%		2%	4%	6%	8%	
5%	Densité sèche	T/m ³	1,89	1,89	1,89	1,90	
	Absorption	w%	(1)	5,9	1,8	1,4	
	Gonflement	g%	(1)	15,0	7,0	5,0	
	Stabilité H.F. (kg)						
	A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)		960	1240	1250	870	
	B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)		1150	1380	1505	1330	
	C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)		1180	1450	1550	1340	
	D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)		0	185	750	870	
	7%	Densité sèche	T/m ³	1,89	1,90	1,90	1,84
		Absorption	w%	14,0	6,7	1,9	1,5
Gonflement		g%	17,0	10,0	3,0	2,0	
Stabilité H.F. (kg)							
A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)			1160	1360	1250	900	
B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)			1300	1415	1410	1225	
C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)			1465	1715	1665	1190	
D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)			80	245	810	770	
(1) éprouvette détériorée : gonflement très important							

Stabilisation au moyen du cut-back dopé et émulsifié EK2

Le processus d'essai est le même que pour le cut-back 10/15 non dopé à cette différence qu'il est inutile de chauffer le liant EK.2

La valeur d'exsudation du mélange est :

$$(w + b) = 13\%$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau du sol W	Dosage en liant EK.2	2%	4%	6%	8%
5%	Densité sèche en T/M3	1,88	1,92	1,94	1,95
	Absorption w'%	(1)	17,2	6,5	2,7
	Gonflement g%	(1)	6,5	3,0	1,0
	Stabilité H.F. (kg)				
	A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)	1275	1580	1700	1850
	B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)	1950	2450	2650	2675
	C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)	2070	2380	2410	2000
D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)	0	215	590	915	
7%	Densité sèche en T/M3	1,90	1,95	1,96	
	Absorption w'%	(1)	13,3	8,1	
	Gonflement g%	(1)	4,5	1,0	
	Stabilité H.F. (kg)				
	A (séchage partiel à 18°C stabilité à 18°C)	1445	1775	1900	
	B (séchage complet à 60°C stabilité à 18°C)	2100	2600	2890	
	C (séchage complet à 60°C stabilité à 60°C)	2220	2500	2560	
D (séchage complet à 60°C stabilité après immersion à 18°C)	0	360	580		

(1) Eprouvettes détériorées: gonflement important

Stabilisation au moyen d'une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100.

Pour obtenir une dispersion satisfaisante du liant, il est nécessaire de mouiller abondamment le sol, ou d'étendre l'émulsion.

Dans ces conditions, il est évidemment nécessaire de laisser sécher le mélange avant compactage de telle sorte que le dosage eau + émulsion soit aussi voisin que possible de l'optimum Proctor et en tous cas, inférieur à la valeur d'exsudation.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau w%		7,2	6,5	4,7	4,1
Teneur en émulsion b%		2,0	4,0	6,0	8,0
Densité sèche	en T/M3	1,92	1,95	1,94	1,94
Absorption	w%	(1)	16,5	19,0	14,0
Gonflement	g%	(1)	12,0	16,7	12,0
Stabilité H.F. (kg)					
A	(séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C	1430	1830	1980	2050
B	(séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C	1600	2000	2270	2620
C	(séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C	1370	1650	1840	1730
D	(séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C.	0	70	90	190
(1) Eprouvette détériorée : gonflement important					

Stabilisation au moyen d'une émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisé.

Comme pour l'émulsion basique, il s'est avéré nécessaire d'opérer le mélange sol-émulsion, en présence d'un excès d'eau, puis de laisser sécher le mélange avant compactage.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau w%		7,5	6,0	5,0	3,0
Teneur en émulsion b%		2,0	4,0	6,0	8,0
Densité sèche	en T/M3	1,98	1,98	1,97	1,95
Absorption	w%	14,7	15,3	12,3	13,3
Gonflement	g%	6,0	10,0	8,3	11,3
Stabilité H.F. (kg)					
A	(séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C	1970	2150	2350	2650
B	(séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C	2150	2410	2650	2980
C	(séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C	2130	2260	2410	2340
D	(séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C	200	190	250	240

Comparaison des Résultats.

Les résultats énumérés ci-dessus permettent une première série d'observations relatives à l'influence du séchage, de la température et de l'imbibition sur la stabilité Hubbard Field.

- a) Le séchage préalable à 60°C est plus favorable que le séchage à l'air pendant 7 jours. Les gains sont toutefois assez faibles sauf pour le cut-back dopé EK 2 pour lequel on enregistre des gains de stabilité qui vont de 700 à 1000 kg.
- b) L'augmentation de température, pour un même mode de séchage provoque une chute de stabilité lorsque le dosage en cut-back ou en EK 2 dépasse 6%.

Pour les émulsions, la chute de stabilité est systématique quel que soit le dosage.

Dans tous les cas, la stabilité à 60° C reste supérieure à 1.000 kg pour un dosage ne dépassant pas 8% (Essais B et C)

- c) L'imbibition provoque dans tous les cas une chute importante de stabilité et constitue en fait, le critère de stabilisation (Essais B et D.)

Les figures 27, 28, 29 et 30 permettent de comparer les liants entre eux.

ESSAI A (fig.27) (Stabilité à 18°C après 7 jours de séchage à l'air)

Le sol bitume réalisé avec le cut-back 10/15 accuse un maximum de stabilité pour un dosage voisin de 5%. Pour les trois autres produits, la stabilité continue à croître jusqu'au dosage de 8%.

C'est l'émulsion acide qui permet d'obtenir les stabilités les plus élevées (plus de 2.000 kg), puis vient l'émulsion basique, le liant EK 2 et enfin, le cut-back 10/15.

ESSAI B (fig.28) (Stabilité à 18°C après séchage complet à 60°C)

On peut formuler la même conclusion que ci-dessus en ce qui concerne l'influence des dosages sur la stabilité.

On note, en outre, que les stabilités obtenues avec le cut-back dopé EK 2 ont très nettement augmenté du fait du séchage à 60° C et rejoignent les stabilités du sol traité à l'émulsion acide.

Les stabilités du sol-bitume réalisé avec le cut-back ordinaire 10/15 demeurent les plus faibles.

ESSAI C (fig.29) (Stabilité à 60°C après séchage complet à 60°C)

L'essai à 60°C fait apparaître dans tous les cas, un maximum de stabilité.

Pour le cut-back 10/15 et le liant EK 2 ce maximum est obtenu pour 5% de liant.

Pour les émulsions, il se situe au voisinage de 6% de liant.

Les éprouvettes traitées à l'émulsion acide ou au cut-back dopé EK.2 ont des stabilités comprises entre 2000 et 2400 kg alors que celles traitées à l'émulsion basique et au cut-back 10/15 n'atteignent que des valeurs comprises entre 1200 et 1800 kg.

ESSAI D (fig.30) (Stabilité à 18°C après séchage, puis immersion).

L'échelle des stabilités sur la figure 30 est double de celle des précédentes afin de rendre le graphique plus lisible et plus précis.

Les stabilités après imbibition ne dépassent en effet jamais 1000 kg et sont pratiquement nulles pour le dosage de 2% de liant.

Le traitement au cut-back 10/15 ou au cut-back dopé EK.2 donnent des stabilités très voisines qui croissent rapidement lorsque le dosage passe de 2 à 6%.

Le sol traité à l'émulsion acide a une stabilité de 200 kg pour les dosages de 2 et 4% et de 250 kg pour les dosages de 6 à 8%. L'accroissement de dosage n'apporte donc pas d'amélioration sensible de la stabilité.

Pour compléter les résultats de l'essai D, il convient de faire état des pourcentages d'absorption d'eau et de gonflement volumétrique.

Ceux-ci sont représentés sur les figures 31 et 32.

Les courbes correspondant au cut-back 10/15 et EK.2 ont une allure très régulière et montrent que le dosage de 5% de liant est suffisant pour assurer une stabilisation du matériau.

Par contre, le gonflement et l'absorption des éprouvettes traitées avec les deux émulsions ne diminuent pas avec le dosage en liant et restent anormalement élevés avec des gonflements supérieurs à 10%

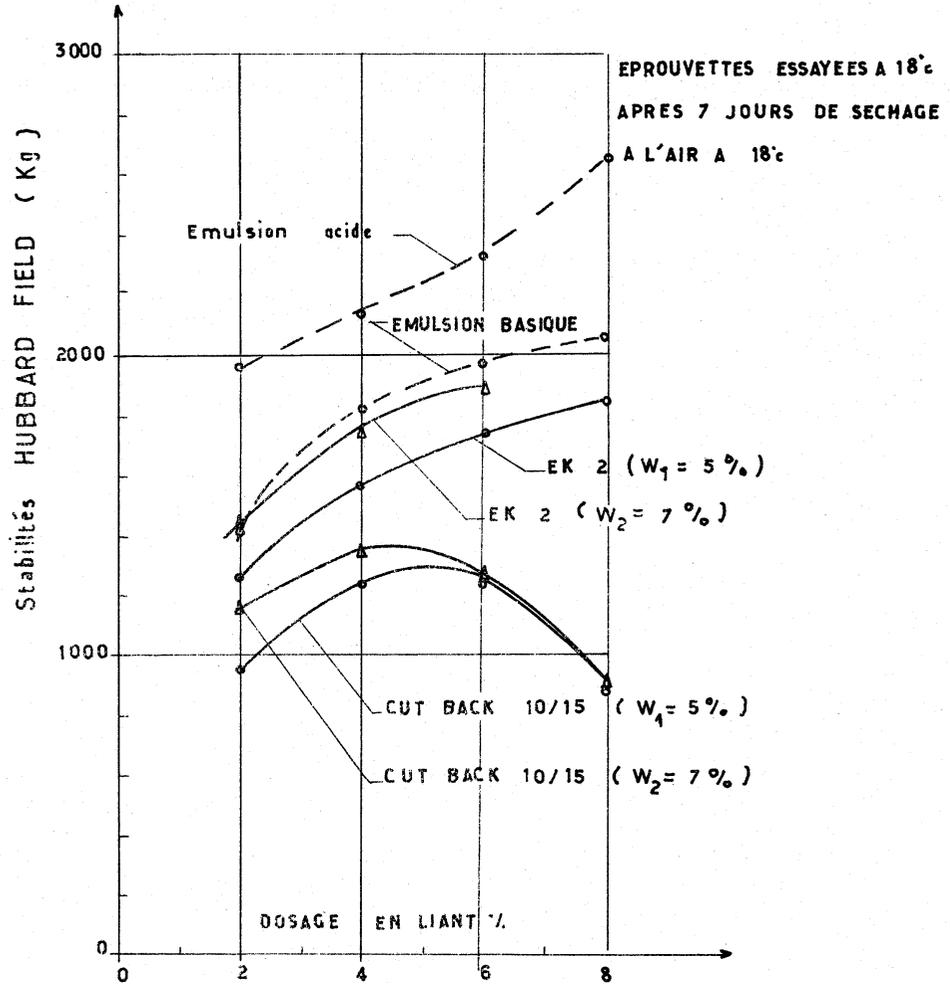
Pour les quatre dosages étudiés on a constaté que les éprouvettes étaient fissurées avant essai.

La stabilité Hubbard Field mesurée sur ces éprouvettes est, sans aucun doute, surestimée car l'essai lui-même provoque un recompactage du sol.

SABLE ARGILEUX ESSAIS Type A

STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ARGILEUX

ADDITIONNE DE DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES



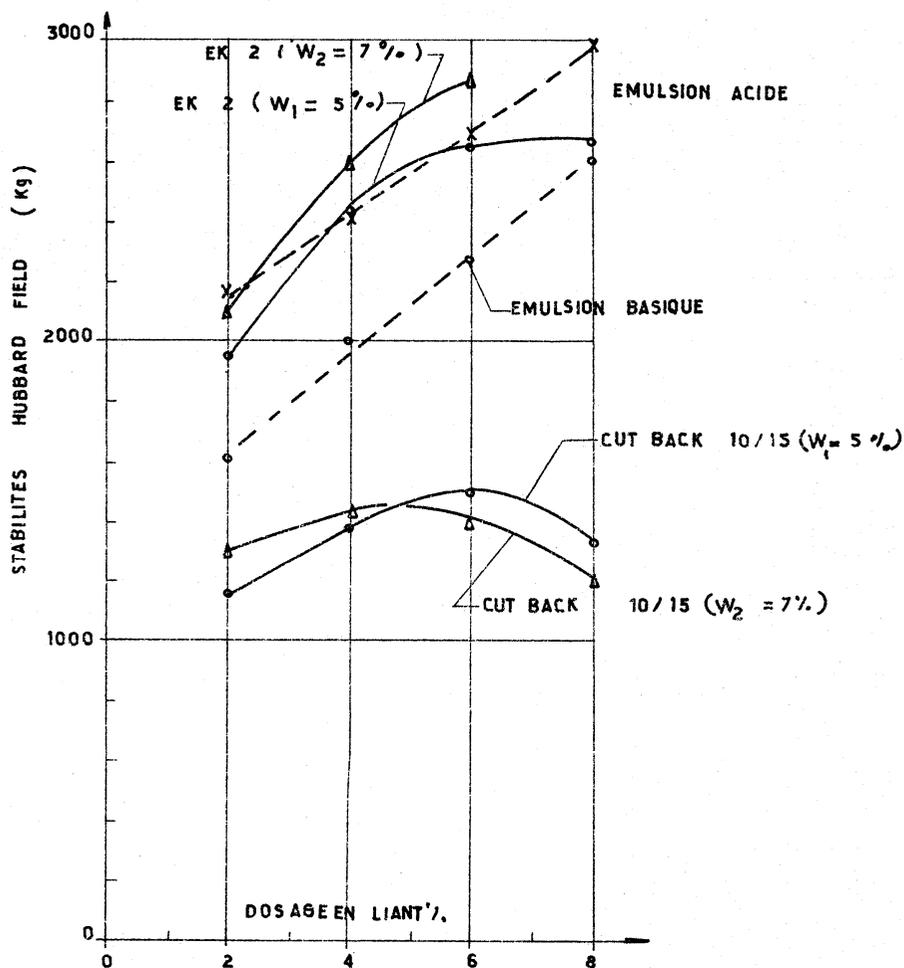
A -1- z Fig 27

SABLE ARGILEUX

ESSAIS Type B

STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ARGILEUX
 ADDITIONNE DE DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES

EPROUVETTES ESSAYEES A 18°C APRES SECHAGE COMPLET A 60°C



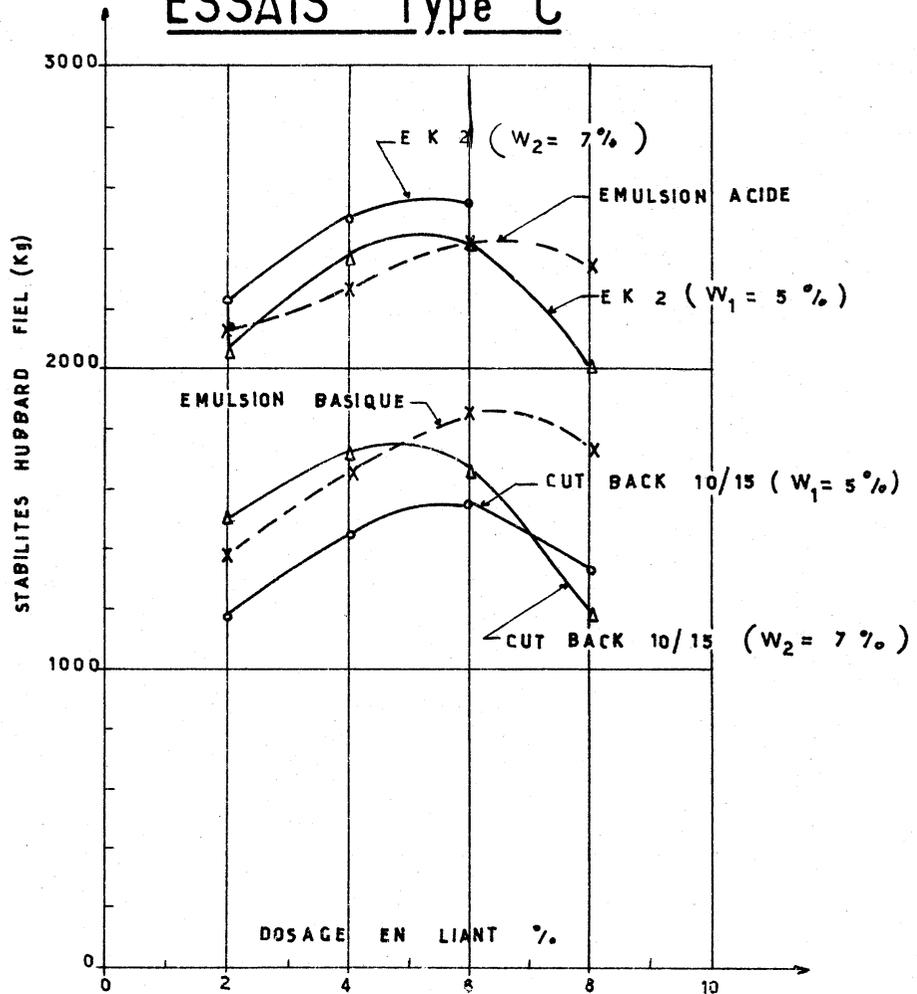
A-1.2- Fig 28

JR. LAMOUR

SABLE ARGILEUX

EPROUVETTES ESSAYEES A 60°c APRES
SECHAGE COMPLET A 60°c

ESSAIS Type C



STABILITES HUBBARD FIELD DU SABLE ARGILEUX

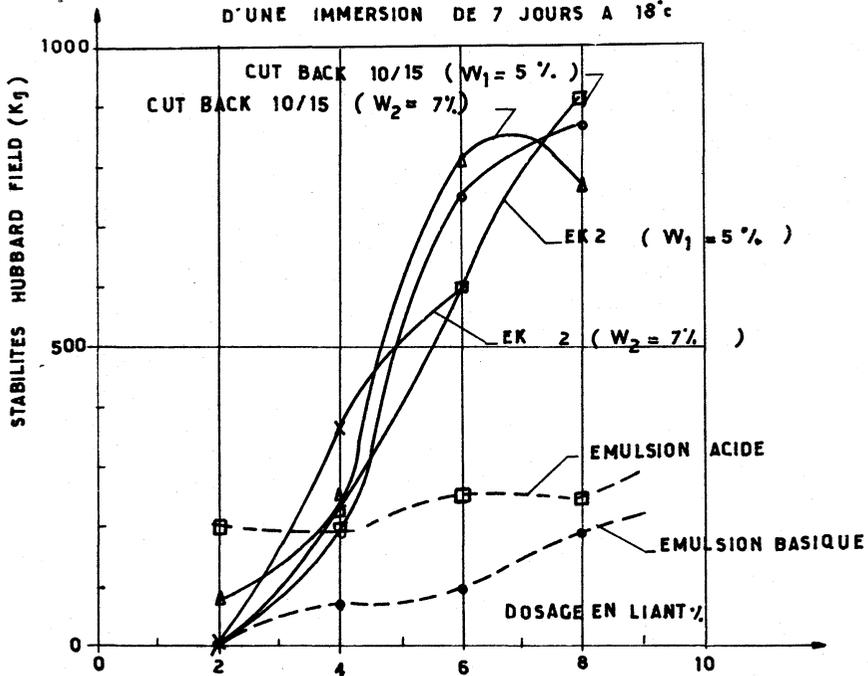
ADDITIONNE DE DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDRO-CARBONES

A_1-2 Fig 29

SABLE ARGILEUX ESSAIS Type D

STABILITE HUBBARD FIELD DU SABLE ARGILEUX
ADDITIONNE DE DIVERS POURCENTAGES DE LIANTS HYDROCARBONES

EPROUVETTES ESSAYEES A 18°c APRES SECHAGE COMPLET A 60°c SUIVI
D'UNE IMMERSION DE 7 JOURS A 18°c

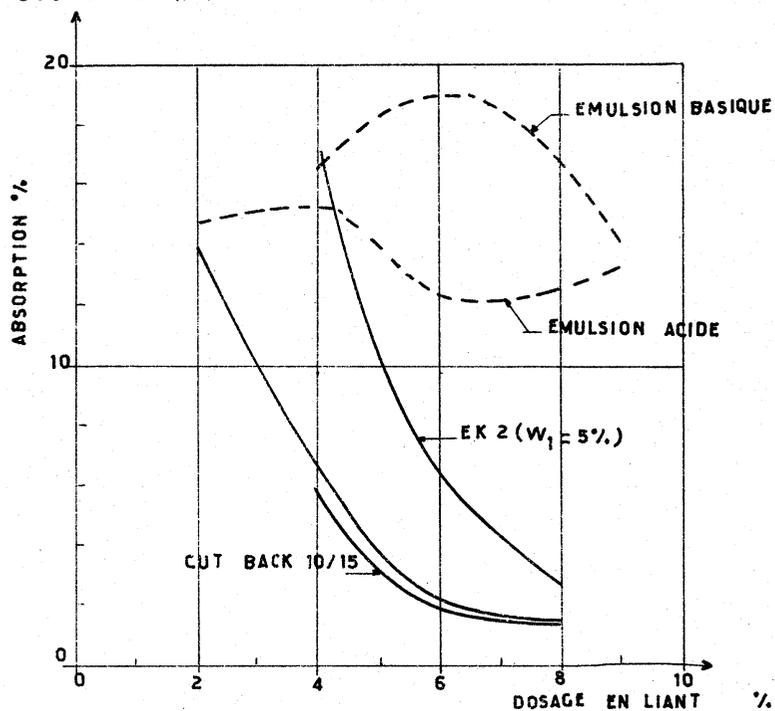


A.1.2-Fig 30

SABLE ARGILEUX

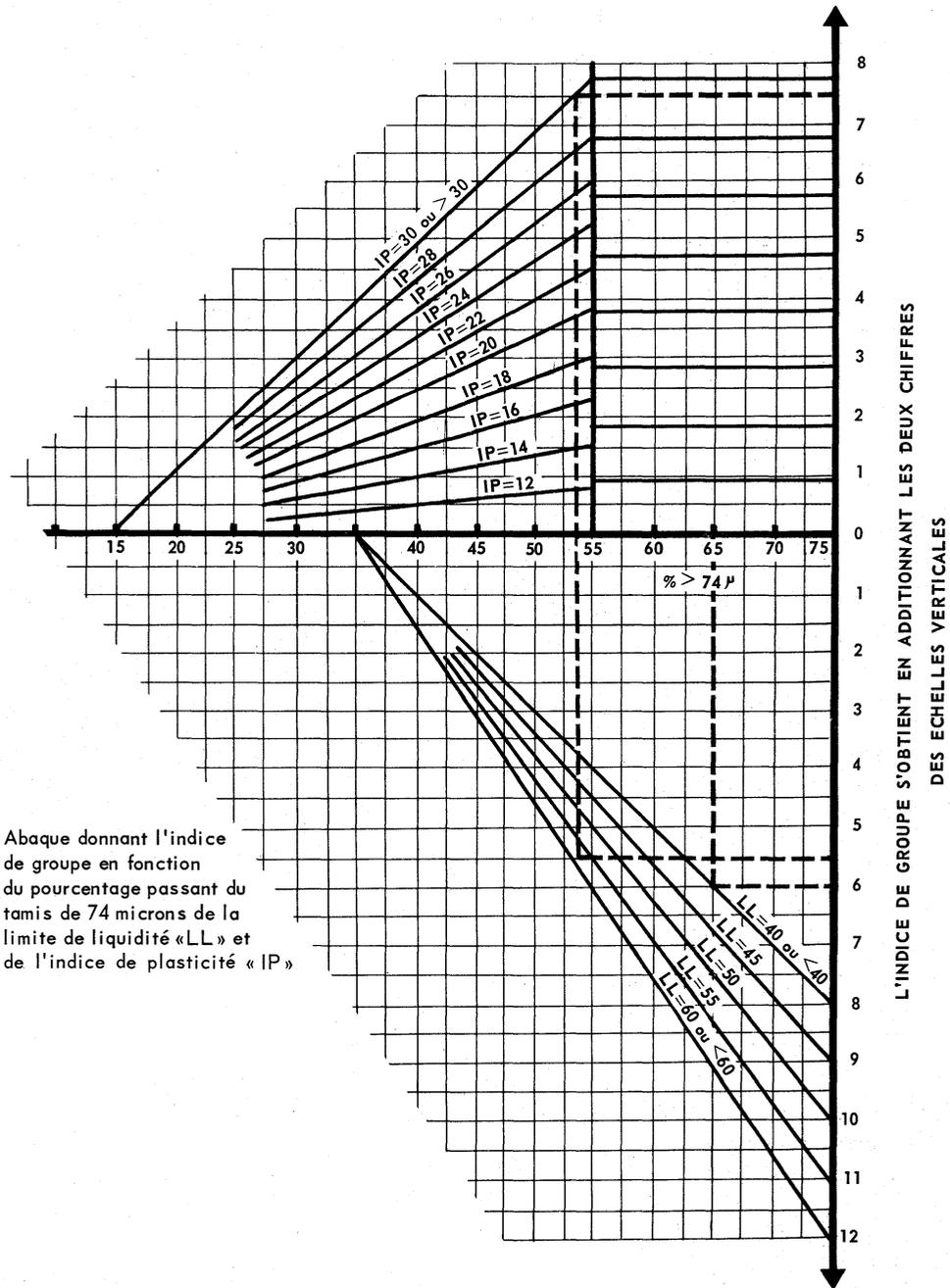
STABILISE AUX LIANTS HYDROCARBONES

VARIATION DU POURCENTAGE D'EAU ABSORBEE APRES
7 JOURS D'IMMERSION EN FONCTION DU DOSAGE EN LIANT



A-1-2-Fig 31

INDICE DE GROUPE



A-1-1 Fig. 2

1.2.3 - SABLE - ARGILE -

1 - DESCRIPTION DU MATERIAU

Courbe granulométrique

La courbe granulométrique du mélange de 50% de sable de dune de Dakar et de 50% d'argile latéritique d'Abidjan est reportée sur la figure 33. On remarquera qu'il y a en moyenne 90% d'éléments passant au tamis de 0,42 mm et 45% d'éléments passant au tamis de 0,074 mm.

Limites d'Atterberg

Limite de liquidité	LL = 34,5%
Limite de plasticité	LP = 21,3%
Indice de plasticité	IP = 13,2%

Classification routière H.R.B.

Le matériau appartient à la classe A.6

Poids spécifique

Le poids spécifique a été trouvé égal à 2,76 T/m³

2 - STABILISATION MECANIQUE

Essai de compactage Proctor Modifié

Comme nous l'avons déjà signalé, deux modes de préparation de l'argile et du mélange argile-sable ont été envisagés.

Le premier, avec broyage et malaxage mécanique très poussés, a pour but de réaliser un sol très homogène, voisin d'un sol naturel.

Le second avec broyage et malaxage manuel plus sommaires, se rapproche d'un mélange réalisé avec des engins de chantier.

La courbe Proctor Modifié correspondant à ce dernier mélange est reportée sur la figure 34.

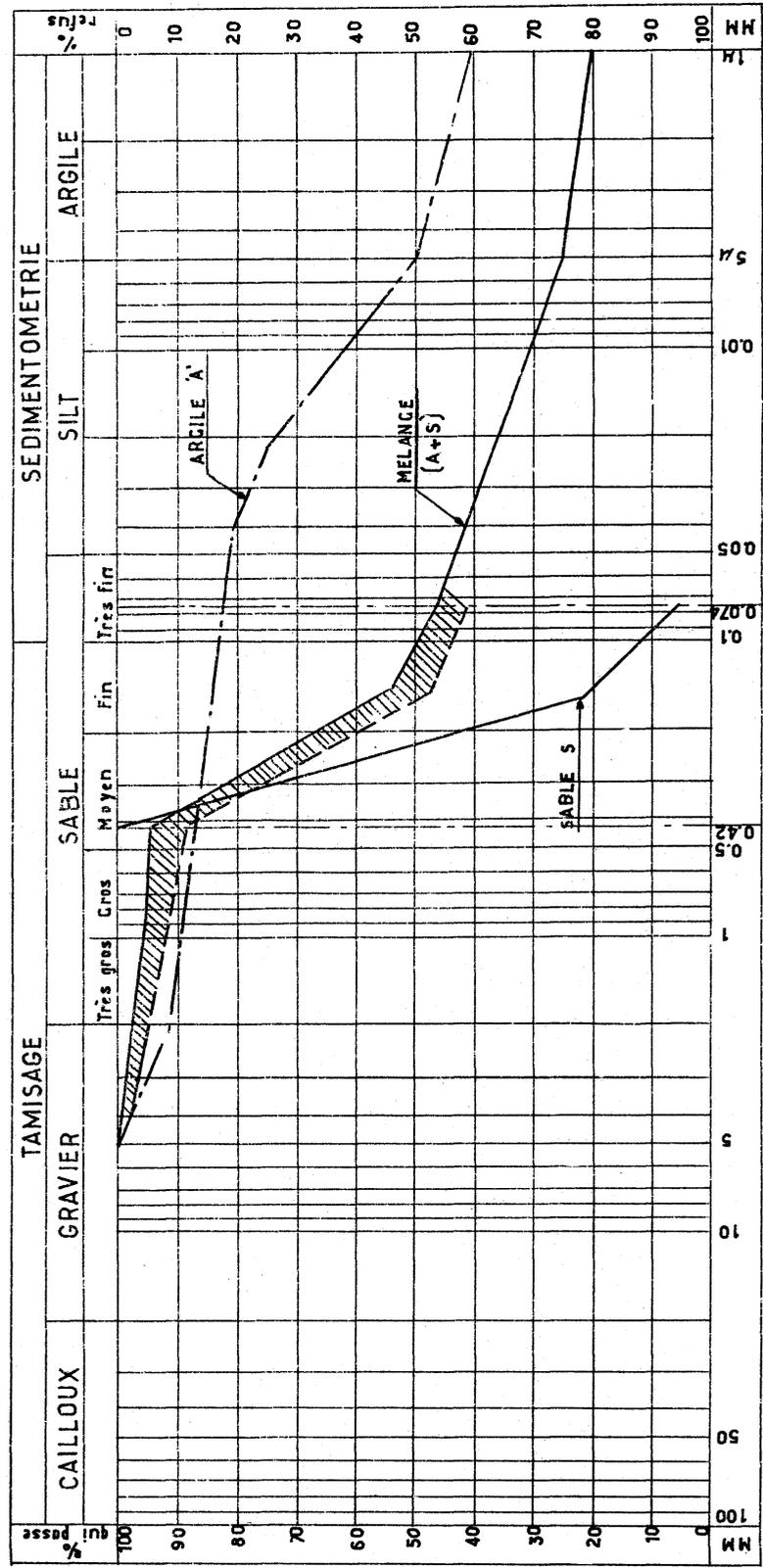
La densité sèche maximale est de 1,86 T/m³. Elle est obtenue avec une teneur en eau optimale de compactage de 16,5%.

Le mélange après broyage et malaxage poussés (sol naturel) conduit à une densité plus élevée égale à 1,92 T/m³ obtenue avec une teneur en eau de 14,3%.

La plus grande finesse de l'argile lui permet donc de venir se loger entre les grains de sable et conduit à un mélange plus dense.

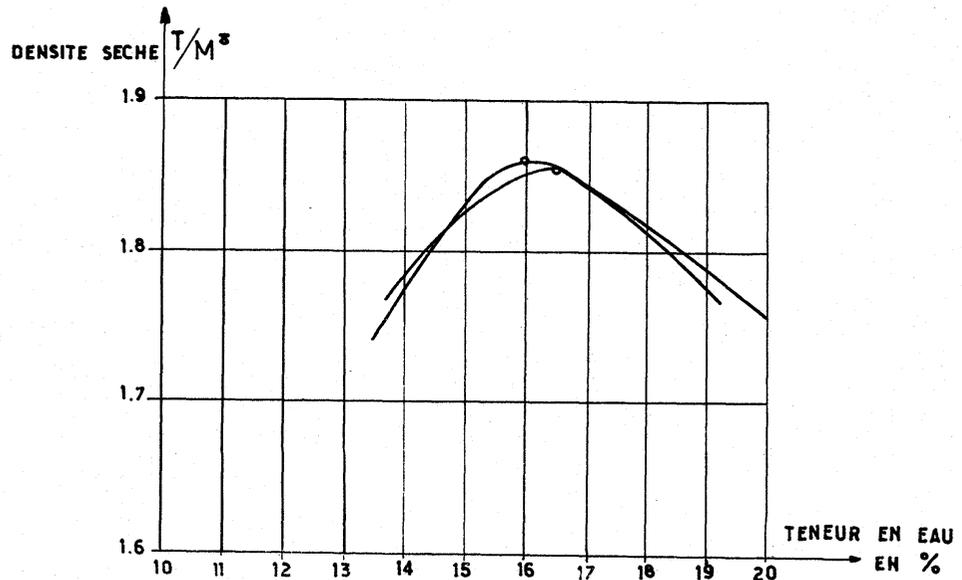
MELANGE 'SABLE-ARGILE'

COURBES GRANULOMETRIQUES DES CONSTITUANTS ET DU MELANGE

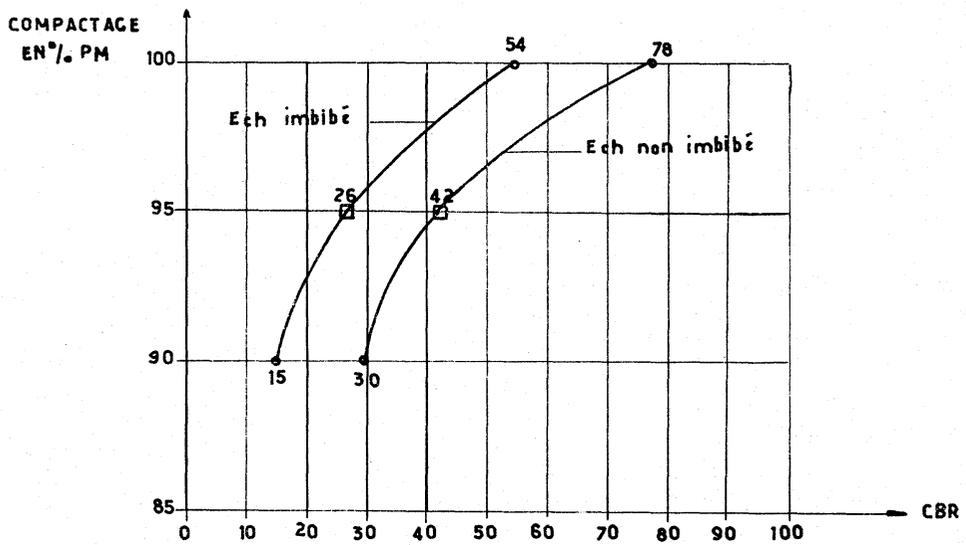


SABLE - ARGILE

COURBE PROCTOR MODIFIE



TENEUR EN EAU OPTIMALE 16 à 16,5 %
 DENSITE SECHE MAXIMALE 1,86 T/M^3



VARIATIONS DE L'INDICE CBR DU MELANGE
 SABLE ARGILE AVEC LE COMPACTAGE ET
 L'IMBIBITION

Essais de portance C.B.R

Les indices C.B.R. obtenus aux essais sont les suivants :

- a) Cas des sols naturels (broyage et malaxage très poussés)

COMPACTAGE	Indices C.B.R.	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% PM	70%	30%
95% PM	65%	17%
90% PM	40%	4%

- b) Cas des mélanges de chantier (broyage et malaxage plus sommaires)

COMPACTAGE	Indices C.B.R.	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% PM	78%	54%
95% PM	42%	26%
90% PM	30%	15%

On constate une amélioration sensible de la portance lorsque l'indice de compactage augmente. Le C.B.R. reste toutefois modéré en raison de l'absence de squelette graveleux dans le sol.

