



école polytechnique de thiès

GC.0468

PROJET DE FIN D'ETUDES

TITRE: LE COMPACTAGE DES SOLS
UTILISES EN CONSTRUCTION
DE ROUTES AU SENEGAL

Auteur M. MOUSTAPHA N'DIAYE

Génie CIVIL

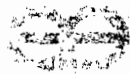
Date 1978

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

PROJET DE FIN D'ETUDES

TITRE LE COMPACTAGE DES
 SOLS UTILISES EN
 CONSTRUCTION DE ROUTES
 AU SENEGAL

DIRECTEUR DE PROJET: M. GAUTHIER



ECOLE

AUTEUR: M. MOUSTAPHA N'DIAYE

GENIE CIVIL

1978

REMERCIEMENTS

Je remercie toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce projet, notamment :

- Mr GAUTHIER, professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès, qui en était le directeur.
- Mr SALL, directeur du C E R E E Q, pour la bonne documentation qu'il a bien voulu me fournir.
- Melle Assiétou GAYE, Secrétaire à l'Ecole Polytechnique de Thiès qui a bien voulu dactylographier ce texte.

AVANT - P R O P O S

Cette étude sera jalonnée par une synthèse bibliographique et d'expériences effectuées en laboratoire sur des sols vis à vis de la réalisation de la couche de base et de fondation. Elle portera aussi sur l'exécution même du compactage et surtout en ce qui concerne l'efficacité des engins de compactage au niveau du chantier de construction.

A l'heure actuelle, la communication routière est assurée par l'intermédiaire des chaussées économiques et des routes en terre qui ont été conçues pour un trafic journalier qui ne dépasse pas quelques centaines ou quelques dizaines de véhicules et dont les performances dépassent qu'à même les chaussées expérimentales de l'essai A.A.S.H.O.

Ces routes économiques malgré leurs caractéristiques géotechniques pauvres, ont pu apporter satisfaction dans ces quinze dernières années, bénéficiant durant cette période, que d'une ou deux enduits superficiels. Et maintenant, pour les horizons futurs, une attention particulière devra être portée sur la structure de ces routes, devant les conditions climatiques difficiles, mais aussi, devant l'augmentation du trafic et en particulier du trafic des poids lourds.

Le problème se pose donc comme ceci : faut-il construire des chaussées économiques qui entraînent de lourdes charges d'entretien ou alors, construire définitivement des chaussées mieux adaptées à la situation actuelle afin de minimiser les coûts d'entretien?

Et ce projet s'intéressera surtout sur l'amélioration que pourrait apporter le compactage correctement réalisé des couches d'assises bien choisies, sur ce problème actuel des routes en Afrique.

T A B L E D E S M A T I E R E S

	Pages
I - Introduction	1
II - Le compactage en laboratoire	2
2.1 Aperçu global	3
2.2 Détermination de la densité sèche	5
2.3 Détermination de la densité humide	6
2.4 Détermination de la teneur en eau	6
2.5 Compaction du matériau mesurée à partir de sa densité sèche	7
2.6 Compaction du matériau mesurée à partir du pourcentage de volume d'air	7
2.7 Facteurs qui influencent le compactage en laboratoire.	8
2.7.1 La granulométrie	8
2.7.2 L'eau	11
2.7.3 Energie de compactage	11
III - Le compactage engin	15
3.1 Introduction	15
3.2 Facteurs qui influencent le compactage - engin	18
3.2.1 Influence du matériau	18
3.2.2 L'eau et le trafic	19
3.2.3 Influence de l'engin et de l'énergie de compactage	24
3.2.3.1 Nombre de passes	25
3.2.3.2 Pression de contact	27
3.2.3.3 Le gradient de compacité et épaisseur de la couche à compacter	29
3.2.3.4 Vitesse	32
3.2.3.5 Compacité et coût du m ³ compacté	33
IV - Les engins de compactage	34
4.1 Les rouleaux lisses	34
4.2 Les rouleaux à pneus	37
4.3 Les rouleaux à pieds	40
4.4 Les engins de damage par chocs	43

4.5	Autre rouleaux agissant par pression	45
4.5.1.	Les rouleaux à grille	45
4.5.2.	Les rouleaux segmentés et à patins	45
4.6	Les engins vibrants, plaques ou cylindres	46
4.6.1.	Les rouleaux vibrants	46
4.6.2.	Les plaques vibrantes	48
4.7	Le compactage des sols traités au ciment	50
V -	Conclusion	51
	Bibliographie	55

I - I N T R O D U C T I O N

Le compactage est une opération essentielle pour la construction d'une chaussée. Il consiste au serrage des matériaux à l'aide d'engins appropriés.

L'intérêt que l'on porte sur le compactage s'explique à la fois par la variété du matériel de compactage et par les nombreuses lacunes qui existent sur ce sujet.

Le développement du matériel a élargi l'éventail des matériaux par l'introduction de sols moins nobles qui étaient très difficiles à mettre en oeuvre mécaniquement : les hériasons et les macadams ont fait place aux sols naturels plus ou moins améliorés, aux sables, aux graviers, aux tout-venant de carrière... Et comme il est impossible de concevoir un engin unique qui soit techniquement et économiquement valable pour un tel éventail de matériaux, des engins de compactage de types variés ont été successivement proposés.

En plus, de nombreuses lacunes existent encore sur la connaissance de la compaction et de nombreux savants se sont penchés sur la question, faisant des essais en laboratoire et en vraie grandeur sur le problème du compactage, pour pouvoir prédire l'efficacité d'un engin sur un sol donné.

Il est possible maintenant de faire une synthèse de ces études faites, pour en dégager certaines conclusions et règles générales.

Et cette étude comportera :

- Un bref aperçu sur les méthodes de contrôle de la compaction
- Une étude des facteurs qui influencent le compactage tels que : nature des sols, caractéristiques et mode d'action des engins de compactage.
- Une analyse des causes de destruction de la couche de base et de la couche de fondation en Afrique tropicale et les solutions apportées : comme par exemple, le traitement de la couche de base au ciment.

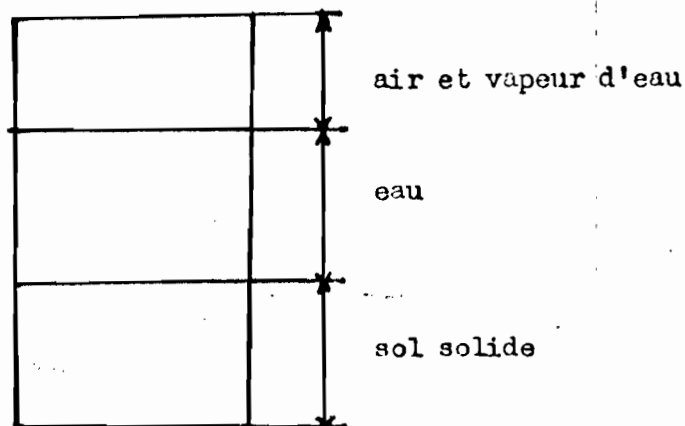
II - LE COMPACTAGE EN LABORATOIRE

2.7 Aperçu global

On peut approximer que les sols se présentent sous forme triphasée

- grains solides
- eau interstitielle
- air et vapeur d'eau

Comme le montre le schéma ci-dessous.



Et le compactage consiste à réduire le volume des vides qui sont occupés par l'air et l'eau ; c'est-à-dire amener les grains **composant ces sols** à un état de serrage optimal, vis à vis du gonflement et du tassement ultérieurs que pourraient occasionner respectivement, l'imbibition en eau et les charges dues au trafic qui seront supportées par la route.

L'analyse des essais A.A.S.H.O a montré que les déformations d'une chaussée circulée (ornières) avait un double origine.

- d'une part une déformation plastique des couches avec re-foulement latéral.
- d'autre part une augmentation de compacité de chaque couche, variable d'ailleurs avec la nature des couches.

Dans le premier cas c'est la stabilité mécanique qui est en cause (déformation par cisaillement), dans le deuxième cas, il s'agit

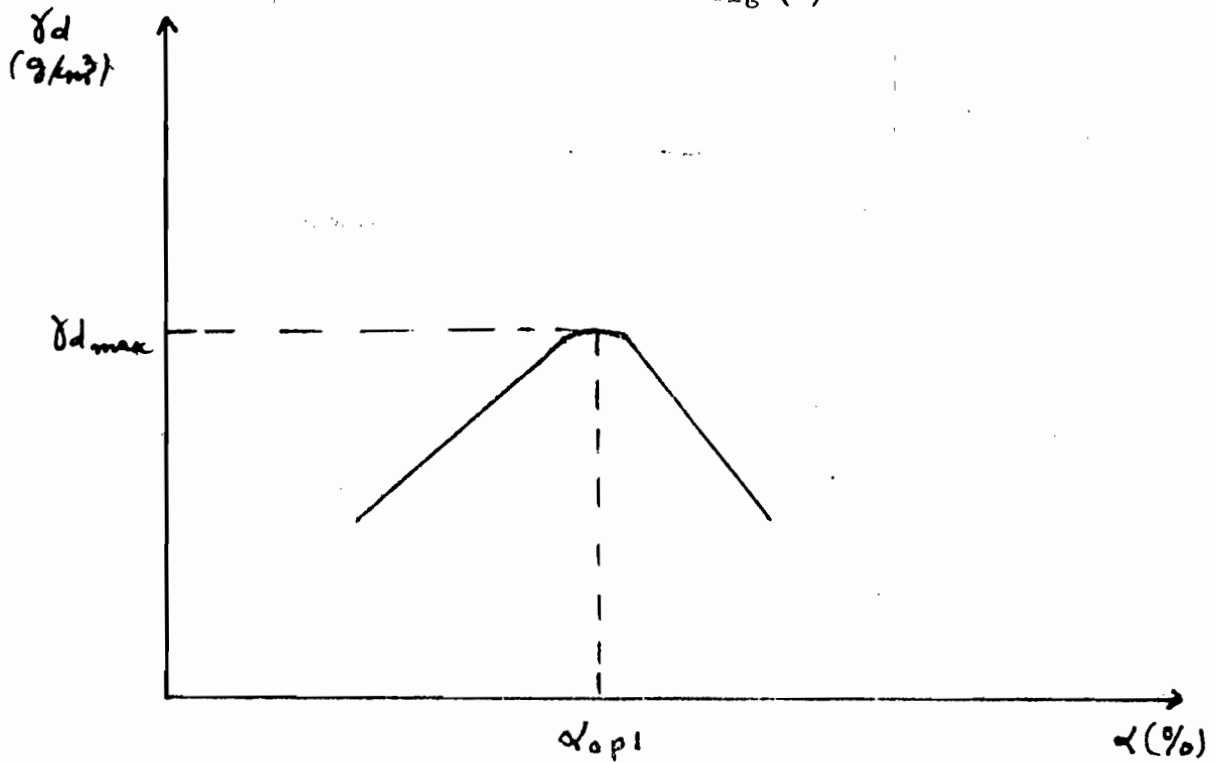
d'un phénomène de tassement différé sous le trafic.

La méthode la plus utilisée en géotechnique routière pour prévenir les tassements ultérieurs des remblais de sol mis en place est basée sur la théorie de Proctor.

Un sol non saturé est caractérisé par une courbe représentant plusieurs états de compacité définis par sa densité sèche et la teneur en eau correspondante. En effet Proctor, a remarqué que si on augmente progressivement la teneur en eau d'un échantillon de sol tout en conservant une méthode de compactage standardisée, le poids spécifique sec apparent varie en augmentant, passe par un maximum et diminue rapidement.

En traçant la courbe densité sèche en fonction de la teneur en eau, on obtient une courbe parabolique caractéristique du matériau appelée courbe proctor de ce dernier (Fig 1).

Fig (1)



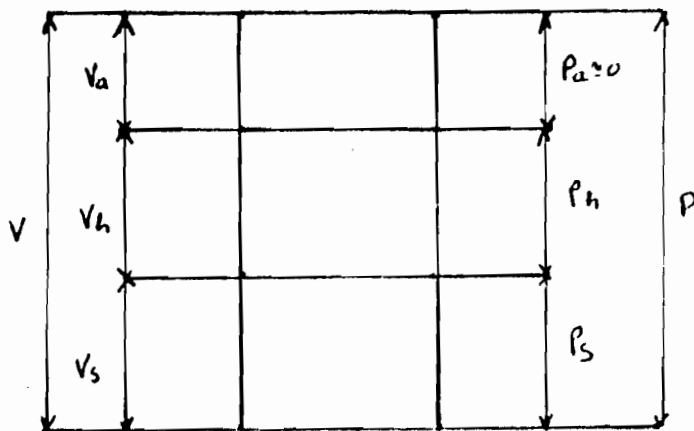
Les caractéristiques intéressantes de cette courbe sont :

- La densité sèche maximum ($\gamma_{d\max}$)
- La teneur en eau optimale (w_{opt})
- L'évasement de la courbe qui nous renseigne sur la sensibilité de l'eau du sol étudié.

Plus la courbe est pointue plus le sol est sensible à l'eau ; plus la courbe est évasée, moins le sol est sensible à l'eau.

Un sol compacté à l'optimum proctor peut, par la capillarité où par succion, absorber une quantité supplémentaire d'eau et parfois gonfler. Et suite à ce gonflement, le sol subit une chute de stabilité mécanique qui sera d'autant plus importante que le sol est sec et la quantité de fines importante.

2.2 Détermination de la densité sèche



avec

V_a : volume d'air

V_h : volume d'eau

V_s : volume solide

$V = v_a + v_h + v_s$: volume total

P_h : poids de l'eau

P_s : poids solide

$P = P_h + P_s$: poids total

La densité humide est : $\gamma_h = \frac{P}{V}$

La teneur en eau est : $\alpha \% = \frac{P_e}{P_s} \times 100$

La densité sèche est : $\gamma_d = \frac{P_s}{V}$

$$\gamma_h = \frac{P}{V} = \frac{P_e + P_s}{V} = \frac{P_s}{V} + \frac{P_e}{V}$$

$$\text{et } \frac{P_s}{V} = \gamma_d$$

$$\Rightarrow \gamma_h = \gamma_d + \frac{P_e}{V} = \gamma_d + \alpha \gamma_d = \gamma_d (1 + \alpha)$$

$$\text{alors } \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \alpha}$$

On voit que la détermination de la densité se fait à partir de la densité humide et de la teneur en eau de l'échantillon.