Essais triaxiaux

- a) Essais triaxiaux lents drainés sur sol naturel (cas du broyage et du malaxage très poussés)

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	ψ	cohésion en kg/cm ²	ψ	cohésion en kg/cm ²
100% PM	35°	2,6	31°	2,7
95% PM	32°	2,5	28°	1,2
90% PM	32°	1,4	26°	0,3

- b) Essais triaxiaux rapides non drainés sur mélange chantier
(cas du broyage et du malaxage plus sommaires)

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	ψ	cohésion en kg/cm ²	ψ	cohésion en kg/cm ²
100% PM	18°	2,65	17°	2,45
95% PM	24°	1,30	25°	0,95
90% PM	28°	0,40	31°	0,10

On notera que :

- pour les essais lents drainés, l'angle de frottement interne varie peu avec le degré de compactage, mais la cohésion, surtout après imbibition, baisse très rapidement lorsque la compacité diminue.
- pour les essais rapides, l'apparition de pressions interstitielles dans les éprouvettes fortement compactées, diminue l'angle de frottement interne apparent. Par contre, lorsque la compacité diminue, la proportion de vides dans le sol augmente et par conséquent, pour une même teneur en eau, le degré de saturation diminue. Il en résulte une atténuation des pressions interstitielles et une augmentation de l'angle de frottement interne apparent qui se rapproche de l'angle réel trouvé aux essais lents.

Essais oedométriques

Le coefficient de compressibilité du sable-argile a été trouvé égal à 130.

La perméabilité du matériau est voisine de $1,5 \cdot 10^{-6}$ cm/sec

3 - STABILISATION A LA CHAUX

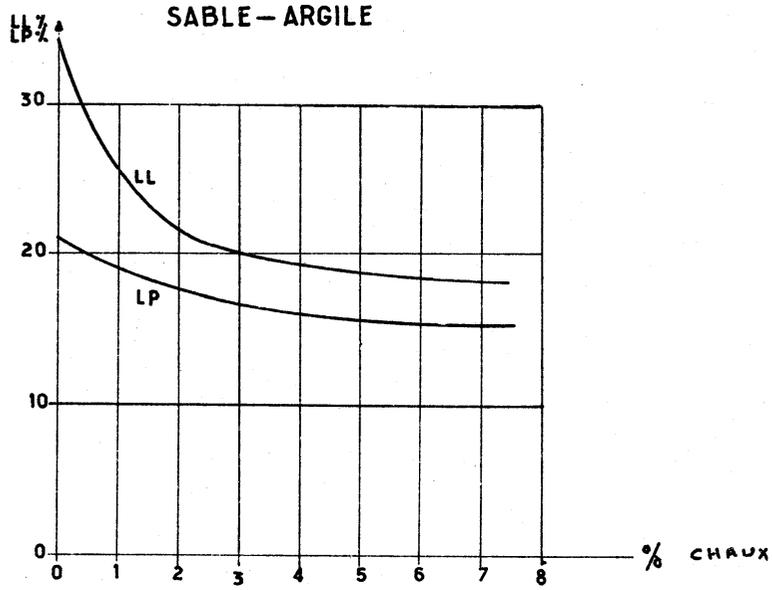
Limites d'Atterberg

L'addition de chaux au mélange sable-argile abaisse l'indice de plasticité. On voit sur la figure 35 que la diminution de l'indice est particulièrement sensible lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 2,5%.

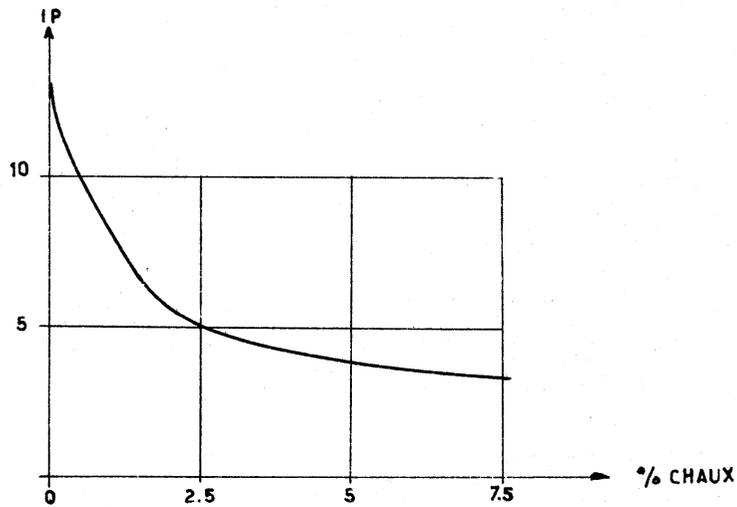
Il passe en effet dans ces conditions, de 13 à 5%. Au delà de 2,5% de chaux, l'indice ne diminue plus que très lentement.

SABLE - ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX
SUR LES LIMITES D'ATTENBERG DU MELANGE



VARIATIONS DES LIMITES DE LIQUIDITE
ET DE PLASTICITE



VARIATION DE L'INDICE DE PLASTICITE

A.1-2 Fig 35

Essais de compactage Proctor Modifié

L'influence de l'addition de chaux sur les caractéristiques Proctor du mélange est assez faible comme on le constate dans le tableau ci-dessous :

% de chaux ajouté au sable-argile	teneur en eau optimale	Densité sèche maximale T/m ³
0	16,5%	1,85
1,5	17 %	1,84
3,0	17 %	1,83
5,0	18 %	1,81
6,0	17,3%	1,83

Essais de portance C.B.R.

Les résultats obtenus ont été reportés sur les fig. 36 et 37.

L'indice C.B.R. croît tout d'abord assez rapidement lorsque le dosage en chaux augmente. A partir de 3% d'addition de liant, le C.B.R. plafonne ou commence même à diminuer.

En ajoutant 3% de chaux au sol compacté à 95% P.M, le C.B.R. passe de 40 à 90% sans imbibition et de 25 à 60% après imbibition.

Essais triaxiaux

Les variations de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction de l'addition de chaux sont reportées sur les figures 38 et 39. Les variations des résistances à la compression simple qui en résultent sont données sur la figure 40.

On voit que l'accroissement sensible des résistances à l'écrasement obtenu sur les éprouvettes non imbibées avec 2 à 4% de chaux ne se conserve pas après imbibition.

Avec 3% de chaux et une compacité de 95% PM, la résistance sans imbibition passe de 4 à 7 kg/cm² alors qu'après imbibition, elle reste voisine de 2 kg/cm² avec ou sans chaux.

Essais Oedométriques

Les coefficients de compressibilité obtenus avec les divers pourcentages de chaux sont les suivants :

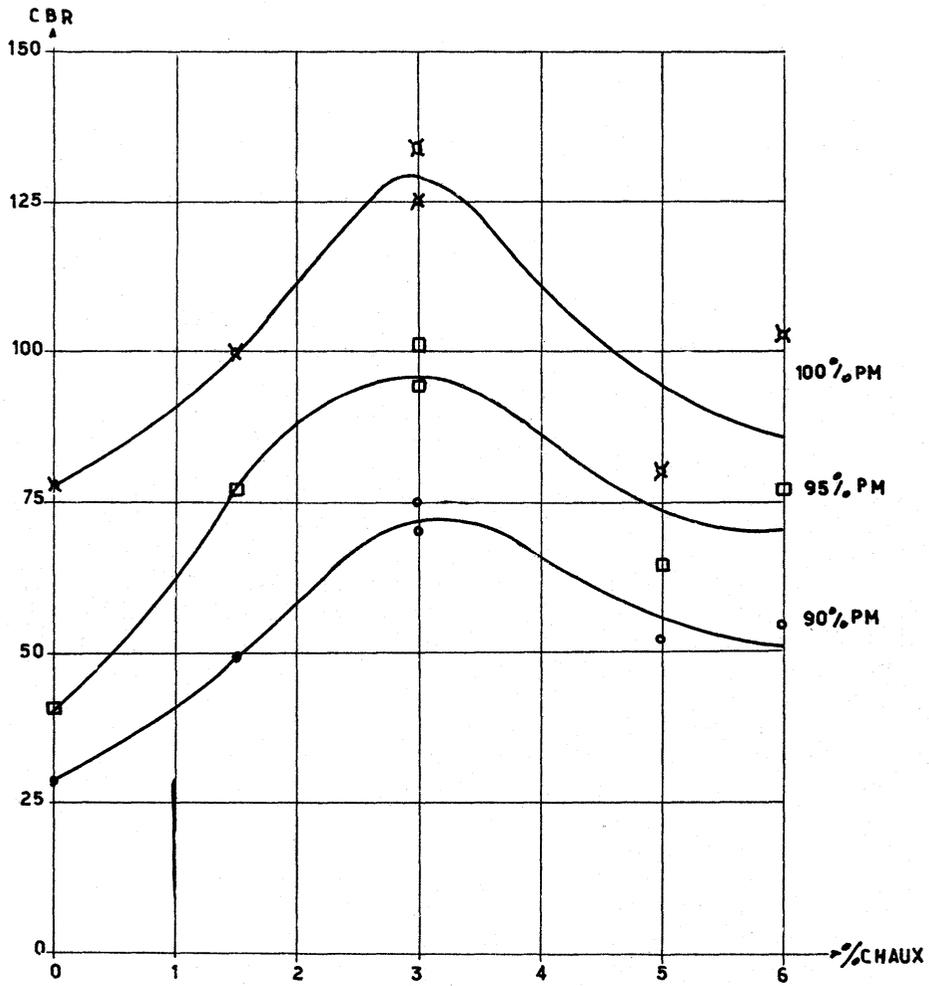
% de chaux	0%	2%	4%	6%
Coefficient de compressibilité	130	200	240	205

On voit que le sol est un peu moins compressible (C_c augmente) lorsque le matériau est amendé à la chaux.

Le coefficient de perméabilité K varie peu et reste compris entre 1 et 9×10^{-6} cm/s.

SABLE - ARGILE

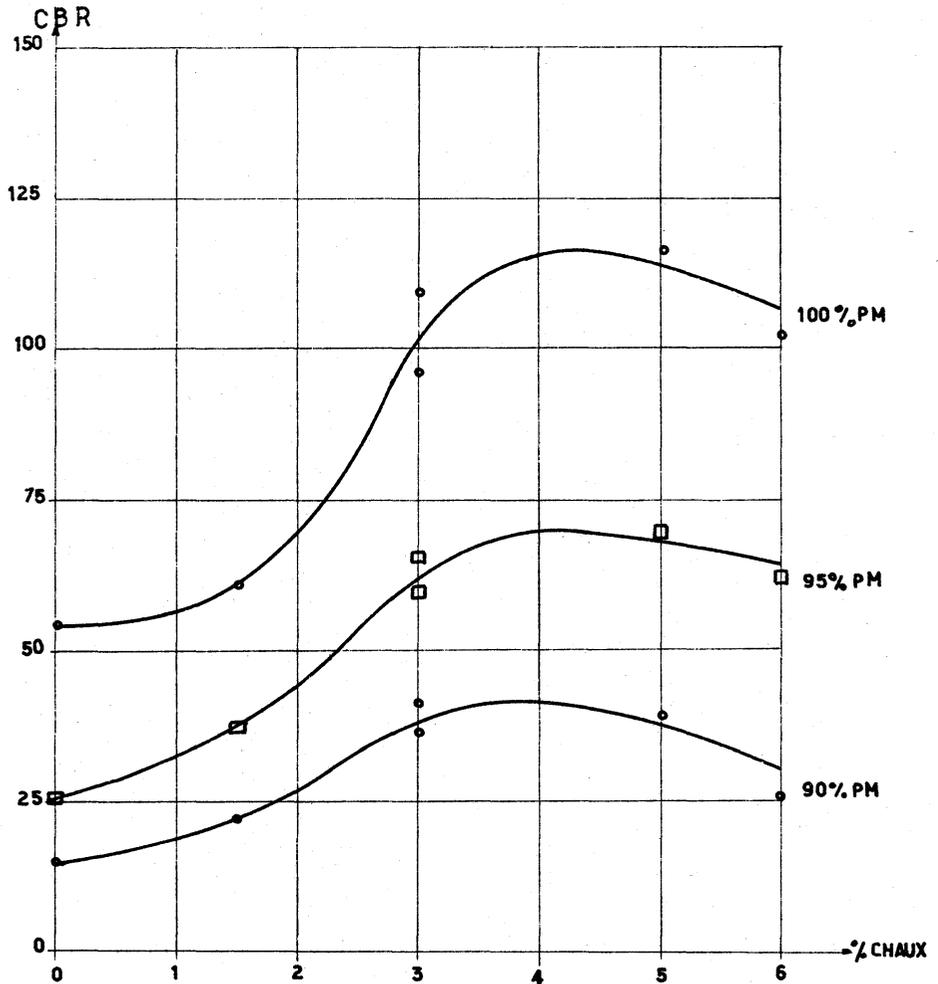
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
L'INDICE CBR DU SOL NON IMBIBE



A.1.2. Fig36

SABLE - ARGILE

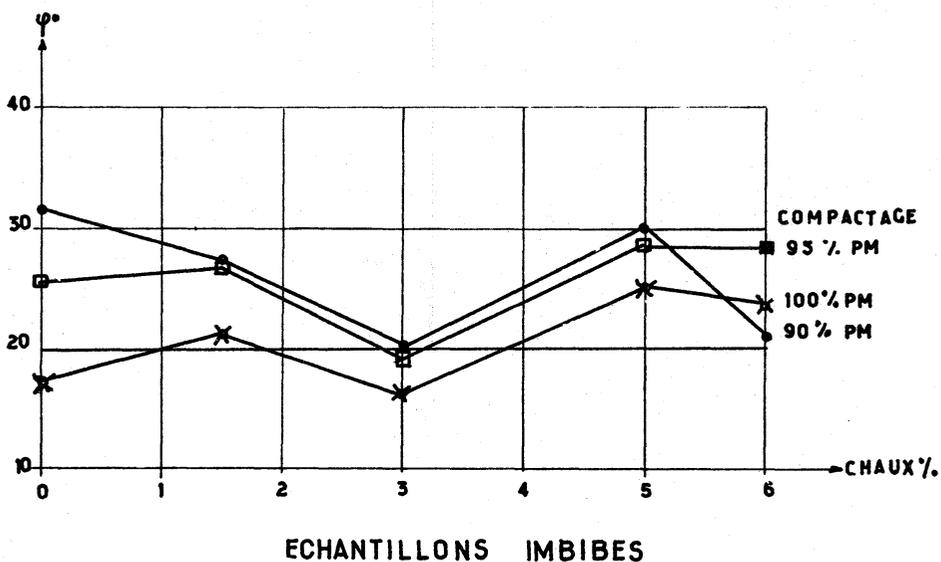
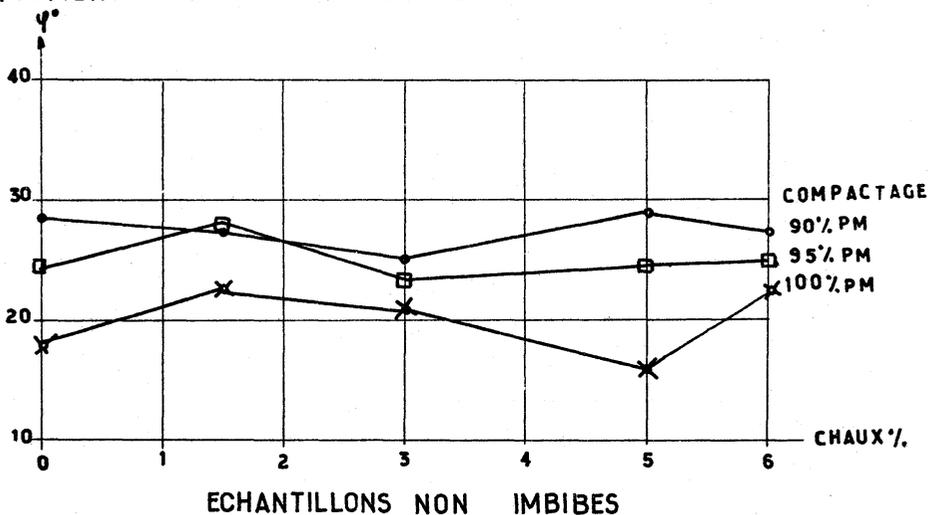
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR L'INDICE
C B R DU SOL IMBIBE



A-1.2 Fig37

SABLE - ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR L'ANGLE DE
FROTTEMENT INTERNE APPARENT DU MELANGE SABLE-ARGILE

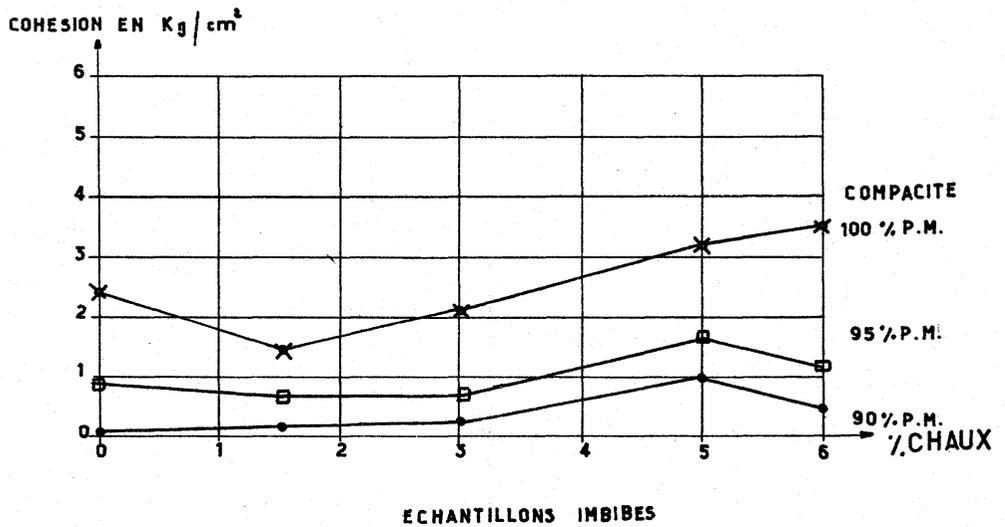
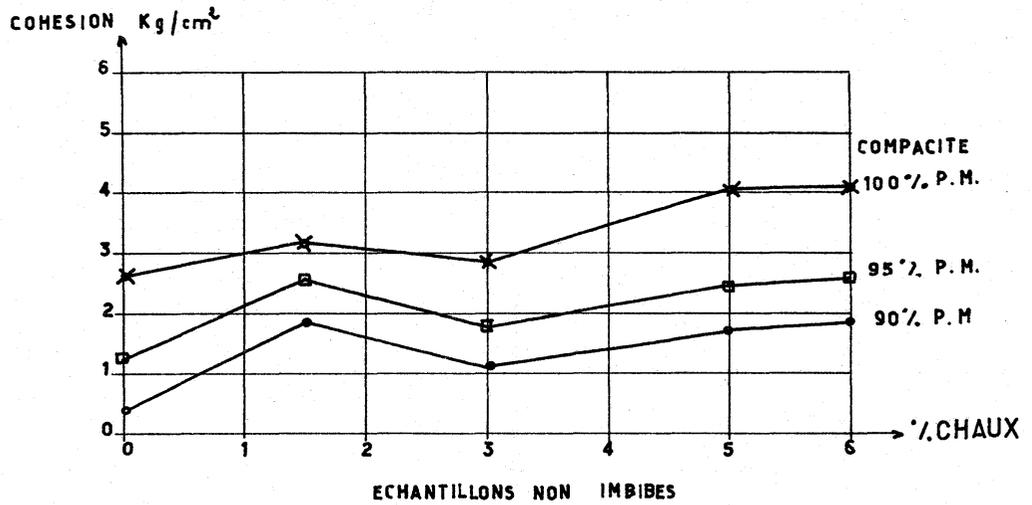


A.1.2. Fig 38

SABLE - ARGILE

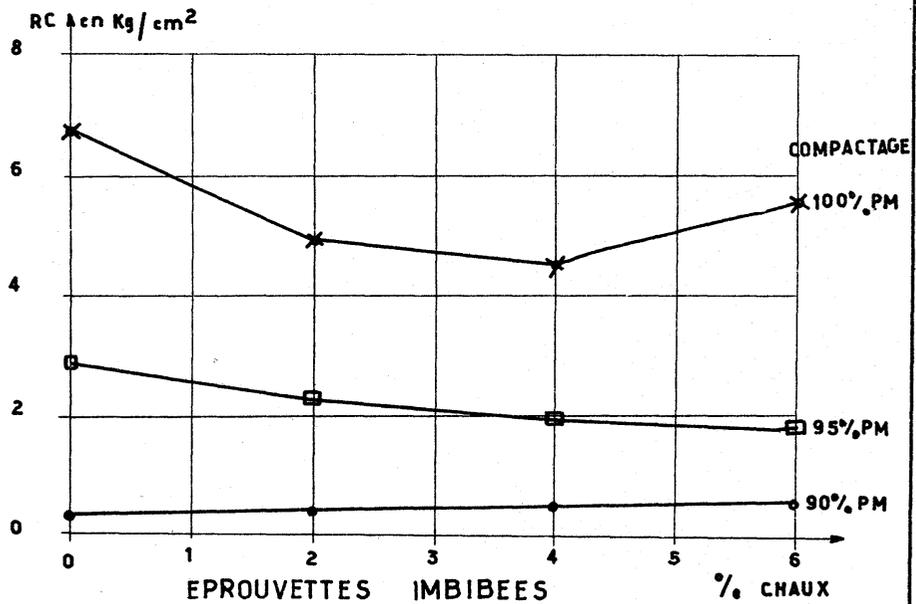
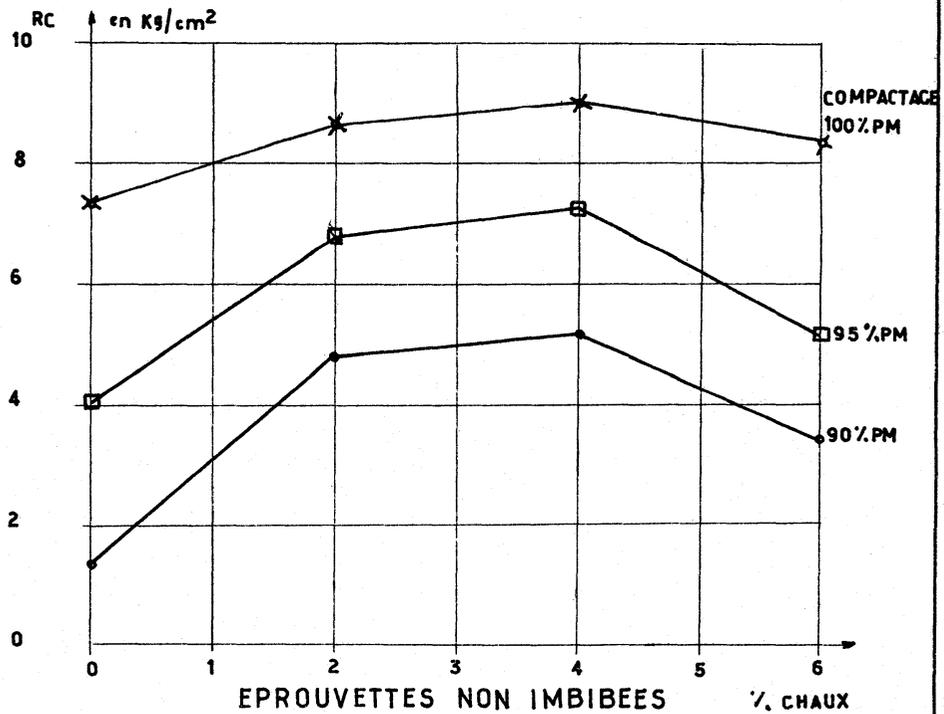
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR

LA COHESION DU MELANGE SABLE ARGILE



SABLE- ARGILE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION DE
L'AMENDEMENT EN CHAUX ET EN FONCTION DU % DE COMPACTAGE



A-1.2-Fig 40

4 - STABILISATION AU CIMENT

Limites d'Atterberg.

Les courbes de variations de LL et LP et IP en fonction du pourcentage d'amendement au ciment sont très voisines de celles obtenues avec la chaux.

L'indice tombe de 13 à 5% par addition de 2,5% de ciment puis il ne varie pratiquement plus. (fig.41)

Essais de compactage Proctor Modifié

% de ciment	Teneur en eau optimale	Densité sèche maximale
0 %	16,5%	1,85 T/m ³
1,5%	17 %	1,85 T/m ³
3 %	16,7%	1,85 T/m ³
5 %	16 %	1,86 T/m ³

On constate dans le tableau ci-dessus que l'addition de ciment n'a que peu d'influence sur les caractéristiques Proctor.

Essais de portance C.B.R.

Les valeurs C.B.R. obtenues avec et sans imbibition ont été reportées sur les graphiques 42 et 43.

Sur échantillons non imbibés, les C.B.R. croissent régulièrement, passant pour une compacité de 95% PM, de 40% sans ciment à 100% avec 2% de ciment et 250% avec 5% de ciment.

Après imbibition, les C.B.R. ne croissent vraiment que si le pourcentage de ciment dépasse 1,5%. A la compacité de 95% PM, nous avons un C.B.R. de 25% sans ciment, 40% avec 1,5% de ciment, 100% avec 3% de ciment et 140% avec 5% de ciment.

Si l'on compare les résultats obtenus avec le ciment à ceux obtenus par amendement à la chaux, on constate que pour avoir le même C.B.R. après imbibition, il faut 40% de liant en moins lorsque l'on emploie le ciment.

Essais triaxiaux

Les variations de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction de l'addition de ciment sont données sur les figures 44 et 45.

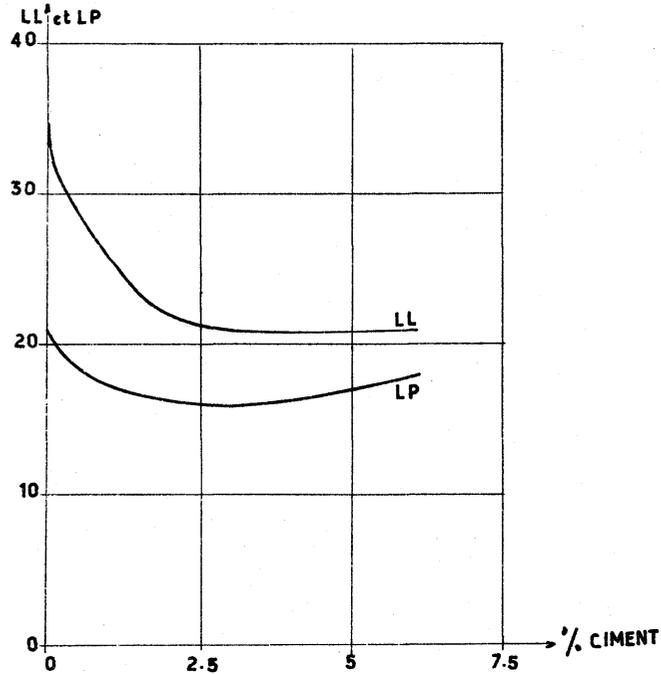
Les variations de la résistance à la compression simple qui en résultent sont reportées sur la figure 46.

On voit d'une façon générale que l'angle de frottement interne apparent varie peu avec le dosage en ciment.

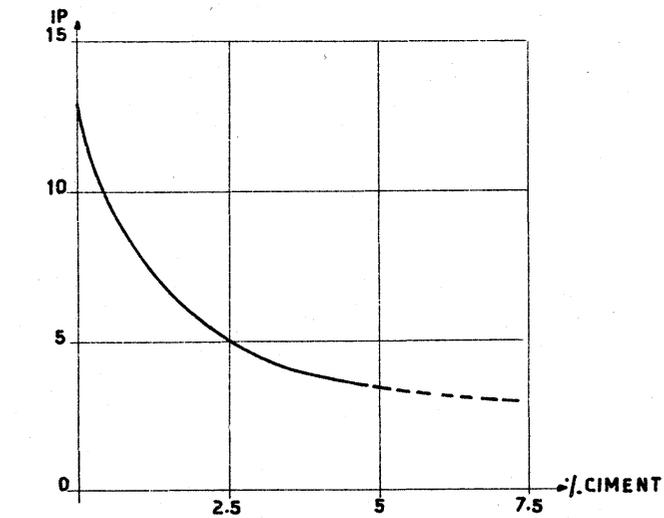
La cohésion et la résistance à la compression simple des matériaux imbibés augmentent avec le dosage mais le gain relatif n'est vraiment important que pour les faibles compacités.

SABLE - ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LES
LIMITES D'ATTERBERG DU MELANGE SABLE - ARGILE



VARIATION DES LIMITES DE LIQUIDITE
ET DE PLASTICITE

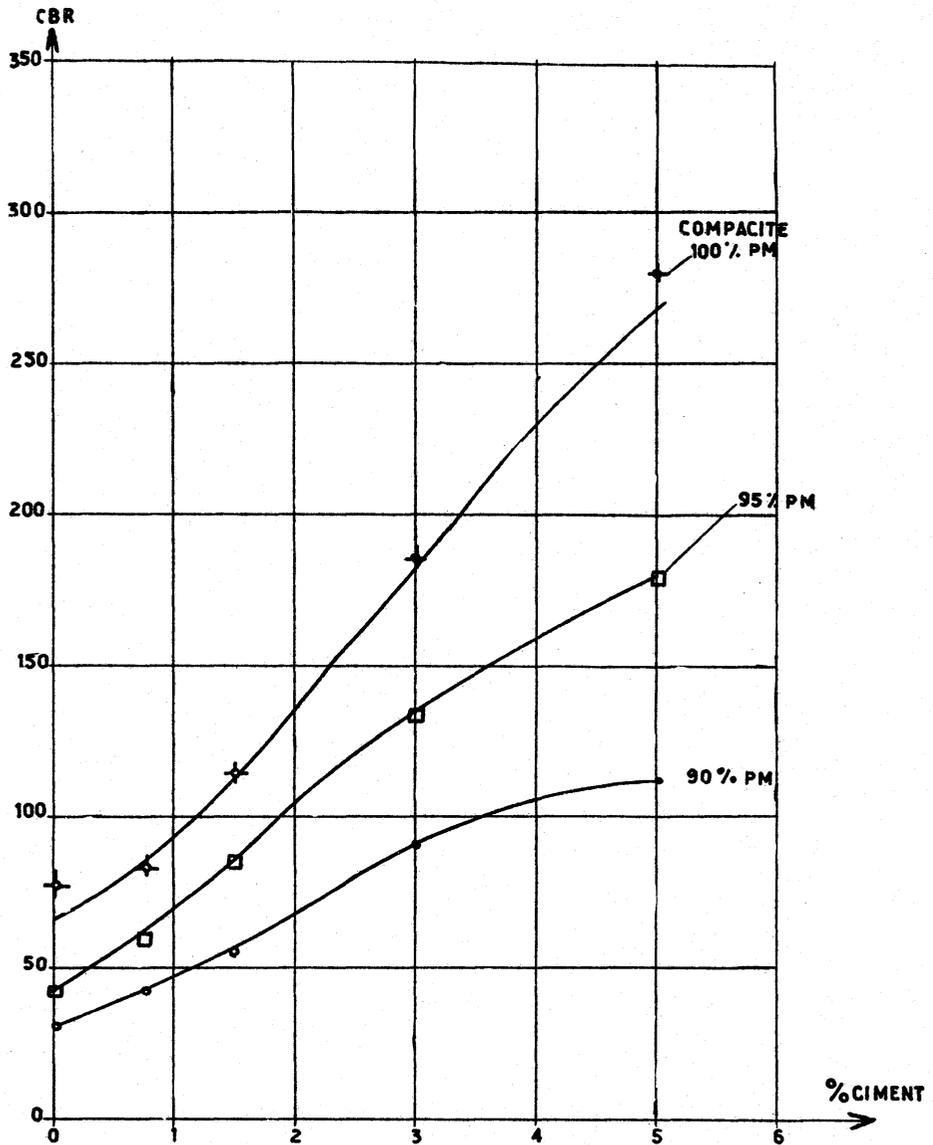


VARIATION DE L'INDICE DE PLASTICITE

A.1.2 - Fig 41

SABLE - ARGILE

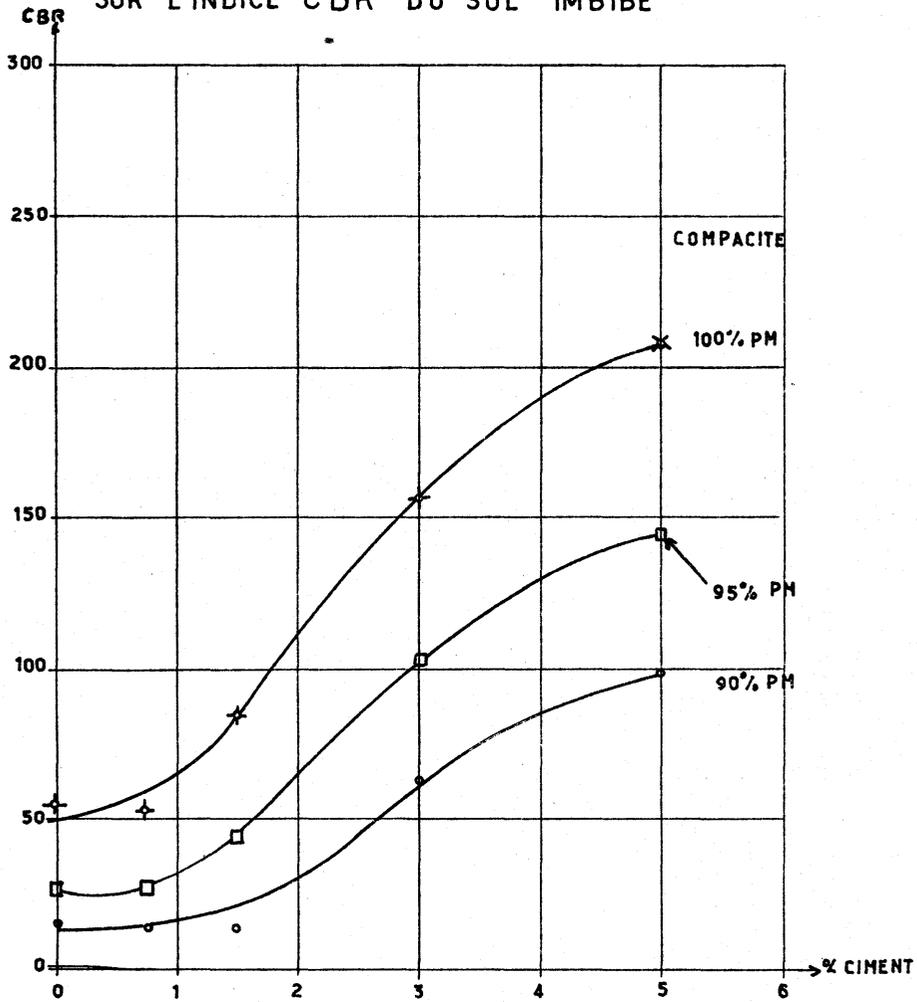
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR
L'INDICE C B R DU SOL NON IMBIBE