2.3 Détermination de la densité humide (γ_h)

- Au laboratoire :

On prend l'échantillon du sol humidifié à une certaine teneur en eau, on en détermine le volume V (volume d'un moule) et le poids P_h

$$\text{et } \gamma_h = \frac{P_h}{V}$$

- In Situ :

La détermination de l'échantillon prélevé se fait par les méthodes de la bouteille de sable ou du densitomètre à membrane. On détermine le volume de l'excavation par remplissage de sable normalisé ou d'une membrane gonflée d'eau.

2.4 Détermination de la teneur en eau

- Au laboratoire :

La teneur en eau peut être déterminée au laboratoire, en prenant une portion du même échantillon humide ; on détermine son poids sec P_2 et son poids humide P_1 (le poids sec P_2 est déterminé par étuvage).

La teneur en eau étant :

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{P_2}$$

- Au chantier

Le rythme de l'exécution des travaux étant souvent incompatible avec le délai qu'impose le séchage à l'étuve, on utilise des méthodes rapides qui sont :

- La méthode par séchage à l'alcool méthylique
- La méthode par emploi de carbure de calcium.

2.5 Compaction du matériau mesurée à partir de sa densité sèche.

La mesure de la compacité d'un sol se fait par la comparaison de la densité apparente réalisée au chantier à la densité sèche apparente maximum réalisée au laboratoire. Le rapport de ces deux grandeurs étant le "degré de compactage" de l'échantillon du sol.

Pour un remblai, on peut se contenter d'exiger 95 % ou 100 % de la compacité maximum réalisée au Proctor standard. Mais pour un chantier de route, où la force portante est élevée, il est plus intéressant d'exiger une compacité de 95 % ou de 100 % du maximum proctor modifié. Ce dernier étant la limite extrême pour les sols plastiques au delà de laquelle on pourrait courir un risque de gonflement.

2.6 Compaction du matériau mesurée à partir du pourcentage de volume d'air

Dans certains pays, l'Angleterre à l'occurrence, le degré de compactage des sols est mesuré à partir de son pourcentage en volume d'air ; rapport du volume d'air au volume total de l'échantillon du sol à étudier et à une teneur en eau appelée teneur en eau naturelle du sol.

La teneur en eau naturelle d'un massif est la teneur en eau d'équilibre qui règne dans le massif lorsque l'équilibre des mouvements d'eau est atteint. Teneur en eau qui dépend pas des variations saisonnières, qui peut être déterminée en laboratoire par des essais de succion ou in situ par des mesures à une profondeur d'au moins 30 à 60 cm en sols sableux et un mètre en sols plastiques.

Les spécifications anglaises imposent de compacter à la teneur en eau naturel (± 2 %)

- Jusqu'à un pourcentage maximum de volume d'air de 10 % pour le corps de remblai.

- Jusqu'à un pourcentage maximum de volume d'air de 5 % pour les 60 cm supérieurs du remblai ainsi que pour les fondations et sous-fondations.

- Jusqu'à un pourcentage maximum de volume d'air de 5 % pour les 15 cm supérieurs pour les sols en place.

Cette méthode, renforcée par une étude de la granulométrie des sols, tiendrait compte de façon plus réaliste, des teneurs en eau que l'on rencontre en zone tropicale à fortes variations d'humidité.

2.7 LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LE COMPACTAGE

2.71 La granulométrie

L'identification géotechnique d'un sol se matérialise essentiellement par la nature du sol et la granulométrie ; ces dernières variables demeurant les facteurs les plus importants qui gouvernent le compactage.

Nous distinguerons d'une part, les sols fins, c'est-à-dire passant le tamis n°4 et d'autre part, les sols comportant des graviers en proportion variable.

Les sols fins :

En ce qui concerne les sols fins, on constate que la densité sèche est d'autant plus grande que la courbe granulométrique est étalée.

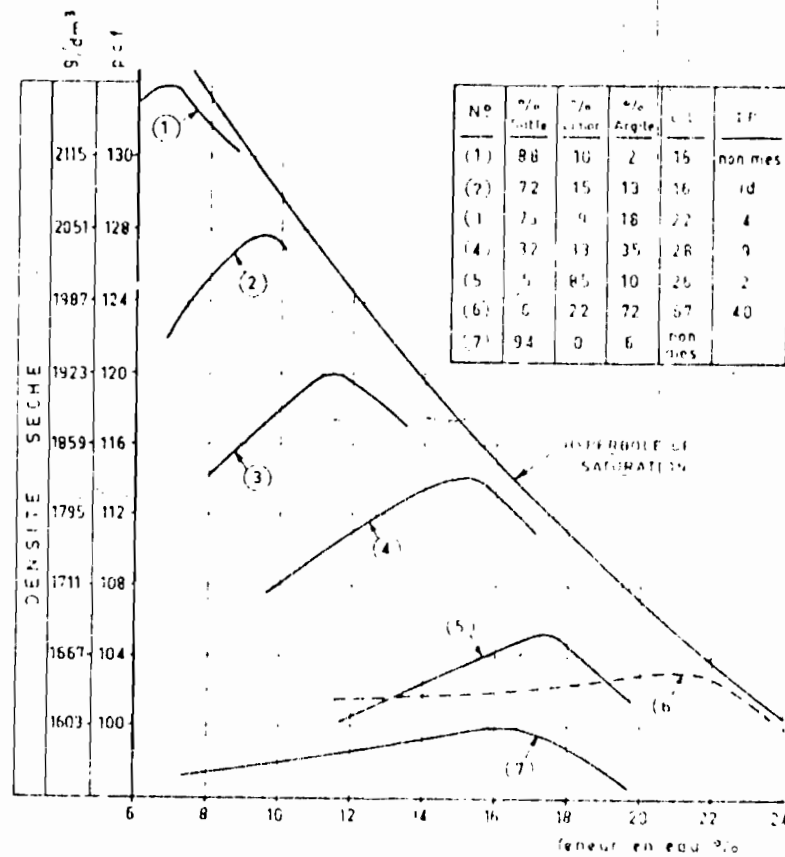
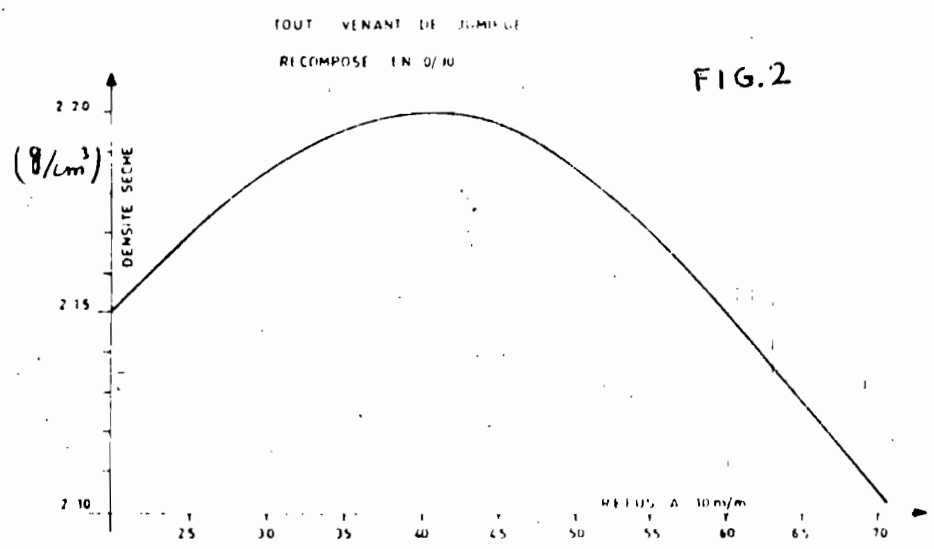


FIG 1 COURBES PROCTOR POUR DIVERSES COMPOSITIONS DE SOL

En observant la figure 1, on constate que les sables limoneux ont leur densité sèche très élevée, alors que les argiles pures ont leur densité sèche maximum très faible, présentant une courbe proctor étalée, plus plate que celle des sables limoneux. On constate aussi que plus le pourcentage de fines est grand, plus la densité sèche maximum augmente. pour les sables.

Sols comportant des graviers

Considérons maintenant un sol fin dans lequel on introduit, par mélange, des éléments graveleux. Tant que ceux-ci seront dispersés dans le mortier, ce sont ces derniers qui gouvernent le comportement du mélange au compactage. Compte tenu du poids spécifique élevé des éléments graveleux, la densité sèche maximum augmentera avec la proportion de ces éléments. Lorsque cette proportion croît au delà d'une valeur telle que, la fraction de mortier soit **insuffisante pour remplir les vides** existant entre les graviers, on observe une diminution progressive de la densité sèche maximum. Et comme le montre la figure 2, représentant les résultats obtenus par le centre d'essais de Rouen en France. Sur un 0/30 reconstitué, en faisant varier la proportion de la fraction de 10/30, on voit que la densité sèche passe par un maximum lorsque le refus de 10 mm est de l'ordre de 40 %.



On pourrait dans la recherche pour obtenir de fortes densités sèches, être tenté de modifier la granulométrie du sol. Il suffit en particulier d'ajouter des fines (à un sol sableux par exemple) pour remplir les vides entre les grains et augmenter la densité sèche.

Malheureusement de tels procédés sont souvent catastrophiques, car si les fines introduites sont argileuses, le gonflement ultérieur sera très important et la lubrification produite par les particules argileuses occasionnera une chute grave de la stabilité.

Cette analyse nous amène à dire que : finalement, la dimension moyenne des grains conditionne dès l'abord les poids spécifiques apparents secs maxima que peut atteindre le sol : Les limites de ces maxima sont environ

- 2,0 t/m³ pour une argile
- 2,2 t/m³ pour des sables présentant une granulométrie étendue et possédant un pourcentage de fines relativement élevé ; tels que les sables plus ou moins argileux.

- 2,5 t/m³ pour un gravier-sable-argile qui est la configuration de la granulométrie de la latérite que l'on trouve en Afrique.

Cependant l'étendue granulométrique a une influence primordiale sur la compactibilité plus ou moins grande d'un matériau. Plus un sol est de granulométrie uniforme, plus le volume total des vides est élevé et plus la porosité est moins sensible à une variation de teneur en eau. Il en résulte une courbe de compaction aplatie, avec un maximum très peu accentué. Le facteur étendu granulométrique peut entrer en compétition avec le facteur dimension moyenne des grains. Au contraire un matériau a granulométrie étalée contient des grains de dimensions très différentes pouvant s'imbriquer les uns dans les autres ; cette imbrication varie notablement d'après la teneur en eau, ce qui se traduit par une courbe de compaction beaucoup plus pointue.

2.7.2 L'EAU

Comme exposé au paravant, l'eau joue le rôle de lubrification qui sera optimal pour une teneur en eau donnée. A une valeur inférieure, le sol sera très difficile à compacter, et au delà de cette valeur, l'eau sera néfaste et provoquera une chute de stabilité. Ce phénomène étant surtout dangereux pour les sols qui contiennent une quantité appréciable de fines, tels que les sables argileux ou limoneux.

2.7.3 L'énergie de compactage

Pour l'essai Proctor, cette énergie de compactage se mesure par la formule

$$E_v = \frac{W \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

avec

E_v : énergie spécifique de compactage

w : poids de la dame tombant en chute libre d'une hauteur h

N : Nombre de coups de dame par couche

n : nombre de couches

V : Volume du moule

Si on augmente l'énergie de compactage (ce qui se réalise le plus souvent en augmentant le nombre de coups par couche), on obtient une courbe coiffant la première et dont le sommet est décalé vers le haut et la gauche par rapport au premier.

A la figure 1, sont représentés les résultats obtenus en moule de 15,24 cm sur un sable peu argileux (CORPS [2]), soient les courbes successives :

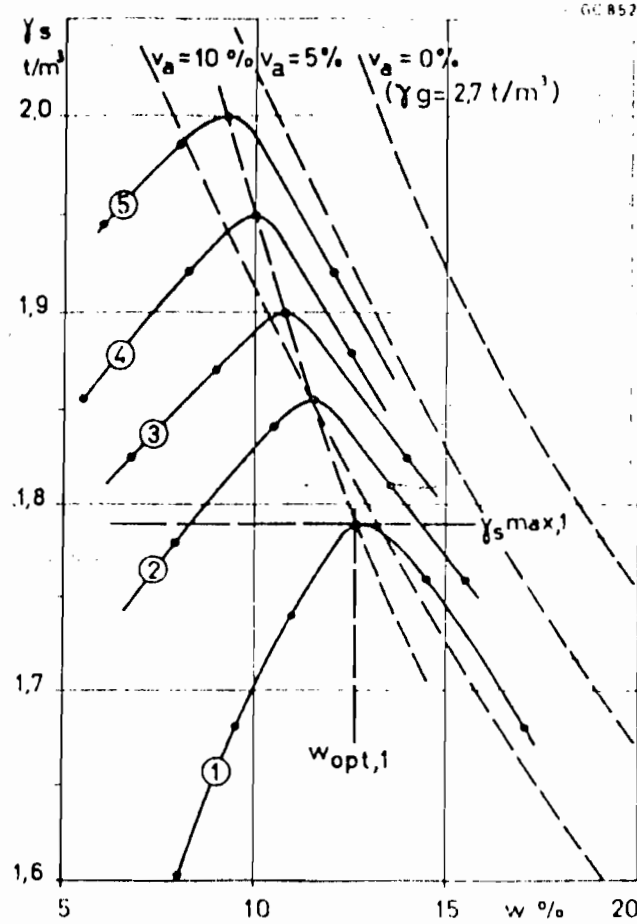


Fig 1 Courbes de compactage d'un sable peu argileux.

Courbe n°	Energie de compactage (kg/cm ³)
1	2,87
2	6,00 (Proctor standard)
3	13,00
4	27,5 (Proctor modifié)
5	50

Par conséquent, si l'énergie de compactage croît, le poids spécifique apparent sec maximum augmente, tandis que la teneur en eau diminue.

Les parties montantes (à gauche de l'optimum) des différentes courbes sont plus ou moins parallèles, tandis que les parties descendantes se recouvrent l'une l'autre et tendent asymptotiquement vers la courbe de saturation (ou de volume d'air nul), courbe correspondant au remplissage de tous les vides du sol par de l'eau. Les optima sont alignés sur une ligne à peu près parallèle à la courbe de saturation.

On peut facilement vérifier qu'il existe une relation linéaire entre le poids spécifique apparent sec maximum et le logarithme décimal de l'énergie de compactage. En partant en ordonnées les poids spécifiques apparents maxima selon une échelle arithmétique et en abscisses les énergies de compactage selon une échelle logarithmique, on obtient la droite " $\gamma_{s, max}$ VS $\log (E_v)$ " de la figure 2 établie à partir de la figure 1.

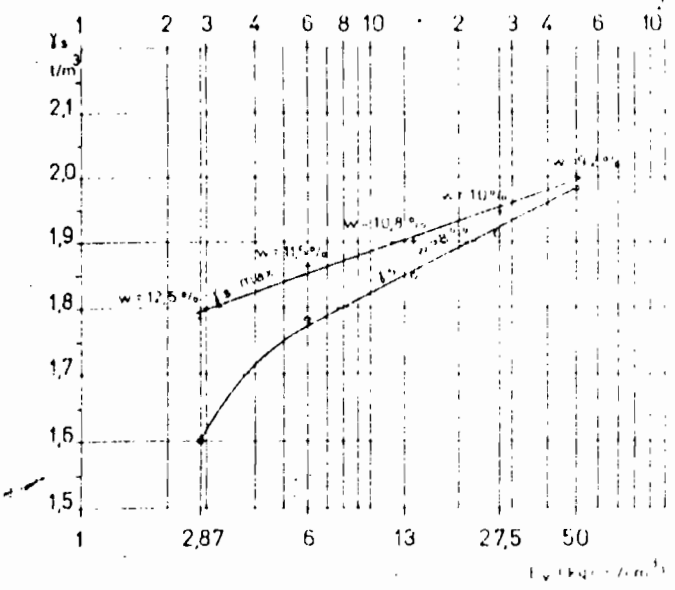


Fig 2.

Relation entre :
 poids spécifique appa-
 rent sec et énergie de
 compactage.

La pente du diagramme semi-logarithmique n'est pas constante : elle varie d'après le type de sol et augmente avec la plasticité du matériau. Donc les sols plastiques sont plus sensibles que les sols sableux à une variation de l'énergie de compactage.

Cette relation s'avère intéressante car elle permet, une fois que l'on connaît deux points de la droite, de prévoir le poids spécifique apparent sec correspondant à toute autre énergie de compactage.

La relation linéaire entre le poids spécifique apparent sec et énergie de compactage semble se vérifier à teneur en eau constante, tant que l'on reste à gauche de la teneur en eau la plus faible, c'est à dire tant que l'on compare des résultats sur des parties de courbes parallèles entre elles ; c'est ce qu'on constate sur la figure 2 pour une teneur en eau de 8 %, cette figure étant issue de la figure 1.

Toutefois pour l'énergie de compactage la plus faible, pour laquelle la courbe de compactage de la figure 1 n'a pas sa partie montante parallèle aux autres courbes, cette relation tombe en défaut.

III - LE COMPACTAGE - ENGIN

3.1 INTRODUCTION

Par les nombreuses études déjà faites sur le compactage au chantier, on constate qu'il est possible de dégager certaines règles au sujet des engins de compactage pour la majorité des cas.

Tout d'abord, il est nécessaire d'insister sur les différences entre les courbes obtenues in situ pour un compactage effectué par un engin. Ces deux genres de courbes présentant toutefois, une certaine analogie.

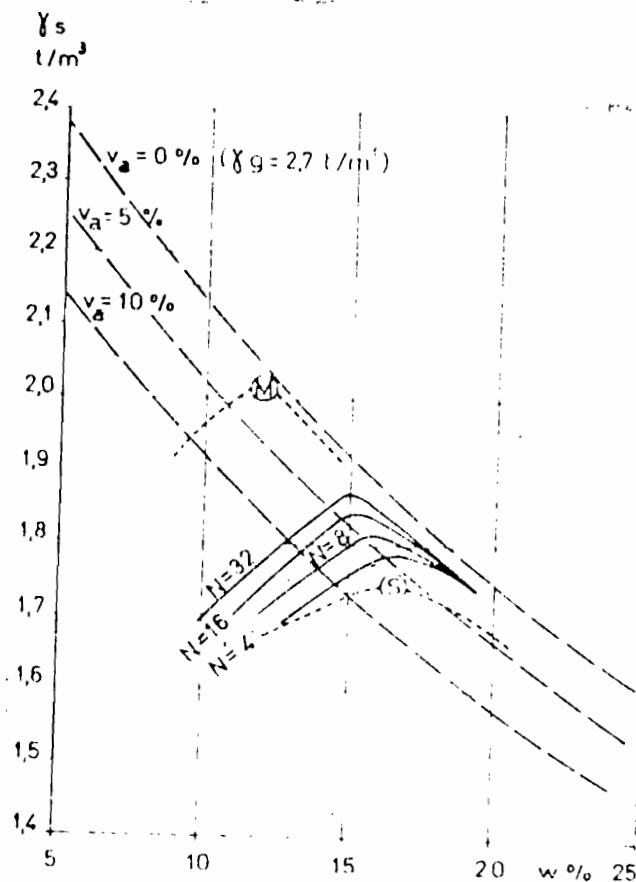


Fig 1 : N = nombre de passes
M = essai proctor modifié
S = essai proctor standard

En effet, si, pour un sol et un engin donné, on relève les poids spécifiques apparents secs correspondant à différentes teneurs en eau et différents nombres de passages (N), on peut tracer les courbes de compactage de l'engin considéré sur le sol choisi. Le diagramme de la figure 1 suivante (établi d'après les données de "ROAD RESEARCH Laboratory") reproduit les résultats obtenus lors du compactage d'une argile limoneuse par un rouleau à pneus de 20 t, après 4, 8, 16 et 32 passes.

On constate sur cette figure que les courbes de compactage s'emboîtent comme dans le cas des courbes proctor représentées ici en trait pointillé. Toutefois, entre ces deux types de courbes apparaissent des écarts en position qui entraînent des compacités maxima et des teneurs en eau optima correspondant à l'engin, différentes de celles que l'on obtient en laboratoire.

Dans ce cas par exemple, le poids spécifique apparent sec de $1,87 \text{ t/m}^3$ est atteint pour une teneur en eau optimum engin de 15 %, alors que l'essai Proctor standard $1,74 \text{ t/m}^3$ et 16,5 %.

Sur la figure 2, on a comparé, pour différents sols, les courbes de compactage en laboratoire avec les courbes de compactage correspondant à des engins variés étudiés au "ROAD LABORATORY" 13 : rouleaux à pneus, rouleaux lisses, rouleaux à pieds, grenouille sauteuse et rouleaux vibrant automoteur. On constate non seulement des écarts de position, mais aussi des variations de forme, certaines étant plus aplaties que d'autres.

Proctor lui-même, s'était rendu compte du problème et avait choisi des conditions opératoires tels que les résultats obtenus au chantier correspondent jusqu'à un certain degré, aux résultats des essais effectués en laboratoire.

A l'heure actuelle avec la diversité des engins de compactage et des sols utilisés rend difficile, voir impossible ce cadrage du problème. Cependant, les essais en laboratoire peuvent donner des indications sur la compactibilité d'un matériau et servir d'une certaine manière à classer et sélectionner les sols.

Mais pour fixer exactement, l'efficacité d'un type de compacteur, l'aire d'essai est alors obligatoire : C'est seulement qu'on peut établir la courbe de compactage de l'engin sur un sol déterminé ainsi qu'étudier l'influence des conditions de mise en oeuvre : nombre de passes, poids de l'engin, épaisseur de couche, vitesse etc...

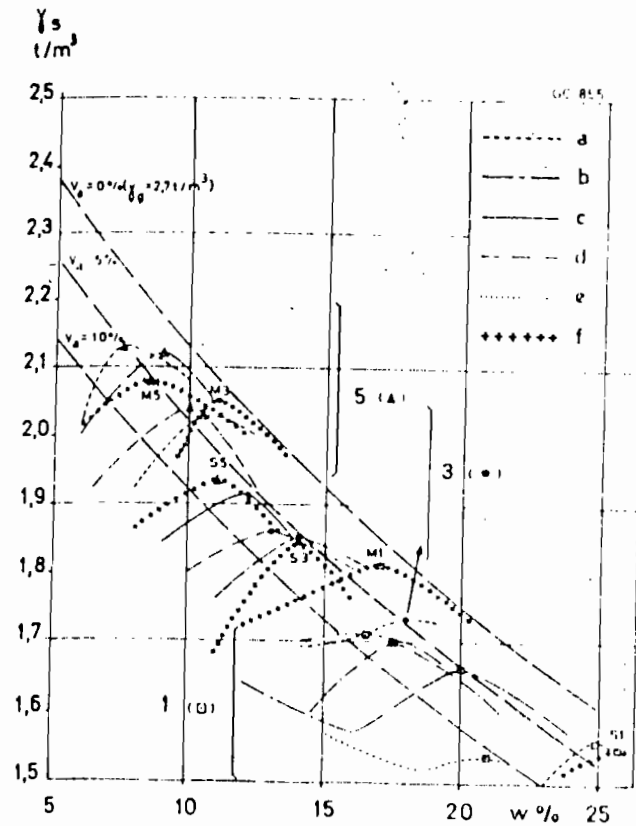


Fig 2 : Courbes de compactage à refus, de différents sols (en couches de 23 cm) par différents engins.

- | | |
|-------------------------------------|---|
| a - rouleau à pneus 12 t ; | d - grenouille 600 kg |
| b - rouleau lisse 8 t ; | e - rouleau vibrant 2,5 t |
| c - rouleau à pieds de mouton 5 t ; | f - Essai proctor standard(S)
et modifié (M) |
| 5 - sable à granulométrie étendue | |
| 3 - argile sableuse | |
| 1 - argile lourde. | |

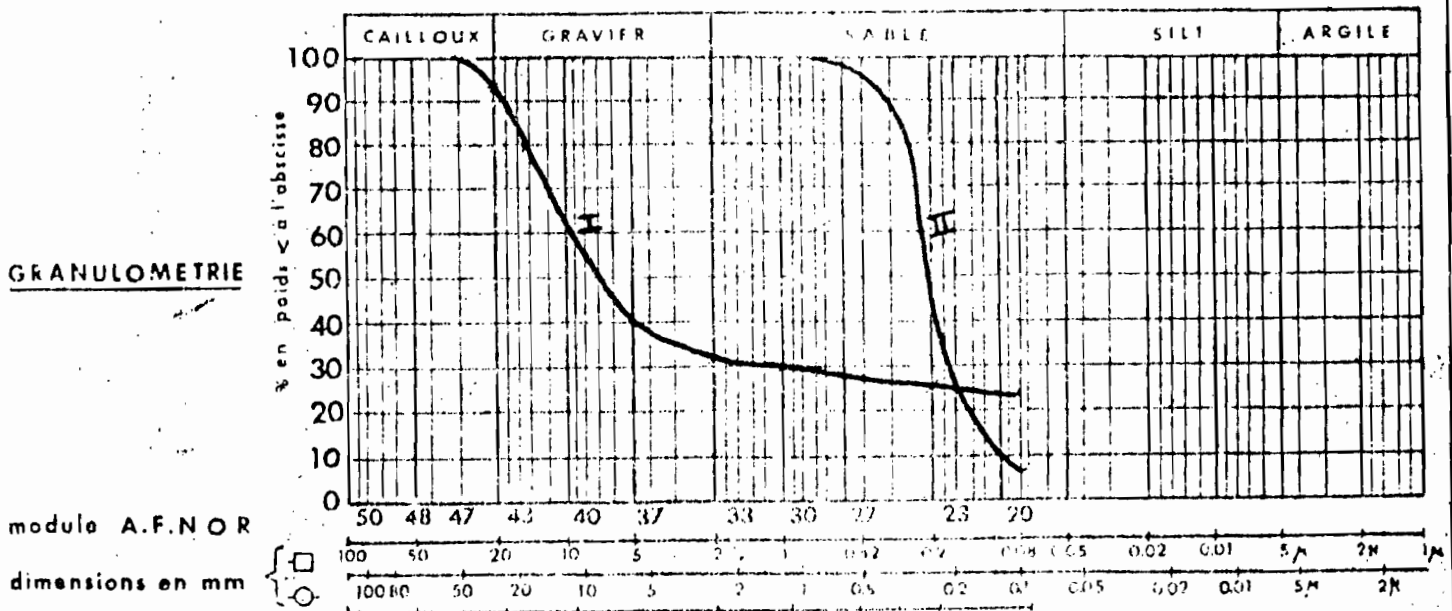
3.2. Facteurs qui influencent le compactage - engin

3.2.1 Influence du matériau

Comme pour le compactage au laboratoire, les principaux facteurs qui interviennent sont essentiellement

- La dimension moyenne des grains
- L'étendue granulométrique
- Le pourcentage de fines

En Afrique tropicale, les sols les plus utilisés pour la couche de base et la couche de fondation sont respectivement la latérite et du sable (souvent limoneux) : leur courbe granulométrique est représentée ci-dessous.



I = Latérite

II = sable limoneux.

La latérite

Les formations latéritiques représentent les plus abondantes ressources de matériaux économiques disponibles.

Ce sont des formations argilo-graveleuses dont les éléments grossiers sont constitués de concrétions latéritiques de diamètre variable, soit de quartz latérisés à différents degrés, mais néanmoins résistants.

Les sables

Au Sénégal dans la partie littorale on trouve des sables plus ou moins argileux d'origine sédimentaire et alors qu'au nord du pays, des sables fins et peu plastiques d'origine éolienne.

Normes relatives au choix des matériaux.

Il n'existe pas de normes sénégalaises, et pour cela la réglementation sur le choix des matériaux de construction routière est faite suivant les spécifications de la C E B T P pour les pays tropicaux (voir tableau suivant)

L'utilisation de ces sols à granularité continue, dans le contexte des pays de la zone tropicale, connaît les problèmes qu'engendrent la pénétration de l'eau et l'augmentation du trafic, surtout du trafic des poids lourds.