A -1-2. Fig 42

SABLE - ARGILE

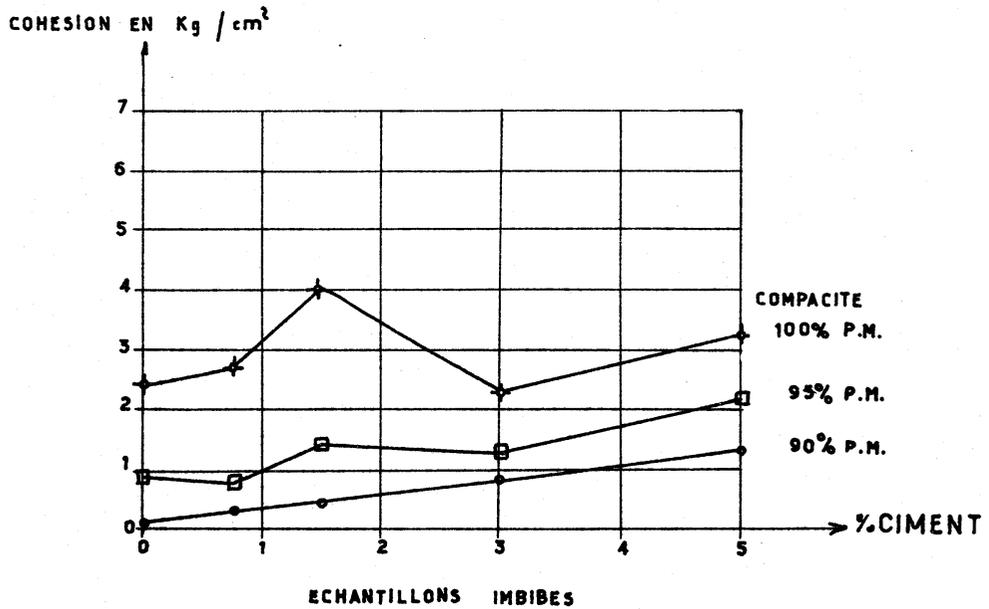
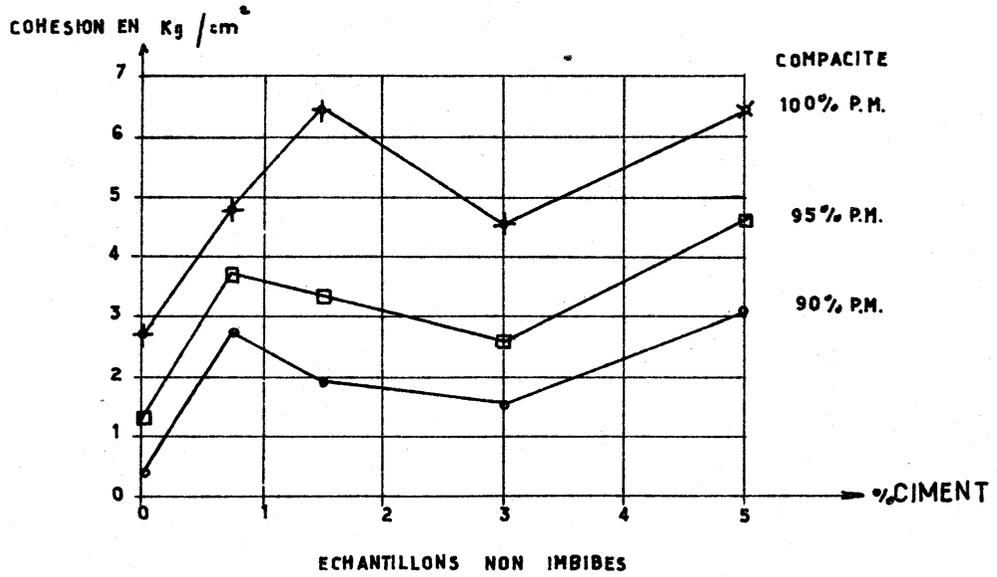
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT
SUR L'INDICE CBR DU SOL IMBIBE



A .1.2 Fig 43

SABLE - ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT
SUR LA COHESION DU MATERIAU

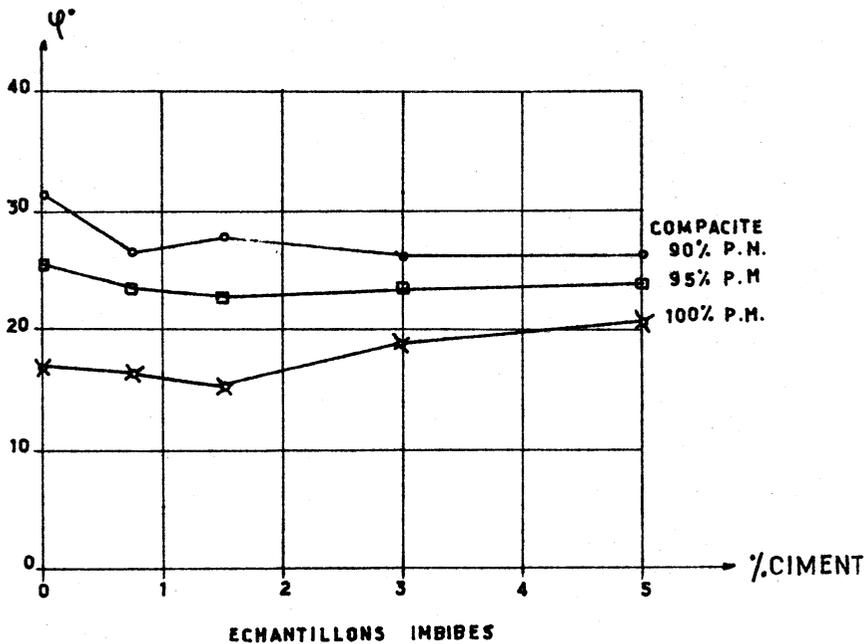
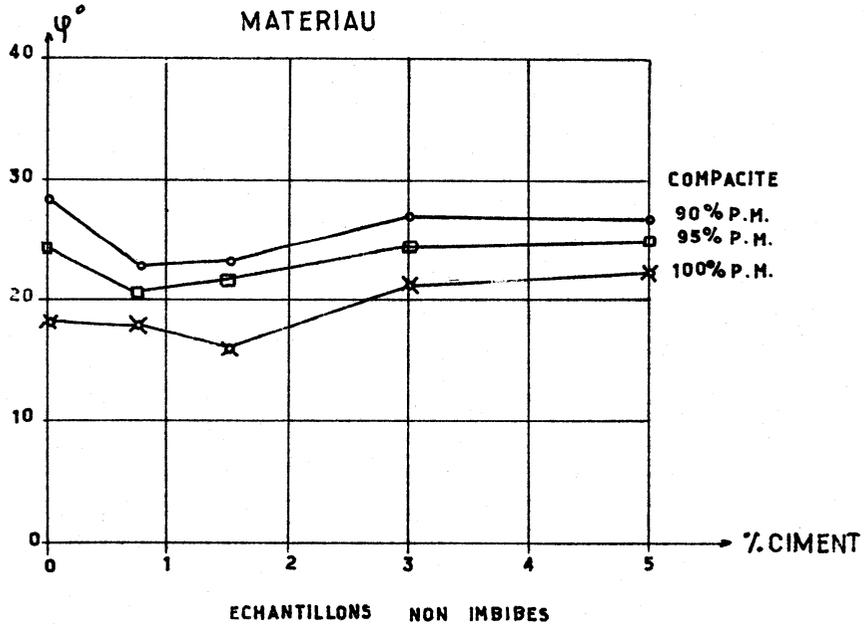


A - 1.2 - Fig 44

SABLE - ARGILE

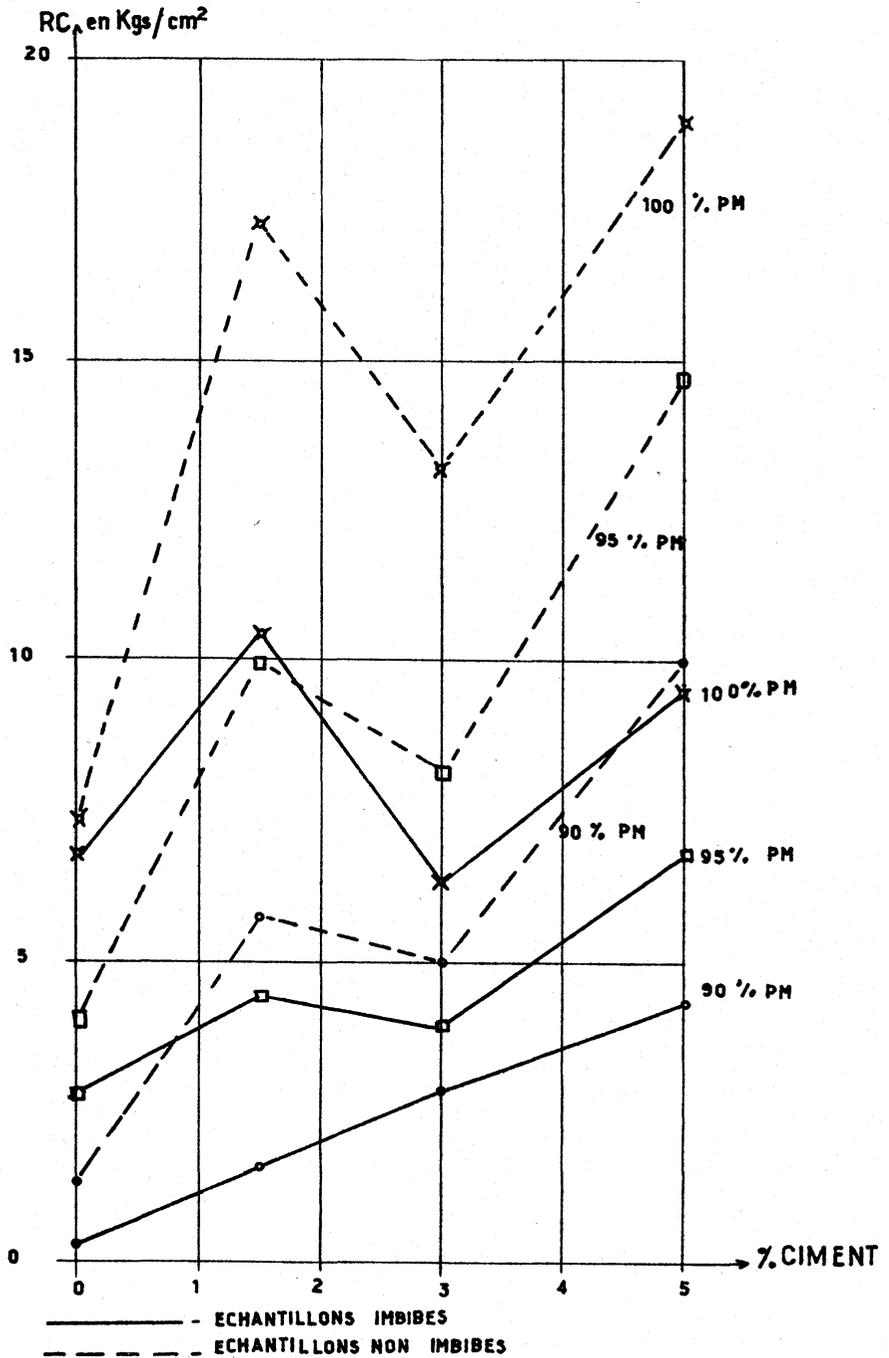
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR
L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE APPARENT DU

MATERIAU



SABLE-ARGILE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION DE
L'AMENDEMENT EN CIMENT ET DU COMPACTAGE



A -1.2-Fig 46

A la compacité de 95% PM, la résistance à la compression simple ne dépasse guère 5 kg/cm².

Essais Oedométriques

L'addition de ciment fait croître rapidement le coefficient C_c donc rend le mélange moins compressible.

On obtient en effet, les résultats suivants :

% ciment	0	1,5%	3%	5%
C_c	130	184	316	553

La perméabilité reste du même ordre de grandeur entre 0,4 et 1,8 10^{-6} cm/s

5 - STABILISATION AU MOYEN DE LIANTS HYDROCARBONES

Liants utilisés - Essais effectués.

Quatre types de liants ont été utilisés.

- Un cut-back 10/15 préparé à partir d'un bitume 180/200
- Un liant bitumineux SHELL, appelé EK 2 qui est un cut-back dopé et émulsifié, miscible à l'eau.
- Une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100 (COLSOL)
- Une émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisée :

Les essais effectués sont des essais Hubbard Field. Quatre modes de conservation des éprouvettes sont utilisés :

ESSAI A : Conservation des briquettes à 18°C. pendant 7 jours, puis mesure de la stabilité à cette même température.

ESSAI B : Séchage des éprouvettes jusqu'à poids constant à 60°C, puis conservation pendant au moins 24 heures à 18°C et mesure de la stabilité à cette même température.

ESSAI C : Séchage des éprouvettes à 60°C. jusqu'à poids constant, puis mesure de la stabilité à cette même température.

ESSAI D : Séchage des éprouvettes à 60°C., immersion des éprouvettes sur la moitié de leur hauteur dans de l'eau potable à 18°C. pendant 7 jours, puis essai dès la sortie de l'eau.

Stabilisation au cut-back 10/15

Ce liant bitumineux s'est avéré utilisable après chauffage entre 60 et 70°C.

La valeur d'exsudation du mélange est :

$$(w + b) = 25\% \text{ avec } w = b$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau du sol W	Dosage en cut-back (b%)		6%	8%	10%	12%
9%	Densité sèche	T/m3	1,90	1,85	1,78	1,74
	Absorption	w'%	(1)	(1)	9,1	6,4
	Gonflement	g%	(1)	(1)	17,5	10,0
	Stabilité H.F (kg)					
	A (sèchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C		2660	2150	1670	1580
	B (sèchage complet à 60°C (stabilité à 18°C		3250	2580	1925	1970
	C (sèchage complet à 60°C (stabilité à 60°C		3575	2625	1900	1475
	D (sèchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C		0	0	60	120
13%	Densité sèche	T/m3	1,79	1,73	1,67	1,61
	Absorption	w'%	(1)	11,2	8,0	5,8
	Gonflement	g%	(1)	17,5	7,6	6,0
	Stabilité H.F (kg)					
	A (sèchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C		1825	1405	1080	925
	B (sèchage complet à 60°C (stabilité à 18°C		2340	1475	1115	880
	C (sèchage complet à 60°C (stabilité à 60°C		2300	1650	950	675
	D (sèchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C		0	50	70	80

(1) éprouvettes détériorées.

Stabilisation au cut-back dopé EK2

Le liant EK2 a été utilisé à froid

La valeur exsudation est :

$(w + b) = 15\%$ avec $w = b$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau du sol W	Dosage en cut-back dopé EK2	2%	4%	6%	8%
7%	Densité sèche T/m ³	1,92	1,92	1,92	1,92
	Absorption w' %	(échantillons détériorés mesures impossibles)			
	Gonflement g %	(échantillons détériorés mesures impossibles)			
	Stabilité H.F (kg)				
	A (séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C)	2420	2825	3430	3590
	B (séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C)	4000	4790	5315	5575
	C (séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C)	4025	5600	5990	5450
D (séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C)	0	0	0	0	
9%	Densité sèche T/m ³	1,94	1,95	1,92	
	Absorption w' %	(échantillons détériorés mesures impossibles)			
	Gonflement g %	(échantillons détériorés mesures impossibles)			
	Stabilité H.F (kg)				
	A (séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C)	3875	4550	4050	
	B (séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C)	4660	6000	6000	
	C (séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C)	6000	6000	6000	
D (séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C)	0	0	0		

Stabilisation au moyen d'une émulsion basique surstabilisée à 60% de bitume 80/100

Pour obtenir une dispersion satisfaisante du liant, il est nécessaire de mouiller abondamment le sol ou d'étendre l'émulsion.

Le mélange est ensuite séché à l'air jusqu'à ce que (w + b) soit aussi voisin que possible de l'optimum Proctor et en tout cas, inférieur à la valeur d'exsudation.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau	w%	10,5	10,0	9,0	8,0
Teneur en émulsion basique	b%	2,0	4,0	6,0	8,0
Densité sèche		1,98	1,94	1,90	1,88
Absorption	w%	Eprouvettes détériorées non mesurables			
Gonflement	g%				
Stabilité H.F (kg)					
A (séchage partiel à 18°C (stabilité à 18°C)		3800	4200	3600	3300
B (séchage complet à 60°C (stabilité à 18°C)		4300	4500	4200	3800
C (séchage complet à 60°C (stabilité à 60°C)		4400	4600	4100	3600
D (séchage complet à 60°C (stabilité après immersion à 18°C)					

Stabilisation au moyen d'émulsion acide à 55% de bitume 100/120 stabilisée

La dispersion du liant a été obtenue de la même manière que dans le cas de l'émulsion basique. Les résultats obtenus sont les suivants :

Teneur en eau	w%	11,8	9,4	6,6	4,7
Teneur en émulsion acide	b%	2,0	4,0	6,0	8,0
Densité sèche		1,96	1,94	1,95	1,94
Absorption et gonflement		Eprouvettes détériorées			
Stabilité H.F (kg)					
A		4110	4270	4460	4575
B		4270	4400	4478	4680
C		3840	4090	4170	4270
D		0	0	0	0

N.B. On a remarqué au cours de l'imbibition que le gonflement des éprouvettes est d'autant plus important que la teneur en émulsion est plus élevée.

Comparaison des résultats

- a) Le séchage complet à 60°C conduit à une stabilité plus élevée que le séchage à l'air à 18° pendant 7 jours (essais A et B)
- b) Les stabilités mesurées à 18°C ou 60°C sur éprouvettes préalablement séchées, sont assez voisines. Le sable-argile stabilisé aux liants hydrocarbonés est donc peu sensible à une élévation de température aussi longtemps que le dosage en liant reste modéré.

La forte cohésion apportée au sol par l'argile lorsqu'elle est sèche contrebalance en effet le ramolissement du bitume dû à l'élévation de température.

- c) L'imbibition provoque dans tous les cas une chute très brutale de la stabilité en raison du gonflement important du sol.

Pour comparer entre eux les quatre liants utilisés, nous n'avons retenu que les essais de stabilité effectués à 18°C (essais A et D). Les essais à 60°C sont en effet trop optimistes en raison de la très forte cohésion de l'argile sèche.

Les stabilités obtenues sans imbibition des éprouvettes sont très bonnes surtout dans le cas de l'utilisation du cut-back dopé EK.2 ou des émulsions. Avec les émulsions, il est toutefois nécessaire de laisser sécher le matériau avant compactage. Sur chantier, cette opération risque d'être longue ou difficile car le matériau a tendance à se mettre en mottes.

Les stabilités Hubbard Field après imbibition sont pratiquement nulles avec les 4 liants hydrocarbonés. Elles ne sont mesurables qu'avec le cut-back 10/15 et ne dépassent guère, dans ce cas, 50 à 80 kg alors qu'une valeur de 225 kg est généralement considérée comme un minimum.

6 - STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES AVEC EMPLOI D'HYDROPHOBANTS

Les essais ci-dessus ont révélé que le mélange sable-argile n'était pas stabilisable aux liants hydrocarbonés usuels.

Le bitume contenu dans ces liants ne peut, à lui seul, éviter le gonflement de l'argile lorsque celle-ci est mise en présence d'eau. Il est apparu logique dans ces conditions, d'envisager l'utilisation d'hydrophobants.

Trois produits ont été retenus :

- le STABIRAM 790 (Sté PROCHINOR)
- le DOPE 4266 (Société chimique et routière de la Gironde)
- le chlorhydrate de la base cyclique 3028 P (Sté DOITTAUSOPURA)

Ces trois produits sont des sels de polyamines, solubles dans l'eau.

Les mêmes liants ont été utilisés à l'exception de l'émulsion acide à 55% de bitume 100/120 qui avait donné les gonflements les plus élevés.

Seul l'essai D, qui consiste à mesurer la stabilité du mélange après séchage à 60°C, puis immersion dans l'eau à 18° pendant 7 jours, a été retenu. Au cours de cet essai, on a mesuré en outre, le gonflement et l'absorption des éprouvettes après imbibition.

- a) Stabilisation avec addition de 0,1% de produits hydrophobants (dosage minimum préconisé par les fabricants).

Stabilisation au cut-back 10/15

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau I

On constate que, d'une façon générale, la stabilité croît avec la teneur en liant, tandis que l'influence de la teneur en eau initiale du sol n'est pas prépondérante.

La condition habituelle, stabilité Hubbard Field supérieure ou égale à 500 lbs (227 kg) est satisfaisante, à condition d'utiliser 12% de cut-back et 0,1% de dopé 4266 ou de base 3028

Stabilisation au liant EK.2

Les résultats des essais Hubbard Field sont consignés dans le tableau II.

On constate que l'accroissement de la stabilité en fonction du dosage est beaucoup moins net qu'avec le cut-back 10/15. La stabilité Hubbard Field de 500 lbs n'est pratiquement jamais atteinte.

Stabilisation à l'émulsion basique surstabilisée.

Les résultats des essais sont consignés dans le tableau III.

Les stabilités obtenues sont faibles.

- b) Stabilisation avec addition de 0,2% de produits hydrophobants

Conditions d'essais.

Les résultats obtenus avec addition de 0,1% d'hydrophobants, bien qu'ils soient insuffisants, prouvent néanmoins que ce dosage minimum préconisé par les fabricants, améliore la stabilité des sols-bitume.

Le dosage de 0,2% a été étudié, mais on s'est limité, d'une part à un seul produit bitumineux, d'autre part à une seule teneur en eau initiale du sol.

Le cut-back 10/15 a été abandonné en raison des difficultés que l'on éprouve à le disperser dans le sol. Il est peu probable que sur un chantier, même en utilisant des moyens de malaxage puissants, on puisse obtenir un mélange homogène avec ce liant.

L'émulsion surstabilisée à 60% de bitume a donné des résultats très médiocres et il est apparu inutile de poursuivre les essais de stabilisation avec ce produit.

On a donc uniquement conservé le liant EK.2 spécialement conçu pour les sols argileux et qui se disperse très facilement dans le sol étudié.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau IV.

Les essais avec la base cyclique 3028 P donnent des résultats très médiocres, par contre, les deux autres hydrophobants permettent d'obtenir des stabilités supérieures à 400 kg dès que le dosage en EK.2 dépasse 4%. Le gonflement du sol est par ailleurs, très faible.

T A B L E A U I
SABLE - ARGILE

STABILISATION AU CUT-BACK 10/15
AVEC ADDITION DE 0,1% D'HYDROPHOBANT

HYDROPHOBANT UTILISE	CARACTERISTIQUES DU MELANGE	TENEUR EN EAU INITIALE DU SOL																															
		W1 = 15%					W2 = 25%					W3 = 35%																					
		4,6	4,7	4,0	1,0	6,5	2,0	3,0	3,0	10,4	8,1	7,0	7,9	6,0	5,6	5,1	7,8	7,7	6,9	5,1	7,9	8,0	7,3	9,1	7,5	5,8							
STABIRAM 790 0,1%	Teneur en eau	w%	4,6	4,7	4,0	1,0	6,5	2,0	3,0	3,0	10,4	8,1	7,0	7,9	Teneur en eau	w%	6,0	5,6	5,1	7,8	7,7	6,9	5,1	Teneur en eau	w%	7,9	8,0	7,3	9,1	7,5	5,8		
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	6	8	10	10	12	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10	10	12	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m ³		1,95	1,95	1,89	1,87	1,96	1,89	1,89	1,85	1,86	1,83	1,75	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,93	1,89	92	1,87	1,84	1,82	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,84	1,85	1,90	1,85	1,81			
	Absorption	w%	27	21	10	7	24	25	13	24	18	15	11	Absorption	w%	25	18	12	24	16	10	5	Absorption	w%	25	28	18	25	18	15			
	Gonflement		36	24	19	12	24	24	16	21	14	11	8	Gonflement	g%	35	34	15	25	12	8	5	Gonflement	g%	29	28	17	25	19	18			
	Stabilité Hubbard Field	kg	75	120	180	175	0	70	130	200	130	130	365	Stabilité Hubbard Field	kg	40	40	135	50	100	190	365	Stabilité Hubbard Field	kg	100	90	215	215	80	145	260		
DOPE 4266 (Milieu basique) 0,1%	Teneur en eau	w%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Teneur en eau	w%	7,9	7,1	5,3	4,4	4,4	4,4	4,4	Teneur en eau	w%	7,9	8,0	7,3	9,1	7,5	5,8			
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	6	8	10	10	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10	10	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10			
	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,92	1,92	1,85	1,95	1,93	1,89	92	1,87	1,84	1,82	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,83	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,84	1,85	1,90	1,85	1,81			
	Absorption	w%	25	12	9	6	30	18	12	24	16	10	5	Absorption	w%	25	12	9	6	30	18	12	5	Absorption	w%	25	28	18	25	18	15		
	Gonflement	g%	35	24	17	11	34	23	15	25	12	8	5	Gonflement	g%	35	24	17	11	34	23	15	5	Gonflement	g%	29	28	17	25	19	18		
	Stabilité Hubbard Field	kg	40	100	160	190	40	90	135	50	100	190	365	Stabilité Hubbard Field	kg	40	100	160	190	40	90	135	365	Stabilité Hubbard Field	kg	100	90	215	215	80	145	260	
BASE CYCLIQUE 3028 P (Chlorhydrate) 0,1%	Teneur en eau	w%	7,9	7,1	5,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	Teneur en eau	w%	7,9	7,1	5,3	4,4	4,4	4,4	4,4	Teneur en eau	w%	7,9	8,0	7,3	9,1	7,5	5,8				
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	6	8	10	10	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10	10	Teneur en liant	b%	6	8	10	6	8	10			
	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,83	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,83	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	Densité sèche en T/m ³		1,92	1,84	1,85	1,90	1,85	1,81			
	Absorption	w%	25	22	12	7	(1)	7	18	(1)	21	18	7	Absorption	w%	25	22	12	7	18	(1)	7	Absorption	w%	25	28	18	(1)	18	7			
	Gonflement	g%	29	24	17	14	(1)	14	17	(1)	19	18	6	Gonflement	g%	29	24	17	14	17	(1)	6	Gonflement	g%	29	28	17	(1)	18	6			
	Stabilité Hubbard Field	kg	0	100	200	290	0	290	140	0	80	145	260	Stabilité Hubbard Field	kg	0	100	200	290	140	0	260	Stabilité Hubbard Field	kg	100	90	215	215	80	145	260		

(1) non mesurables - éprouvettes détériorées.

T A B L E A U II

SABLE - ARGILE

STABILISATION AU CUT-BACK DOPE EMULSIFIE E.K.2

AVEC ADDITION DE 0,1% D'HYDROPHOBANT

TENEUR EN EAU INITIALE DU SOL

HYDROPHOBANT	CARACTERISTIQUES DU MELANGE	TENEUR EN EAU INITIALE DU SOL												
		W1 = 15%				W2 = 25%				W3 = 35%				
STABIRAM 790 0,1 %	Teneur en eau	w%	8,0	6,5	6,8	4,5	8,6	8,8	8,5	6,3	8,7	8,7	6,0	4,6
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m3		1,98	1,96	1,92	1,93	1,97	1,91	1,87	1,88	1,97	1,90	1,93	1,90
	Absorption	w%	23	23	19	13	23	20	24	18	18	19	16	16
	Gonflement	g%	18	16	14	12	18	15	14	13	14	14	16	14
	Stabilité Hubbard Field	kg	100	110	150	170	95	145	155	140	140	140	175	190
DOPE 4266 (Milieu basique) 0,1 %	Teneur en eau	w%	12,8	11,2	11,4	9,7	11,6	7,3	9,5	6,6	8,8	6,7	4,6	4,9
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m3		1,86	1,82	1,78	1,78	1,89	1,92	1,85	1,89	1,94	1,95	1,95	1,90
	Absorption	w%	20	19	17	15	25	25	21	20	30	27	21	17
	Gonflement	g%	13	11	8	6	23	24	17	17	33	28	21	15
	Stabilité Hubbard Field	kg	100	130	190	240	60	70	120	150	40	75	120	180
BASE 3028 P (chlorhydrate) 0,1 %	Teneur en eau	w%	7,1	6,5	5,0	3,9	7,0	8,3	6,9	6,6	8,7	7,3	7,7	6,5
	Teneur en liant	b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m3		1,95	1,92	1,92	1,88	1,95	1,91	1,90	1,87	1,95	1,92	1,87	1,85
	Absorption	w%	29	26	24	21	30	25	22	17	25	26	21	17
	Gonflement	g%	30	22	20	17	26	23	19	14	24	24	17	12
	Stabilité Hubbard Field	kg	40	70	90	130	50	90	120	150	45	80	125	200

T A B L E A U III

SABLE - ARGILLE

STABILISATION A L'EMULSION BASIQUE SURSTABILISEE

ADDITIONNEE DE 0,1% d'HYDROPHOBANT

HYDROPHOBANT	CARACTERISTIQUES DU MELANGE	TENEUR EN EAU INITIALE DU SOL											
		W1 = 15%				W2 = 25%				W3 = 35%			
STABIRAM 790 0,1 %	Teneur en eau w%	8,8	8,3	7,2	6,3	6,4	3,8	2,7	2,3	6,3	3,0	3,2	2,2
	Teneur en liant b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m ³	1,91	1,85	1,83	1,80	1,96	1,92	1,91	1,88	1,96	1,91	1,93	1,89
	Absorption w%	19	16	18	17	19	22	24	21	22	24	18	19
	Gonflement g%	14	10	11	10	17	19	24	19	18	18	16	18
	Stabilité Hubbard Field kg	75	135	100	100	70	60	50	75	0	60	135	125
DOPE 4266 (Milieu Basique) 0,1 %	Teneur en eau w%	8,8	8,3	6,6	5,7	8,1	6,5	4,8	3,2	4,6	4,6	2,6	2,4
	Teneur en liant b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m ³	1,92	1,87	1,86	1,83	1,95	1,93	1,91	1,87	1,97	1,93	1,88	1,88
	Absorption w%	23	24	24	24	25	25	24	27	27	27	27	27
	Gonflement g%	21	21	20	20	24	25	25	28	27	27	27	27
	Stabilité Hubbard Field kg			très voisine de zéro		très voisine de zéro					Eprouvettes gravement détériorées au cours de l'imbibition		
BASE CYCLIQUE 3028 P (Chlorhydrate)	Teneur en eau w%	9,4	8,6	8,1	7,4	7,6	6,2	6,5	3,2	9,1	6,9	5,9	6,7
	Teneur en liant b%	6	8	10	12	6	8	10	12	6	8	10	12
	Densité sèche en T/m ³	1,90	1,85	1,81	1,77	1,91	1,88	1,87	1,85	1,92	1,90	1,88	1,77
	Absorption w%	19	19	19	10	22	20	19	18	19	19	18	15
	Gonflement g%	19	16	15	14	20	20	18	18	15	15	14	9
	Stabilité Hubbard Field kg	70	70	70	75	0	80	90	100	90	110	130	160

T A B L E A U I V

SABLE-ARGILE
STABILISATION AU LIANT EK.2 AVEC ADDITION
DE 0,2% D'HYDROPHOBANT

HYDROPHOBANT	CARACTERISTIQUES DU MELANGE	TENEUR EN LIANT EK.2				
		4	6	8	10	12
STABIRAM 790 0,2%	Teneur en eau w%	10,0	8,0	6,4	6,6	5,5
	Densité sèche en T/m ³	1,96	1,95	1,94	1,89	1,88
	Absorption w%	14,6	13,9	12,6	9,2	3,2
	Gonflement g%	6	7	6	4,5	2,3
	Stabilité Hubbard Field kg	490	560	615	1405	2350
DOPE 4266 (milieu ba- sique) 0,2%	Teneur en eau w%	11,4	12,0	10,6	8,4	8,6
	Densité sèche en T/m ³	1,92	1,87	1,86	1,86	1,82
	Absorption w%	16,0	15,0	11,5	8,5	2,6
	Gonflement g%	8	8	4,5	3,8	1,5
	Stabilité Hubbard Field kg	400	590	1000	1400	2400
BASE CYCLI- QUE 3028 P (chlorhydrate	Teneur en eau w%	11,7	8,6	8,0	6,5	2,5
	Densité sèche en T/m ³	1,94	1,96	1,95	1,92	1,90
	Absorption w%)	Eprouvettes détériorées			
	Gonflement g %)				
	Stabilité Hubbard Field kg	Très faible				

1.2.4 - ARGILE SABLEUSE

1 - DESCRIPTION DU MATERIAU

Courbe granulométrique

La courbe granulométrique du mélange de 25% de sable de dune de Dakar et de 75% d'argile latéritique d'Abidjan (que nous avons baptisé argile sableuse) est reportée sur la figure 47.

On remarquera qu'il y a en moyenne 90% d'éléments passant au tamis de 0,42 mm et 55 à 60% d'éléments passant au tamis de 0,074mm.

Limites d'Atterberg

Limite de liquidité LL = 48%

Limite de plasticité LP = 26,5%

Indice de plasticité IP = 21,5%

Classification routière H.R.B.

Le matériau appartient à la classe A-7-6

Poids spécifique

Le poids spécifique a été trouvé égal à 2,87 T/m³

2 - STABILISATION MECANIQUE

Essais de compactage Proctor Modifié

Avec les échantillons broyés et mélangés mécaniquement, nous avons obtenu les caractéristiques Proctor suivantes :

Densité sèche maximale 1,80 T/m³

Teneur en eau optimale 18,5%.

Avec les échantillons préparés plus sommairement (cas des mélanges obtenus par malaxage sur le chantier) nous avons une densité un peu plus faible :

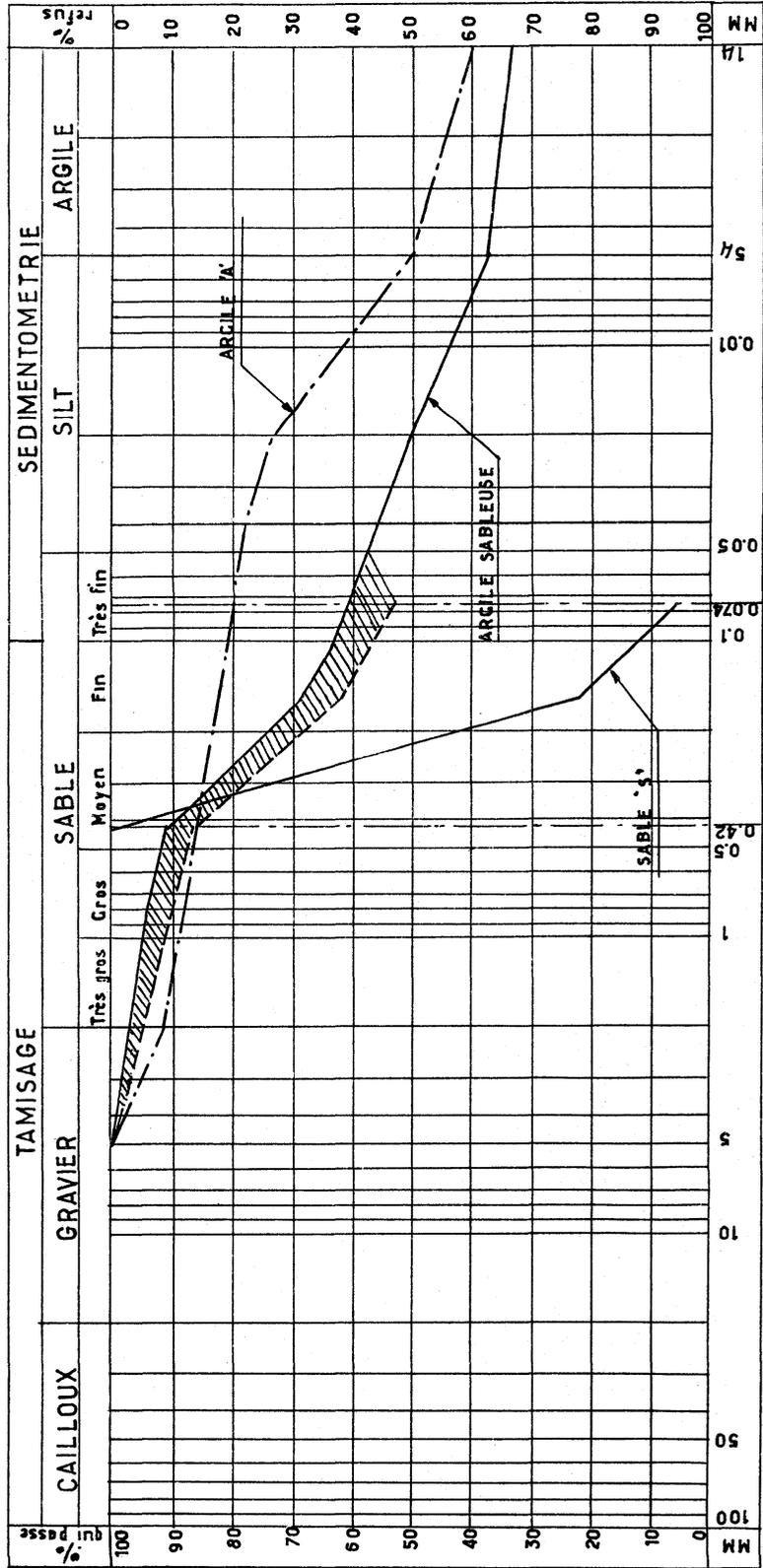
Densité sèche maximale 1,77 T/m³

Teneur en eau optimale 20%

Les différences dues aux deux modes de préparation ne sont pas négligeables mais elles sont nettement moins accentuées que pour le sable argileux.