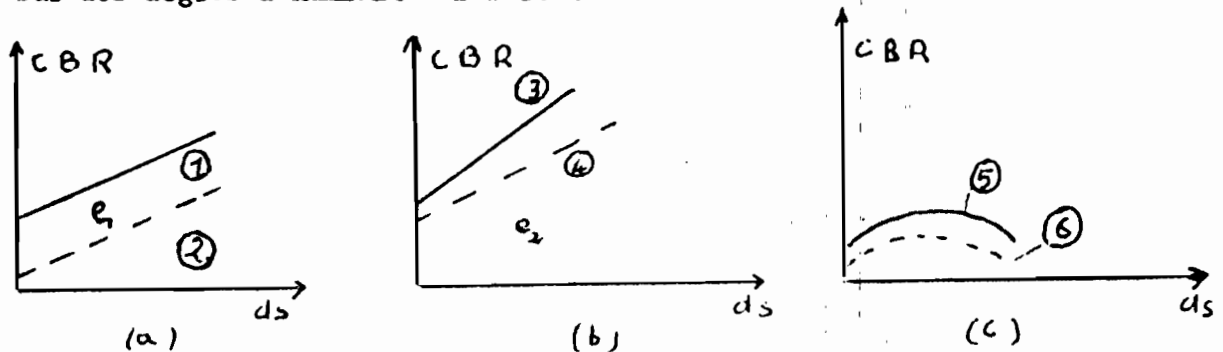
3.2.2 L'EAU ET LE TRAFIC

L'eau est le principal ennemi de la route, en effet, l'infiltration de l'eau dans les différentes couches de chaussées occasionnent une chute grave de la portance de ces dernières.

Ces pays de la zone tropicale bénéficient d'une longue saison sèche suivie d'une courte période d'humidité. Les différentes couches de chaussée de ces pays, voient leur teneur en eau assujettie à des variations importantes. Suite à ces variations de teneur en eau et au compactage effectué par le trafic, la compacité des différentes couches change ; changements répétitifs qui aboutissent à un stade de rupture par fatigue provenant du frottement entre les grains composant du sol de la couche correspondante.

L'effet du trafic sur une chaussée est équivalent à un compactage. On peut considérer qu'une couche de chaussée (sauf si elle est stabilisée au ciment) évoluera vers un stade ultime qui dépend de sa teneur en eau moyenne.

Comme le montrent les courbes ci-dessous qui représentent la variation de l'indice de portance CBR en fonction de la densité sèche sur des degrés d'humidité différents



- Variation du C.B.R d'un sol en fonction de la densité sèche.

Relation C.B.R - Densité sèche (d_s) pour différentes teneurs en eau (e_1 : faible - e_2 : moyenne - e_3 : forte).

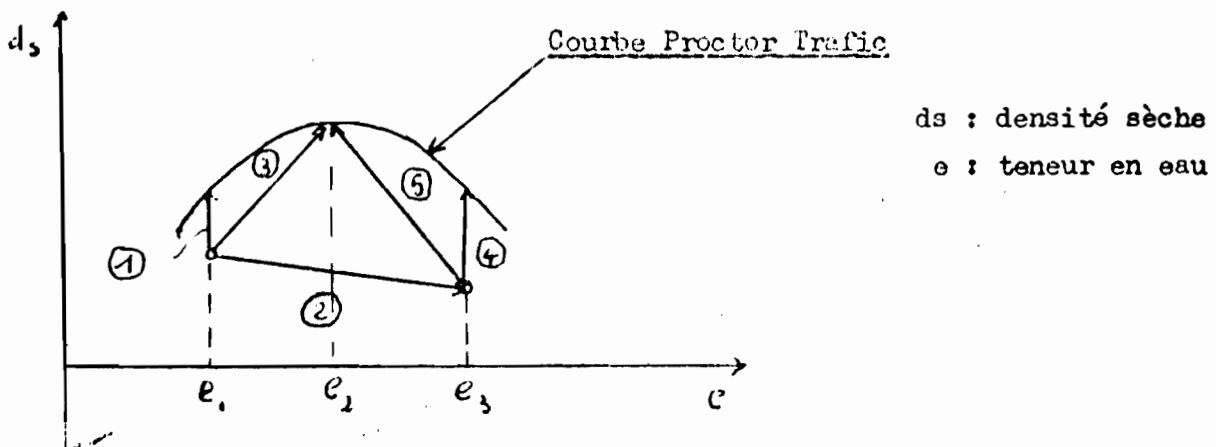
Courbes : 1-3-5 = immédiatement après compactage.

2-4-6 = après mouillage à saturation.

d_s : densité sèche

e : teneur en eau

Considérons maintenant la couche à étudier et supposons qu'elle ait une densité sèche inférieure à celle qu'elle atteindra sous le trafic (voir figure ci-dessous)



SPECIFICATIONS RECOMMANDEES PAR LE C E B T P POUR LES PAYS

TROPICAUX

Couche	W _L	Ip (%)	C.B.R	W de compactage	% de fines	Dureté Los Angelès	degré de compactage	gonflement linéaire mesuré dans le moule CBR	densité sèche (t/m ³)
Plateforme	70	40	5	W _{opt} + 1%	-	-	Après 4 j d'imbibition	3 %	-
Fondation	50	25	30*	-	-	-	Après 4 j d'imbibition	1 %	1,90
Couche de base	35	15	80	W _{opt}	40	50	Après 4 j d'imbibition	0,3 %	2,00

1) Si la teneur en eau est faible, mais n'évolue pas, la densité sèche va peut être varier et le CBR également.

2) Si la teneur en eau augmente rapidement (flèche 2) avant que le trafic ait le temps d'agir, le CBR va diminuer sensiblement et on risque alors des désordres, avant tassement.

3) Si la teneur en eau évolue lentement, en même temps que le trafic, le CBR augmente progressivement, avec par ailleurs des tassements importants (flèche 3)

4) Si la teneur en eau était élevée dès l'origine le trafic va occasionner un léger accroissement du CBR et ensuite une chute rapide, il y aura peu de tassement ; mais peut être une dislocation de la chaussée (flèche 4)

5) Si la teneur en eau est élevée mais s'abaisse rapidement, il peut y avoir une évolution favorable (flèche 5)

6) Dans le cas enfin où la teneur en eau était et reste proche de la teneur en eau optimum, on aura des tassements importants mais une bonne stabilité.

Cet examen nous montre jusqu'où, peut aller l'action de l'eau sur une couche de sol mal compactée et assujettie à de grandes variations de teneur en eau. C'est le cas de nos routes au Sénégal qui sont très sec pendant la saison sèche et très humide pendant la saison des pluies.

La solution de ces différents problèmes qui nuisent au bon fonctionnement de la route, consiste à l'heure actuelle à la stabilisation chimique de la couche de base par addition de liant hydraulique tel que le ciment.

Ce traitement consiste à ajouter au sol à mettre en place, une quantité de ciment de 3 à 10 % en poids et une quantité d'eau définie. Ce mélange mis en place sera soigneusement compacté.

Ce sol ainsi traité étant mis en place sur une couche de fondation simplement stabilisée mécaniquement, constitue un ensemble rigide, qui répartit les contraintes sur une surface importante de la couche de fondation, à la façon d'une dalle ; en contrepartie, sous l'effet des charges.

naissent dans cette dalle qui travaille en flexion, des contraintes de traction, qui se manifestent surtout, en section courante à sa base..

Les matériaux traités au ciment entrent dans la catégorie des matériaux fragiles tel que le béton, et présentent donc une faible résistance à la traction. Cette carence pourrait donc engendrer dans le cas d'une couche mal dimensionnée des fissurations qui proviennent de la base pour se développer, sous l'effet du trafic, sur toute l'épaisseur de la couche.

Pour palier à cet inconvénient on peut mettre en place une couche de matériau traité d'une épaisseur de 20 à 25 cm, reposant sur une couche de fondation suffisamment indéformable. Mais néanmoins, il surgit un problème inhérent aux matériaux traités au ciment : le retrait qui peut aussi causer des fissurations. Ce retrait est dû à l'hydratation du ciment où à l'évaporation de l'eau.

3.2.3 INFLUENCE DE L'ENGIN ET DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE

L'action d'un engin de compactage intervient par l'énergie qu'il communique au sol, mais aussi par la manière dont cette énergie est communiquée.

L'énergie de compactage dépend du nombre de passes et du poids de l'engin, et la façon dont elle va être communiquée dépend de la pression transmise par l'engin au sol, la surface de contact engin-sol, l'épaisseur de la couche meuble qu'il s'agit de compacter, la vitesse de progression de l'engin, la fréquence et la force de vibration dans le cas des engins vibrants.

3.2.3.1 Nombre de passes

Les courbes représentant les variations de la densité sèche en fonction du nombre de passes, présentent une configuration semblable ; elles présentent une relation linéaire jusqu'à un certain nombre de passes, au delà duquel la compacité devient rapidement constant. C'est le palier de la compacité à refus ou compacité ultime que peut atteindre l'engin (voir figure 1)

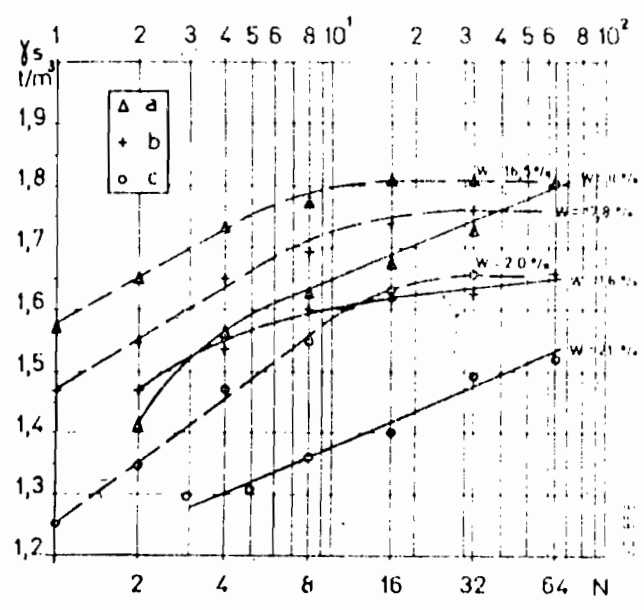


Fig 1
 a : argile sableuse
 b : argile limoneuse
 c : argile lourde
 N : Nombre de passes
 γ_s : densité sèche apparente

Relation entre le poids spécifique apparent sec et le nombre de passes (N) pour les sols cohésifs compactée par rouleaux lisses de 2,8 t (—) et 8,7 t (---) à la teneur en eau de l'optimum - engin.

Dans ce diagramme semi-logarithmique, si l'on porte les poids spécifiques apparents secs (en échelle arithmétique) en fonction du nombre de passes (en échelle logarithmique), à la teneur en eau constante, pour des sols et des engins très divers, on vérifie bien cette remarque qui a été faite au paravant.

On constate que pour le rouleau de 2,8 t après deux ou trois passes, un accroissement rapide, suivi d'un accroissement linéaire. Alors que pour le rouleau de 8,7 t, on constate un accroissement linéaire suivi d'un palier comme décrit au paravant. Pour ces deux cas il serait intéressant de trouver la pente de la droite ainsi décrite et le nombre minimum de passes pour atteindre le palier qui dépend de l'engin et du sol.

L'observation première de ces courbes, nous amène à remarquer la prédominance des parties linéaires d'équation

$$n = a \log \frac{N_0 + \Delta N}{N_0}$$

N_0 est le nombre de passes correspondant à la densité sèche apparent

$\Delta N = N_n - N_0$ avec N_n = nombre de passes obtenus après N passes

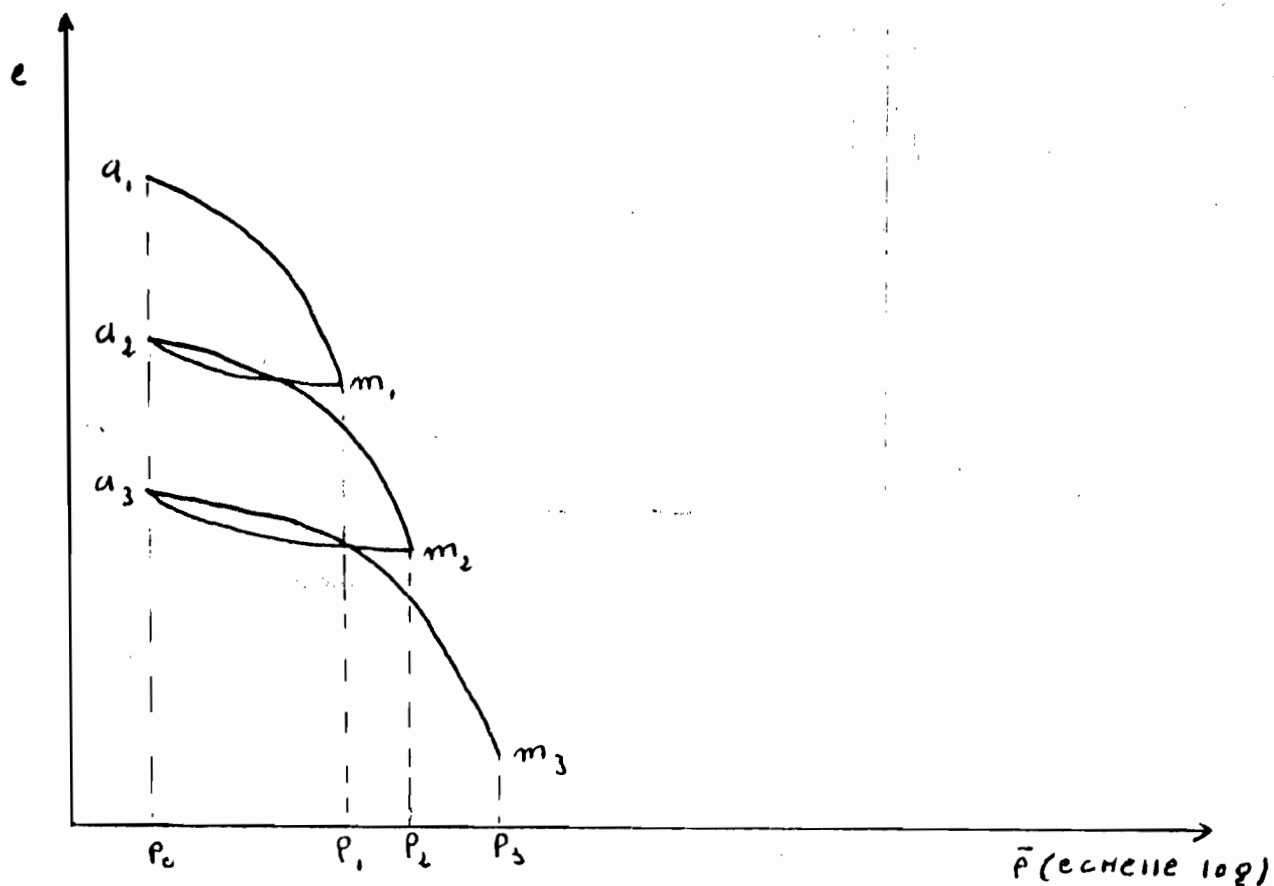
a = pente de la partie linéaire ; elle dépend des caractéristiques du sol et des conditions de chargement.

On pourrait donc pousser l'analyse, sur une analogie avec l'essai de compression à l'odomètre.

En effet nous savons que pour le compactage engin, le sol est soumis à une alternance de chargement égal au poids de l'engin et à un déchargement. Alors que pour l'essai de compression, une situation presque analogue est soumise à l'échantillon de sol.

Sauf que les charges sont appliquées plus lentement que lors du compactage.

Et en représentant la courbe indice des vides versus le logarithme de la pression exercée nous obtenons la configuration suivante



La courbe présente deux parties :

- Une partie $a_i m_i$ qui correspond à la compression.
- Une partie $m_i a_i + 1$ qui correspond à la décompression.

Les points a_i , représentant l'état du sol après le déchargement sont donc plus intéressants, dans la mesure où le compactage est analysé à, l'état de déchargement. (à partir de l'indice des vides il sera alors facile de déterminer la densité sèche correspondante.)

3.2.3.2 P R E S S I O N D E C O N T A C T

La pression de contact est un autre facteur d'importance qui se définit comme le quotient du poids total de l'engin par l'ensemble des aires de contact avec le sol.

Il existe également une relation linéaire entre le poids spécifique apparent sec maximum et le logarithme de cette pression de contact, tout au moins pour les compacités maxima obtenues pour chaque pression (à la teneur en eau optimum correspondante ; ce n'est donc pas une relation à teneur en eau constante).

A la figure 1, (d'après Lewis [12]), cette relation est vérifiée pour différents nombres de passes, sur deux sols compactés par un rouleau à pneus sur un sable argileux et une argile limoneuse. Si on recherche d'autre part, les relations à teneur en eau constante, on obtient soit une droite, soit une courbe présentant une légère concavité vers le haut. Sur certains sols, l'influence de la pression de contact est prépondérante sur le nombre de passes : il vaut donc mieux augmenter la pression de contact à la place du nombre de passes.

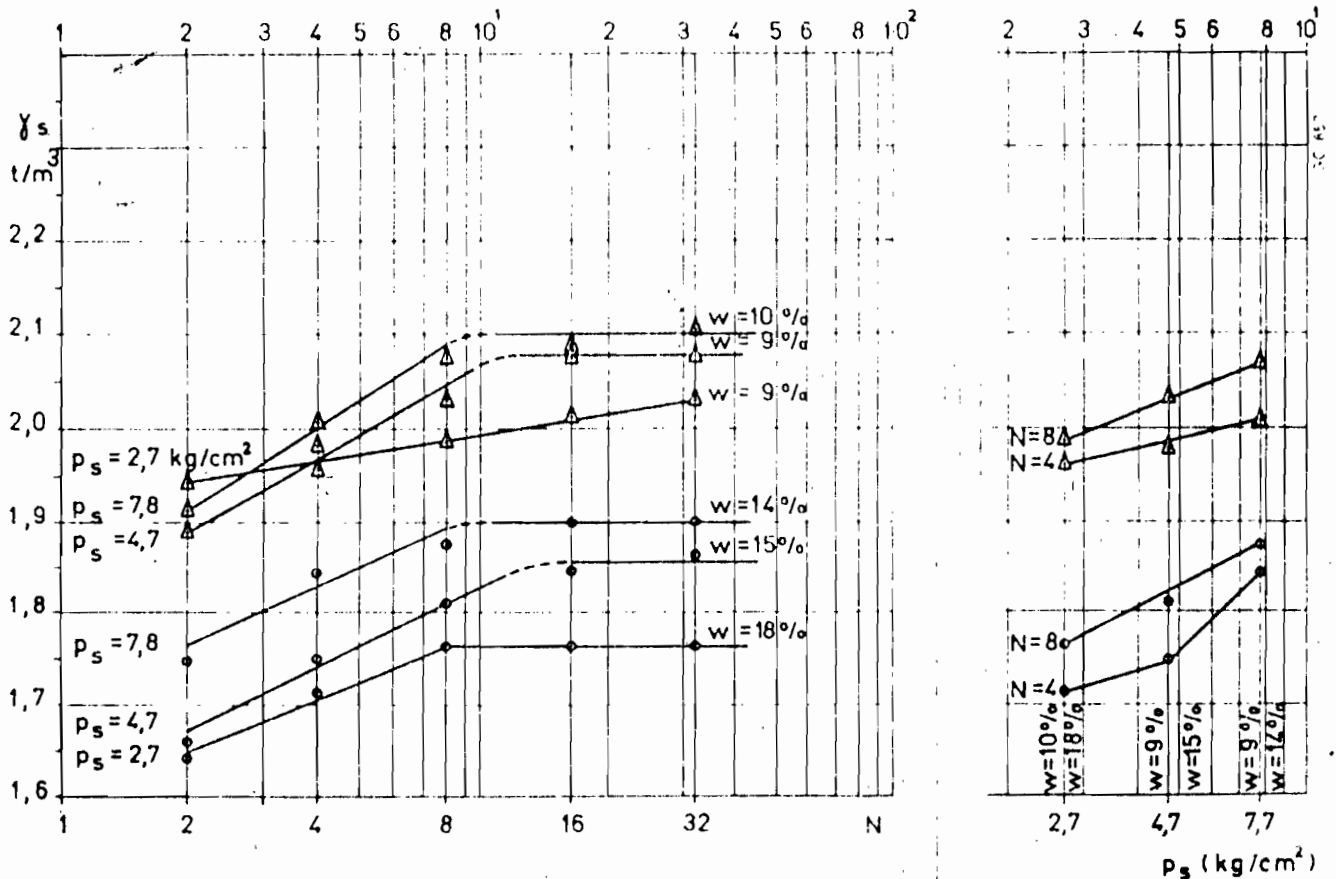


Fig 1 Relation entre le poids spécifique apparent sec et le nombre de passes (N) ou la pression de contact (P_s) pour un sable argileux (Δ) et une argile limoneuse (\odot) compactés par rouleau à pneus (à la teneur en eau optimum - engin).

3.2.3.3 LE GRADIENT DE COMPACTITE ET EPAISSEUR DE LA COUCHE A COMPACTER

Nous savons que lorsqu'une couche de sol est chargée, la contrainte de compression varie avec la profondeur. Et d'après les résultats théoriques de Boussinesq relatifs au problème de la détermination des contraintes et des déformations dans un massif élastique, homogène, semi-indéfini, chargé en surface par une force concentrée ou par des pressions réparties,

Dans le cas où par exemple, la charge est uniformément répartie sur un cercle de centre O'' et de rayon " a ", on a, pour les points de l'axe.

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

q = pression appliquée
 σ_z = contrainte de compression
 a = rayon du cercle
 z = profondeur du point considéré

Cette relation, bien que ne représentant pas l'état réel des contraintes en pratique, nous donne néanmoins une indication qualitative selon laquelle, la contrainte de compression infligée par un engin de compactage, diminue avec la profondeur du point considéré dans la couche de sol. Et que, à la surface de la couche compactée l'efficacité de l'engin ne dépend que de la pression et non de la charge totale. Par contre, à pression constante, lorsque la charge augmente, la surface d'appui augmente également et ceci va de pair avec une augmentation de la contrainte verticale comme le montre l'équation ci-dessus. C'est-à-dire à une profondeur donnée, nous pouvons donc dire que l'augmentation de la surface de contact correspond à une efficacité accrue du compactage en profondeur.

Le gradient de compacité, c'est-à-dire la différence par "cm" de profondeur, est approximativement proportionnel à la diminution de l'effet de compaction avec la profondeur et ceci, dû au fait que, chaque tranche reçoit une pression, donc une énergie de compactage moindre, par conséquent les courbes de compactage sont de plus en plus

basses. C'est ce que vérifie la figure 1 ci-jointe, tirée d'une étude du "Corps Of Engineers 14 " sur un limon placé sur une seule couche meuble de 85 cm

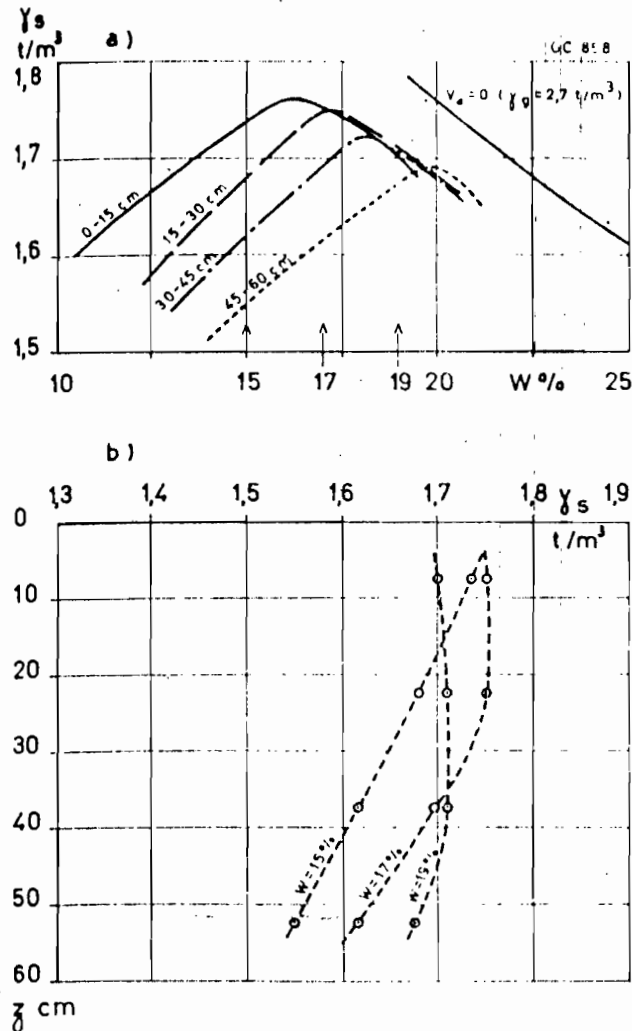


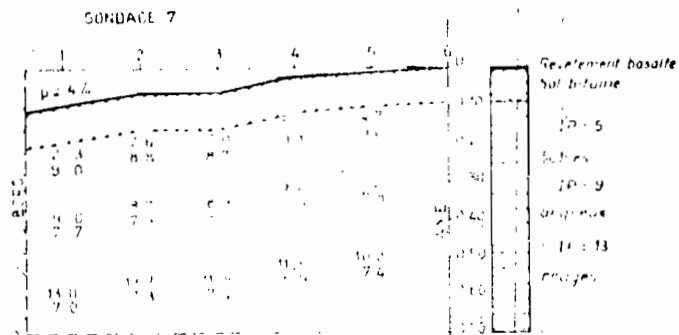
Fig 1 Influence de la teneur en eau sur le gradient de compacité.

a) Courbes de compactage à différentes profondeurs d'une argile limoneuse placée en couche meuble de 85 cm et compactée par un rouleau à pneus de 45 t

b) gradient de compacité en profondeur (γ)

Ces constatations faites, conduisent pour un sol donné, à une limitation de l'épaisseur à compacter, mais ce phénomène est atténué

si nous faisons un raisonnement similaire, pour voir que l'effet du trafic se manifeste de façon identique en profondeur. Comme le montre les études du Génie Américain sur les compacités obtenues sur un certain nombre de pistes soumises à un trafic répété, compacités qui varient avec la profondeur, confirmant ainsi le rôle de l'épaisseur de chaussée sur les tassements différés du sol de plate-forme, ainsi que celui de l'intensité de la charge.



Chiffres supérieurs : teneurs en eau

Chiffres inférieurs : indice de compactage
proctor modifié

Fig 2 Variation de la compacité du sol sous une chaussée en fonction de la profondeur.

La figure 2 montre que la compacité du sable sous une chaussée mince peut évoluer de façon importante par rapport à celle mesurée à une certaine profondeur.

Cette évolution, qui ne met pas en cause la stabilité de la chaussée, amène la formation progressive d'ornières.

3.2.3.4 LA VITESSE

On voit, d'après l'exemple de la figure 1, tirée de Lewis 15 que quelle que soit la vitesse, la compacité finale est à peu près constante, bien que le nombre de passes nécessaires pour atteindre certain poids spécifique apparent augmente au fur et à mesure que la vitesse croît.