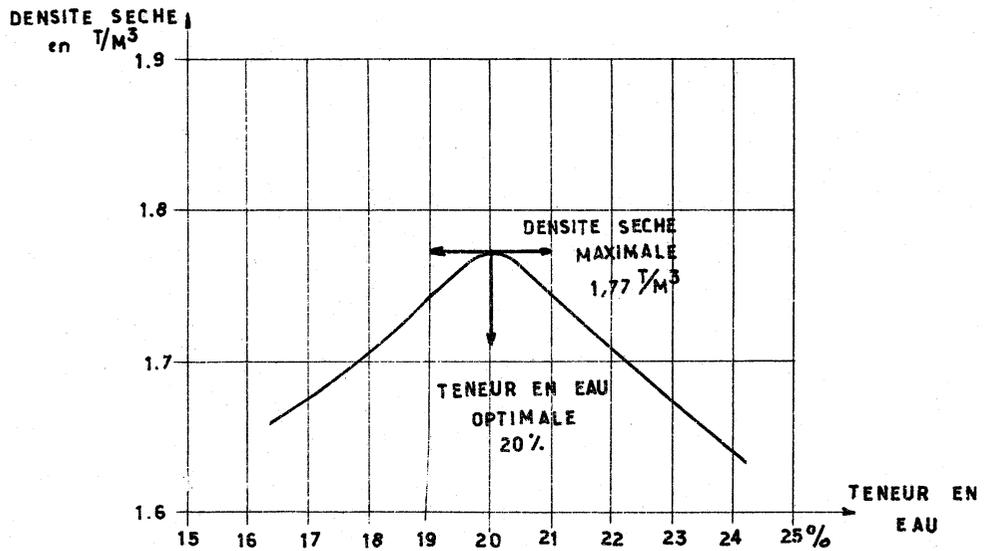
ARGILE SABLEUSE

COURBES GRANULOMETRIQUES DES CONSTITUANTS ET DU MELANGE
(75% Argile + 25% Sable)



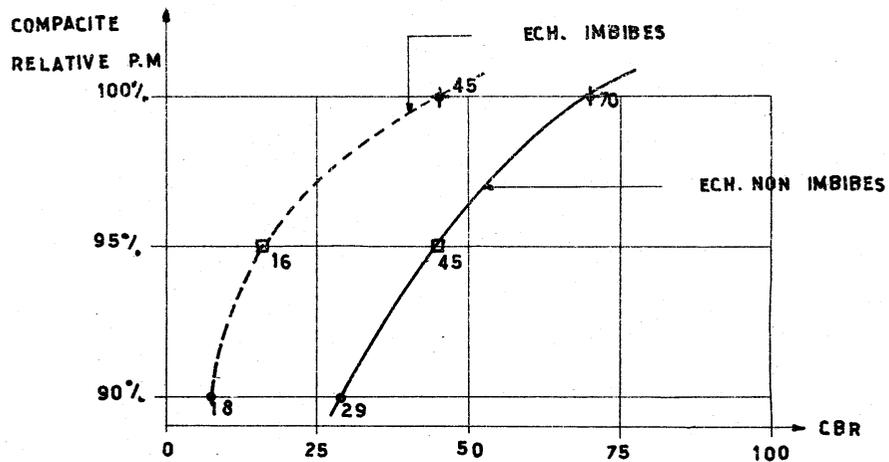
ARGILE - SABLEUSE

ESSAI PROCTOR MODIFIE



INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR L'INDICE

CBR DE L'ARGILE SABLEUSE



A-1-2-Fig 46

Essais de portance C.B.R.

Les indices C.B.R. obtenus en laboratoire sont les suivants :

a) Cas des sols naturels (broyage et malaxage très poussés)

COMPACTAGE	C . B . R .	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% P.M	60	20
95% P.M	55	7
90% P.M	40	5

b) Cas des mélanges de chantier (broyage et malaxage moins poussés)

COMPACTAGE	C . B . R .	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% P.M	70	45
95% P.M	45	16
90% P.M	30	8

Les valeurs ci-dessus mettent en évidence la chute très importante de la portance par suite de l'imbibition.

Ceci est dû au caractère très argileux du sol qui appartient à la classe A-7-6. L'imbibition s'accompagne d'ailleurs d'un gonflement de l'ordre de 2%.

On remarquera également que les C.B.R. sont plus élevés dans le cas des mélanges sommairement broyés. Cette préparation laisse en effet subsister des nodules argileux très compacts qui ne se ramollissent que très lentement à l'eau et qui constituent une sorte d'ossature dans le sol. Ceci améliore le frottement interne et, par conséquent, la portance du matériau.

Essais triaxiaux

a) Essais triaxiaux lents drainés sur sol naturel (cas de broyage et du malaxage très poussés).

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	φ	cohésion en kg/cm ²	φ	cohésion en kg/cm ²
100% P.M	31°	4,2	24°	3
95% P.M	27°	4,0	22°	2
90% P.M	27°	2,2	19°	0,9

- b) Essais triaxiaux rapides sur mélange chantier (broyage et malaxage moins poussés).

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
	ψ	cohésion en kg/cm ²	ψ	cohésion en kg/cm ²
100% P.M	9°	5,7	9°	3,8
95% P.M	15°	4,2	11°	2
90% P.M	17°	3,1	12°	0,8

On notera que :

- pour les essais lents drainés, la cohésion et l'angle de frottement interne diminuent tous les deux lorsque le compactage, et par conséquent, la densité sèche du matériau diminue.
- pour les essais rapides, la cohésion diminue également lorsque la compacité baisse, par contre, l'angle de frottement interne augmente. Ceci est dû à l'apparition de pressions interstitielles qui sont évidemment plus importantes dans le matériau le plus compact qui possède le moins de vides et un degré de saturation plus élevé.

Essais oedométriques

Le coefficient de compressibilité C_c mesuré à l'oedomètre est égal à 130.

Le coefficient de perméabilité est voisin de $0,5 \cdot 10^{-4}$ cm/s, ce qui correspond à un sol déjà très imperméable.

3 - STABILISATION A LA CHAUX

Limites d'Atterberg

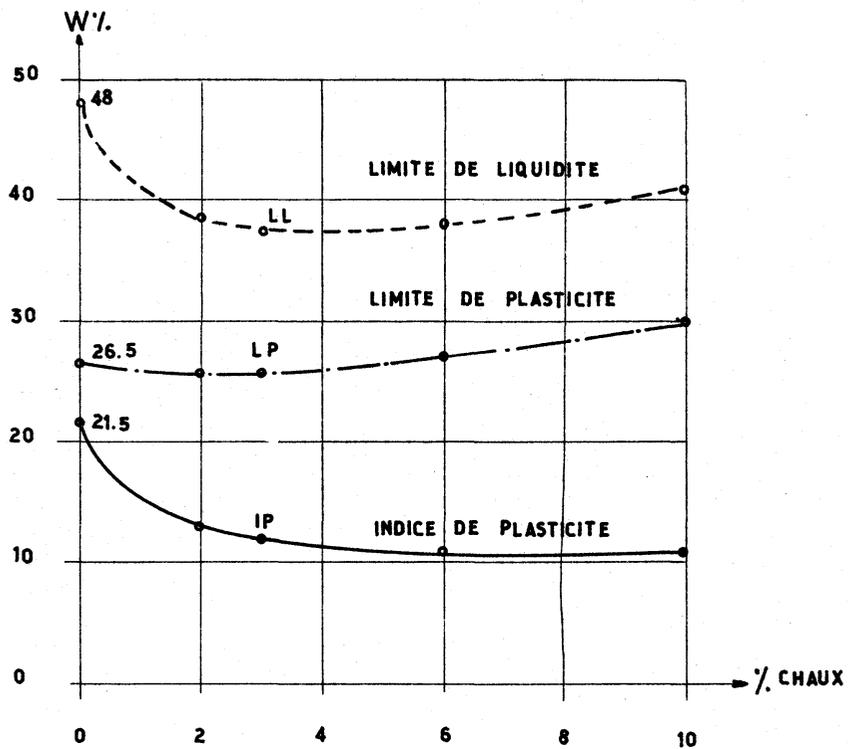
L'addition de chaux à l'argile sableuse abaisse l'indice de plasticité. On voit sur la figure 49 que la diminution de IP est particulièrement sensible lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 3%. L'indice de plasticité tombe en effet dans ces conditions, de 21,5 à 12%. Au delà de 3% de chaux, l'indice ne varie pratiquement plus.

Essai de compactage Proctor Modifié

L'adjonction de chaux à l'argile sableuse augmente la teneur en eau optimale de compactage et diminue la densité maximale Proctor Modifié en raison de l'excès de fines introduit dans un mélange déjà riche en éléments très fins.

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
LES LIMITES D'ATTERBERG DE L'ARGILE SABLEUSE



A_1-2 . Fig 49

Les valeurs obtenues aux essais sont les suivantes :

% d'adjonction de chaux	Densité sèche maximale Proctor en T/m ³	Teneur en eau optimale de compactage
0%	1,78	20%
2,5%	1,72	20%
5,0%	1,73	20,2%
7,5%	1,73	20,5%

Essais de portance C.B.R.

Les résultats obtenus sur éprouvettes imbibées et non imbibées ont été reportés sur les fig.50 et 51.

On constate une amélioration sensible des indices C.B.R. pour des additions de chaux comprises entre 2,5 et 5%. Au delà de cette valeur, les gains de portance sont faibles ou nuls.

Les essais après imbibition sont plus défavorables mais l'allure des courbes est la même que pour les moulages non imbibés.

Pour un compactage moyen de 95% P.M et une argile sableuse amendée avec 5% de chaux, nous obtenons un C.B.R. de 105% sans imbibition (à 3 jours d'âge) et de 70% avec imbibition (à 7 jours d'âge).

Essais triaxiaux rapides

Les variations de l'angle de frottement apparent et de la cohésion du matériau avec le dosage en chaux, sont reportées sur les figures 52 et 53.

Les variations de compression simple qui en résultent sont représentées sur la figure 54.

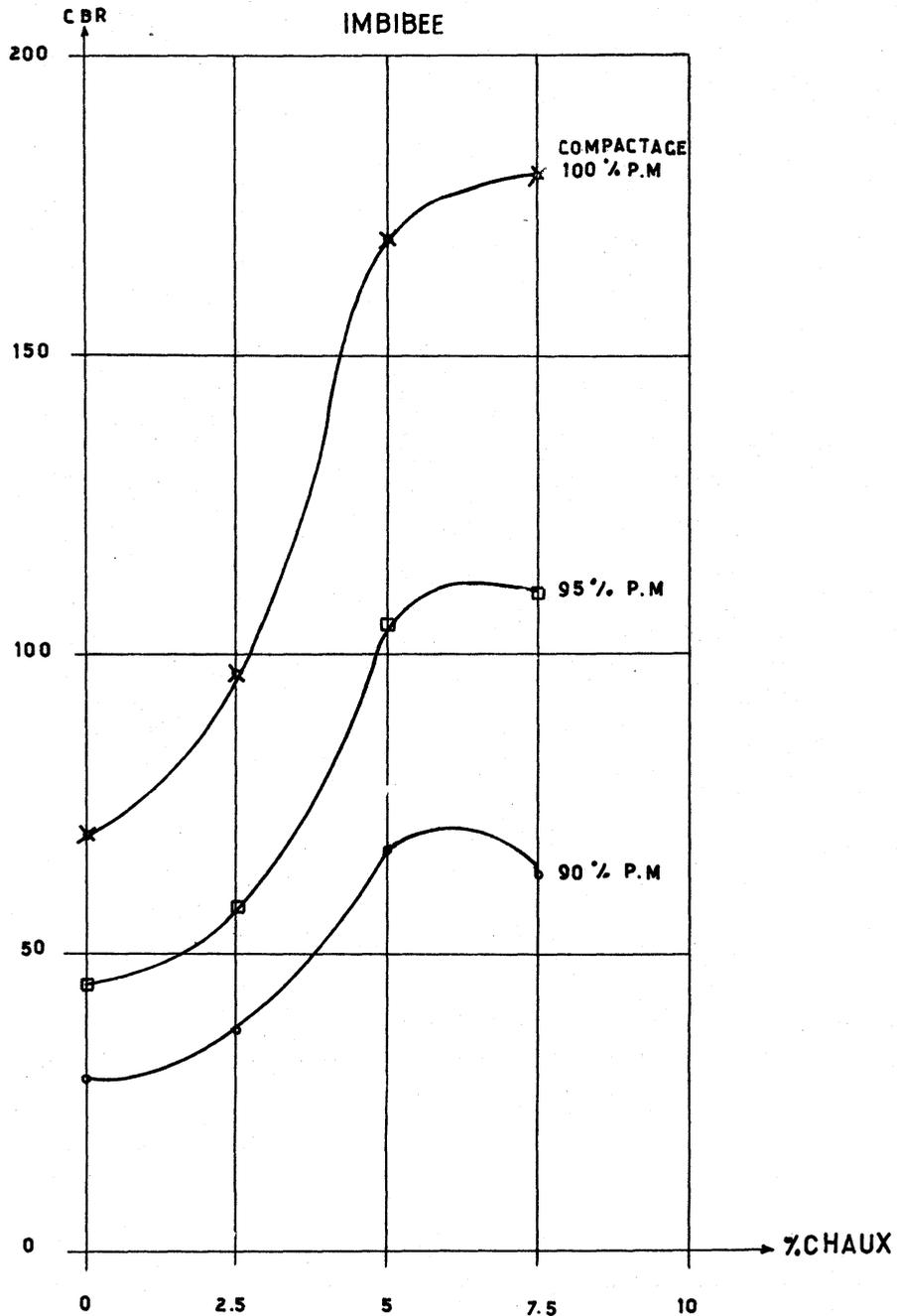
Les éprouvettes non imbibées ont des résistances qui croissent nettement dès que les pourcentages de chaux dépassent 2%. Pour une compacité de 95% P.M, la résistance passe de 11 kg/cm² sans chaux à 12 kg/cm² avec 2% de chaux, puis à 18 kg/cm² avec 4% de chaux et 20 kg/cm² avec 6% de chaux.

Pour les éprouvettes imbibées, l'amélioration de résistance apportée par la chaux est moins nette. A la compacité de 95% P.M la résistance passe de 5 kg/cm² sans chaux à 8 kg/cm² avec 6% de chaux.

Le gonflement du matériau à l'imbibition reste important (0,4 à 0,8%) mais il est tout de même moins important que celui de l'argile sableuse non amendée qui gonflait de 2%.

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
L'INDICE CBR DE L'ARGILE SABLEUSE NON
IMBIBEE

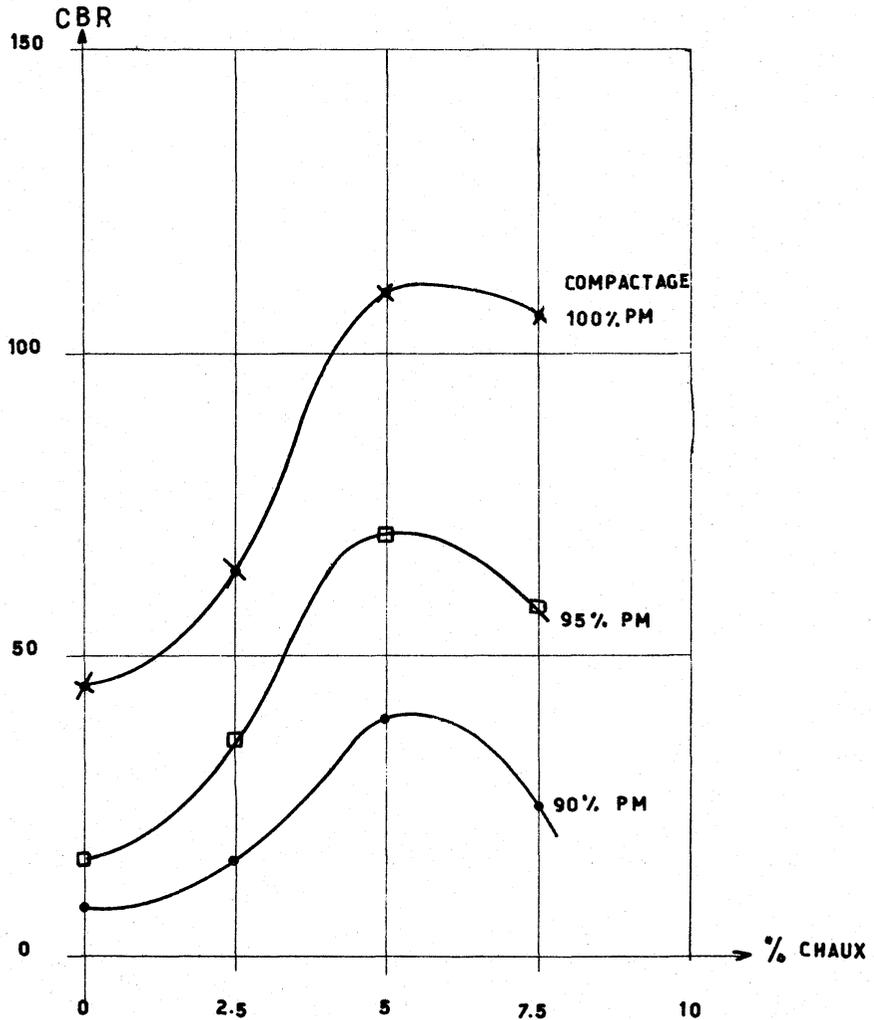


A .1-2.Fig 50

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
L'INDICE CBR DE L'ARGILE SABLEUSE IMBIBEE

JR. LAMOUR

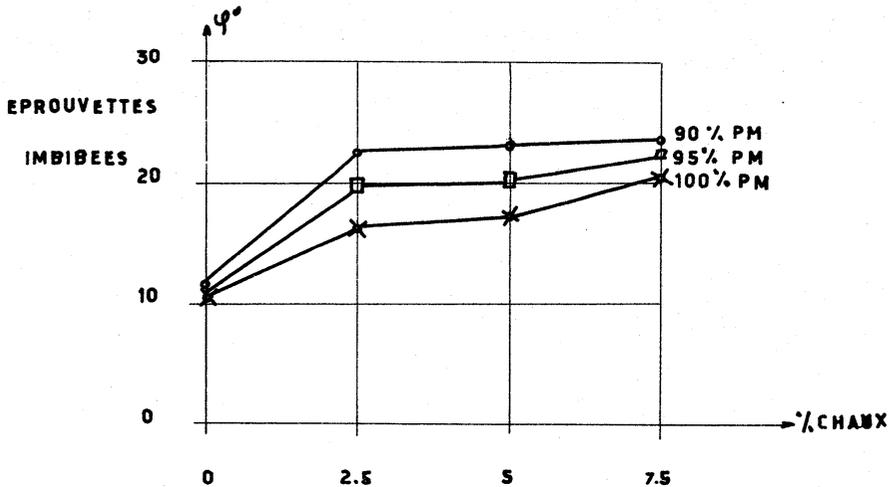
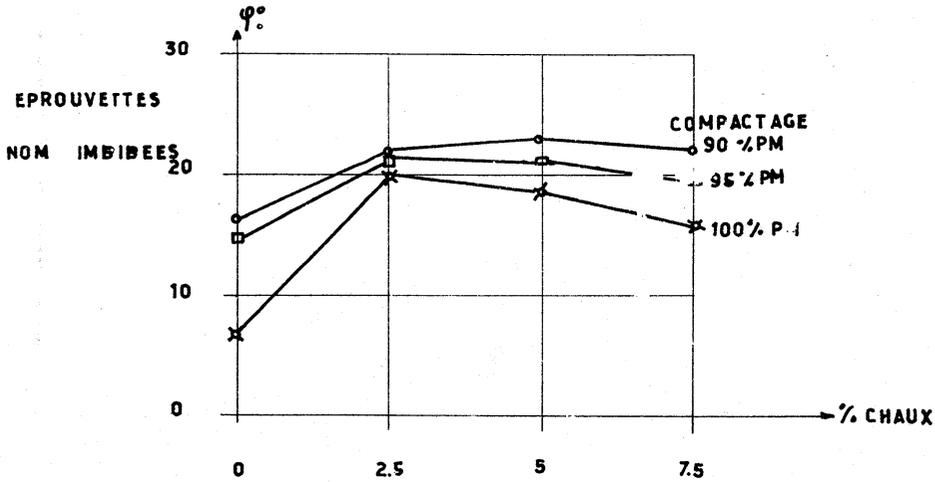


A.1.2. Fig 51

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE APPARENT
DE L'ARGILE SABLEUSE

J.P. LAMOUR

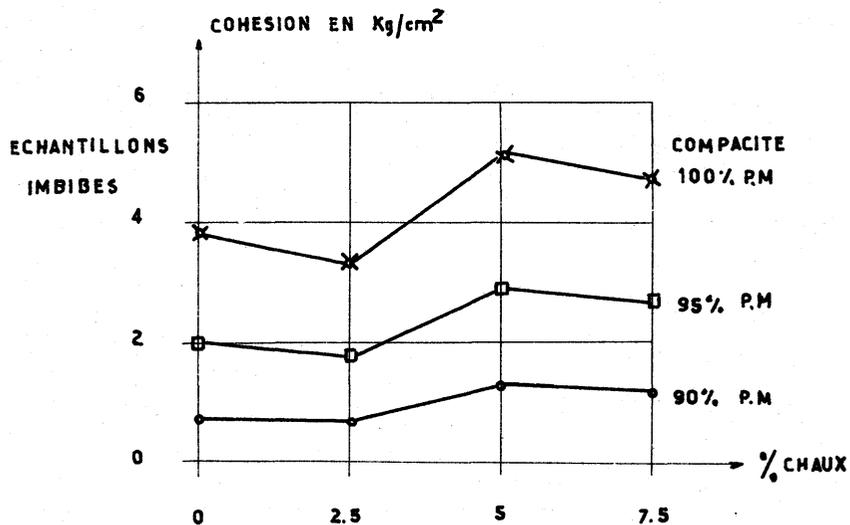
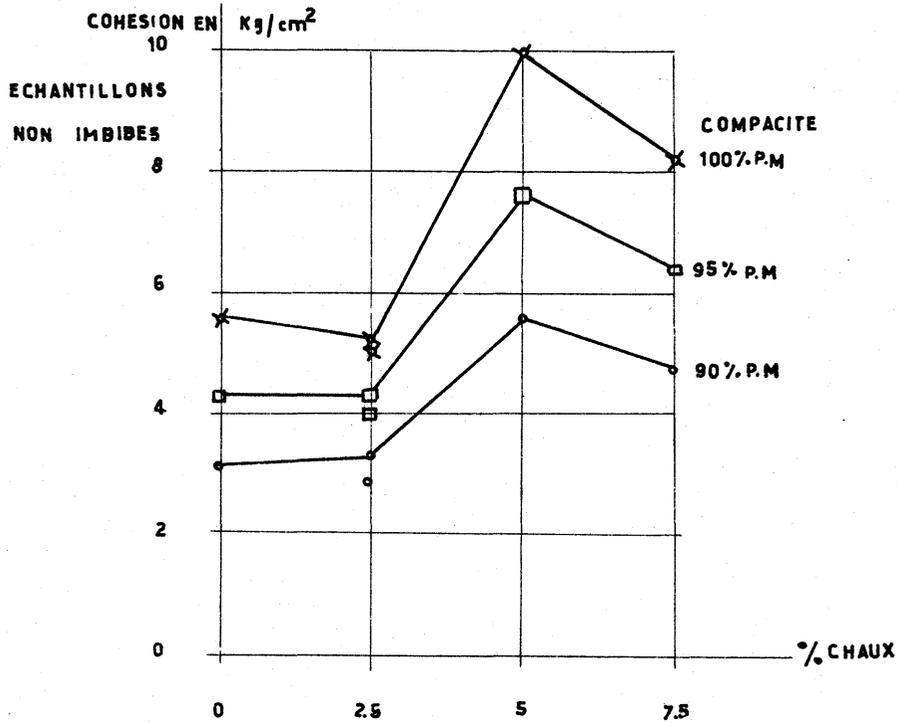


A - 1.2 - Fig 52

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX
SUR LA COHESION DE L'ARGILE SABLEUSE

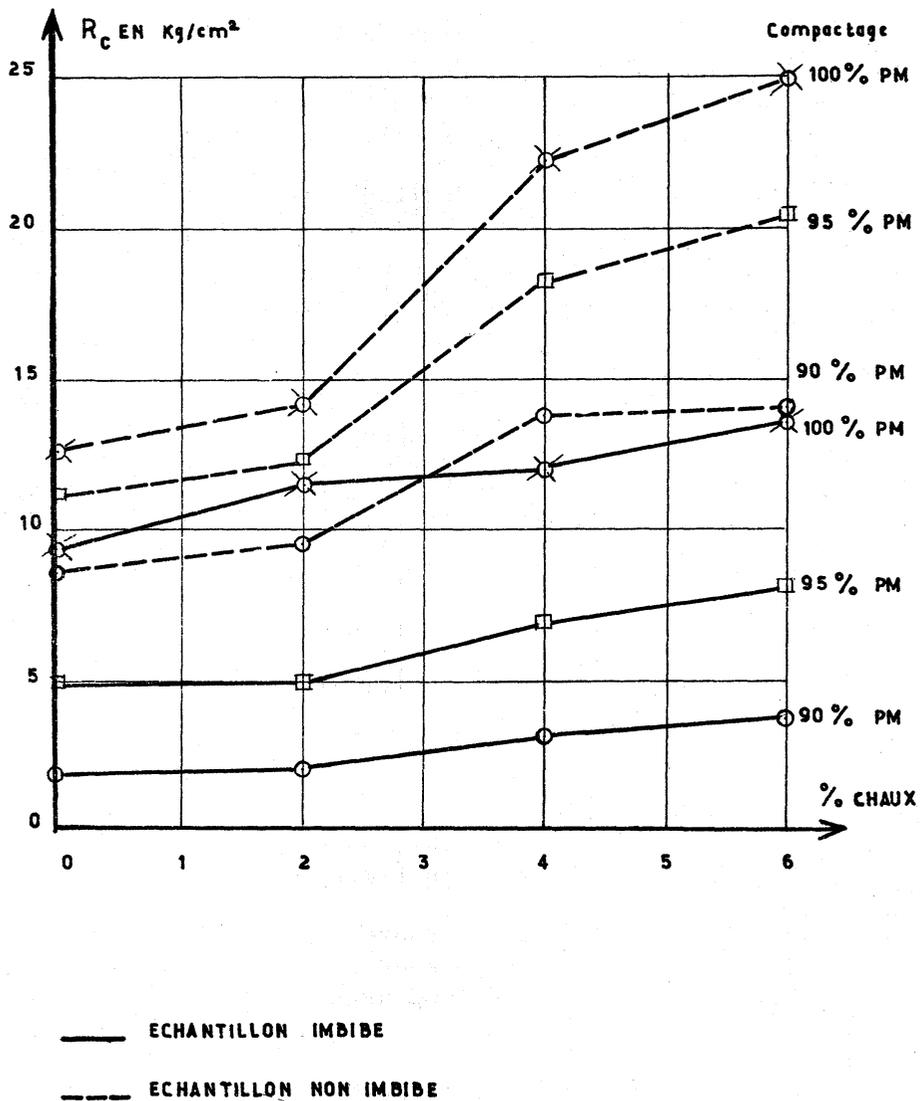
J.P. LAMOUR



A-4.2 - Fig 53

ARGILE SABLEUSE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION
DU % D'AMENDEMENT A LA CHAUX ET DU COMPACTAGE



A.1.2 Fig. 54

Essais oedométriques

Les valeurs obtenues pour le coefficient de compressibilité sont les suivantes :

% de chaux	0	2%	4%	6%	8%
Coefficient de Compressibilité	131	190	490	590	520

La compressibilité du sol diminue donc très sensiblement dès que le dosage en chaux dépasse 4%.

De son côté, la perméabilité augmente avec l'amendement passant de $0,5 \times 10^{-4}$ cm/s à des valeurs comprises entre $0,3 \times 10^{-6}$ et 1×10^{-6} cm/s

4 - STABILISATION AU CIMENT

Limites d'Atterberg

De 21,5% sans ciment, l'indice de plasticité tombe à 11% avec 4% de ciment. Au delà de 4% de ciment, on ne constate plus aucun abaissement de l'indice. Au contraire, l'excès de fines provoque une augmentation de la valeur de IP.

Essais de compactage Proctor Modifié

L'addition de ciment n'a que peu d'influence sur les caractéristiques Proctor du mélange. On obtient en effet, les valeurs suivantes :

% d'addition de ciment	Densité sèche maximale en T/m ³	Teneur en eau optimale
0%	1,78	20%
2,5%	1,77	19,5%
5%	1,77	19,5%
7,5%	1,78	19,4%

Essais de portance

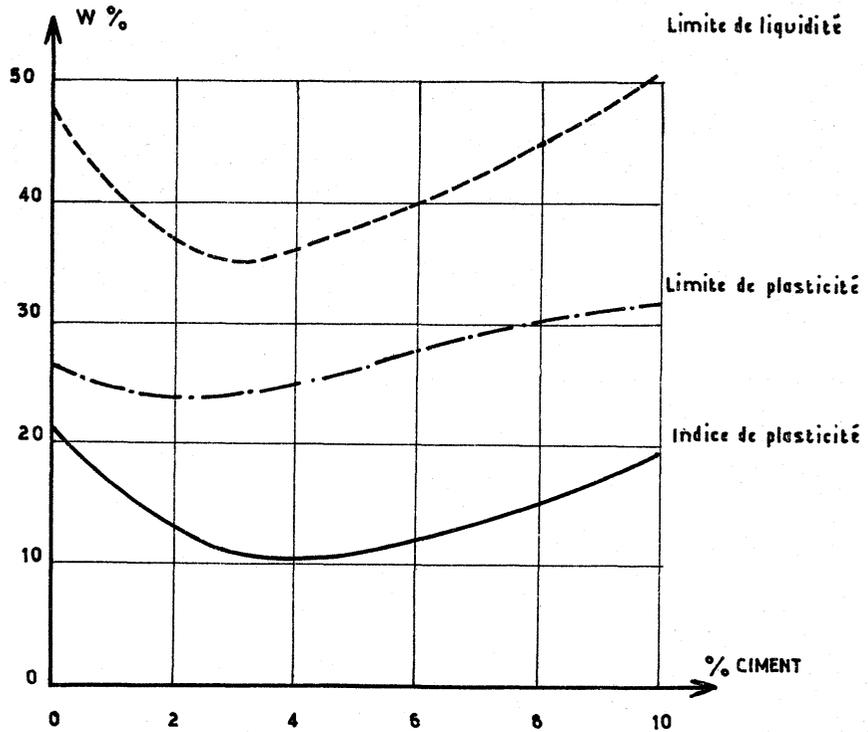
Les valeurs des indices C.B.R., en fonction du pourcentage de ciment sont représentées sur les figures 56 et 57.

On remarquera que sur les éprouvettes non imbibées, la portance augmente régulièrement avec le pourcentage de ciment. A la compacité de 95% P.M on a un C.B.R. de 100% avec 3% de ciment et 200% avec 5 à 6% de ciment.

Avec les moulages imbibés, le gain de portance n'est sensible que pour des dosages supérieurs à 2,5%. Aux dosages élevés (8 à 10%) les différences entre C.B.R. imbibés et non imbibés deviennent relativement faibles.