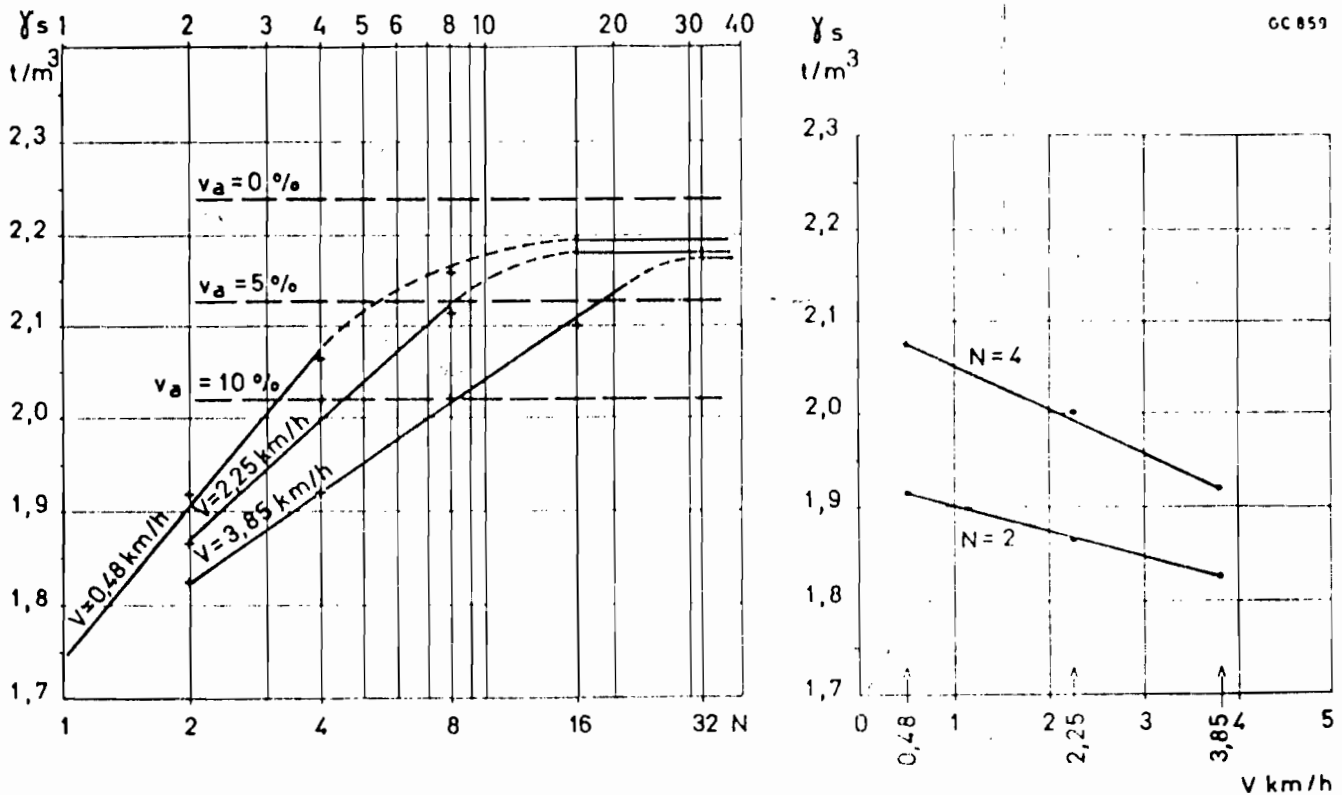


Fig 1 Influence de la vitesse (v) sur la relation entre le poids spécifique sec apparent et le nombre de passes ; avec un rouleau vibrant de 7,5 t sur un sable de granulométrie étendue à une teneur en eau de 7,6 %.

Toutefois, l'accroissement du nombre de passes n'est pas proportionnel à l'augmentation de la vitesse, surtout pour les vitesses faibles ; il y a par conséquent, souvent intérêt à augmenter la vitesse de compactage. On pourra aussi par une étude de rendement de l'engin, trouver la vitesse et le nombre de passes optimum.

3.2.3.5 COMPACTITE ET COUT DE M³ COMPACTE

Une caractéristique très intéressante pour l'utilisation du matériel de compactage est la capacité horaire de compactage, c'est-à-dire le nombre de m³ compactés par l'engin en une heure.

Cette caractéristique est aisée à calculer, si l'on connaît, pour le matériau envisagé, à la teneur en eau de compactage, la relation entre le nombre de passes (N) et la compacité, ainsi que l'épaisseur maximum pour laquelle le poids spécifique apparent sec est supérieur ou égal au poids spécifique apparent sec imposé.

La capacité horaire de compactage est alors donnée par la formule

$$C. H = \frac{VL e_c}{N \text{ min}} \quad (\text{en m}^3/\text{h})$$

C.H = capacité horaire de compactage

V = vitesse de l'engin (en m/h)

L = largeur compactée (en m)

e_c = Epaisseur maximum compactée (en m)

N_{min} = nombre minimum de passes nécessaires à la vitesse considérée pour atteindre l'état de compaction imposé.

Si l'engin possède une gamme de vitesses assez étendue, il est intéressant de rechercher la vitesse donnant la capacité maximum il suffit pour cela de rechercher à rendre maximum le quotient vitesse nombre de passes.

Une fois la capacité horaire connue, il est facile d'estimer le prix de revient du compactage au m³. Le coût du m³ compacté s'obtient en divisant le coût horaire (c'est-à-dire le coût de location de la machine ou l'amortissement de la machine, le prix du combustible et les gages de l'opérateur) par la capacité horaire de compaction.

Il peut être affecté par divers facteurs et varie notablement d'après les engins.

IV - LES ENGINES DE COMPACTAGE

Les divers engins de compactage se divisent habituellement en trois groupes :

- Les engins agissant par chocs : dames, grenouilles, pilonneuses.
- Les engins agissant par pression soit les rouleaux à pneus, les rouleaux à pieds, les rouleaux à grilles segmentés.
- Les engins vibrants : plaques vibrantes, rouleaux vibrants.

Pour chacun de ces types d'engins, il est intéressant de donner :

- une caractérisation technique : c'est à dire les données techniques nécessaires pour comparer entre eux les engins du même type et les définir complètement.
- un ordre de grandeur du degré de compactage réalisable compte tenu du matériau à mettre en oeuvre et l'énergie appliquée par l'engin
- des indications sur la capacité horaire et le coût du "m³" compacté.

4.1 LES ROULEAUX LISSES

Les rouleaux à jantes lisses les plus communément appelés "rouleaux lisses" comprennent tous les engins (vibrants exceptés) qui transmettent une charge élevée au sol par l'intermédiaire de cylindres lisses en acier.

Les rouleaux lisses sont presque tous automoteurs et se divisent en rouleaux lisses tandem et rouleaux lisses tricycles, selon que l'essieu arrière comporte un ou deux cylindres.

a) La caractéristique principale est la charge linéaire obtenue en divisant la partie du poids total reportée sur un cylindre, par la largeur de celui-ci. Cette charge linéaire qui varie habituellement entre 15 et 100 kg/cm peut différer assez considérablement entre les cylindres avant et arrière d'un même rouleau du fait du décalage vers l'arrière, variant en général entre les rapports 1/2 et 2/3 ceci vaut surtout pour les rouleaux tricycles qui présentent donc l'inconvénient d'une compression inégale des deux bandes de roulement.

Pour les tandems, les deux cylindres, même s'ils sont inégalement chargés, roulent dans les mêmes traces ; par contre la largeur effectivement compactée par passe est plus faible qu'avec les rouleaux tricycles.

b) Les rouleaux lisses conviennent parfaitement pour la compaction des sols grenus moyennement cohérents tels que les sables argileux ou limoneux, les graviers, les sables et les argiles sur lesquels on obtient assez aisément des compacités de l'ordre du maximum proctor modifié.

c) Habituellement on peut espérer atteindre la compacité maximum (refus) entre 8 à 15 passes, pour autant que l'on emploie des charges linéaires élevées. Un système de compactage souvent économique est celui du compactage par étapes : On effectue une partie (par exemple 30 %) du nombre de passes total avec un rouleau léger puis le reste avec un rouleau notablement plus lourd. Les cylindres lisses réalisent des surfaces peu étendues dans le sens de déplacement de l'engin. Les pressions qui sont assez élevées au contact avec le sol, s'amortissent donc rapidement en profondeur, ce qui rend impossible le compactage des couches épaisses de ce fait, même pour les rouleaux les plus lourds on ne peut guère dépasser 20 à 25 cm.

D'après une étude détaillée faite à l'université d'AIK-LA CHAPELLE (16), il existerait pour chaque sol et chaque diamètre de cylindre une charge linéaire optimum fournissant la compacité maximum.

La figure 1 présente certains résultats obtenus par Theiner pour un sable uniforme à faible teneur en eau. A chaque diamètre correspond une charge optimum, dont le choix semble particulièrement critique pour les faibles diamètres. De plus, cette charge optimum varierait fortement d'après le sol (sur limon-sableux, les courbes sont plus aplaties)

Cette étude fait ressortir l'avantage des tests largement variables et de diamètre assez élevés.

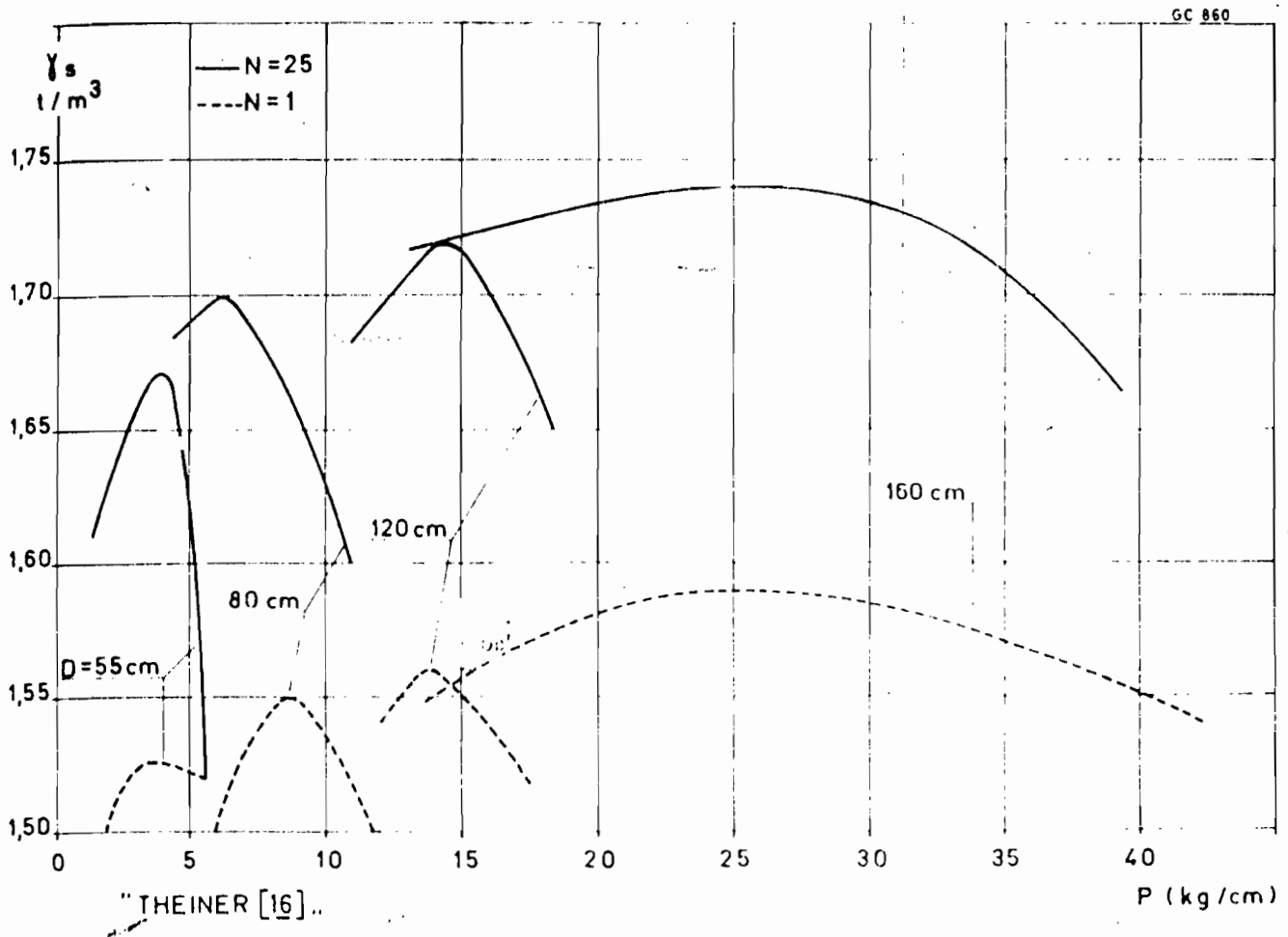


Fig 1 : Influence de la charge linéaire (P) et du diamètre (D) de rouleaux lisses sur le poids spécifique apparent sec (sable à granulométrie uniforme en eau à une teneur de 4,5 %).

- c) Le prix de revient du compactage par rouleaux lisses est assez bas (par suite du faible coût horaire) et cela d'autant plus que la charge linéaire augmente.

4.2 LES ROULEAUX A PNEUS

Les compacteurs à pneus ou rouleaux à pneus comprennent tous les engins qui transmettent une charge au sol par l'intermédiaire d'une ou plusieurs rangées de pneus. Ils peuvent être automoteurs ou traités. On les subdivise aussi en rouleaux légers si la charge par pneu est d'environ 1 t et en rouleaux lourds si la charge par pneu est plus élevée (jusqu'à 20 t/pneu pour les supercompacteurs).

a) La pression statique de contact (P_s en kg/cm^2) est définie comme le quotient du poids total du rouleau par la surface totale de contact des pneus. Celle-ci s'obtient en mesurant les empreintes de pneus sur une surface bien plane (on ne tient pas compte des dessins des pneus car on suppose qu'ils se remplissent de sol durant le compactage). Cette définition se base sur une répartition égale du poids total du rouleau entre les différentes roues. Cette répartition des charges est actuellement réglée par certains dispositifs mécaniques. Dans les autres cas, on admettra que la pression de contact est une pression moyenne. Il est évident que la pression de contact est une pression de gonflage ou pression de l'air à l'intérieur des pneumatiques. Cependant ces deux pressions ne sont pas égales, comme on pourrait le croire en première vue.

On peut se rendre compte dans la figure 1 (d'après Lewis [12]), que dans certains cas de grands écarts peuvent exister entre les deux pressions, écart pouvant aller jusqu'à 100 %. Il est donc dangereux de se baser uniquement sur la pression de gonflage pour juger de l'efficacité d'un tel rouleau.

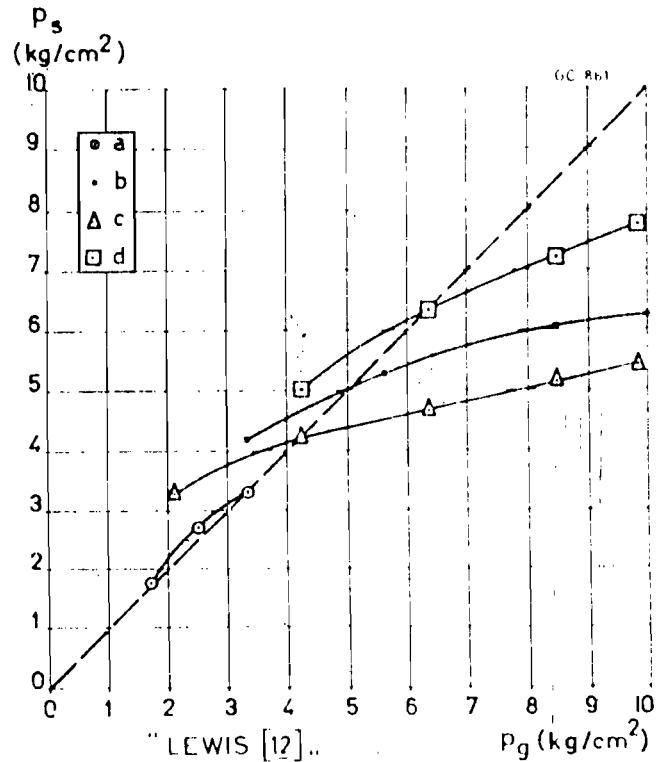


Fig 2 Relation entre pression statique de contact (P_s) et pression de gonflage (P_g)

	Poids total du rouleau	Pneus	charge/roue
a	12 t	11 x 12 (souples)	1,33 t
b	20 t	9 x 20 (rigides)	2,22 t
c	45 t	16 x 21 (rigides)	5 t
d	45 t	16 x 21 (rigides)	10 t

b) L'usage des rouleaux à pneus est tout aussi courant sur les sols pulvérulents (à granulométrie étendue) que sur les sols cohésifs, bien que les résultats soient légèrement supérieurs dans le premier cas.

Sur les sables à granulométrie étroite et sur les sols compressibles traités en couches épaisses, on peut rencontrer des difficultés de compactage, mais en accroissant progressivement la pression de contact par réglage du gonflage des pneus depuis une pression très faible jusqu'à la pression normale, on peut souvent surmonter ces difficultés.

On utilise également avec succès les rouleaux à pneus pour réaliser la mise en place de matériaux, pierreux et cela sans craindre l'écrasement des éléments aigus comme c'est le cas pour les rouleaux lisses.

c) Sur la plupart des matériaux, le nombre moyen de passes pour atteindre la compacité à refus est d'environ 10 à 15. La surface des pneus étant à peu près circulaire et pratiquement indépendante de la rigidité du sol, on peut s'attendre à une bonne répartition des contraintes en profondeur, (que l'on peut même souvent supposer suivre la loi de Boussinesq) le choix de l'épaisseur de couche dépend du sol, de la pression de contact et de l'aire de contact et varie entre 15 et 45 cm (meuble). L'emploi d'engin à large gamme de pressions de gonflage se recommande si l'on désire opérer dans les meilleures conditions sur des sols variés.

d) Les rouleaux à pneus possèdent des capacités horaires de compaction augmentant avec les dimensions et le poids total : malheureusement un coût d'exploitation plus élevé annule à peu près cet avantage. Cependant il est probable que le rendement pourrait être amélioré en augmentant la vitesse de compactage.

LES ROULEAUX A PIEDS

Un "rouleau à pieds" se compose essentiellement d'un tambour cylindrique de diamètre important (1,2 m à 1,5 m) portant une certaine protubérance saillante ou "pieds" (aujourd'hui on en voit des automoteurs):

Il existe différentes sortes de pieds : la figure 1 en reprend les types les plus courants.

- les pieds coniques
- les pieds prismatiques
- les pieds de mouton
- les pieds en club de golf.

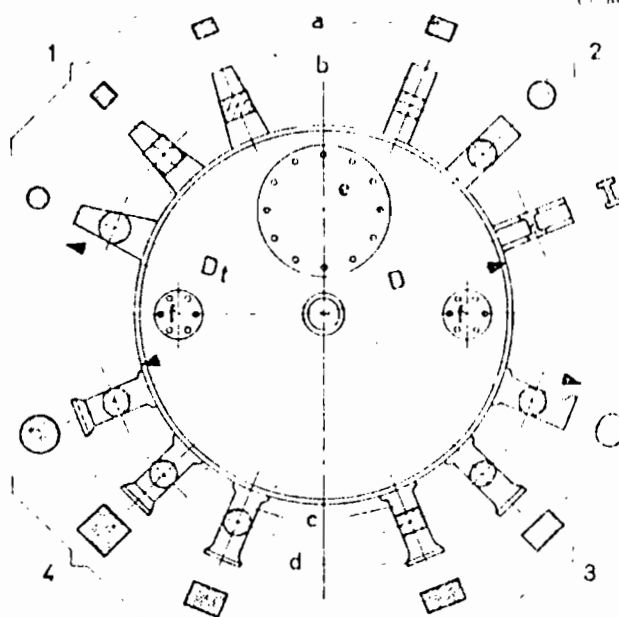


Fig 1 : Différentes sortes de pieds utilisés pour les rouleaux à pieds.

- 1) Pieds coniques (ou pyramidaux)
- 2) Pieds prismatiques
- 3) Pieds de mouton
- 4) Pieds en club de golf

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| a - Empreinte de la base | d - base |
| b - pied | e - sable |
| c - cheville | f - eau |
| Dt - diamètre total | D - diamètre du tambour. |

Chacun de ces types peut être construit selon différents modèles d'où différentes empreintes de la base du pied (surface de contact = 30 à 80 cm²). A part l'influence de la surface de base, ces différentes formes ne semblent pas se traduire par des avantages quelque peu importants au point de vue compaction.

a) La caractéristique la plus importante est la pression statique "nominale" P_{sn} (en kg /cm²) qui est égale au quotient du poids total du rouleau par la surface totale de contact d'une rangée de pieds. Cette variable conventionnelle n'est pas la pression de contact réelle avec le sol ; il est logique de supposer en effet que la pression de contact réelle varie notablement selon l'état de compaction du sol et sa teneur en eau, ce que des expériences américaines ont d'ailleurs confirmé. La pression statique nominale varie dans de larges limites mais sa valeur moyenne habituelle est comprise entre 20 et 35 kg/cm²

Pour les rouleaux à pieds automoteurs, les mêmes remarques concernant la pression de contact par essieu des rouleaux lisses est valable en ce qui concerne la pression nominale par rouleau; en effet ces rouleaux souvent à quatre roues, deux avant et deux arrière ont un centre de gravité excentrique qui occasionne un cas de chargement différent des roues avant et arrière.

Pour les rouleaux à pieds, il apparaît nécessaire de considérer encore une autre variable : c'est le "degré de recouvrement" c'est-à-dire le pourcentage de surface de l'engin qui reçoit une application de charge lors d'une passe de rouleau.

Ce degré de recouvrement est toujours faible, il varie entre 3 et 11 %. Il faut donc s'attendre à ce qu'il faille aux rouleaux à pieds un nombre de passe plus élevé qu'avec d'autres engins, nombre de passe d'ailleurs d'autant plus élevé que le degré de recouvrement est faible.

b) Les rouleaux à pieds sont bien adaptés au compactage des sols argileux ; en effet leur action de pétrissage est très utile pour briser les mottes d'argile et les serrer efficacement les unes contre les autres. Toutefois, pour les engins modernes lourdement lestés, la teneur en eau optimum - engin se situe aux environs de la teneur en eau

optimum Proctor modifié et même souvent en dessous.

Or, dans nos pays à climat relativement sec, il est facile de voir la teneur en eau d'une argile se situant dans les limites opérationnelles de l'engin. Ce qui explique la grande performance de ces engins dans tous les pays qui ont une saison sèche bien marquée, tel que le Sénégal.

Les rouleaux à pieds sont peu indiqués pour le compactage des terres sableuses.

c) Une opinion courante est que les rouleaux à pieds compactent de bas en haut et que, même en dessous de la couche supérieure meuble (qui doit toujours être recompressée), la compacité va en croissant avec la profondeur, contrairement à la règle générale. Certaines expériences semblent cependant contredire cette affirmation.

Un fait est actuellement bien admis : il est nécessaire de mettre en oeuvre des couches minces successives (15 à 20 cm maximum)

Il convient également d'étudier la pression de contact (c'est à dire le lestage du rouleau) en fonction du sol et de sa teneur en eau.

d) Du fait de la mise en oeuvre en couches minces et du grand nombre de passes nécessaires, le rendement des rouleaux à pieds n'est pas très élevé. Le coup du mètre cube compacté serait plus élevé qu'avec les autres types de rouleaux.

4.4 LES ENGINES DE DAMAGE PAR CHOCS

Le damage par chute de masses d'une certaine hauteur ou "compactage par impact" est certainement la plus ancienne méthode employée par l'homme.

Parmi les engins modernes de damage par chocs nous distinguons

- Les dames légères à explosion ou air comprimé (leur poids est souvent voisin de 100 kg)
- Les dames lourdes ou sauterelles (allant jusqu'à 1200 kg)
- Les vibro-pilonneuses.

a) La pression statique définie comme précédemment a une valeur moyenne de 0,15 à 0,20 kg/cm² pour les dames et 0,05 et 0,10 kg/cm² pour les vibro-pilonneuses

La distinction entre ces deux groupes d'engins se justifie par l'examen de leurs caractéristiques : les vibro-pilonneuses compensent les plus faibles pressions statiques et hauteurs de chute (h) par une fréquence des chocs élevée (400 à 800 coups/min contre 50 à 100 pour les dames) ce qui augmente le nombre d'applications et résulte en une énergie totale de compaction sensiblement équivalente.

La méthode de damage par chocs est encore appliquée dans le système dit à masse pilonneuse. Des masses de 1 à 3 t, en béton ou en fonte, parfois munies de saillies, sont montées sur un appareillage spécial fixé à la flèche de pelles mécaniques et lâchées en chute libre d'une hauteur de 1 à 3 m. Ce système s'emploie surtout pour le compactage des remblais ou de grands canaux.

b) On se sert des dames par chocs pour compacter les sols fins plastiques tout autant que les sols grenus : cependant pour les premiers les degrés de compaction sont plus faibles et le volume d'air reste important, ce qui indique que le damage est impuissant à chasser l'air "emprisonné". Les vibro-pilonneuses agissent partiellement tandis que les argiles semblent à déconseiller. L'effet des masses pilonneuses au contraire, paraît être maximum sur les sols cohérents relativement secs.

c) Les dames par chocs ont donné la preuve de leurs qualités pour le compactage des couches épaisses, surtout pour les sols-granuleux,

le gradient de poids spécifique en profondeur étant en général inférieur à celui des rouleaux agissant par pression.

Pour les sols argileux dont la teneur en eau naturelle est assez élevée, il y a avantage à augmenter le diamètre des dames légères. L'énergie de compactage diminue ce qui entraîne une réduction du poids spécifique apparent maximum ; cependant la teneur en eau optimum engin se rapproche des teneurs en eau naturelle et la capacité horaire augmente.

L'énergie de compactage par unité de surface est facilement calculable d'une manière analogue au compactage dynamique en laboratoire. En général pour un engin donné on trouve une relation entre cette énergie de compactage et les compacités produites sur un sol. Les correspondances entre engins différents sont beaucoup moins sûres.

d) Les engins de damage par chocs seraient intéressants s'il n'y avait que la question de rendement. En effet, la capacité horaire, même pour les dames lourdes, se limite à quelques dizaines de m^3/h ce qui entraîne des coûts au m^3 notablement plus élevés que pour les rouleaux. L'usage de ces engins se limite donc nécessairement à de petits travaux, ou au cas où l'on ne dispose que de peu d'espace (remblayage près de piles de ponts ou derrière culées-de ponts, damage de tranchées).

4.5 AUTRES ROULEAUX AGISSANT PAR PRESSION

Il existe encore deux derniers types de rouleaux agissant par pression : ce sont les rouleaux à grille et les rouleaux segmentés.

4.5.1 Les rouleaux à grille

Les rouleaux à grille consiste en un cylindre lisse où la surface latérale est remplacée par une grille tressée en acier spécial

Ce sont des engins intermédiaire entre les rouleaux à pieds et les rouleaux lisses. Des premiers, ils ont les pressions de contact élevées et une certaine action de pétrissage.

Il semblerait que leur recouvrement faible leur impose encore un nombre de passes élevé. Des rouleaux lisses, ils possèdent l'aptitude de se convertir à tous les sols argileux et sableux.

Les rouleaux à grille sont également très utiles pour le concassage des gros blocs rocheux et une première imbrication du matériau ; le compactage est alors terminé par rouleau lisse.

4.5.2 Les rouleaux segmentés ou à patins

Les rouleaux segmentés ou à patins dérivent des rouleaux lisses. Ce sont des engins récents sur lesquels on dispose de peu de données. Il semblerait cependant qu'ils possèdent certains avantages sur les rouleaux lisses, notamment celui d'avoir des surfaces de contact plus étendues en longueur, ce qui favorise la pénétration des contraintes en profondeur et permettre le compactage en couche plus épaisse.

4.6 LES ENGINES VIBRANTS, PLAQUES OU CYLINDRES

Ces engins combinent le serrage par pression vertical et la diminution de frottement entre grains par la vibration.

L'expérience et la théorie montrent que : dans un milieu granuleux chaque taille de grain à une fréquence propre qui est de l'ordre de 5000 cycles/mm pour les graves de 5 mm, 2500 cycles/mm pour ceux de 20 mm et 1000 cycles/mm pour ceux de 150 mm. Les engins de compactage dynamique pour opérer efficacement doivent vibrer au voisinage de la fréquence de résonance de différents matériaux à compacter. C'est pourquoi en pratique, les engins vibrants usuels ont des fréquences qui s'échelonnent de mille à quatre milles-cycles/mm. Selon le poids des engins et les conducteurs.

4.6.1 Les rouleaux vibrants

Les rouleaux vibrants sont constitués de cylindres lisses auxquels des vibrations sont imprimés par un mécanisme vibrant qui communique un mouvement alternatif vertical au cylindre.