ARGILE SABLEUSE

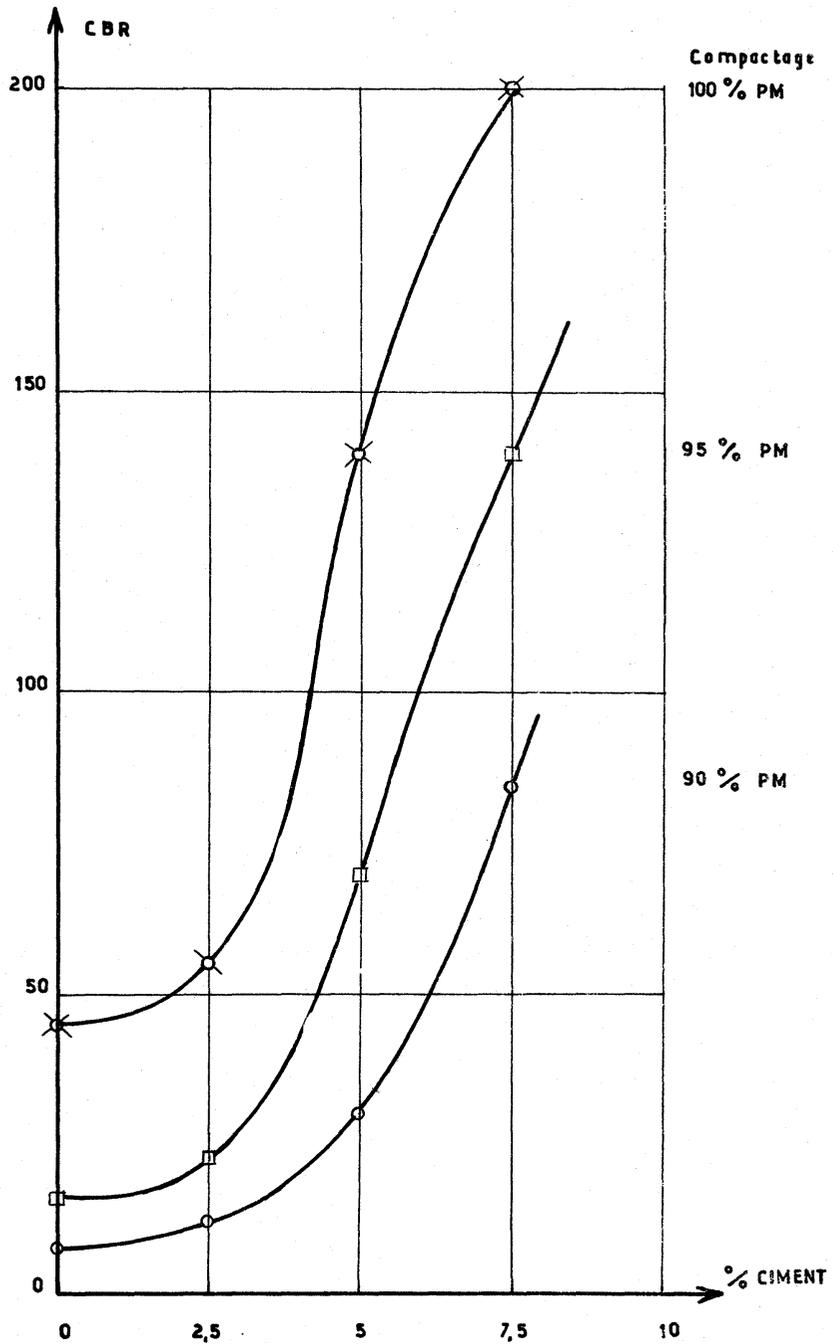
INFLUENCE DE L'ADDITON DE CIMENT SUR LES LIMITES
D'ATTERBERG DE L'ARGILE SABLEUSE



A.1.2 Fig.55

ARGILE SABLEUSE

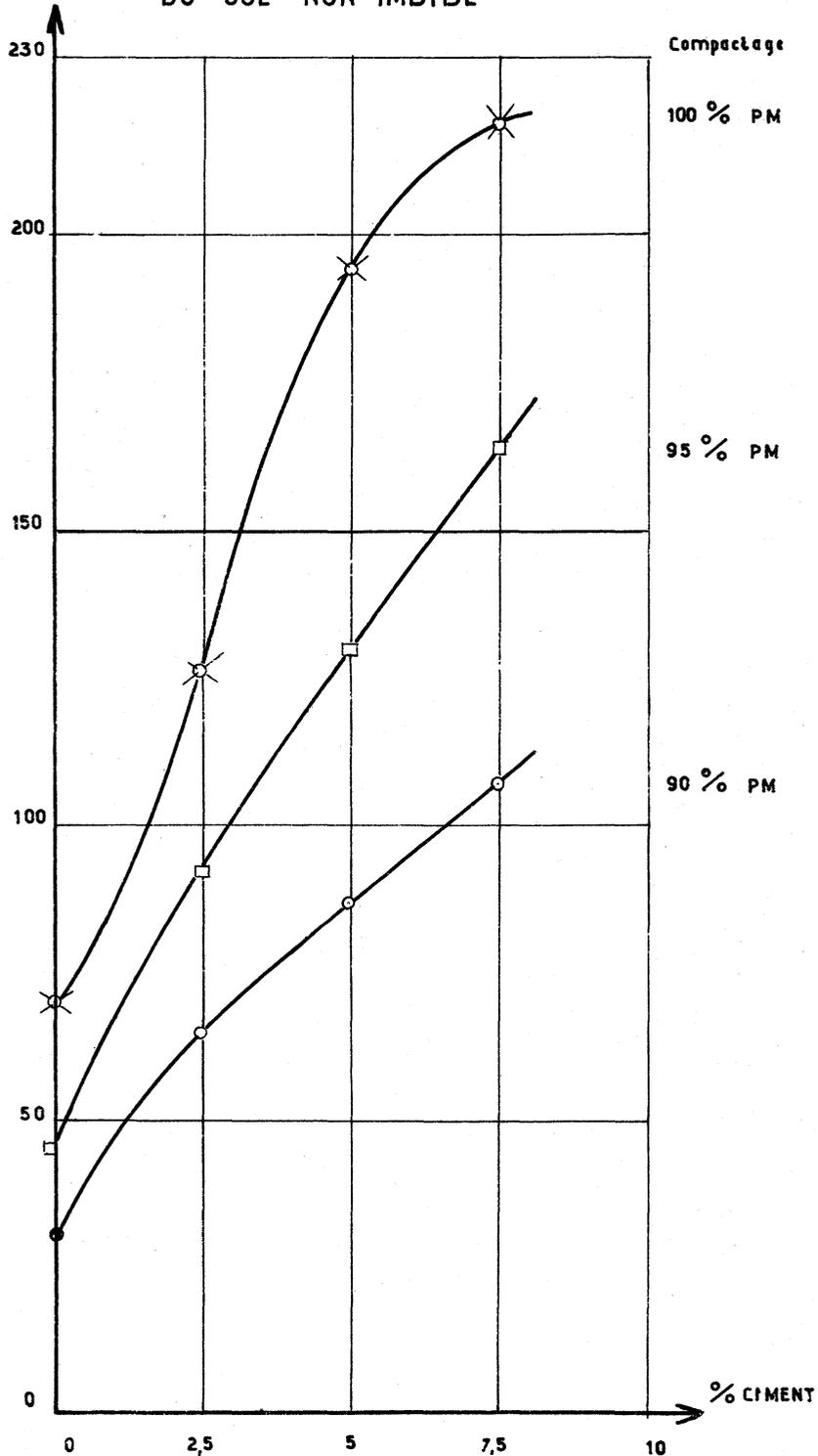
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LE CBR
DU SOL IMBIBE



A.1.2 Fig.56

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LE CBR
DU SOL NON IMBIBE



A.1.2 Fig.57

A la compacité de 95% et après imbibition, il faut 4% de ciment pour obtenir un C.B.R. de 100% et 7,5% de ciment pour obtenir un C.B.R. de 200%.

Essais triaxiaux

Les variations de l'angle de frottement apparent et de la cohésion de l'argile sableuse stabilisée au ciment, sont représentées sur les figures 58 et 59.

La variation de résistance à la compression simple qui en résulte est représentée sur la figure 60.

On remarquera que les résistances des éprouvettes non imbibées augmentent régulièrement avec le pourcentage de ciment. A la compacité de 95% P.M, elles passent d'une moyenne de 10 kg/cm² sans ciment à 23 kg/cm² avec 5% de ciment. Cette dernière valeur peut être considérée comme très bonne.

Après imbibition, le gain de résistance par addition de ciment est nettement plus faible.

A la compacité de 95% P.M, la résistance passe seulement de 5 kg/cm² sans ciment à 7,5 kg/cm² avec 5% de ciment. Le ciment n'arrive donc pas à s'opposer au gonflement et au ramollissement de l'argile sableuse par imbibition.

Essais oedométriques

Les valeurs du coefficient de compressibilité C_c sont les suivantes :

% d'addition de ciment	3%	5%	7,5%
Coefficient C_c	180	520	690

La compressibilité du matériau diminue donc considérablement dès que le dosage en liant dépasse 5%.

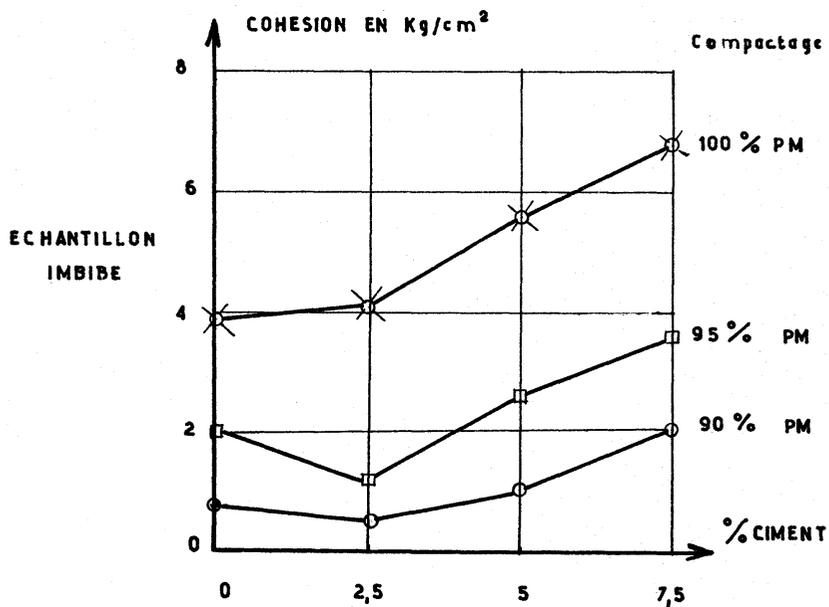
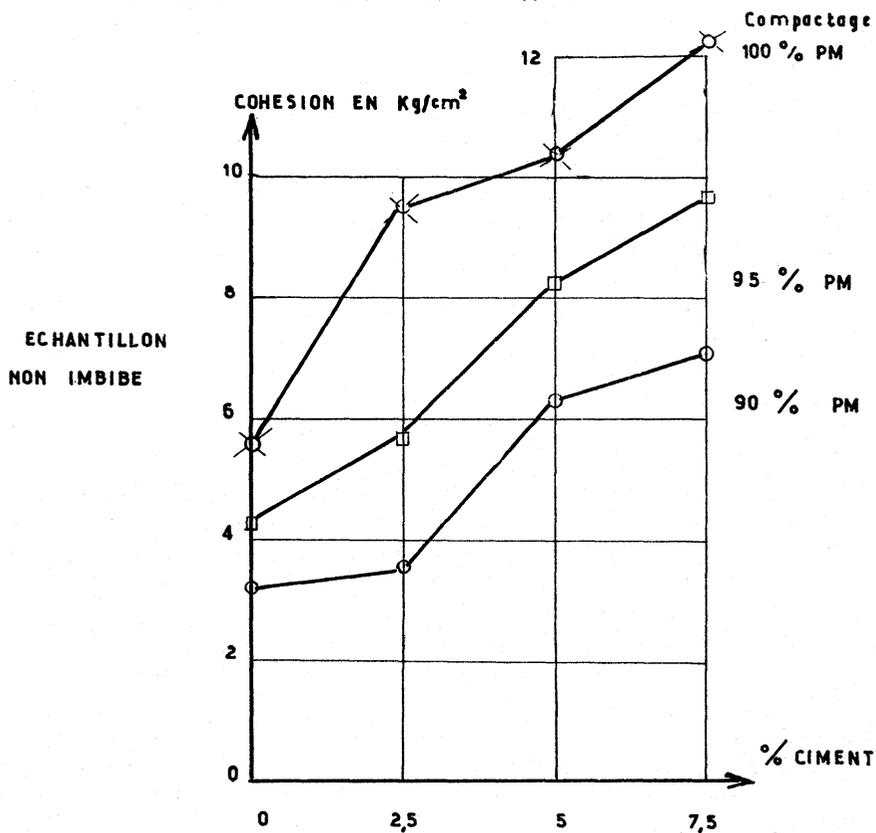
De son côté, la perméabilité augmente légèrement, le coefficient K passant de $0,5 \times 10^{-4}$ cm/s à 10^{-4} cm/s

CONCLUSIONS :

Malgré l'addition de chaux ou de ciment, l'argile sableuse conserve une plasticité élevée. La stabilisation mécanique, l'amendement à la chaux et surtout au ciment, améliorent les qualités de portance du sol mais, en raison de son caractère argileux, il reste très sensible à une augmentation de la teneur en eau et subit des variations de volume importantes en cas d'imbibition. Chaque fois que cela sera possible, il y aura intérêt à effectuer sur le chantier, une correction granulométrique avec apports de matériaux sableux et également d'éléments graveleux destinés à donner un squelette au sol.

ARGILE SABLEUSE

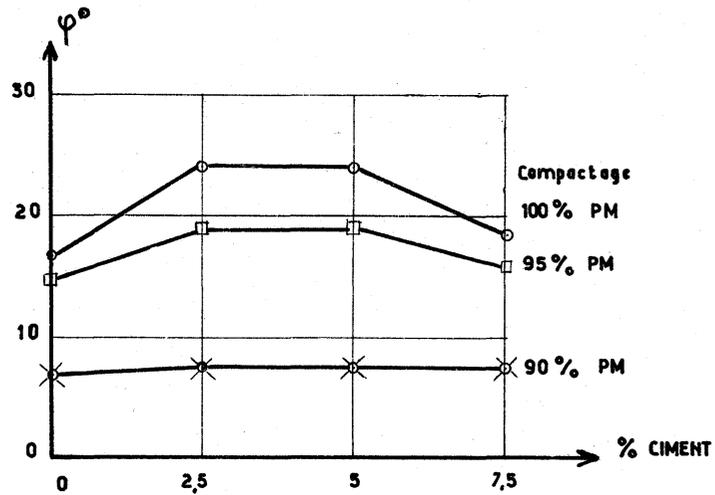
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LA
COHESION DE L'ARGILE SABLEUSE



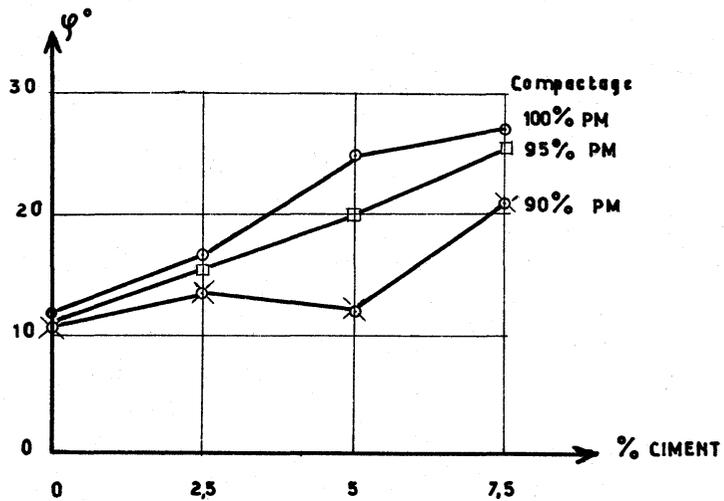
A.1.2 Fig.58

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT APPARENT DE L'ARGILE SABLEUSE



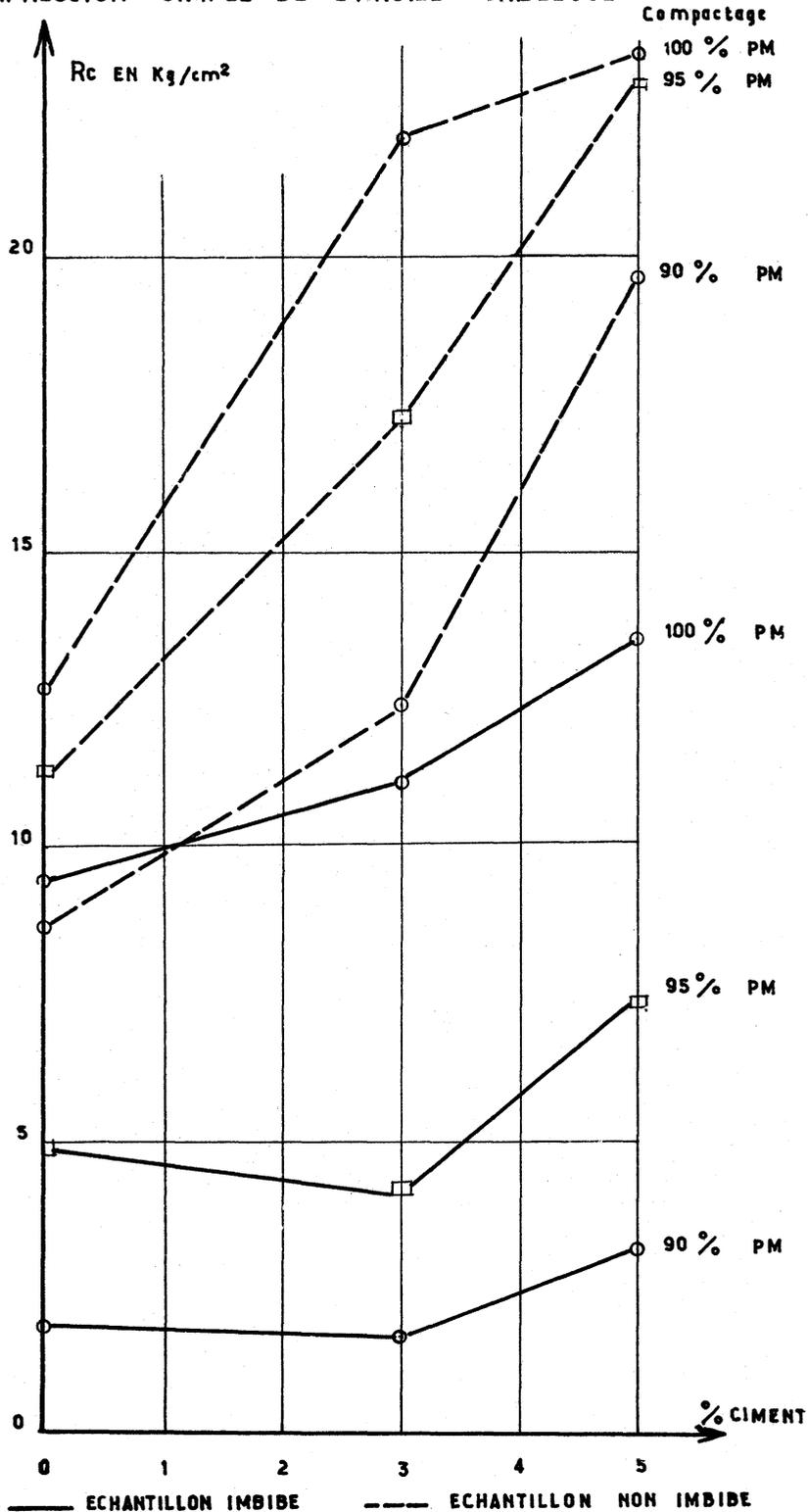
Echantillons non imbibés



Echantillons imbibés

ARGILE SABLEUSE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LA RESISTANCE A
LA COMPRESSION SIMPLE DE L'ARGILE SABLEUSE



A.1.2 Fig.60

Les essais effectués sur le mélange sable-argile avaient montré que les émulsions donnaient des résultats très médiocres et que le malaxage avec le cut-back 10/15 était difficile. Pour l'argile sableuse dont la stabilisation est encore plus difficile, nous n'avons donc, à priori, retenu qu'un seul liant hydrocarboné : le cut-back dopé et émulsifié E.K.2 avec utilisation d'un hydrophobant (Stabiram 790 ou Dope 4266).

Les essais Hubbard Field avec 0,2 et 0,3% d'hydrophobant n'ont donné aucun résultat après imbibition, quel que soit le dosage en E.K.2. Nous avons donc poursuivi l'étude avec des dosages plus élevés d'hydrophobant (0,4 et 0,5% du poids du sol). Malgré cela aucune éprouvette Hubbard Field n'a résisté à l'épreuve de l'imbibition. Le gonflement était rapide et très important. Nous avons donc renoncé à la stabilisation de l'argile sableuse aux liants hydrocarbonés.

1.2.5 - ARGILE LATÉRITIQUE D'ABIDJAN

1 - DESCRIPTION DU MATERIAU

L'argile d'Abidjan contient beaucoup de fines mais ne renferme aucun élément supérieur à 5 mm. C'est un matériau latéritique incomplètement évolué qui ne comporte pas de nodules pisolithiques. La stabilisation naturelle par floculation d'hydrate double d'alumine et de fer (latérisation) a cependant déjà eu lieu.

Analyse granulométrique

Divers échantillons d'argile broyée sommairement et mis à déliter dans l'eau pendant 24 heures, ont été soumis à l'analyse granulométrique. Le fuseau obtenu a été reporté sur la figure 61. Il y a en moyenne 85% d'éléments passant au tamis de 0,074 mm et 50% d'éléments inférieurs à 5 microns.

La même argile broyée par voie mécanique donne 100% d'éléments passant au tamis de 0,4 mm et 95% passant au tamis de 0,074 mm.

Limites d'Atterberg

Limite de liquidité LL = 65%

Limite de plasticité LP = 34%

Indice de plasticité IP = 31%

La limite de retrait est de 29%.

Classification routière H.R.B.

Le matériau appartient à la classe A-7-5

Poids spécifique

Le poids spécifique a été trouvé égal à 2,94 T/m³.

2 - STABILISATION MECANIQUE

Essais de compactage Proctor Modifié.

Avec l'argile finement broyée, nous avons obtenu les caractéristiques Proctor suivantes :

Densité sèche maximale : 1,61 T/m³

Teneur en eau optimale : 26%

Avec l'argile broyée plus sommairement, les valeurs obtenues sont les suivantes :

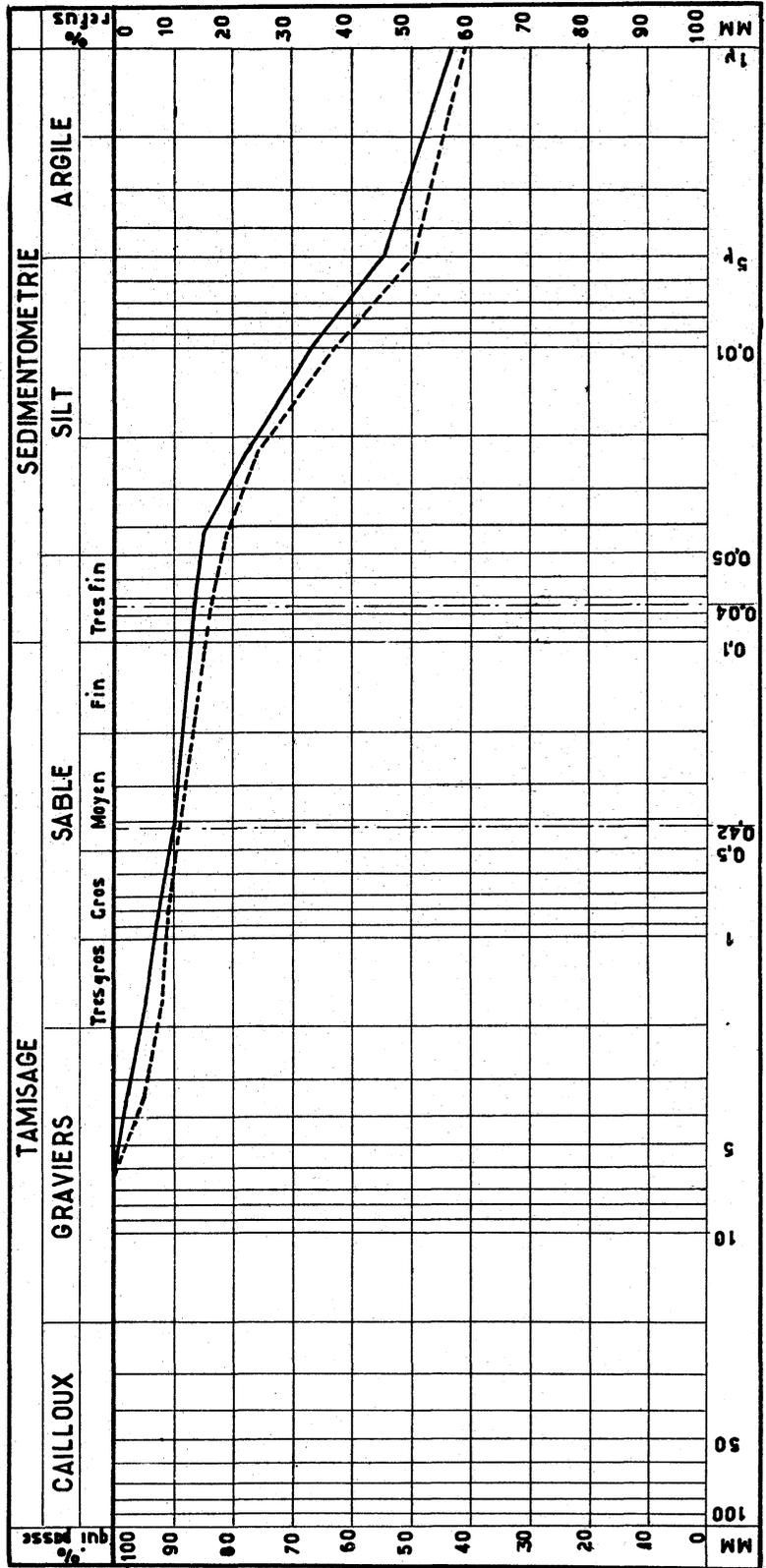
Densité sèche maximale : 1,58 T/m³

Teneur en eau optimale : 27%

La courbe Proctor a une allure assez plate; il n'est donc pas nécessaire sur le chantier, de respecter avec trop de rigueur la teneur en eau optimale pour avoir un bon compactage.

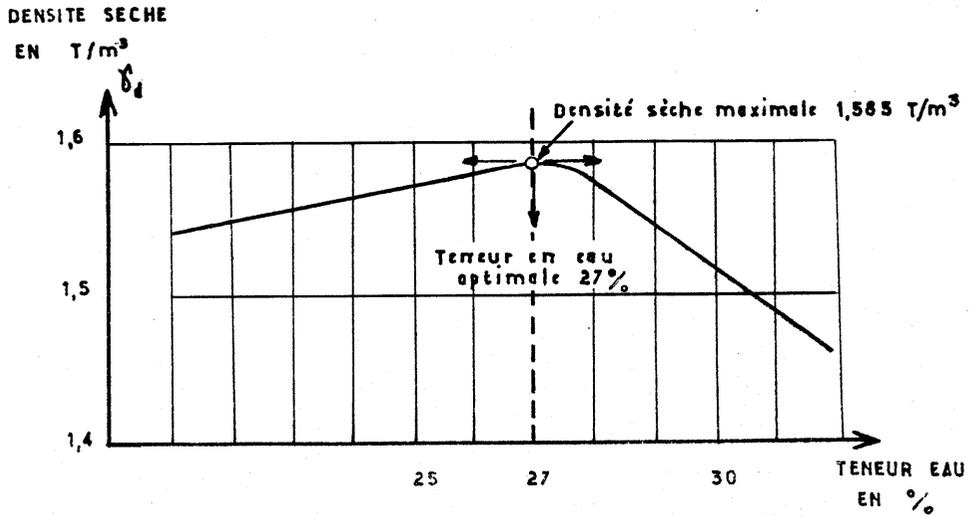
ARGILE

FUSEAU DETERMINE PAR LES COURBES GRANULOMETRIQUES
EXTREMES

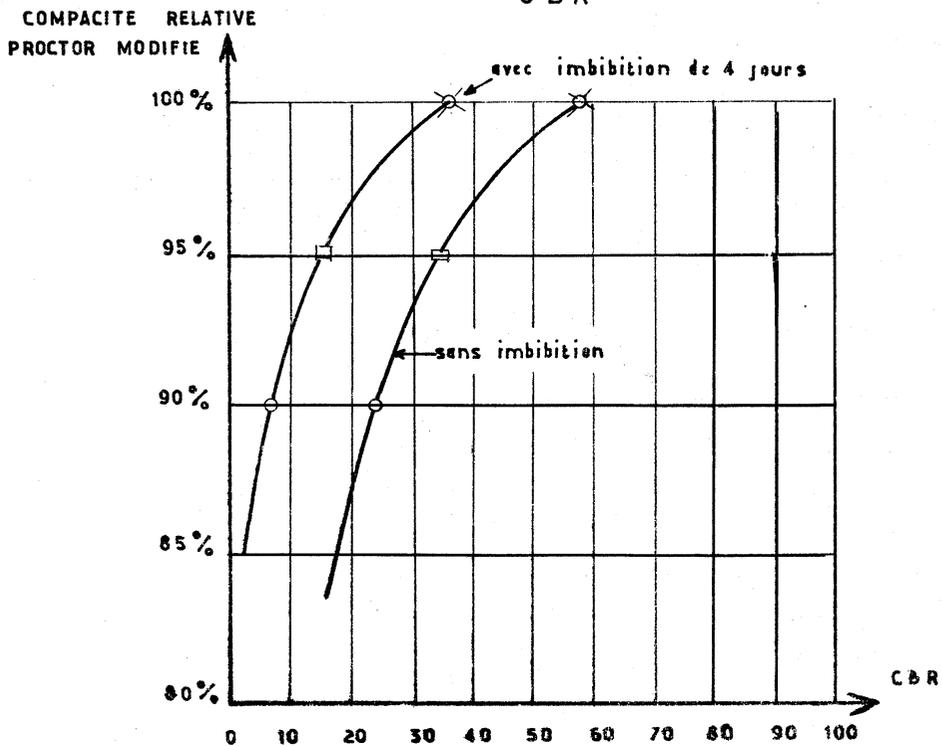


ARGILE

COURBE PROCTOR MODIFIE



INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR L'INDICE CBR



A.1.2 Fig.62

Essais de portance C.B.R.

Les indices C.B.R. obtenus en laboratoire sont les suivants :

a) cas de l'argile finement broyée :

DEGRE DE COMPACTAGE	C. B. R.	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% P.M.	57	13
95% P.M.	38	4
90% P.M.	28	2

b) cas de l'argile broyée plus sommairement

DEGRE DE COMPACTAGE	C. B. R.	
	Echantillons non imbibés	Echantillons imbibés
100% P.M.	57	36
95% P.M.	35	16
90% P.M.	24	7

On constate une chute de portance très importante après imbibition surtout pour les faibles compacités des sols. Le mode de préparation de l'argile est sans importance pour les moulages non soumis à l'immersion. Pour les C.B.R. après imbibition, on constate par contre, des portances nettement plus faibles avec l'argile la plus fine.

Essais triaxiaux

a) Essais triaxiaux lents drainés sur argile finement broyée :

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons imbibés	
		cohésion en kg/cm ²		cohésion en kg/cm ²
100% P.M.	22°	4,9	15°	3,8
95% P.M.	22°	4,7	13°	1,8
90% P.M.	21°	4,4	10°	0,9

b) Essais triaxiaux rapides non drainés sur argile broyée plus sommairement.

COMPACTAGE	Echantillons non imbibés		Echantillons	
		cohésion en kg/cm ²		cohésion en kg/cm ²
100% P.M.	8°	5,4	3°	4,2
95% P.M.	13°	3,6	12°	2,2
90% P.M.	18°	2,6	18°	1,0

On notera qu'en raison du caractère argileux du sol, la cohésion est très élevée sur les éprouvettes non imbibées. Après imbibition, la baisse de cohésion est d'autant plus importante que le sol est moins compact.

Les angles de frottement interne apparents qui résultent des essais rapides sont très faibles avec les éprouvettes compactées à 100% P.M. en raison de la pression interstitielle importante qui se développe dans les sols presque saturés.

Avec les éprouvettes moins compactées, les vides sont plus importants, donc le degré de saturation est plus faible et l'angle de frottement apparent est plus élevé.

Essais oedométriques

Le coefficient de compressibilité C_c mesuré à l'oedomètre est égal à 80, valeur correspondant à un sol de grande compressibilité.

Le coefficient de perméabilité est voisin de 0,5 10^{-10} cm/s ce qui correspond à un sol très peu perméable.

3 - STABILISATION A LA CHAUX.

Limites d'Atterberg

L'indice de plasticité qui était de 31% sans chaux, tombe rapidement à 22% avec 5% de chaux. Au delà de ce dosage IP varie très peu (voir fig. 63).

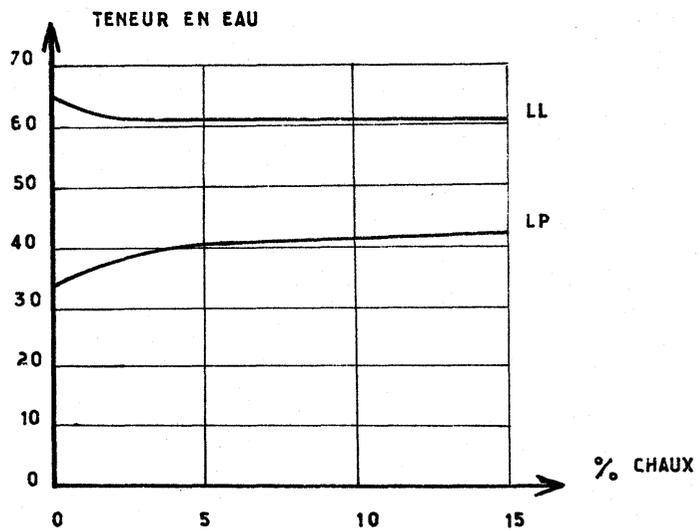
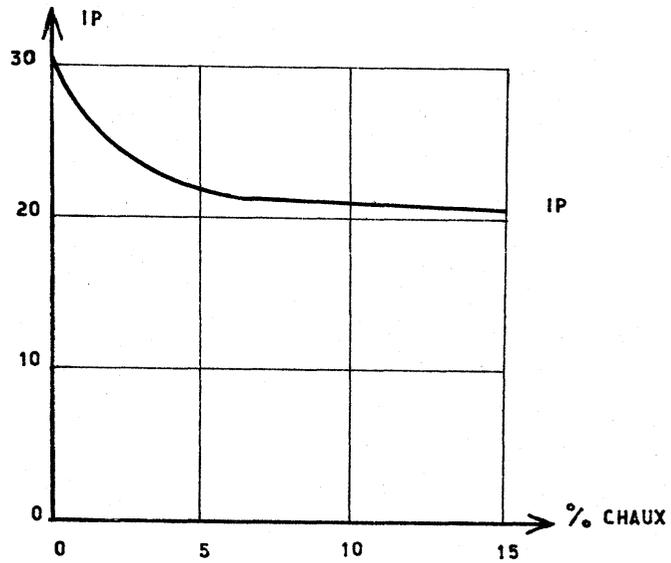
Essais de compactage

L'adjonction de chaux à l'argile ne modifie guère les caractéristiques de compactage Proctor du mélange. Nous avons en effet obtenu les résultats suivants :

% d'addition de chaux	Teneur en eau optimale en %	densité sèche maximale en T/m ³
0%	27%	1,58
2,5%	27%	1,57
3,5%	27,5%	1,57
5,0%	28%	1,57
7,0%	28,5%	1,55

ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR LES
LIMITES D'ATTERBERG DE L'ARGILE



Essais de portance C.B.R.

Les résultats obtenus sur éprouvettes imbibées et non imbibées ont été reportés sur la figure 64.

On voit que l'augmentation de C.B.R. n'est vraiment sensible que lorsque le pourcentage de chaux ajouté à l'argile, dépasse 3%.

Au delà de 6% de chaux toutefois, le gain supplémentaire de portance devient faible ou nul pour les compacités courantes.

Essais triaxiaux

Les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement apparent du matériau avec le dosage en chaux sont reportées sur les figures 65 et 66.

Les variations des résistances à la compression simple qui en résultent sont représentées sur la figure 67.

Aux faibles compacités, on n'observe pratiquement pas d'améliorations des résistances à la compression simple qui restent faibles, quel que soit le dosage en chaux (5 à 7 kg/cm² sans imbibition et 1 à 3 kg/cm² après imbibition pour un compactage de 90% P.M)

Aux fortes compacités, (100% P.M), on note une augmentation sensible des résistances lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 4%. Au delà de ce dosage, les résistances plafonnent.

Aux compacités moyennes (95%P.M), les résistances varient peu avec le dosage et se situent aux environs de 10 kg/cm² sans imbibition et 5 kg/cm² après imbibition.

Essais oedométriques

Les coefficients de compressibilité déduits des essais oedométriques sont les suivants :

% d'addition de chaux	0%	2%	4%	6%	8%
Coefficient C_c	80	150	200	210	192

La compressibilité diminue donc lorsque le dosage en chaux passe de 0 à 4%, puis elle reste stationnaire.

Le coefficient de perméabilité K varie peu, restant compris entre 0,5 et 1,5 x 10⁻⁴ cm/s, quel que soit le dosage en chaux

4 - STABILISATION AU CIMENT

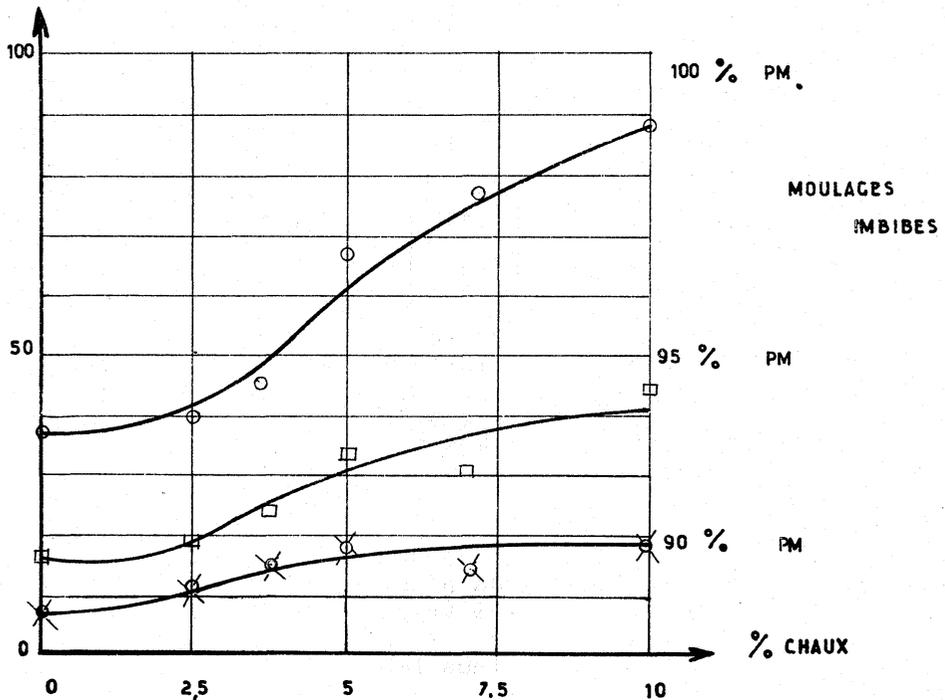
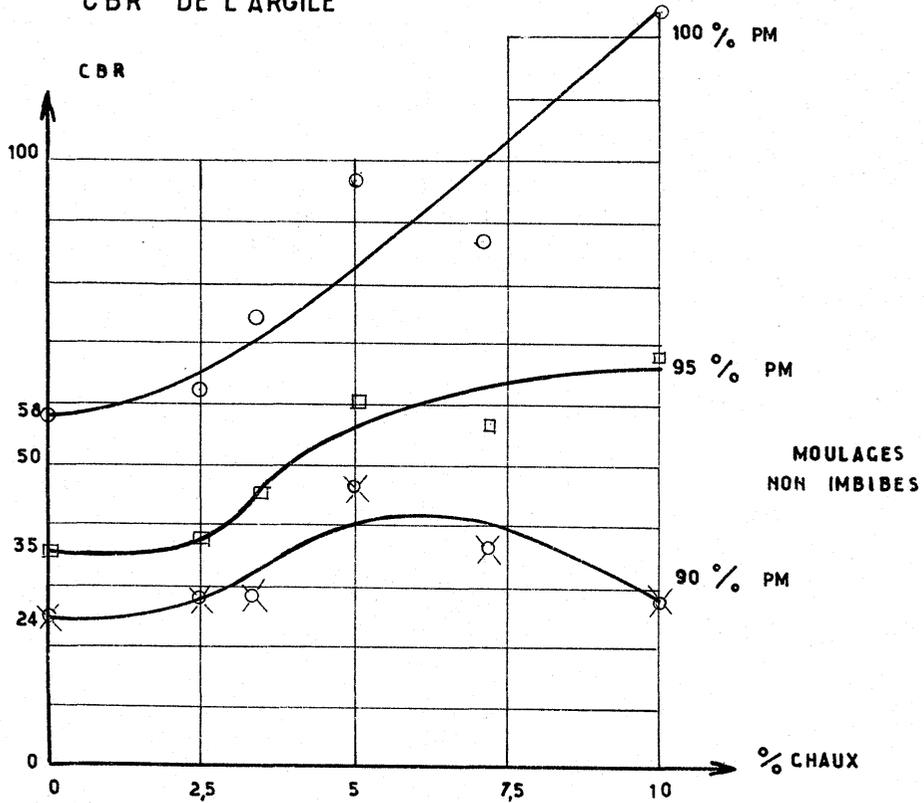
Limites d'Atterberg

De 31% sans ciment, l'indice de plasticité tombe à 23% avec 5% de ciment et 17% avec 15% de ciment (figure 68).

L'indice conserve donc, dans tous les cas, des valeurs relativement élevées.

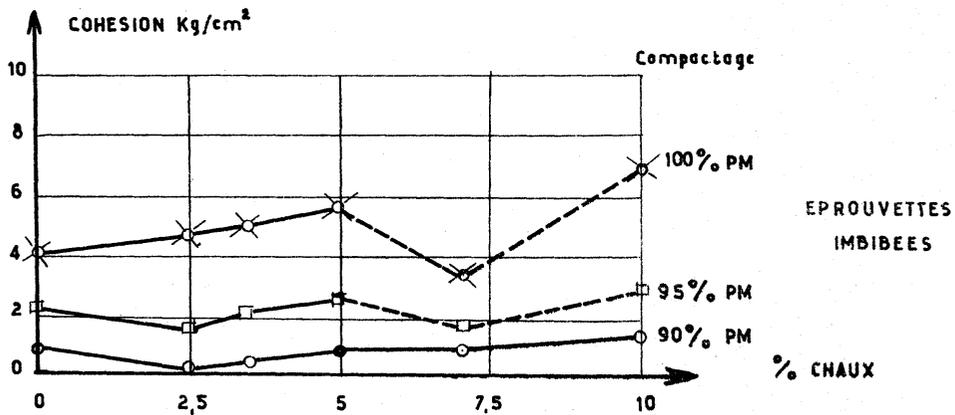
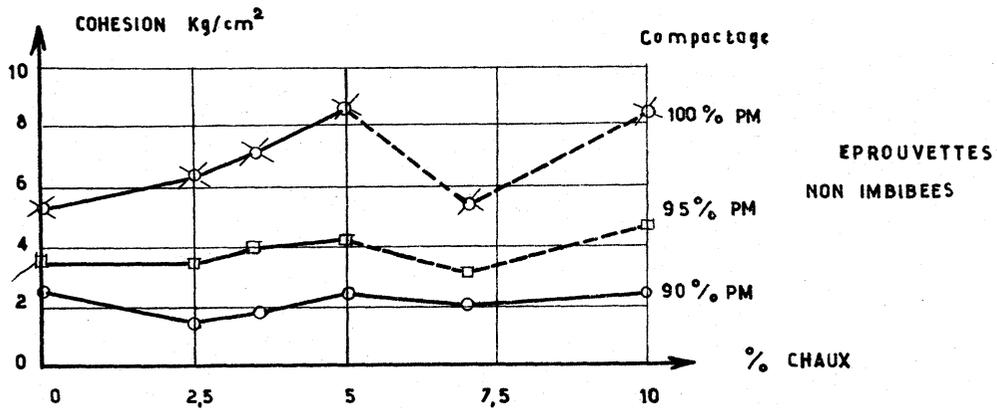
ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITON DE CHAUX SUR LES INDICES CBR DE L'ARGILE



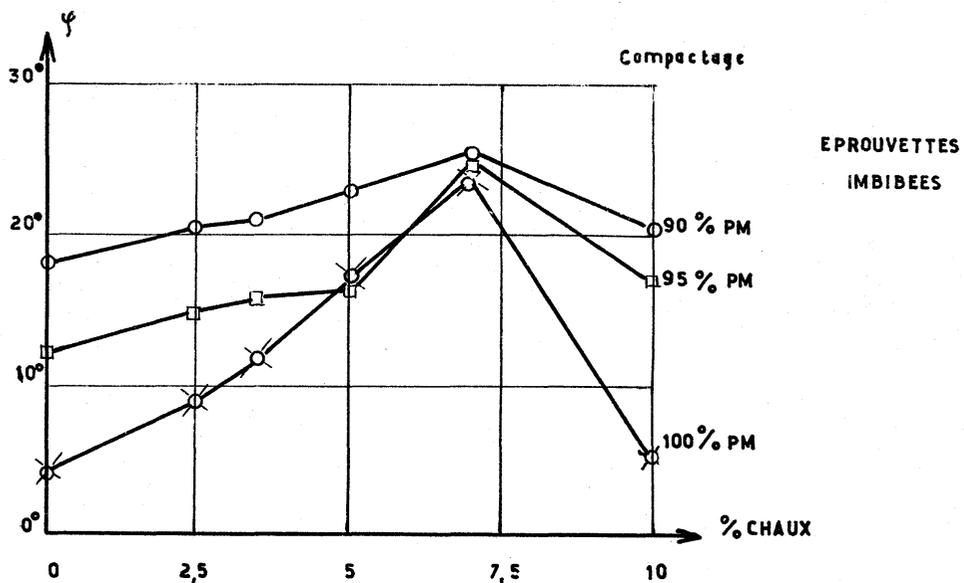
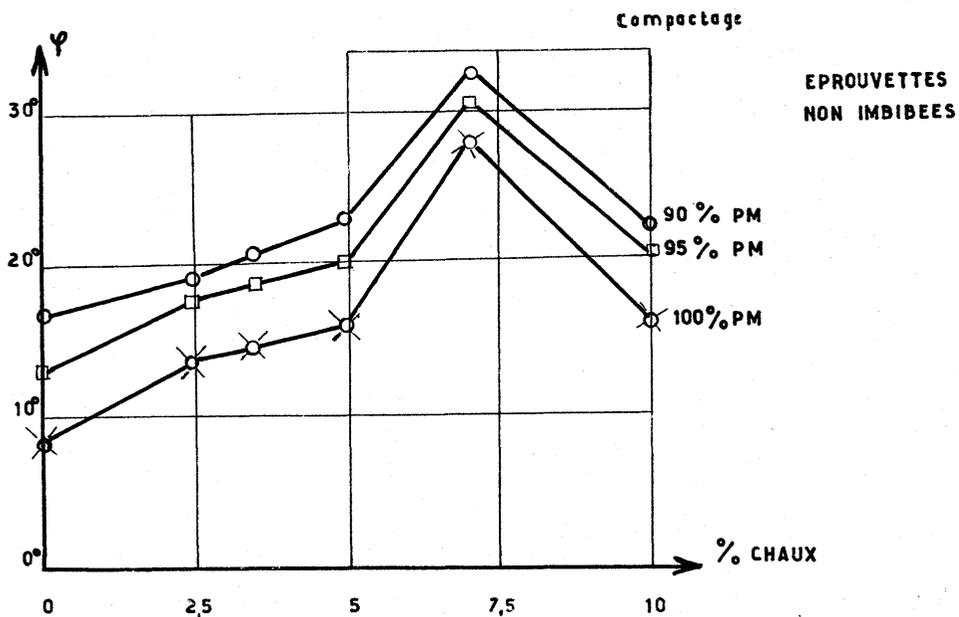
ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR LA
COHESION APPARENTE DE L'ARGILE



ARGILE

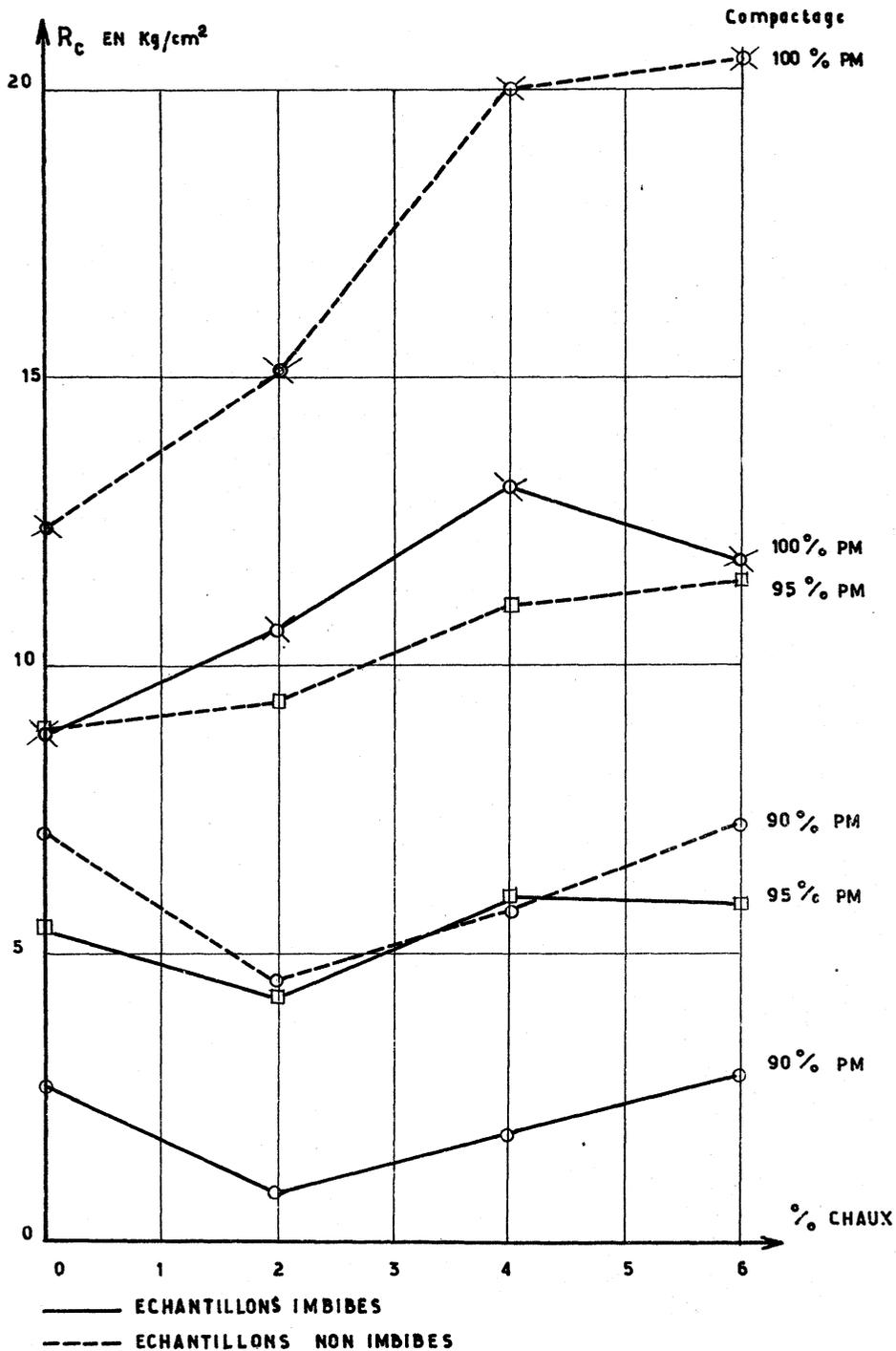
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CHAUX SUR
L'ANGLE DE FROTTEMENT DE L'ARGILE



A. 1.2 Fig66

ARGILE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION
DU % DE CHAUX ET DU COMPACTAGE



Essais de compactage

L'addition de ciment ne modifie que légèrement les caractéristiques Proctor du mélange. On constate une légère diminution de la densité sèche maximale, accompagnée d'une faible augmentation de la teneur en eau optimale.

% de ciment	teneur en eau optimale	densité sèche maximale T/m ³
0	27%	1,58
2,5%	27,5%	1,56
4%	28%	1,56
5%	28%	1,56
8%	28%	1,54

Essais de portance C.B.R.

Les valeurs des C.B.R. sont reportées sur les figures 69 et 70. On voit que les indices portants augmentent d'abord faiblement pour les dosages compris entre 0 et 2,5% de ciment, puis fortement, pour les dosages compris entre 2,5 et 5% de ciment.

Au delà de 5% de ciment, la croissance est un peu moins rapide pour les éprouvettes imbibées. Pour les échantillons non imbibés, on constate même une diminution du C.B.R. qui est très certainement due au fait que la prise du ciment est incomplète par manque d'eau d'hydratation.

Essais triaxiaux

Les variations de l'angle de frottement apparent et de la cohésion du matériau avec le dosage en ciment, sont représentées sur les figures 71 et 72.

Les valeurs des résistances à la compression simple qui en résultent sont reportées sur la fig.73

Lorsque le dosage en ciment augmente, on constate une amélioration sensible des résistances aux fortes compacités. Ce gain est par contre assez faible pour les compacités de 90% P.M.

A la compacité moyenne de 95% P.M la résistance à la compression simple passe sans imbibition, de 9 kg/cm² sans ciment à 11 kg/cm² avec 5% de ciment.

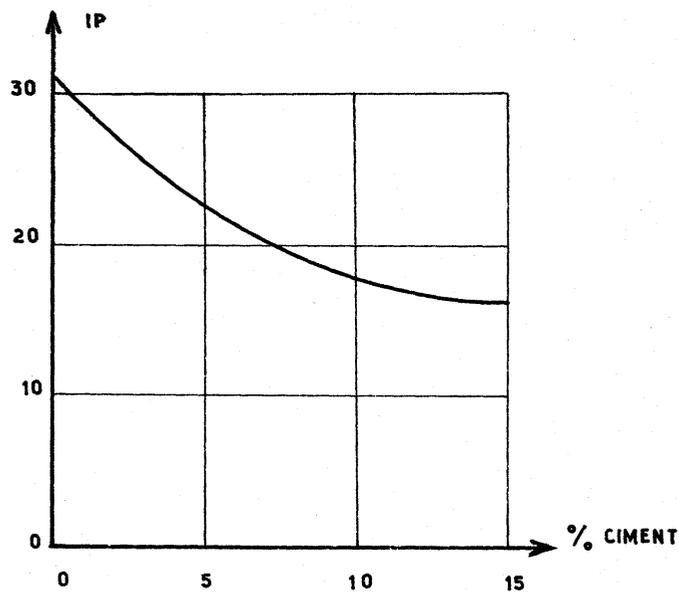
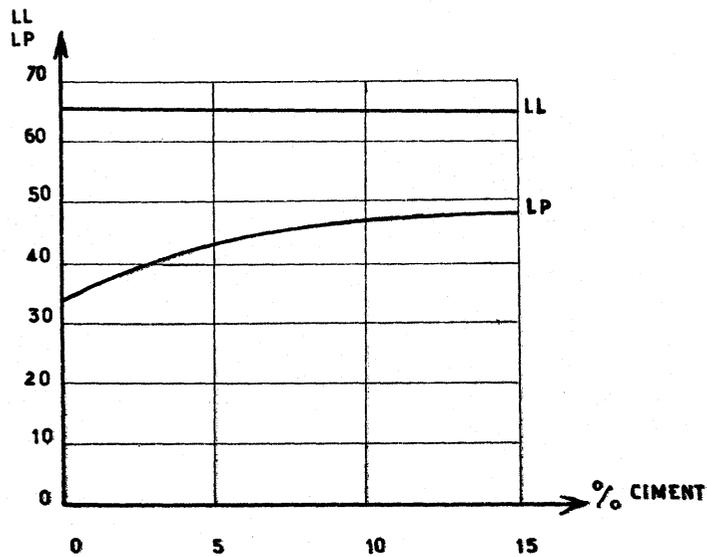
Essais oedométriques

Les valeurs des coefficients de compressibilité obtenues aux essais sont les suivantes :

% de ciment	0%	2,5%	4%	5%	8%
Compressibilité C _c	80	179	252	308	346

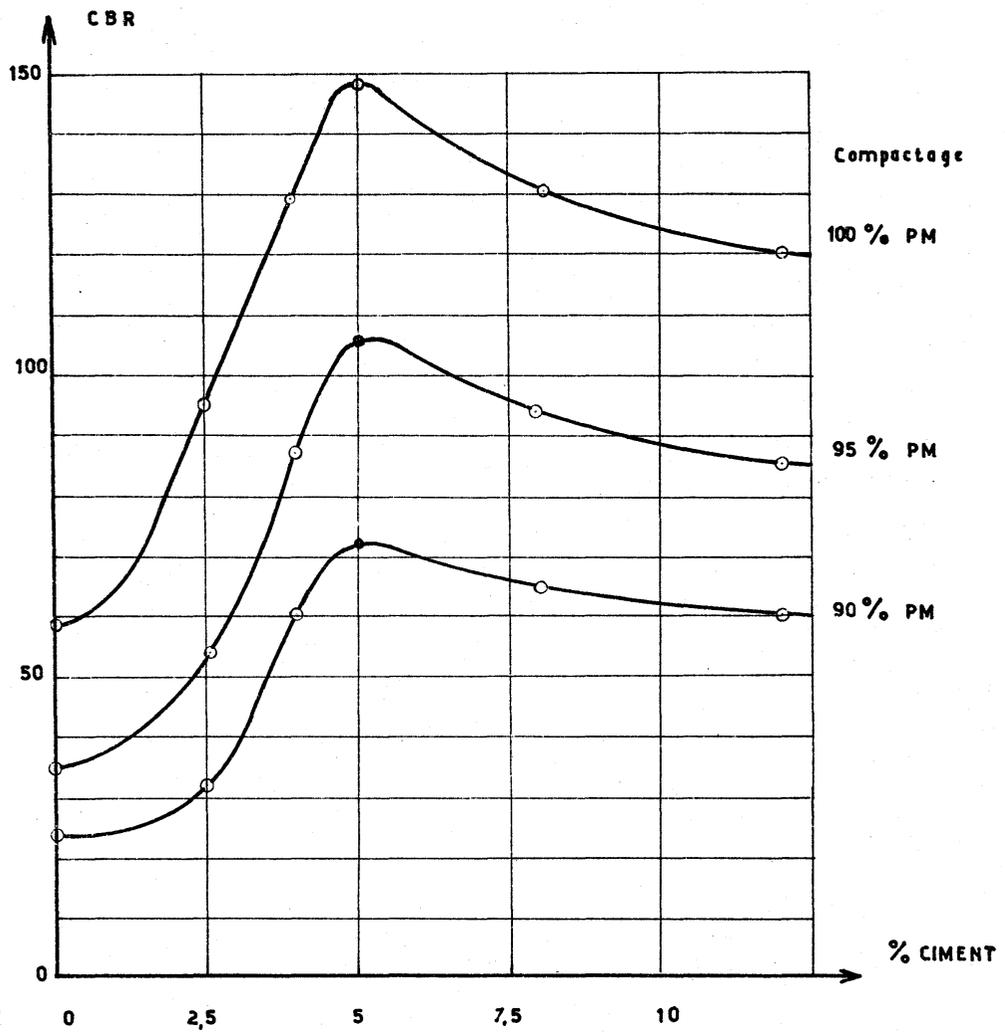
ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LES LIMITES
D'ATTERBERG DE L'ARGILE



ARGILE

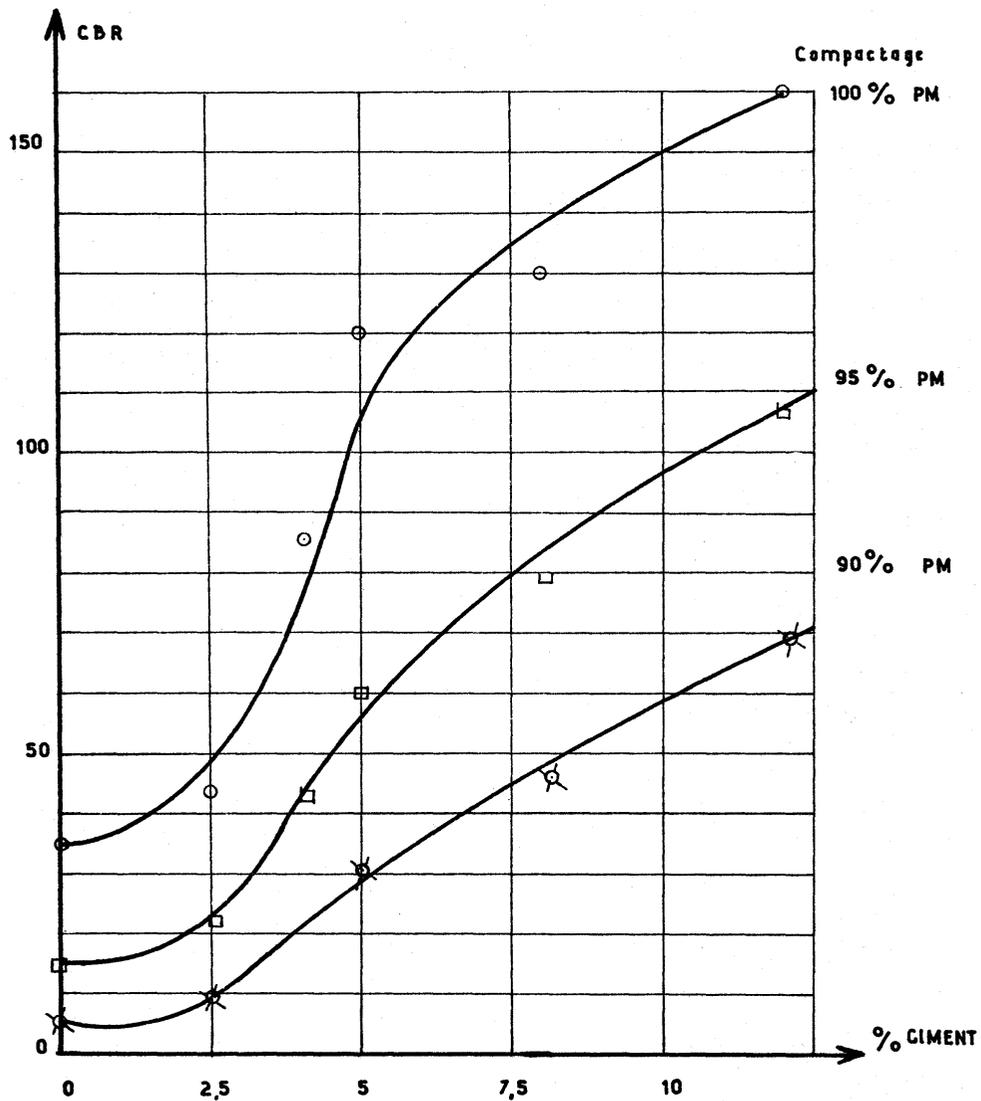
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LES
INDICES CBR DE L'ARGILE NON IMBIBEE



A. 1.2 Fig.69

ARGILE

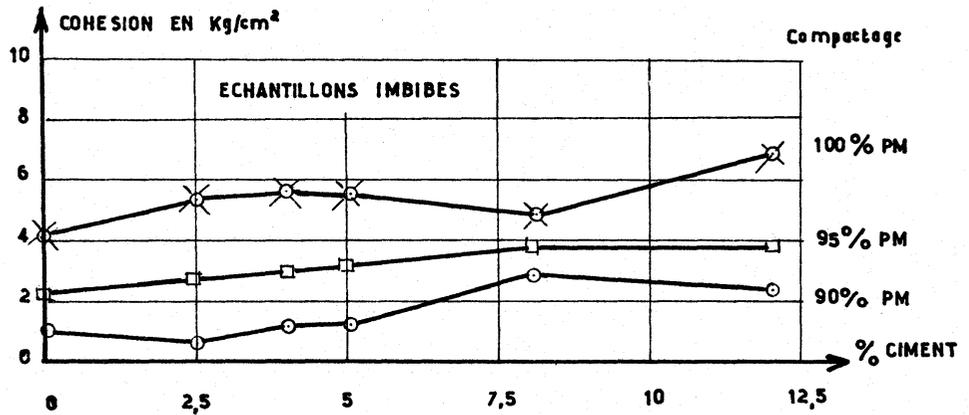
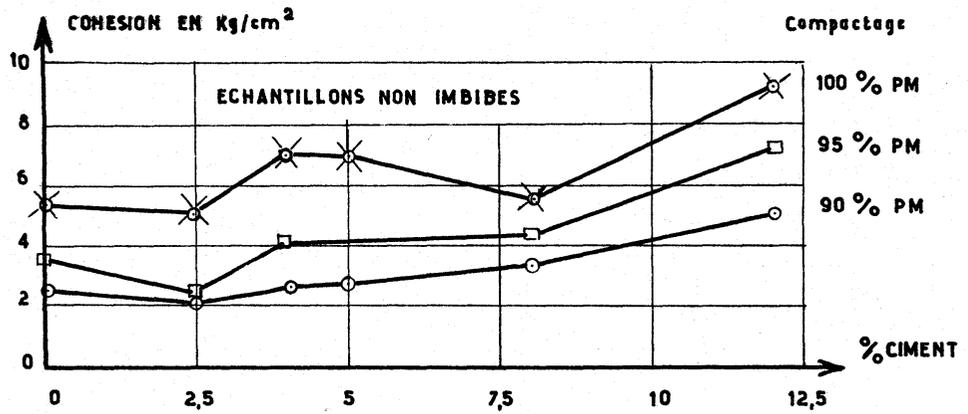
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR LES
INDICES CBR DE L'ARGILE IMBIBEE



A.1.2 Fig70

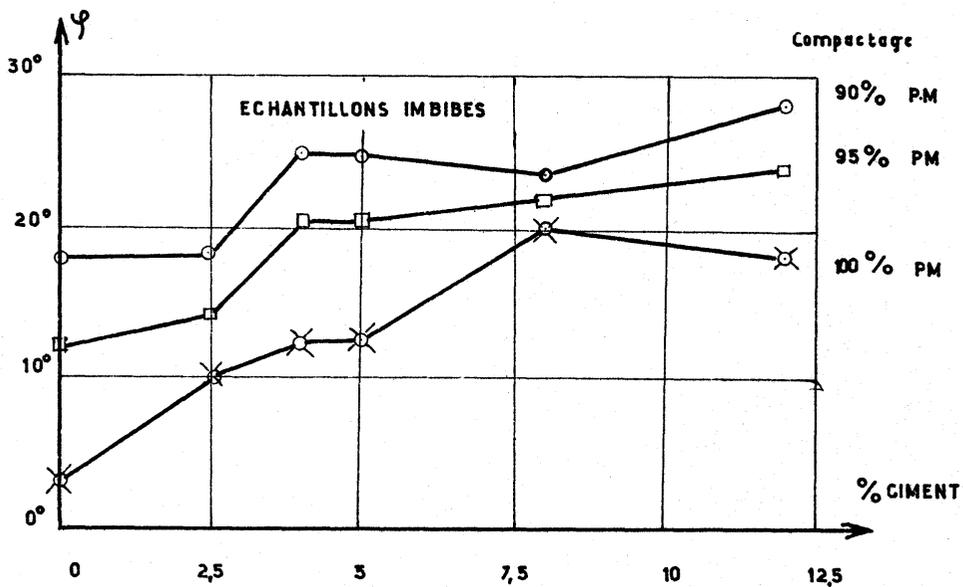
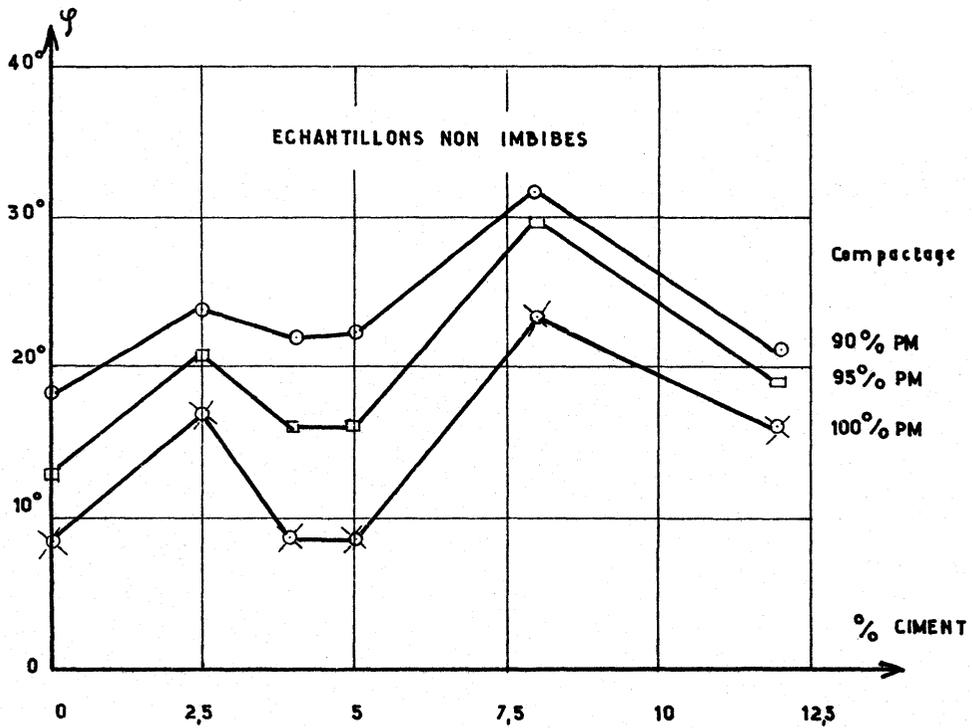
ARGILE

INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR
LA COHESION DE L'ARGILE



ARGILE

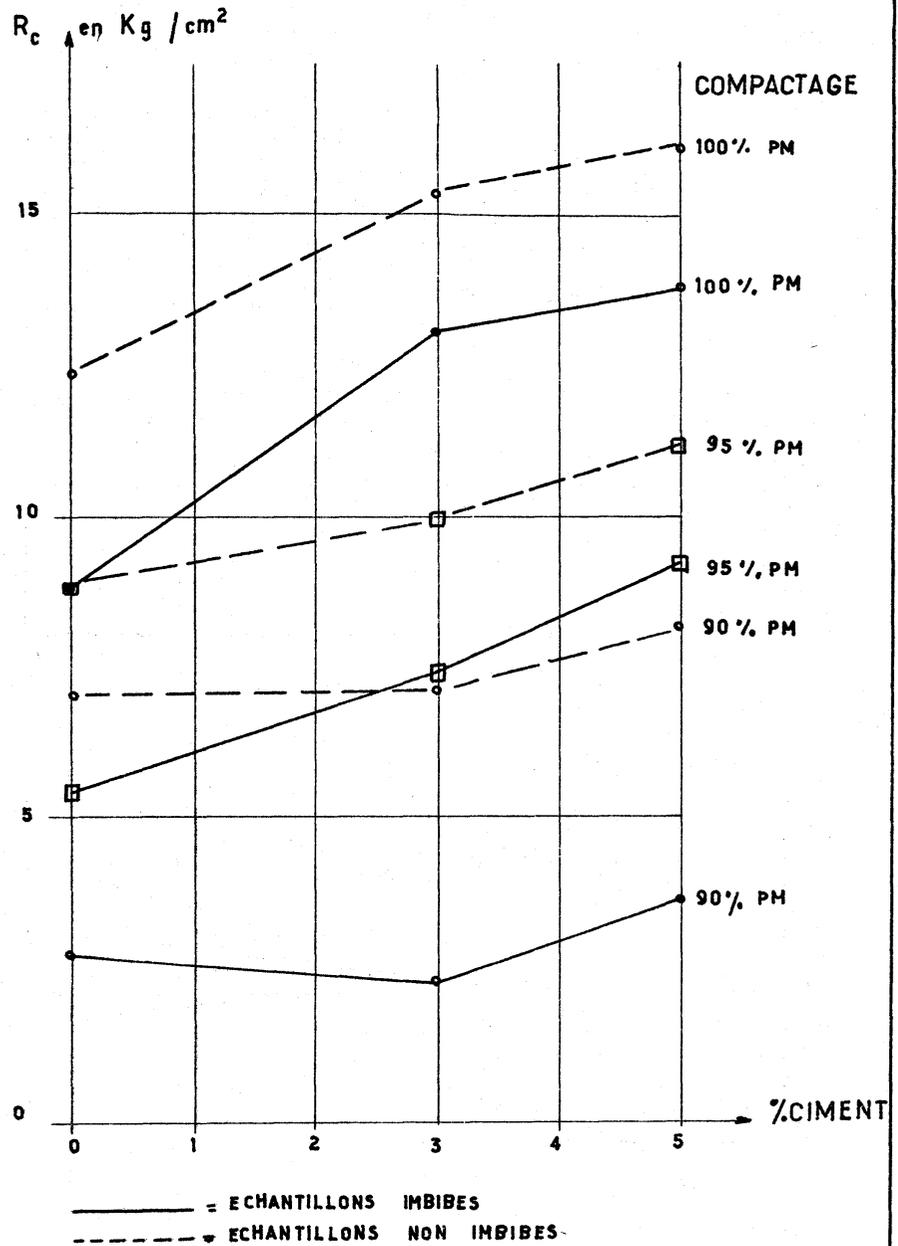
INFLUENCE DE L'ADDITION DE CIMENT SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT APPARENT DE L'ARGILE



A.1.2 Fig72

ARGILE

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN FONCTION
DE L'AMENDEMENT AU CIMENT ET DU COMPACTAGE

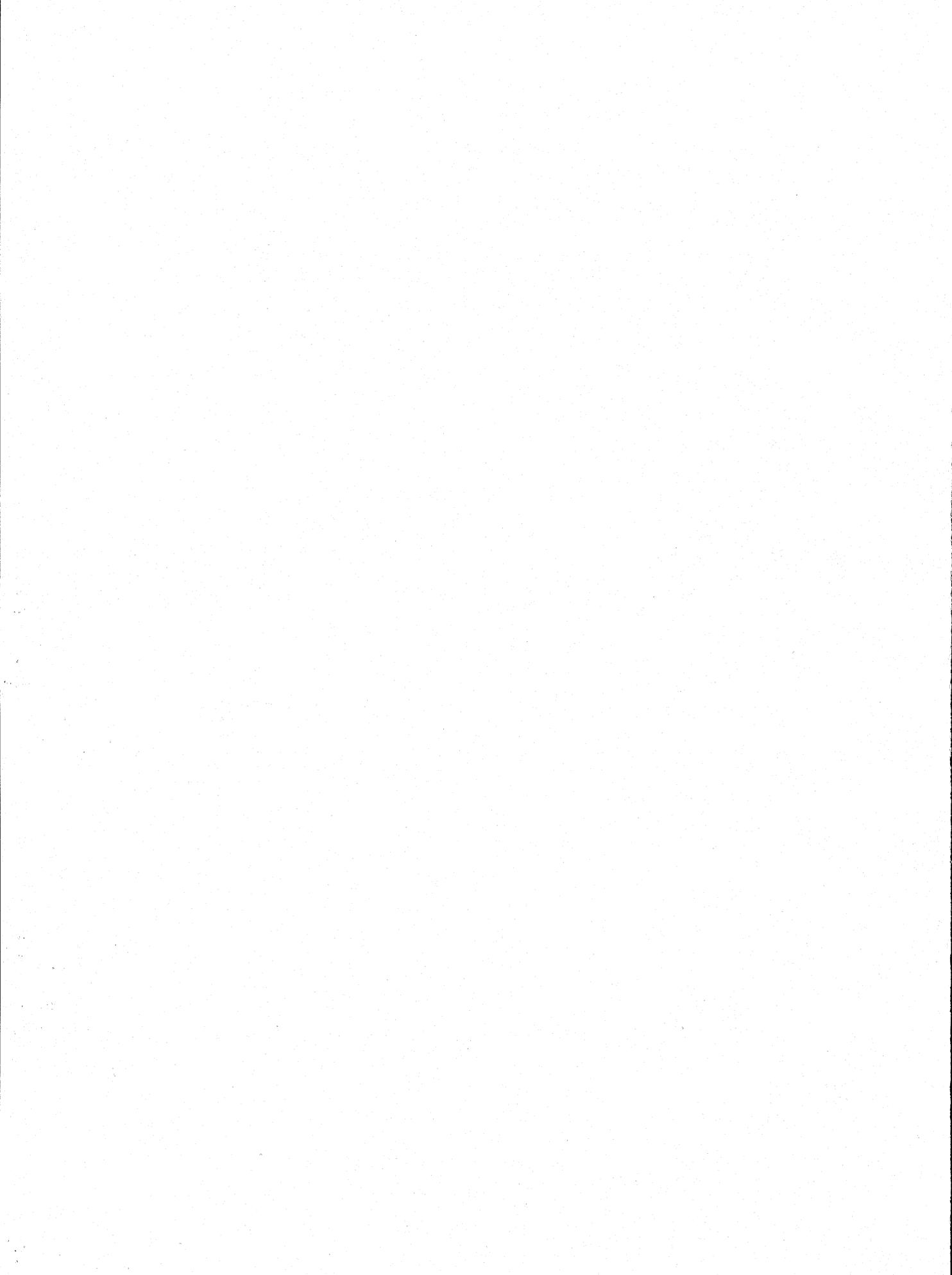


La compressibilité de l'argile diminue donc constamment lorsque le pourcentage de ciment augmente.