Ils se divisent en rouleaux monoroues légers (0,2 à 1,5 t) et automoteurs ou lourds (1,5 à 8 t) et en rouleaux tandem automoteurs.

Comme pour les rouleaux lisses, on parlera de charge P (en kg/cm) Sa valeur moyenne oscille entre 10 et 25 kg/cm soit moins que les rouleaux lisses. On compte en effet sur la vibration pour compenser un poids mort beaucoup plus faible.

Les autres caractéristiques principales sont ; la force dynamique, la fréquence de vibration et l'amplitude des vibrations.

La fréquence de vibration est comprise en général entre 1200 et 3600 cycles/mm, mais n'est que rarement réglable.

Sur les sols argileux, la vibration, même à fréquence basse, à peu d'influence et le gain de compacité par rapport aux rouleaux lisses (qui d'ailleurs ne sont pas eux mêmes tellement intéressants sur ce type de sol) est faible et probablement non justifiable économiquement. Il faut cependant faire exception pour les rouleaux vibrants lourds à charge linéaire élevée qui donnent de bons résultats même sur des sols forts argileux.

Les rouleaux vibrants sont par contre très recommandés pour le compactage des sols pulvérulants à des teneurs en eau assez basses. Sur les sables à granulométrie étroite on rencontre souvent des difficultés sérieuses, surtout du fait de la décompaction superficielle.

Les rouleaux vibrants sont également très utiles pour le tassement des matériaux rocheux ou de pierrailles.

La compacité croît en général rapidement et atteint des valeurs supérieures à celles des rouleaux lisses statiques de charge linéaire analogue. Toutefois contrairement à certaines opinions, le nombre de passes nécessaire pour arriver aux compacités à refus reste élevé.

A poids égal, l'effet des rouleaux vibrants se fait sentir à moins grande profondeur que celui des plaques vibrantes ; ceci par suite de l'aire de contact limitée. A ce point de vue, il y a intérêt à employer des rouleaux lourds.

Comme pour tous les engins vibrants, l'influence des autres caractéristiques entre en jeu à la fois et il est très délicat de fixer l'importance relative de chacun.

Voici cependant quelques remarques :—l'influence de la charge linéaire apparaît comme importante ce qui explique la vogue actuelle des rouleaux lourds et ultra-lourds.

— la fréquence optimum de vibration dépend du type de sol et de détail de construction de l'engin.

— Il semble que dans de nombreux cas, on puisse accroître l'efficacité en profondeur par réglage de la force dynamique.

Le coût du m³ compacté est élevé, surtout pour les rouleaux vibrants légers ; il diminue fortement si l'on emploie des rouleaux lourds travaillant sur des couches épaisses.

4.6.2 LES PLAQUES VIBRANTES

Les plaques vibrantes se composent essentiellement d'une plaque de poids et de dimensions très variables à laquelle un mécanisme vibrant communique un mouvement sinusoïdal vertical : c'est à dire alternativement décollement et pression du sol. Ce mouvement est obtenu par l'effet d'inertie ou force centrifuge de masses concentrées ou balourds tournant en sens inverse à grande vitesse. L'inclinaison du vecteur représentant la résultante de ces forces d'inertie peut se réaliser par décalage de ces masses excentrées et permet d'utiliser le temps de décollement de l'engin pour le faire progresser dans un sens déterminé.

D'après leur poids qui peut varier de 30 à 2500 kg les plaques vibrantes se subdivisent en plaques légères, moyennes ou lourdes.

La pression statique de contact (ls) de ce type d'engin est évidemment faible (0,15 à 0,25 kg/cm² mais parfois bien moins).

Toutefois la résultante sinusoïdale des forces centrifuges ou "force dynamique" toujours au moins égale au poids mort de la plaque (elle vaut 3 à 5 fois ce poids mort) ajoute à cette pression statique une pression dynamique (Pd) souvent importante. La force dynamique est proportionnelle à la masse et à l'excentricité des balourds et au carré de la fréquence de vibration (entre 1000 et 4000 cycles/mn). Les dispositifs permettant de régler séparément force dynamique et fréquence de vibration sont rarement prévus sur les plaques vibrantes et habituellement les deux variables sont liées.

Une autre variable est l'amplitude ou hauteur de décollement : elle est en général inférieure au cm. Souvent même la plaque ne se soulève pas visiblement du sol.

Les plaques vibrantes conviennent parfaitement pour le compactage des sols pulvérulants à des teneurs en eau assez basses.

Leur utilisation est généralement pleinement indiquée sur les matériaux pierreux (concasses calcaires) et matériaux non cohésifs de fondation (laitier). Il est alors souvent avantageux de travailler à des teneurs en eau élevées proches de la saturation pour autant que ces conditions soient acceptables à d'autres points de vue : drainage, ségrégation, pompage...

Certaines plaques dont l'amplitude de soulèvement est importante et la fréquence de vibration basse semblent convenir également aux sols argileux : elles agissent probablement partiellement par dommage par chocs.

Pour les sables à granulométrie étroite, il convient d'étudier soigneusement les conditions de compactage, entre autre le réglage de la force dynamique.

Le nombre de passes dépend à la fois de l'engin et du sol et est donc très variable. Il y a parfois danger à prolonger la compaction vibrée : la compacité peut décroître après un certain nombre de passes. Jusqu'à présent il n'est pas possible de rattacher ce phénomène à une caractéristique déterminée. Les plaques vibrantes réalisent facilement le compactage des couches épaisses tout au moins les plaques moyennes et lourdes (sur les matériaux de granulométrie uniforme on observe une décomposition en surface). Il est difficile d'analyser séparément les autres facteurs influençant l'énergie de compactage entre autre la pression statique, la force dynamique, la fréquence de vibration, l'amplitude de soulèvement. Cela est dû en grande partie à des interactions entre ces différents facteurs telles que le mécanisme du compactage par vibration n'est encore que très imparfaitement compris à l'heure actuelle.

La vitesse des plaques vibrantes est faible (quelques dizaines de mètres par minute) et leur compacité horaire s'en dressent fortement. De plus le coût d'exploitation de ces engins relativement nouveaux est encore élevé. Ces deux remarques se traduisent par des prix de revient de compactage moins intéressants, semble-t-il que ceux des rouleaux classiques. Il y aurait intérêt, dans certains cas à remarquer les plaques vibrantes par tracteur de manière à en augmenter la capacité horaire.

4.7 LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS AU CIMENT

L'obtention d'une bonne compacité est indispensable pour que les résistances mécaniques d'une assise traitée se développent normalement. Ceci explique l'attention particulière que l'on doit apporter à l'opération du compactage.

Pour les graves traitées au ciment, on est arrivé actuellement à définir un atelier de compactage qui semble bien adapté : atelier qui consiste à l'association d'un rouleau vibrant suffisamment lourd et d'un rouleau à pneus également lourd (2,5 à 3 t par roue au moins). En général le rouleau vibrant effectif quelques passes, soient 3 à 4 passes qu'il faut pas dépasser, sous peine de soumettre à l'engin des efforts trop importants ; cette opération sera suivie d'une finition à l'aide du rouleau à pneus. Mais, l'utilisation du rouleau à pneus tend à être laissée à cause des traces de pneus qu'elle laisse sur le "fini" de couche compactée.

Notons aussi que l'emploi du compactage par vibration ne s'accommode pas d'une granularité défectueuse : en effet dans le cas où la granularité et l'angularité du matériau ne sont pas bonnes le moindre excès de vibration produira, une ségrégation par couche.

Pour les chantiers importants, la meilleure façon de choisir l'atelier de compactage et de déterminer le nombre de passes nécessaire de chacun des engins utilisés est de faire au début du chantier des planches expérimentales de compactage, où l'on suit l'évolution de la densité du matériau.

V - C O N C L U S I O N

Cette étude bien que n'étant pas exhaustive, nous permet qu'à même de tirer un bon nombre de règles générales permettant une bonne exécution du compactage - chantier.

- Les essais de compactage en vraie grandeur de nombreux sols par des engins variés permettent de classer les différents types d'engins selon leur adaptation aux sols et de choisir rapidement le modèle le plus approprié dans un cas déterminé.

Le tableau I donne à ce sujet des indications générales compte tenu des connaissances actuelles. Remarquons que ce tableau s'attache uniquement à l'efficacité de l'engin sur le sol donné, sans tenir compte ni de la capacité horaire, ni du prix de revient. Ces deux dernières variables dépendant en grande partie des facteurs économiques et techniques du moment et du lieu où l'on se trouve.

TABLEAU I

Adaptation des engins aux sols.

Engins		Sols cohésifs			Sols pulvérulents		Matériaux pierreux
Dénomination	Caractères principales	$w \geq 20\%$ mod.	intermédiaire	$w < 20\%$ stand.	Granulom. étendue	Granulom. uniforme	
Rouleaux lisses	P W_i L_n						
Rouleaux à pneus	P_i W Λ						
Rouleaux à pieds	P_{in} W' Σ_d						
Rouleaux à grille							
Dames	{ P_i W Λ						
Vibropilonneuses	{ et h						
Plaques vibrantes	P_i et P_d						
Rouleaux vibrants	P et P_d						

× Bien adapté

| Satisfaisant (certains cas)

| Impropre.

- Pour un sol et un engin donné, il existe une courbe de compactage engin, de forme et de position parfois très différentes de la courbe obtenue en laboratoire sur le même sol. Il existe donc une compacité maximum engin et une teneur en eau optimum engin qui dépendent en plus de l'énergie de compactage.

- Il n'existe pas jusqu'à présent, un moyen de chiffrer exactement cette énergie de compactage. Toutefois il est certain que plusieurs facteurs sont à considérer tels que le nombre de passes et la pression de contact. On a pu vérifier qu'il existe en général une relation linéaire entre le logarithme de ces variables et le poids spécifique apparent sec. La détermination du facteur de proportionnalité, c'est à dire la pente des droites γ_d vs $\lg(N)$ et γ_d vs $\log(P_s)$ pourra se faire sur des engins et des sols déterminés au bout d'une bonne expérience sur l'exécution du compactage.

- La vitesse de passage de l'engin sur le sol a également une influence ; on aura donc à déterminer une vitesse et un nombre de passes arrangés d'une façon optimale (économiquement) pour avoir la plus grande capacité horaire.

- L'épaisseur compactée est augmentée par l'emploi d'engins à surface de contact très grande tels que les rouleaux à pneus ou les rouleaux à patins.

- Dans certains cas, il est même possible de prévoir le nombre de passes nécessaires pour atteindre le refus pour éviter un compactage supplémentaire inutile.

- Il est à retenir aussi que, pour les pays tropicaux il serait plus intéressant de mener le contrôle du compactage avec la méthode anglaise ; dans la mesure où cette méthode basée sur la teneur en eau naturelle des sols, est indépendante des variations climatiques saisonnières.

- Et enfin on a essayé dans cette étude, de voir : l'influence des intempéries locales, l'eau à l'occurrence et du trafic sur une couche déjà compactée. Les matériaux à granularité continue stabilisée par un compactage seulement, voient leur résistance s'effondrer rapidement devant la conjugaison des facteurs d'intempérie

et de l'accroissement du trafic, surtout du trafic des poids lourds et aujourd'hui la solution retenue est de munir les chaussées d'une couche de base en grave stabilisée au ciment. Ce matériau pas trop expensive au Sénégal, bien mélangé et mise en place pour servir de couche d'assise des routes à trafic intense, telles que les routes nationales et les routes urbaines.

Une synthèse générale et complète est impossible à l'heure actuelle et ceci provient du fait que les renseignements sûrs sont en effet assez réduits et que les études étant souvent partielles et difficilement comparables entre elles. C'est ainsi qu'il n'existe encore une théorie générale de la compaction ni en laboratoire ni au chantier.

Certains chercheurs ont abordé le problème, chacun sous une optique particulière. C'est ainsi que par exemple M. tente d'expliquer le compactage en partant de la loi de conservation de l'énergie : le travail effectué sur le système (c'est à dire le tassement du matériau) est ainsi égale à la variation d'énergie totale (comportant la déformation élastique, compression des gaz etc) augmentée de la chaleur ajoutée au système (chaleur provenant de la résistance au frottement entre particules). On arrive ainsi à faire ressortir les différents facteurs qui interviennent dans le phénomène, sans pour autant chiffrer leur importance quantitative. Et il est possible que des études nouvelles éclairciront peu à peu le problème.

Il reste également difficile d'évaluer l'influence de nombreux facteurs sur la compacité d'un matériau et de nombreuses questions restent discutées, notamment :

- Dans quelles conditions doivent se faire les associations d'engins : ordre de succession, association la plus favorable étant donné le matériau, nombre de passes de chaque engins ?
- Quelle est l'influence de la durée d'action d'un engin ?
- Quelle est l'importance respective des caractéristiques des engins vibrants : fréquence de vibrations, force dynamique ?

Dans ce projet, on aimerait procéder à certaines expériences à l'aide d'essais qui nous auraient permis de voir par exemple l'effet de la compressibilité des sols ou de l'énergie sur le compactage engin par des simulations de l'exécution du compactage - chantier avec l'aide du C E R E E Q (Centre Expérimental de Recherches et d'Études pour l'Équipement). Mais les démarches effectuées dans ce sens restèrent vaines, à cause du fait que nous disposions pas de temps et de moyens matériels nécessaires.

Le problème du compactage apparaît très complexe vu le grand nombre de variables en cause. Cependant de part cette étude, on voit que l'empirisme n'est plus de mise et les nombreuses recherches entreprises sur ce sujet, permettent de promouvoir de nouvelles méthodes de plus en plus scientifiques et sûres.

B I B L I O G R A P H I E

1. Conception et Construction des chaussées (Tome I et II)
par Georges JEUFFROY
EDITION EYROLLES
61, boulevard Saint-Germain Paris Ve (1970)
2. Compactage des sols en construction routière
par J. DE WANDELEER (1961)
3. Manuel sur les routes dans les zones tropicales et
désertiques.(Tome 2)
ETUDES ET CONSTRUCTION BCEOM ET CEBTP (1975)
4. Ciments et Chaux dans les assises de chaussées.
Laboratoire central des ponts et chaussées
DIFFUSION EYROLLES,
61, boulevard Saint-Germain Paris (1968)