Le coefficient de perméabilité varie assez peu avec le pourcentage de ciment.

5 - STABILISATION AUX LIANTS HYDROCARBONES

La stabilisation du mélange de 75% d'argile et de 25% de sable ayant déjà donné de très mauvais résultats, aucun essai n'a été entrepris sur l'argile seule.



A N N E X E 2

EXEMPLES DE REALISATIONS DE CHAUSSEES DANS DIVERSES REGIONS D'AFRIQUE

2.1 - INTRODUCTION

- 2.1.1 - Les exemples de chaussées donnés dans cette annexe concernent essentiellement des chantiers sur lesquels ont été utilisés des procédés relevant de la technique de la stabilisation des sols.
- Les renseignements ont été, en général, recueillis par nos divers laboratoires d'Afrique et résultent de la consultation, soit des entreprises, soit des organismes officiels des Travaux Publics.
- 2.1.2 - Les réalisations qui seront décrites ci-après sont situées dans les pays africains suivants :
- Sénégal
 - Côte d'Ivoire
 - République Centrafricaine
 - République du Congo Brazzaville
 - République du Congo Léopoldville
 - Cameroun
 - Algérie-Sahara
- 2.1.3 - Pour chaque projet, il y a des conditions climatologiques et géographiques bien définies, qu'on pourra utilement retrouver dans des ouvrages déjà publiés tels que :
- "Rapport sur une Mission en Afrique Noire" de Messieurs PELTIER et BONNENFANT.
 - "Le Congo Physique" de M. ROBERT
 - "Le Katanga Physique" de M. ROBERT.
- 2.1.4 - Les réalisations étudiées n'ont pas nécessairement été exécutées suivant le système le plus économique. Il se peut, en effet, que des contingences locales imposent le choix d'une solution qui ne soit pas nécessairement la meilleure sur le plan technique ou sur le plan financier. Il semble cependant que dans chaque cas, la recherche de l'utilisation des matériaux naturels ait été une des préoccupations majeures des organismes d'étude et des constructeurs.
- 2.1.5 - La terminologie employée pour désigner les diverses parties qui constituent la route proprement dite et son assiette est la suivante :
- plate-forme : sol naturel compacté ou non.
 - corps de chaussée : cette partie peut comprendre une couche inférieure dénommée "fondation" et une couche supérieure dite "couche de base".
 - Revêtement : couche supérieure surmontant la "couche de base"
- Remarques :
- la fondation peut être constituée de plusieurs couches superposées.
 - le revêtement est, en général, une couche imperméable réalisée à l'aide de liants hydrocarbonés.
- 2.1.6 - Pour la comparaison des prix de revient indiqués dans cette annexe, nous rappellerons que l'on a sensiblement :
- 1 Franc Français (F.F) = 10 Francs Belges (F.B)
 - = 50 Francs C.F.A. (F.C.F.A.)

.2.2 - EXEMPLES DE REALISATIONS au S E N E G A L.

2.2.1 - Route de THIES à SAINT-LOUIS

Renseignements Généraux.

Le tronçon dont il est question ici s'étend de Guéoul à Lougo à environ 80 kms de St.Louis.

Sa longueur est de 17 kilomètres.

Le trafic journalier est de l'ordre de 300 à 500 véhicules dont environ 1/3 de camions parmi lesquels certains sont chargés à 14 tonnes par essieu.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

Le sol rencontré est presque toujours un sable fin dont la totalité des éléments passe au tamis de 0,4mm d'ouverture.

Le C.B.R. admis pour ce matériau est de 20%.

La teneur en eau optimale de compactage est comprise entre 9 et 11% et la densité sèche maximale Proctor Modifié est voisine de 1,80 T/M3.

Cette valeur est facilement obtenue sur le chantier après compactage.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Il y a une absence presque totale de matériaux rocheux ou de latérite gravelo-argileuse dans la région.

Le seul matériau disponible est donc le sable rencontré sur le tracé.

Solution retenue pour la Constitution du Corps de Chaussée.

En l'absence d'éléments graveleux, l'administration décide de prévoir une couche de base en sol-ciment.

Le sol-ciment a été réalisé à partir d'un sable homogène provenant d'emprunts assez rapprochés, ouverts le long du tracé. (Distance moyenne de transport inférieure à 3 kms) Les découvertes des divers emprunts n'ont jamais dépassé 30 à 50 cm.

Le dosage en ciment a été de 8%. Les résistances à la compression simple sur éprouvettes conservées 7 jours sous paraffine varient, dans ces conditions, entre 20 et 30 kg/cm2.

L'épaisseur de la couche de base en sol-ciment prévue au marché était de 15 cm après compactage.

Revêtement

Il a été réalisé un enduit bicouche de 2,5 cm d'épaisseur.

La première couche constituée de 15 litres/m2 de gravillon de basalte 15/25 avec 1,5 kg de cut-back 150/200 est placée

après épandage d'une couche d'accrochage à 1 kg d'émulsion par m².

La seconde couche est constituée par 10 litres au m² de gravillon de basalte 5/15 avec 1,2 kg de cut-back 150/200.

Exécution des Travaux.

Les terrassements ont été de l'ordre de 70 000 m³ et ont été exécutés en 7 mois. Les principaux engins utilisés ont été :
3 scrapers D.8 (8-10-12m³) + 1 dozer pousseur et 2 graders.

L'extraction du sable des emprunts se faisait à la pelle de 350 litres et le transport était assuré par 2 dumpers et 5 camions. Le travail a été réalisé au Travel-Plant après mise en cordon. L'eau de compactage provenait de forages. Le répandage a été exécuté à l'aide d'un spreader box. Le tapis bi-couche a été réalisé sur 6.00m de largeur à une cadence de 3 000 m²/jour.

Le compactage s'est effectué en 3 phases :

- premières passes aux rouleaux agricoles
- compactage aux cylindres vibrants
- finition au rouleau à pneus de 15 T.

Le rendement pour l'exécution de la couche de base a été de 225 m²/jour.

Renseignements sur les prix de Revient.

Prix unitaires importants :

Nous reprenons ci-après quelques prix de travaux élémentaires qui résultent du décompte définitif.

Rubrique	Unité	Francs CFA
Débroussage	m ²	11,50
Remblais provenant d'emprunts	m ³	245
Arrosage et compactage	m ³	129
Sol-ciment (15cm après compactage)	m ²	719
Revêtement	m ²	456

Remarques.

- Prix des essais préliminaires et de chantier : 1 700 000 Frs
- Ciment rendu chantier : 7 600 frs/T
- Sable : 200 frs/m³
- Cut-back rendu chantier : 20 000 frs/T
- Gravier : 4 500 frs/m³

Tous ces prix sont exprimés en francs CFA.

2.2.2 - Route M'BOUR KAOLACK

Renseignements Généraux.

Le tronçon réalisé a une longueur de 118 km . Le trafic supporté peut atteindre 300 camions par jour dont certains équipés d'essieux chargés à 13 Tonnes.

Reconnaissance et Etude des sols de la plateforme.

Les sols rencontrés sont en grande partie, du type "sables fins et moyens" plus ou moins argileux. le % d'argile colloïdale est d'environ 10 . Les densités sèches maximales peuvent atteindre 1,8 à 2 T/m³ et les teneurs en eau correspondantes 8,5 à 9%.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Pour le tronçon situé du côté de M'BOUR, on peut utiliser des latérites gravelo-argileuses. Signalons que des carrières de basalte existent à DAKAR et à KHOMBOLE. Quelques poches de latérite de faible puissance ont été ultérieurement découvertes. Aux environs de M'BOUR on a également trouvé un gisement calcaire.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

La plateforme a d'abord été stabilisée mécaniquement par compactage. Sur 84 km, la couche de base a été réalisée en "sol-bitume" d'une épaisseur de 10cm. Le dosage en cut-back 50/100 a été de 5%, la teneur en eau optimum du sol étant de 5%. Les stabilités Hubbard Field imposées ont été de 545 kg à sec et de 227 kg après 7 jours d'imbibition.

Un tronçon de 28 km à partir de M'BOUR a eu sa couche de base exécutée en utilisant un empierrement pi-couche, la première couche est constituée de tout-venant 0/70 (75^l/m²) et la seconde par des graviers de 50/70 85^l/m²)

Solution retenue pour le revêtement.

Sur le sol-bitume, on a placé un tapis superficiel léger monocouche (1,2 kg/m² de cut-back 150/200 - 12 litres de gravillon de basalte) scellé par "seal coat" avec un dosage de 1 kg/m².

Le macadam qu'on a traité en semi pénétration, (faute de matériau d'agrégation) a été protégé par un revêtement superficiel tri-couche dont la composition est reprise ci-après :

1ère couche : 2 kgs de cut-back 150/200 - 15 l. de 15/25
2ème couche : 1,5 kg de cut-back 150/200 - 12 l. de 5/15
3ème couche : 2 kgs de cut-back 150/200 - 8 l. de 2/5

Exécution des Travaux.

Le volume des travaux est donné ci-après :

- Terrassements	:	500.000 m ³
- Sol-bitume	:	490.000 m ²
- Empierrement	:	170.000 m ²
- Revêtement superficiel	:	680.000 m ²
- Cut-back	:	6.250 T
- Ciment (bordures)	:	1.000 T
- Empierrement	:	28.000 m ³
- Gravillon	:	14.000 m ³

Le sol-bitume a été exécuté à la cadence de 500m/jour
(utilisation de 28 T de cut-back/jour.

Renseignements sur les prix de revient. (1952)

Terrassements : 300 millions de Frs CFA, soit 600 frs par m³ mis en place.

Macadam + revêtement : 4.400.000 Frs CFA/km soit 725 frs/m²

Sol-bitume + revêtement : 4.325.00 Frs CFA/km soit 736 Frs/m²

Montant total pour 112 km de chaussée : 800 millions de frs CFA
soit environ 7 millions de Frs CFA par Km.

2.3 - EXEMPLE DE REALISATION DANS LA REPUBLIQUE DU CONGO-BRAZZAVILLE.

2.3.1 - Route de POINTE NOIRE-SOUNDA.

Renseignements généraux.

Le tronçon réalisé à 125 km de longueur. Le trafic est moyen, mais des convois lourds exceptionnels seront en circulation lors des travaux d'aménagement du KOUILOU.

Les études topographiques préliminaires ont coûté 335.000 Frs/km.

Reconnaissance et Etude des sols de la plateforme.

Sur une longueur d'environ 65 km on rencontre des sols à limon plus ou moins argileux contenant 13 à 20% de sable. La perméabilité est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} cm/sec. Les indices de plasticité sont compris entre 10 et 30.

Sur le tronçon restant, les sols sont à prédominance sableuse et sont légèrement plastiques ou dépourvus de toute plasticité.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

La prospection a surtout été orientée vers la recherche de "graves" et de latérites graveleuses à plasticité faible. Quelques carrières ont pu être découvertes. Pour le sable du second tronçon, deux solutions ont été envisagées :

- d'une part, la stabilisation au ciment (sol-ciment,
- d'autre part, la stabilisation au cut-back (Sand-Mix)

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

L'idée d'utiliser un sol-ciment a été rapidement abandonnée en raison du dosage élevé en liant qui était nécessaire (200 à 250 kg de ciment par m³ de sable).

Le Sand-Mix a donc finalement été adopté sur un tronçon avec un dosage de 5% de cut-back S.R.O. Sa densité sèche après compactage était de 1,97 T/m³ pour une teneur en eau de mise en place de 8,5%.

Exécution des Travaux.

Le volume mensuel de terrassements réalisés a été de 100.000 m³. Deux tronçons ont eu leur couche de base réalisée en latérite sur 14 cm d'épaisseur. Un troisième tronçon a été exécuté avec base en sand-mix de 12 cm, revêtu d'une mono-couche. Sa tenue a été très bonne.

Le sand-mix a été malaxé en central-plant Barber-Greene

Renseignements sur les prix de revient.

Le prix de la chaux rendue Pointe-Noire est de 25.000 frs CFA par Tonne et le prix du ciment est de 7.000 Frs/T. Le poste déforestation a été très important: 157 millions de frs CFA. La route latérisée revient à environ 2,6 millions de frs CFA par km.

Le coût du tronçon exécuté en sand-mix est d'environ 6,7 millions frs CFA par km et se décompose comme suit :

- Plateforme (profilage et' compactage) :	356.000 frs/km
- Sand-mix + cut-back du revêtement :	5.660.000 frs/km
- Gravillon du revêtement :	684.000 frs/km

TOTAL :	6.700.000 frs/km.

.2.4 - EXEMPLE DE REALISATION DANS LA REPUBLIQUE CENTRAFRICAINE

2.4.1 - Route DAMARA à FORT-SIBUT

Renseignements généraux.

La longueur du chantier a été de 110 km; le trafic est moyen (véhicules de 3 à 5 Tonnes). Les travaux ont consisté en une amélioration et un nouveau traitement de l'ancienne plateforme avec augmentation de la largeur qui est passée de 5 à 9 mètres.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

On a rencontré deux types de sols principaux :

- a) des sols graveleux (latéritiques et quartzeux)
- b) des sols limoneux plus ou moins chargés de sable et d'argile.

Notons également qu'en beaucoup d'endroits de la route on a retrouvé des couches de latérite.

a) SOLS GRAVELEUX

On peut les classer dans les catégories A-2-6 et A-2-7. Les densités sèches obtenues sont assez fortes 2,1 à 2,16. Les C.B.R. après imbibition sont, dans ces conditions, de l'ordre de 50 à 60%.

Un bon drainage permet d'augmenter la portance d'environ 20%

b) SOLS LIMONEUX

Les densités sèches sont plus faibles 1,80 à 1,85 T/m³ avec une teneur en eau de compactage de 16%. Un bon drainage permet de tabler sur des indices C.B.R. de l'ordre de 30 à 40% alors qu'ils sont d'environ 20% après 4 jours d'imbibition et 15% après 21 jours. Ces sols sont donc très sensibles à l'eau.

c) LATERITES RENCONTREES SUR LA ROUTE.

Elles comportent un pourcentage de sable important et sont caractérisées par la disparition des fines plastiques. Les valeurs des indices C.B.R. sont satisfaisantes (50 à 60%).

On rencontre également des gisements de tout-venants latéritiques plus plastiques. Les bancs ont de 1 à 2 m. d'épaisseur sous 0m,20 à 1m,00 de stérile. Lorsque la teneur en fines est importante les latérites deviennent glissantes.

Solutions retenues pour la constitution du corps de chaussée.

- Amendement des latérites trop plastiques par addition de "graves et sables".
- Eviter les granulométries trop uniformes et les discontinuités qui sont favorables à la production de tôle ondulée.
- Améliorer les propriétés hydrophobes du matériau.
- Amélioration par addition de faibles pourcentages de ciment sans aller jusqu'à l'exécution d'un "sol-ciment".

.2.5 - EXEMPLE DE REALISATION AU CAMEROUN

2.5.1 - Route PITOA-FIGUIL

Renseignements généraux

Le chantier de 75 km de longueur fait partie de l'axe GAROUA-MAROUA (200 km).

Le trafic supporté par la route est du type moyen à lourd; l'essieu maximum est de 11,5 T.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

Sols à faible indice de groupe et à facteur de portance très variables.

De tous les essais exécutés, il ressort que l'épaisseur minimum de sol amélioré à prévoir est de 17 cm.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Des latérites à caractéristiques acceptables sont très difficiles à trouver en quantité suffisante.

De plus, le problème de l'humidification avant compactage est aussi très délicat à résoudre: la teneur en eau naturelle à 1m,50 de profondeur n'est encore que de 1 à 2%.

Solutions retenues pour la constitution du corps de chaussée.

Suivant les tronçons, l'une des trois solutions ci-dessous a été retenue :

- 1) Amélioration à l'aide de "graves" sur une épaisseur de 10 à 15 cm.
- 2) Couche de base stabilisée à la chaux. Un dosage de 4% de chaux abaissait sensiblement l'indice de plasticité tout en augmentant la portance.
- 3) Simple recharge avec une latérite de bonne qualité.

Exécution des travaux.

- Le compactage a été très poussé, il a atteint des valeurs de l'ordre de 98% PM.
- Le stade final du travail qui est l'exécution d'un revêtement hydrocarboné doit être atteint par étapes successives :

- 1) réalisation des remblais et compactage de la plateforme.
- 2) première exécution de la couche de base (soumise ensuite au trafic).
- 3) correction de la base et amélioration.
- 4) bitumage.

- Le traitement à la chaux a été exécuté par la méthode de mélange dite "en cordons".

L'humidification a ensuite lieu et précède le brassage au pulvi-mixer et le compactage par couche de 10 cm.

Solution retenue pour le revêtement.

Avant de procéder à la mise en place du revêtement, la couche de base a d'abord été imprégnée au cut-back MCI ou au cut-back O/1 à raison de 1 kg/m² (imprégnation à froid)

Après 48 heures de séchages, la première couche est posée et la seconde suit également 48 heures plus tard.

La première couche est composée de :

- 18^l/m² de gravillon 15/25 et de 1,3 kg/m² de cut-back 400/500.

Le cylindrage est effectué au rouleau lisse de 8/10 T.

La seconde couche comporte :

- 12^l/m² de gravillon 5/15 et 1 kg/m² de cut-back 400/500.

Le cylindrage est fait au rouleau lisse de 5/7 T.

2.6 - EXEMPLES DE REALISATIONS EN COTE D'IVOIRE.

Les divers travaux décrits ci-après se rapportent à des chantiers de faible importance, il s'agit plutôt de sections de routes et de traversées de localités.

2.6.1 - Traversée de TOUMODI.

Renseignements généraux.

Le tronçon EST-OUEST est long de 1,5 km et celui orienté NORD-SUD a une longueur de 10,5 km.

Le trafic journalier est de 260 véhicules légers et 375 lourds. TOUMODI se trouve sur l'axe ABIDJAN - MALI - HAUTE VOLTA - NIGER.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

La majorité des sols est constituée par des sables limoneux et argileux. Les sables graveleux sont trouvés dans les zones en déblais, de faible profondeur. A plus grande profondeur, on trouve souvent des limons argileux.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

La prospection a porté sur la recherche de gîtes graveleux en vue d'exécuter un béton de sol et d'amaigrir les sols trop argileux. On a également recherché des gisements de sable pour la réalisation du revêtement, en "sand asphalt".

Solutions retenues pour la constitution du corps de chaussée.

Les travaux de terrassements ont été exécutés en évitant au maximum d'avoir recours à des emprunts. La fondation est réalisée en graveleux naturel à indice de plasticité inférieur à 20. Pour la couche de base, le graveleux naturel doit avoir un indice inférieur à 16. Les épaisseurs extrêmes réalisées pour la couche de base sont 11,5 et 18 cm.

Solutions retenues pour le revêtement.

La couche de base subit d'abord une imprégnation au cut-back à raison de 1,2 à 1,3 kg par m².

Le sand asphalt, d'une épaisseur moyenne de 32 mm, est ensuite réalisé par enrobage à chaud avec 7,2% de bitume 80/100 et épandage au finisher.

Exécution des travaux

La plateforme a été traitée par compactage sur une épaisseur de 10 à 15 cm.

La centrale Barber Green pouvait débiter 25 T/heure de revêtement.

On a utilisé sur ce chantier des rouleaux à grilles (grid roller) qui sont susceptibles d'agir efficacement contre le feuilletage.

2.6.2 - Route ABIDJAN - ABENGOUROU (Tronçon COMOE-APOSSOU)

Renseignements généraux.

Le tronçon réalisé est long de 10,65 km et se situe sur l'axe Abidjan - Chana.

Le trafic est de l'ordre de 200 véhicules légers et de 150 camions par jour.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

Les sols rencontrés sont essentiellement des sables limoneux ou argileux en surface et des sables graveleux ou des limons argileux dans les zones en déblais.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Des prospections par quadrillage ont permis de mettre en évidence des gisements de sables et graviers non plastiques ou peu plastiques.

Solution retenue pour le corps de chaussée et le revêtement.

Après compactage de la plateforme, on met en place une couche de base en béton de sol d'une épaisseur de 13 à 18 cm. L'ensemble reçoit un revêtement d'environ 30 mm de "Sand Asphalt" dosé à 6,2% de bitume.

Exécution des Travaux.

La plateforme a été soigneusement compactée à la densité maximale Proctor Modifié. Des taux de 108% PM ont même été relevés en quelques points. La couche de base en béton de sol avait des indices de plasticité compris entre 7 et 14%. Les densités sèches obtenues sont de l'ordre de 2,1 à 2,26 T/m³.

Le revêtement a été exécuté par épandage au finisher après enrobage à chaud au Barber Green. La production atteinte a été 25 T/heure.

REMARQUE.

Par endroit, une fondation en sol graveleux sélectionné a été interposée entre la plateforme et la couche de base (béton de sol)

2.6.3 - Traversées de BONGOUANOU et de KANGANDI

Renseignements généraux.

Le chantier est long de 2,300 km. La route supporte un trafic journalier de 45 véhicules légers et 225 véhicules lourds.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

Ce sont des sols limoneux, argileux et sableux, sans squelette et à portance assez faible.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

La prospection a surtout été orientée vers la recherche de sable et de graveleux en vue de l'exécution d'un béton de sol.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

La chaussée a été réalisée comme suit :

- compactage de la plateforme
- mise en place d'une couche de fondation d'une épaisseur de 10 à 15 cm en graveleux naturel sélectionné.
- réalisation d'une couche de base de 10 cm en béton de sol amélioré par addition de 3% de ciment. Le C.B.R. obtenu dans ces conditions est de l'ordre de 150%.

Solution retenue pour le revêtement.

Le revêtement a consisté en l'application d'un enduit tri-couche sur imprégnation.

L'imprégnation a été réalisée par épandage de 1,5 kg/m² de cut-back 0/1 fluxé par 10% de gas-oil. Comme liant hydrocarboné des couches, on a utilisé l'émulsion Colacid à raison de 4 kg/m² (émulsion à 65%).

Les gravillons en quartz anguleux sont dosés de la façon suivante :

- 12 litres de 7/15
- 8 litres de 2/7
- 6 litres de sable.

L'épaisseur totale du revêtement est de 25 mm environ.

2.6.4 - Tronçon de sortie de BOUAKE.

Renseignements généraux.

Le tronçon s'étend sur une longueur de 2,2 km et devra supporter un trafic journalier de 500 véhicules légers et de 150 lourds.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

Les sols sont du type "graveleux latéritique", mais quelques poches de terre humique excessivement mauvaises ont été rencontrées.

L'indice de plasticité se situe aux environs de 20%.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Un gîte de sable à proximité du chantier et d'accès facile d'une puissance de 8.000 m³ environ a été retenu.

Les caractéristiques du matériau d'apport sont les suivantes :

ES : 70 - Densité sèche "in situ" : 1,51 à 1,57 T/m³

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

Après curage des poches d'humus et remplacement par du sable, on a réalisé la chaussée de la façon suivante :

- 1) Compactage de la plateforme
- 2) Mise en place d'une couche anticontaminante de 7cm de sable
- 3) Mise en place d'une couche de base de 5 cm de sable stabilisé au Colsol.
- 4) Réalisation d'une couche d'accrochage suivie d'un revêtement tricouche.

Exécution des travaux.

Les 5 cm stabilisés au Colsol ont été exécutés en centrale et sur emprunts.

Le revêtement est épais d'environ 3 cm et a été réalisé comme suit :

- 1ère couche : 1 kg de Colacid + 15 litres de 15/25 au m²
2ème couche : 1 kg de Colacid + 10 litres de 5/15 au m²
3ème couche : 1 kg de Colacid + 5 litres de 2/7 „ au m²

(utilisation de l'émulsion Colacid R.60%).

Avant la pose de la première couche, la couche de base stabilisée au Colsol a été imprégnée d'une couche de scellement à l'émulsion.

REMARQUE

Des affaissements locaux ont été constatés surtout aux endroits où les couches de mauvaise terre avaient été curées et où la couche de base n'était pas assez imperméable (avant pose du revêtement tricouche).

2.7 - EXEMPLES DE REALISATIONS DANS LA REPUBLIQUE DU CONGO (LEOPOLDVILLE)

2.7.1 - Route JADOTVILLE - KOLWEZI

Renseignements généraux

Le chantier est assez important, le tronçon exécuté s'étend sur une longueur de 184 km.

Le trafic est de l'ordre de 80 véhicules/jour. Toutefois, il faut s'attendre à un certain développement dans l'avenir du fait de l'extension du complexe industriel dans la région du Haut-Katanga.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme.

10% des sols (du côté de Kolwézi) sont sableux et sablo-silteux.

90% des sols sont du type latéritique argileux.

Les teneurs en eau optimales de compactage oscillent entre 10 et 15% pour des densités sèches de l'ordre de 1,9 à 2 T/m³.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

Des gisements naturels de latérite exploitable ont pu être décelés en assez grand nombre le long du tracé de la route. Les latérites peuvent être de deux types :

- graveleuses (pisolitiques)
- rocheuses ou de cuirasse.

Certains gîtes atteignent plusieurs mètres d'épaisseur.

Les caractéristiques de discrimination des latérites sont les suivantes :

- IP inférieur ou égal à 8
- LL inférieure à 30.
- moins de 25% d'éléments passant au tamis de 0,074mm.

C.B.R. : supérieur à 28% après 4 jours d'imbibition et pour un compactage de 95% PM.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

La chaussée sera exécutée de la façon suivante :

- 1) la plateforme sera énergiquement compactée
- 2) La fondation sera réalisée à l'aide de latérite graveleuse sélectionnée et compactée
- 3) La couche de base sera constituée de latérite stabilisée à la chaux éteinte.

2.7.2 - Route ELISABETHVILLE - KASUMBALESA

Renseignements généraux

Le premier tronçon de cette route a une longueur de 40 km et a été exécuté en 1959-60. Le trafic journalier est de l'ordre de 200 à 250 véhicules. La route relie le Katanga à la Rhodésie et fait partie de l'itinéraire "Alger-Le Cap".

Reconnaissance et Etude des sols de la plateforme.

Quelques passages sablo-limoneux ont été repérés. Toutefois, la majorité de la route se trouve tracée dans des sols naturels latéritiques dont l'indice de plasticité est inférieur à 12%.

Les sols appartiennent en majorité à la catégorie A-2 de la classification routière H.R.B.

Reconnaissance et Etude des Emprunts.

La prospection a consisté à rechercher des carrières de latérites susceptibles d'être stabilisées à la chaux.

Du fait de la faible importance des travaux de découverte, il était indiqué de rechercher le maximum de gisements de manière à réduire le plus possible les distances de transport. Les densités sèches maximales Proctor Modifié des latérites à stabiliser sont de l'ordre de 1,94 à 2,14 T/m³, les teneurs en eau optimales variant de 9,5 à 13,7%.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

La plateforme (sol naturel) sera traitée mécaniquement par compactage. Tous les remblais présenteront au moins une compacité égale à 90% de la densité sèche maximale Proctor Modifié. Les 15 derniers centimètres seront compactés à au moins 95% P.M.

Pour la réalisation de la couche de base en matériau stabilisé à la chaux, on a fixé les conditions suivantes :

- Indice de plasticité inférieur à 6%.
- C.B.R. à 100% PM supérieur à 180 (valeur ramenée à 150)
- C.B.R. à 95% PM supérieur à 80.

Solution retenue pour le revêtement

La dernière partie de la chaussée sera constituée par un revêtement tri-couche posé sur une couche d'imprégnation.

Les caractéristiques des diverses couches sont les suivantes (quantités données par m³).

1ère couche : 22 kg de 12/25 + 1,1 l. de bitume 85/100 au m².

2ème couche : 12 kg de 6/12 + 1,7 l. de bitume 85/100 au m².

3ème couche : 8 kg de 3/6 + 0,9 l. de bitume 85/100 au m².

Exécution des travaux

Les terrassements ont été réduits au maximum.

Le compactage a été réalisé au supercompacteur de 50 tonnes.

La stabilisation a nécessité l'emploi de 3 à 4% de chaux.

La couche stabilisée a été exécutée avec un appareil "P et H single pass" suivi d'une niveleuse pour finition. Le compactage a également été effectué au supercompacteur.

Renseignements sur les prix de revient

Les prix ci-après sont ceux résultant de l'adjudication, ils datent de 1959 lors de l'exécution du premier tronçon :

RUBRIQUE	UNITE	PRIX
Stabilité à la chaux	m2	34,30 F.B.
Revêtement tri-couche	m2	46,40 F.B.
Compactage plateforme	m2	7,00 F.B.
Couche d'imprégnation	m2	9,75 F.B.

2.7.3 - Artères Urbaines d'ELISABETHVILLE

Renseignements généraux

Les artères urbaines d'Elisabethville étant soumises à un trafic intense, particulièrement dans les quartiers industriels, il s'est avéré nécessaire de traiter le corps de chaussée et la plateforme très soigneusement. Avant l'apparition de la technique de la stabilisation, la couche de base était réalisée en empierrement. Ce macadam à l'eau, d'exécution assez onéreuse et dont la pose convenable nécessite une mise en oeuvre délicate, exige malgré tout l'apport de matériau sélectionné et dont le prix, rendu chantier, est relativement élevé. Les conditions locales spéciales résultant de la présence de stocks importants de scories métallurgiques ont nécessairement guidé les spécialistes vers les solutions permettant l'utilisation de ces stériles.

A ce jour, environ 20 km de routes ont déjà été exécutées suivant la technique décrite ci-après.

Reconnaissance et Etude des Sols de plateforme

Les sols sont, pour la plupart, à classer dans la catégorie des latérites plastiques à très faible portance. Des C.B.R. inférieurs à 20% après 4 jours d'imbibition sont assez fréquents.

Reconnaissance et Etude des Emprunts

Les installations de l'Union Minière ont stocké un volume extrêmement important de scories à poids spécifique fort élevé, de l'ordre de 3 à 3,2 T/m³. Des gîtes de matériaux sableux et pierreux existent aux environs d'Elisabethville. Toutefois, les opérations d'extraction et de préparation de ces matériaux (lavage, criblage et transport) les rendent peu compétitifs lorsqu'on les compare au prix de la scorie rendue sur le chantier.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée

- a) Compactage soigné de la plateforme à la teneur en eau optimale.
- b) Exécution d'une couche de base en "sol-scories" compacté.
- c) Imprégnation
- d) Revêtement mono ou bicouche.

En certains endroits, une couche filtrante et anticontaminante en scories pures compactées avait été interposée entre la plateforme et la couche de base.

Par suite des essais de remontées capillaires et des mesures du produit Kh, la couche de scories a été supprimée. Le compactage de ce matériau était d'ailleurs très malaisé et devait se faire au travers d'une couche tampon douée de cohésion.

Exécution des Travaux

Il s'avère que le moyen économique de mise en oeuvre est la méthode d'exécution "en place".

Il y a intérêt à mélanger les scories au matériau latéritique à une teneur en eau aussi basse que possible.

Les apports de scories sont, en général, compris entre 40 et 60% du sol naturel à amender.

Le compactage a toujours été prescrit et exécuté à une teneur en eau inférieure à la valeur optimale déterminée lors de l'essai de compactage.

Si cette teneur en eau est dépassée, on assiste en effet à une chute spectaculaire de la portance.

Renseignements sur les prix de revient

RUBRIQUE	EN PLACE	EN CENTRALE FIXE
Couche d'imprégnation	9 FB/m ²	-
Tapis bi-couche	48 FB/m ²	-
Couche de base	46 FB/m ²	80 FB/m ²
Empierrement	130 FB/m ²	
Revêtement d'enrobés		120 FB/m ²

REMARQUE : l'empierrement nécessite un revêtement de qualité supérieure à celui exigé par la couche de base en stabilisé du type sol-scories.

2.7.4. - Route KOLWEZI - N'ZILO

Renseignements généraux

La route qui relie la ville de Kolwézi à la centrale Delcommune est une voie privée qui était annuellement traitée et entretenue par épandage de latérite graveleuse. L'entretien se montait à environ 22.000 FB par km et par an.

Le trafic journalier est relativement faible: voitures légères plus une vingtaine de camions et camionnettes.

L'épaisseur de la latérite d'apport varie entre 15 et 60 cm suivant les endroits et cette épaisseur résulte de la succession des entretiens annuels par gravelage.

Reconnaissance et Etude des sols de la plateforme

Tous les sols sont du type "latérite graveleuse" de plus ou moins bonne qualité. Les indices de plasticité varient entre 8 et 22, les densités sèches sont assez élevées et comprises entre 1,91 et 2,09 T/m³.

Reconnaissance et Etude des Emprunts

Des carrières de latérite sont situées aux environs du tracé. Un gîte de sable quartzeux d'excellente qualité rencontré aux environs de Kolwézi pouvait également être utilisé.

Solution retenue pour le revêtement

La route a servi et sert encore de tronçon expérimental. Du fait de son usage privé, on a réalisé une chaussée aussi économique que possible.

Les conditions qui ont été fixées à cet effet, sont les suivantes :

- a) Utilisation de la latérite rencontrée sur place sans effectuer ni découverte, ni apport extérieur.
- b) Réalisation d'un drainage soigné pour bénéficier au maximum de l'augmentation de portance due à la non saturation du matériau.

La route a, en conséquence, été exécutée comme suit :

- Plateforme compactée afin d'obtenir au moins 97% de la densité sèche maximale obtenue avec l'énergie Proctor Modifié.
- Revêtement monocouche avec "lisières d'ancrage" en produit bitumeux.

Exécution des Travaux

Le compactage a été réalisé sur 5 m de largeur en fin de saison des pluies au moment où la teneur en eau naturelle était très proche de la valeur optimale de compactage.

L'imprégnation a été réalisée avec 1,2 à 1,5 litres au m² de bitume.

Le revêtement monocouche est fait sur 3,30 m de largeur avec des gravillons de calibre 6/12 ou 3/6. Le dosage est de 1,5 l au m².

Le tronçon expérimental a été exécuté sur environ 10 km de longueur.

Renseignements sur les prix de revient.

Prix au km avec revêtement superficiel mono couche 220.000 FB

Prix au km y compris les travaux de drainage et aménagements divers 240.000 FB

Une première estimation avec étude détaillée des prix des opérations élémentaires avait prévu un prix de revient de 155.000 FB au km.

Ce résultat aurait pu être atteint si le chantier avait été plus important et si l'organisation du compactage avait été plus rationnelle.

2.7.5. - Routes urbaines de la CIRCONSCRIPTION de KOLWEZI

Renseignements généraux

Il s'agit de routes à circulation assez dense mais qui se trouvent dans la circonscription urbaine. Elles sont soigneusement drainées et sont toutes revêtues. La partie réalisée en sol-ciment et qui est décrite ci-après a une longueur d'environ 10 à 15 km. Le trafic moyen journalier varie de 3 à 5.000 véhicules dont plus de la moitié sont des camions.

Reconnaissance et Etude des sols de la plateforme

Tous les sols de la région de Kolwézi sont à caractéristique prédominante sableuse et à plasticité nulle, sauf quelques rares échantillons de poches limoneuses où l'indice de la plasticité varie de 5 à 8%.

Reconnaissance et Etude des Emprunts

Le sable naturel peut être utilisé pour la stabilisation et il n'est donc pas nécessaire de prévoir d'apports extérieurs. Seules certaines poches ne pourront être utilisées, mais elles sont fort localisées et relativement peu nombreuses.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

Du fait de la nature du matériau, il était indiqué de s'orienter vers une solution par "stabilisation au ciment.

Le matériau naturel de la couche de base a été enlevé et mis en cordon pour permettre le dégagement et le compactage de la plateforme.

Le mélange du ciment et du sable a été exécuté à la niveleuse ou au pulvi-mixer.

En général, le pulvi mixer a donné de meilleurs résultats et a été aussi économique que l'utilisation de la niveleuse.

Le sol a été traité avec des additions de 4 à 8% de ciment.

Les épaisseurs de sol-ciment ont varié entre 10 et 15 cm. Les revêtements superficiels ont été du type soit bicouche soit monocouche.

Ils ont été réalisés, soit en place, soit en centrale fixe.

Renseignements sur les prix de revient

NATURE DE LA COUCHE	ENGIN OU METHODE UTILISEE	P R I X
<u>Couche de base</u>		
4% ciment - 15 cm d'épaisseur	Niveleuse	73,50 FB au m ²
6% ciment - 15 cm d'épaisseur	Pulvimixer	72,00 "
<u>Revêtement</u>		
Tapis bi-couche 3 à 4 cm	en place	45 "
Tapis mono-couche 1,5 à 2 cm	"	25 "
Préenrobés	en plant	77 "

2.7.6. - Route LEOPOLDVILLE - KENGE

Renseignements généraux

La route est appelée à favoriser le développement économique de la région du Kwango.

La Société des Ciments du Congo a exécuté divers tronçons d'essais en "sol-ciment". Actuellement, la route est en cours d'exécution en utilisant la technique de stabilisation aux liants hydrocarbonés. Le résumé ci-après a trait aux essais d'orientation de stabilisation au ciment. Le trafic actuel est de 100 voitures légères et de 50 camions par jour, mais ces chiffres sont appelés à augmenter par suite du développement prévu de la région.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme

Le "sable noir" naturel constitue la majeure partie des matériaux rencontrés sur le tracé. Toutefois, les résistances obtenues après amendement de ce sable au ciment pour des échantillons conservés sous film de paraffine sont très faibles malgré des additions de ciment allant de 7 à 13%.

Reconnaissance et Etude des Emprunts

Comme le sable noir ne pouvait convenir pour réaliser des couches de base en sol-ciment, il a été nécessaire de rechercher des matériaux offrant des résistances plus fortes avec des dosages en ciment plus faibles. Un sable limoneux légèrement plastique (indice de plasticité = 8,5%) a été retenu.

Pour obtenir des résistances suffisantes il a fallu prévoir des apports de 3 à 5% de ciment.

Solution retenue pour la constitution du corps de chaussée.

Le sable noir naturel sert de couche de fondation après compactage. Le sable limoneux d'apport après stabilisation au ciment sert de couche de base.

L'ensemble reçoit un revêtement superficiel mono ou bi-couche.

Solution retenue pour le revêtement

- couche d'imprégnation à raison de 0,75 kg d'émulsion au m², puis sablage avec du 0/5.
- bi-couche :
 - 1ère couche : 1,2 kg/m² de bitume 85/100 + 14 kg de 8/15
 - 2ème couche : 1,2 kg/m² de bitume 85/100 + 8 kg de 2/8
- Sablage final ou épandage de concassé 2/8.

Exécution des travaux

- La plateforme a été compactée à 95% PM
- Le sable limoneux a été apporté au scraper puis mélangé au ciment par l'une ou l'autre des deux méthodes ci-dessous :
 - "mix-in-place" : pulvi-mixer multipass du type Seaman (4 passes minimum)
 - "mix-in-plant" : malaxeurs MILLIARS de 250 litres (malaxage 2 minutes)

Les dosages réalisés ont été compris entre 2,5 et 4,5% et l'épaisseur de la couche de base a été de 10 à 12 cm.

Renseignements sur les prix de revient

MATERIAU	PROCEDE	% CIMENT	PRIX AU m ²
Sable limoneux (épaisseur 10 cm	"en place"	2,5	67,17 FB
	"en plant"	3	110,74 FB
	"en place"	4,5	74,04 FB
Sable noir (épaisseur 12,5	"en place"	13	104,96 FB
	"en plant"	13	134,80 FB

REMARQUE : Le mix-in-plant revient très sensiblement plus cher.

2.8 - EXEMPLE DE REALISATION EN ALGERIE (SAHARA)

2.8.1 - Route du GASSI-TOUIL

(Renseignements extraits des articles de MM.PELTIER, FUMET FCNKENELL et GUERIN, publiés dans la revue générale des Routes de Juin 1959).

Renseignements généraux

Le Gassi-Touil est un couloir qui permet le franchissement dans le sens Nord-Sud du grand Erg Oriental Saharien.

Le trafic avant construction était évalué à 100.000 tonnes utiles par an. La route permet en particulier, de relier Hassi-Messaoud à la région d'Edjelé.

Les conditions climatiques sont particulièrement dures avec des températures atteignant 50° à l'ombre pendant 4 à 5 mois de l'année.

Les températures mesurées dans l'enrobé servant de revêtement à la chaussée varient :

- en été, entre + 30° C le matin et + 80°C dans l'après-midi,
- en hiver, entre - 5°C la nuit et + 25°C le jour.

La région est extrêmement sèche avec une pluviométrie moyenne annuelle qui est inférieure à 5 cm.

Reconnaissance et Etude des Sols de la plateforme

Le sol, très uniforme en surface (reg sablonneux) est plus varié à quelques décimètres de profondeur. Il va du sable avec quelques petits graviers jusqu'au sable limoneux ou même argileux (IP de 3 à 10%).

Reconnaissance et Etude des Emprunts

A part quelques grès très friables qui sont inutilisables en couche de chaussée, il y a pénurie totale de sols graveleux. Il est donc nécessaire de se rabattre sur les sables limoneux ; lorsqu'ils ont 15 à 30% de fines ces sables conduisent d'ailleurs à des compacités excellentes (densité maximale Proctor Modifié de 2,05 à 2,15 T/m³) et ne nécessitent qu'une teneur en eau de compactage modérée (6 à 9%).

Ils possèdent des C.B.R. assez élevés, même après imbibition, à condition d'être très bien compactés (C.B.R. imbibés 40 à 60%)

Les résistances à la compression simple à sec peuvent dépasser 10 kg/cm² à 95% du Proctor Modifié.

Solution retenue pour le corps de chaussée

Il était très difficile, étant donné la nécessité de travailler avec de gros engins de terrassements, d'effectuer une sélection rigoureuse des sables limoneux les plus aptes à servir en couche de base. Pour compenser l'éventuel manque de cohésion de certaines couches sableuses et pour résister aux efforts de cisaillement élevés, dus à la circulation de camions très lourds, une stabilisation chimique a donc été prévue dans la partie supérieure de la couche de base.

L'originalité de ce chantier a consisté à employer pour la première fois à une grande échelle une stabilisation au lignosulfite. Cette poudre marron est un sous-produit de l'extraction de la cellulose à partir du bois de pin des Landes. Elle est très soluble dans l'eau et permet de doubler la résistance à la compression simple avec un dosage qui ne dépasse pas 0,5 à 1% du poids du sol.

La solution retenue a donc consisté à mettre en place :

- une couche de fondation en sable cohérent humidifié et compacté.
- une couche de base dont la partie inférieure qui a de 8 à 18 cm d'épaisseur suivant la portance du sol de fondation, est en sable limoneux humidifié, homogénéisé au pulvi-mixer et fortement compacté et dont la partie supérieure sur 12cm est stabilisée au lignosulfite.

Solution retenue pour le revêtement

Le revêtement est constitué par un tapis d'enrobé dense de 5 cm d'épaisseur posé sur une couche d'accrochage et de scellement réalisée avec 1 kg de cut-back 10/15 au m². L'enrobé est confectionné à partir de sable graveleux dont le manque éventuel de fines est compensé par de la chaux. Le dosage moyen est de 6,5% de bitume 80/100 dopé.

Exécution des Travaux

La couche stabilisée au lignosulfite a été exécutée de la même manière qu'un sol-ciment.

Le sol est disposé en cordon et le lignosulfite approvisionné en sacs sur le cordon.

Le travel-plant absorbe l'ensemble, la dispersion du liant commençant à sec dans la vis d'Archimède qui alimente la chafne à godets.

Ce système a permis de réaliser une moyenne journalière de 800 mètres linéaires de couche de chaussée en matériau stabilisé

Le compactage a permis d'atteindre des compacités comprises entre 97 et 100% de la densité Proctor Modifié.

Comportement de la chaussée

L'augmentation de cohésion du matériau, grâce au lignosulfite, est spectaculaire, la couche obtenue après séchage étant extrêmement dure et résistant au burin.

On constate toutefois une humidification en hiver avec des teneurs en eau de 5% pendant plusieurs semaines dans la couche de base.

Il ne semble toutefois pas y avoir de migration capillaire du lignosulfite par remise en solution de ce liant, phénomène qui serait à redouter dans des climats moins secs que le Sahara Oriental.

On n'a pas non plus observé d'attaque de ce produit organique par les micro-organismes du sol alors que ce genre d'attaque avait été observé dans des climats moins secs avec des sols stabilisés aux résines.

Renseignements sur les prix de revient.

Le prix de revient de la route a été relativement bas puisque nous avons relevé les chiffres suivants au km (prix 1957 exprimés en Francs français de 1963)

NATURE DU TRAVAIL	PRIX AU KM
Terrassements	10.000 F.F
Couche de base	55.000 F.F
Enrobés	25.000 F.F
Amortissement des forages	10.000 F.F
Transport d'eau	10.000 F.F
Fourniture bitume, cut back	30.000 F.F
Fourniture lignosulfite et chaux	10.000 F.F
Surveillance, contrôle, divers	5.000 F.F

Les prix de revient élémentaires étaient les suivants :

- eau	par m ³	20 F.F
- bitume	par tonne	500 F.F
- cut-back	par tonne	570 F.F
- lignosulfite	par tonne	550 F.F
- chaux	par tonne	350 F.F

A N N E X E 3

REVETEMENTS SUPERFICIELS DE CHAUSSEE à

BASE DE LIANTS HYDROCARBONES

3.1 - GENERALITES

3.1.1 - ROLE DU REVETEMENT

Le revêtement d'une chaussée a un rôle complexe. Il doit :

- éviter l'usure des couches de base, la formation de poussière et de tôle ondulée en saison sèche, la formation de boue en saison des pluies.
- apporter une imperméabilisation aux couches de base et favoriser le ruissellement des eaux vers les accotements et les fossés, ce qui est d'autant plus facile que le profil en travers de la chaussée est à plus forte pente (pente optimale 3%).
- absorber la plus grande partie des contraintes de cisaillement engendrées par la circulation des véhicules et dues au couple de traction en roulage normal, au freinage, aux accélérations et décélérations, aux efforts en virage.
- contribuer à la stabilité de l'ensemble du corps de chaussée, et en particulier de la couche de base, par un étalement des contraintes verticales.

Il est bien évident que cet effet est d'autant plus important que le revêtement est plus épais et de module d'élasticité plus élevé.

3.1.2 - DEFINITIONS

1 - Revêtements superficiels minces

Les revêtements superficiels minces sont constitués par la superposition de plusieurs couches dont les définitions et les rôles respectifs sont rappelés ci-dessous :

Couche anti-poussière

La couche anti-poussière consiste en un répandage destiné à éviter la formation de poussière ou de tôle ondulée sur la couche de base pour laquelle il n'a pas été jugé utile de prévoir un revêtement superficiel définitif. Ces couches anti-poussière sur lesquelles on ne reviendra par la suite, peuvent être constituées par des répandages de Roads Oils, de Cut Back fluide ou d'huile minérale ou végétale, cette dernière pouvant être d'origine locale.

Imprégnation

La couche d'imprégnation est constituée par un liant fluide pénétrant par capillarité dans la couche de base. Elle est destinée à assurer l'imperméabilisation de la couche de base.

Couche d'accrochage ou de collage

La couche d'accrochage est constituée par un répandage de liant visqueux destiné à assurer un collage entre la couche de base et les couches supérieures du revêtement.

Semi-pénétration

La semi-pénétration est un répandage de liant visqueux, pénétrant par gravité dans une couche de base à vides superficiels élevés et destiné au collage des agrégats devant remplir ces vides.

Cette couche assure une liaison entre la couche de base et les gravillons destinés à remplir ces vides et s'apparente à une couche d'accrochage. La semi-pénétration est généralement réservée à la fermeture des couches de base réalisées en empierrement.

Percolation

La percolation est le répandage d'un matériau enrobé destiné à obturer les vides superficiels d'une couche de base.

La percolation est généralement réservée à la fermeture des couches de base réalisées en empierrement.

Cloutage

Le cloutage consiste à faire pénétrer par cylindrage dans une couche de base, des gravillons ou des graviers destinés à renforcer l'efficacité d'une imprégnation ou d'une couche d'accrochage.

Enduit superficiel ou enduit d'usure.

L'enduit superficiel est réalisé par répandage d'un liant visqueux qui pénètre très peu et qui est suivi d'un gravillonnage et d'un cylindrage.

Il est dit : mono-couche, bi-couche ou tri-couche suivant le nombre de répandages successifs qui ont été réalisés.

Couche de scellement ou fermeture

La couche de scellement comprend un répandage superficiel de liant visqueux suivi ou non d'un gravillonnage ou d'un sablage et destiné essentiellement à imperméabiliser la chaussée.

2. Revêtements épais ou tapis

Les revêtements épais sont des revêtements en matériaux enrobés, généralement posés en une seule couche. Suivant la granulométrie de l'agrégat utilisé et son dosage en liant, on distingue les binders, généralement constitués par des agrégats assez gros à granulométrie ouverte, les enrobés ouverts, les enrobés denses et les bétons bitumineux. Ces derniers correspondent à une granulométrie continue conduisant à un revêtement particulièrement fermé.

3.2 - REVETEMENTS USUELS

3.2.1 - CONSIDERATIONS GENERALES

Les routes revêtues commençant à trouver un développement considérable en Afrique, il est intéressant de savoir à partir de quel trafic on a intérêt à entreprendre la réalisation d'un revêtement.

Cela dépend, bien entendu, d'une part du plan d'investissement routier et d'autre part, du climat qui a une influence considérable sur le coût de l'entretien des routes non revêtues.

Dès que le trafic dépasse 30 véhicules/jour, il semble qu'il y ait intérêt à réaliser un revêtement sur une largeur de 3,50 m de chaussée.

Dès que le trafic dépasse 100 véhicules/jour, la réalisation d'un revêtement sur 6 m de largeur paraît nécessaire de façon à permettre la circulation à double sens.

La nature de la couche de base et la façon dont elle a été stabilisée influent considérablement sur le choix et la constitution des revêtements à adopter.

Dans le cas où la couche de base a été stabilisée mécaniquement, on a généralement intérêt à prévoir un revêtement du type multi-couche avec imprégnation.

L'utilisation de revêtements hydrocarbonés épais, et en particulier de béton bitumineux, risque de conduire à des mécomptes dans le cas où le matériau constituant la couche de base est à fort indice de plasticité. En effet, un revêtement multi-couche est suffisamment imperméable aux précipitations, mais s'avère perméable à l'évaporation de l'eau, ce qui permet le départ de l'eau en excédent dans la couche de base. Par contre, un béton bitumineux constitue un écran vis-à-vis de l'évaporation et risque d'entraîner un ramollissement de la couche de base sous l'influence des remontées capillaires.

Sur une couche de base stabilisée au moyen d'un liant hydraulique, les revêtements multi-couches ou les revêtements épais donnent de bons résultats.

La liaison entre la couche de base et le revêtement proprement dit, doit être assurée par une imprégnation si la couche de base est d'aspect assez ouvert et à faible dosage en liant, et au contraire, par une couche d'accrochage si la couche de base est d'aspect très fermé et à dosage en liant élevé.

Il est bien entendu qu'au point de vue économique on a tout intérêt à utiliser un revêtement le plus mince possible, et dans la plupart des cas, des revêtements du type mono-couche sont suffisants.

Dans le cas d'une couche de base stabilisée au moyen d'un liant hydrocarboné, les revêtements multicouches et les revêtements épais sont tous deux possibles.

Afin d'éviter tout enrichissement en liant de la couche de base déjà stabilisée aux liants hydrocarbonés, il y a lieu de proscrire la réalisation d'imprégnation.

La liaison entre la couche de base et le revêtement est alors assurée par une couche d'accrochage ou même un cloutage.

3.2.2 - CONSTITUTION DES DIFFERENTES COUCHES ET DOSAGES

IMPREGNATION

L'imprégnation étant destinée à pénétrer dans la couche de base par capillarité, il est nécessaire d'utiliser un liant fluide: cut-back, goudron ou émulsion surstabilisée.

On utilise un liant d'autant plus fluide que la surface de la couche de base est moins ouverte.

En pratique, pour les couches de base à texture assez serrée, on utilise des cut-back 0/1, des goudrons RT1, ou des cut-back américains des classes 0 ou 1.

Pour des couches de base à texture très ouverte, on peut utiliser des cut-back 10/15, des goudrons RT2, ou des cut-back américains de la classe 2.

En ce qui concerne les dosages, la règle générale est la suivante:

- le taux d'imprégnation doit correspondre à la quantité de liant susceptible d'être absorbée par la chaussée en 24 h. Cette quantité est généralement comprise entre 1 kg et 2 kg par mètre carré.

Un dosage trop important conduit à un ressuage et à des arrachements lors de la réalisation du revêtement proprement dit.

COUCHE D'ACCROCHAGE

Les couches d'accrochage sont généralement réalisées en cut-back visqueux 150/200 ou 400/500, ou encore avec les goudrons RT4 ou RT5.

Elles peuvent être également réalisées en émulsion ou même en bitume pur. D'une façon générale, les bitumes de base des cut-back et émulsions sont des bitumes 80/100.

Les quantités à répandre sont généralement comprises entre 800 g et 1,200 kg par mètre carré pour les bitumes, cut-back et goudrons, et 2 kg pour les émulsions.

ENDUITS SUPERFICIELS

La règle générale suivante doit être appliquée :
1 kg de liant est susceptible d'accrocher 10 litres de gravillons.

Une quantité supplémentaire de gravillons conduirait à du rejet et une quantité moindre à un ressuage du liant.

Les compositions généralement utilisées sont les suivantes par mètre carré de chaussée

Enduits bi-couche

1ère couche : liant 1,5 kg, gravillons 5/15 - 15 litres

2ème couche : liant 1 kg , gravillons 3/8 avec sable - 10 litres.

cette dernière couche constituant une couche de fermeture ou scellement.

3.2.3 - MISE EN OEUVRE

IMPREGNATION

L'expérience prouve qu'il est assez difficile de bien réussir une imprégnation.

Si la couche de base est sèche, le liant ne pénètre pas, il en est de même si la teneur en eau est trop élevée.

Dans un état d'humidité donné, le sol possède un potentiel de succion qui est d'autant plus élevé que la teneur en eau est plus faible et qui s'annule pour une teneur en eau voisine de celle de l'optimum Proctor Modifié.

Pour réussir une imprégnation, il faut profiter de ce phénomène et opérer de la façon suivante :

- on laisse sécher la couche de base bien au-dessous de la teneur en eau optimale, on répand une quantité d'eau de l'ordre de 0,75 litre par mètre carré, puis on répand le liant d'imprégnation dès que cette eau a tendance à être tirée en profondeur par succion.

En fait, la pénétration est suffisante lorsque le liant pénètre environ à 10 mm en profondeur. La couche supérieure présente alors une teinte de plus en plus foncée lorsqu'on se rapproche de la surface et une circulation légère est possible sans arrachement.

COUCHE D'ACCROCHAGE

Les couches d'accrochage doivent être répandues sur des surfaces parfaitement sèches si le liant utilisé est un cut-back ou un goudron; lorsque les surfaces sont humides, on a intérêt à employer une émulsion.

ENDUITS SUPERFICIELS

Les liants doivent être répandus sur des surfaces propres et autant que possible, sèches.

Le gravillonnage doit suivre immédiatement le répandage du liant et le cylindrage doit être effectué aussitôt que possible.

En climat très humide et par temps pluvieux, on a intérêt à utiliser des émulsions et des dopages pour éviter les désenrobages.

Après répanchage de la dernière couche de gravillons et cylindrage, il y a lieu d'éviter les rejets de gravillons ou la formation de tôle ondulée par des passages périodiques de Broom Drag, jusqu'à accrochage de la totalité du gravillon.

3.2.4 - TENUE ET ENTRETIEN

Si les couches de base sont correctement réalisées, la tenue des revêtements multicouches est généralement satisfaisante. On assiste quelquefois à une destruction des revêtements multicouches qui part des bords de chaussée avec épaufrage.

Pour éviter ce phénomène on a tout intérêt à faire déborder l'imprégnation et même la couche d'accrochage, de part et d'autre de la bande revêtue, ce qui contribue d'ailleurs à éviter la pénétration d'eau par les accotements.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un revêtement du type multicouche ne constitue pas une solution définitive et qu'un entretien du revêtement est indispensable.

Cet entretien doit porter :

- sur la réparation des flaches ou des dégradations localisées,
- sur l'exécution périodique de revêtements de fermeture avec des revêtements généraux, à des intervalles de temps qui dépendent, bien entendu, du trafic mais ne doivent pas dépasser 4 ou 5 ans pour un trafic normal.

3.3 - EXEMPLES DE REVETEMENTS.

Les exemples les plus typiques de revêtements réalisés en Afrique dans les dernières années sont reportés dans les tableaux suivants.

Ces tableaux montrent que les revêtements les plus couramment utilisés, sont des revêtements du type bi-couche sur imprégnation, la deuxième couche jouant le rôle de scellement.

Les bitumes de base utilisés dans les cut-back ou les émulsions sont généralement des bitumes 80/100.

-:-:-:-:-

REVETEMENTS SUPERFICIELS

NATURE DE LA COUCHE	L I A N T		A G R E G A T S	
	Nature	Dosage	Nature	Dosage
<u>Route BAMAKO -SEGOU</u> Années 53-55				
Imprégnation après humidification	Cut-back 0/1	1kg/m2		
1è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1kg/m2	gravillon 2/12	10 l/m2
2è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1kg/m2	sable	7 l/m2

<u>PK 25 - 38.5</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	0,8 kg/m2		
1è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1kg/m2	dolérite 5/12	12 l/m2
2è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1kg/m2	dolérite 2/5	5 l/m2
3è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	0,5 kg/m2	sable 2/0,1	3 l/m2

<u>PK 38.5 - 50</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	0,8 kg/m2		
1è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1 kg/m2	gravillon 5/10	12 l/m2
2è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1 kg/m2	Dolérite 2/5	5 l/m2
3è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	0,9 kg/m2	sable 2/0,1	5 l/m2

<u>PK 50 - 86</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	0,8 kg/m2		
1è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1,4 kg/m2	gravillon 5/10	12 l/m2
2è couche	émulsion 50% de bitume 80/100	1,5 kg/m2	sable 2/5	7 l/m2

<u>Route TOGO-NIGERIA</u>				
1) sur sol enrobé				
Scellement	cut-back 150/200	1 kg/m2		
1è couche	cut-back 150/200	1,5 kg/m2	gravillon 5/15	15 l/m2
2è couche	cut-back 150/200	1,8 kg/m2	gravillons 5/15	15 l/m2
2) sur béton de sol				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m2		
1è couche	cut-back 150/200	1,5 kg/m2	Gravillon 5/15	15 l/m2
2è couche	cut-back 150/200	1,8 kg/m2	Gravillon 5/15	15 l/m2

NATURE DE LA COUCHE	L I A N T		A G R E G A T S	
	nature	dosage	nature	dosage
<u>Sur sable argile</u> <u>COTONOU-PORTO NOVO</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,2 kg/m ²		
Enrobés sur 4 cm	cut-back 400/500 dopé	4,25kg/m ²	Gravillon 5/15 roulé	55 l/m ²
Scellement	cut-back 400/500	1,2 kg/m ²	sable	10 l/m ²

<u>COTONOU-OUIDAH</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
Enrobés sur 3 cm	cut-back 400/500	3,4 kg/m ²	Gravillon 5/15	40 l/m ²
Fermeture	cut-back	1,2 kg/m ²	Sable	12 l/m ²

<u>COTONOU-PORTO-NOVO</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back 150/200	1,5 kg/m ²	Gravillon 5/15	12 l/m ²
Fermeture	cut-back 150/200	1 kg	Sable	10 l/m ²

<u>GRAND POPO-TOGO</u>				
Sol-ciment				
Imprégnation	cut-back fluide	1 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back	1,8 kg/m ²	Gravillon 5/15	15 l/m ²
Fermeture			Sable	

<u>VOIRIE URBAINE de</u> <u>YAOUNDE</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back 150/200	1,2 kg/m ²	Gravillon concessé 15/25	18 l/m ²
2 ^è couche	cut-back 150/200	1,2 kg/m ²	Gravillon concessé 10/20	14 l/m ²

<u>DAKAR-BAMAKO</u>				
T.V. latéritique				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
Enrobé ouvert à froid (3,5 cm)	cut-back 150/200 dopé	4 kg/m ²	concessé 2/25	40 l/m ²
Fermeture	Colsol	0,5 kg/m ²	sable naturel	5 l/m ²

<u>Route fed.101</u> <u>PK - 0-40</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
1 ^è couche	émulsion	2,5 kg/m ²	basalte concassé 18 15/25	18 l/m ²
2 ^è couche	émulsion	2,5 kg/m ²	basalte concassé 14 5/15	14 l/m ²
3 ^è couche	émulsion	2 kg/m ²	basalte concassé 6 2/5	6 l/m ²

NATURE DE LA COUCHE	L I A N T		A G R E G A T S	
	nature	dosage	nature	dosage
<u>Route Fed. 101</u>				
<u>PK. 40-55</u>				
<u>T.V. latéritique</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1,5 kg/m ²		
Enrobé ouvert	cut-back 150/200	2,8 kg/m ²	gravillon latéritique	
Fermeture 1	Colsol	0,4 l/m ²	sable naturel	5 l/m ²
Fermeture 2	Colsol	0,5 l/m ²	sable naturel	5 l/m ²

<u>Route Fed. 101</u>				
<u>PK. 55-80</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1 kg/m ²		
1 ^è couche	émulsion de bitume	1 kg/m ²	basalte concas- sé 5/15	14 l/m ²
2 ^è couche	émulsion	1,4 kg/m ²	basalte concas- sé 3/5	6 l/m ²
3 ^è couche	émulsion	0,6 kg/m ²	sable local	3 l/m ²

<u>Route M'BOUR</u>				
<u>KAOLAK</u>				
Scellement	cut-back 150/200	1 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back 150/200	1,2 kg/m ²	gravillon basalte	12 l/m ²

<u>GUEOUL-LOUGA</u>				
Accrochage	émulsion à 55% de bitume 80/100	1 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back 150/200	1,5 kg/m ²	15/25	15 l/m ²
2 ^è couche	cut-back 150/200	1,2 kg/m ²	5/15	10 l/m ²

<u>PITOA - FIGUIE</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1	1 kg/m ²		
1 ^è couche	cut-back 400/600	1,3 kg/m ²	concassé 15/25 granitique	18 l/m ²
2 ^è couche	cut-back 400/600	1 kg/m ²	concassé 5/15 granitique	12 l/m ²

<u>Traversée de BONGOUANOU et de KANGANDI</u>				
Imprégnation	cut-back 0/1 fluxé par 10% gasoil	1,5 kg/m ²		
1 ^è couche	Emulsion Colacid à 65% de bitume	4 kg/m ²	quartz 7/15	12 l/m ²
2 ^è couche			roulé mais an- guleux 2/7	8 l/m ²
3 ^è couche			sable	6 l/m ²

NATURE DE LA COUCHE	L I A N T		A G R E G A T S	
	nature	dosage	nature	dosage
<u>Tronçon de la SORTIE</u>				
<u>de BOUAKE</u>				
Scellement	Emulsion			
1è couche	Colacid à 60%	1 kg/m2	15/25	15 l/m2
2è couche	" "	1 kg/m2	5/15	10 l/m2
3è couche	" "	1 kg/m2	2/7	5 l/m2

<u>JADOTVILLE-KOLWEZI</u>				
Imprégnation	Wankie Tar	1 kg/m2		
1è couche	bitume 85/100	1,2 l/m2	12/25	22 kg/m2
2è couche	bitume 85/100	1,4 l/m2	6/12	8 kg/m2

3.4 - ETUDES ET RECHERCHES CONCERNANT LES REVETEMENTS

L'examen de la tenue des revêtements de chaussées réalisés en Afrique depuis une dizaine d'année, montre qu'un certain nombre de recherches et d'études concernant ces revêtements mériteraient d'être entreprises.

Ces recherches, qui devraient être menées parallèlement en laboratoire et sur des chantiers expérimentaux, pourraient porter :

- sur l'utilisation des matériaux locaux, tels que les coquillages ou les latérites lavées, pour la réalisation de gravillonnages.
- sur les dopes à utiliser en climat humide et , en général, sur les phénomènes de désenrobage.
- sur le rôle joué par la couche de collage dans la répartition des contraintes et des déformations, en particulier, dans le cas de couches de base stabilisées à faible dosage et surmontées d'un revêtement épais en matériaux enrobés.
- sur l'étude de liants thermo-durcissables ou sans susceptibilité.

Cette dernière étude paraît particulièrement importante et devrait permettre la mise au point de revêtements mono-couche présentant une plus grande rigidité et une meilleure résistance à l'usure.

-:-:-:-:-

ÉTUDES

parues à ce jour dans la série « développement de l'outre-mer » (1)

8083* - N° 1

Le marché du café, du cacao et des bananes dans les pays de la CEE

1963, 226 p. (f, d, i, n), FF 49,-; FB 500,-

8116 - N° 2

Document synthétique sur l'économie mondiale des matières grasses

1964, 63 p. (f, d, i, n), FF 12,-; FB 120,-

8149* - N° 3

Les critères d'appréciation des projets soumis au Fonds européen de développement

1965, 54 p. (f, d, i, n, e), FF 5,-; FB 50,-

8177 - N° 4

Le marché des oléagineux tropicaux dans les Etats membres de la CEE

1966, 206 p. (f, d, i, n, e), FF 60,-; FB 600,-

SERVICES DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

(1) Les signes abrégés f, d, i, n et e indiquent les langues dans lesquelles les textes ont été publiés (français, allemand, italien, néerlandais et anglais).

BUREAUX DE VENTE

FRANCE

*Service de vente en France des publications
des Communautés européennes*
26, rue Desaix – Paris 15e
Compte courant postal : Paris n° 23-96

BELGIQUE

Moniteur belge – Belgisch Staatsblad
40, rue de Louvain – Leuvenseweg 40
Bruxelles 1 – Brussel 1

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

*Office central de vente des publications
des Communautés européennes*
9, rue Goethe – Luxembourg

ALLEMAGNE

Verlag Bundesanzeiger
5000 Köln 1 – Postfach
Fernschreiber: Anzeiger Bonn 8 882 595

PAYS-BAS

Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf
Christoffel Plantijnstraat – Den Haag

ITALIE

Libreria dello Stato
Piazza G. Verdi 10 – Roma

Agenzie:

Roma – Via del Tritone 61/A e 61/B
Roma – Via XX Settembre
(Palazzo Ministero delle Finanze)
Milano – Galleria Vittorio Emanuele 3
Napoli – Via Chiaia 5
Firenze – Via Cavour 46/r

GRANDE-BRETAGNE ET COMMONWEALTH

H.M. Stationery Office
P.O. Box 569
London S.E. 1

ETATS-UNIS D'AMERIQUE

European Community Information Service
808 Farragut Building
900-17th Street, N.W.
Washington, D.C., 20006

AUTRES PAYS

*Office central de vente des publications
des Communautés européennes*
2, place de Metz – Luxembourg
Compte courant postal : Luxembourg n° 191-90

SERVICES DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
8200/1/IV/1967/5

FF 60,- FB 600,- DM 48,- Lit. 7 500 Fl. 44,- £4.6.0 \$12.00
