

N° d'ordre :

TH
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
— I. N. R. A. —
STATION de SCIENCE du SOL
Domaine Saint-Paul
84140 MONTFAVET

THÈSE

présentée à la
FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE SPECIALITES
(Troisième Cycle de Mécanique des Solides)

par
Jean-Pierre ASTÉ
Ingénieur E.N.S. Géologie de Nancy

Contribution à l'étude de la locomotion tous terrains sur chenilles

Soutenue le 28 septembre 1967, devant la Commission d'Examen

M. L. SANTON *Président*
M. P. ANGLES D'AURIAC }
M. J. BIAREZ } *Examineurs*

GRENOBLE

TH-
GC25

26 FEV. 1976 //

CHAPITRE 1: Generalités - Le Système Sol Chenille .

I.1. Le sol. Propriétés mécaniques

I.2. Le sol. Méthode simple de mesure des propriétés mécaniques

Nous ne reviendrons pas sur les essais classiques destinés à mesurer ces valeurs :

- essai triaxial
- essai de compression simple
- vane test
- boîte de cisaillement.

M. MERCKLE a d'ailleurs fait le point sur ces essais dans sa thèse (réf. 34).

Nous voulons plutôt insister sur une catégorie d'essais destinée à caractériser le sol de façon empirique. Il ne s'agit plus là de résoudre au moins approximativement certains problèmes généraux, mais de connaître la "force" du sol. Un tel type d'essai a surtout une valeur statistique et ses buts essentiels doivent être : facilité et fidélité dans l'exécution, grand nombre de mesures pour pouvoir adopter des "moyennes" pour un sol donné, pour pouvoir chiffrer par un indice donné la résistance d'une catégorie de sol.

Dans cet esprit, aux Etats-Unis, le Waterways Experiment Station de Vicksburg a défini un essai d'enfoncement de cône. La caractéristique mesurée étant l'effort de pointe, l'essai est très rapide.

Sa représentativité a été mise à l'épreuve par un programme expérimental très complet (réf. 73 et 78).

I.22. L'essai de cône Index.

I.221. Définition.

L'essai de pénétration à cône consiste à mesurer la force nécessaire pour produire un enfoncement donné dans un sol donné. L'appareillage est décrit dans la figure n° 4. La force transmise directement par un opérateur est mesurée

6 -

à l'aide d'un anneau dynamométrique.

Le cône a un angle au sommet de 30° et une surface de base de 0,5 sq.in soit $3,426 \text{ cm}^2$ correspondant à un rayon d'environ 2 cm.

On fait pénétrer d'abord le cône dans le sol, puis on mesure la force nécessaire pour enfoncer la base du cône de 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 ; 12,5 et 15 cm, soit pour chaque inch (2,5 cm) de profondeur supplémentaire entre 0 et 6 inch.

Cette tranche de sol entre 0 et 15 cm est en effet considérée comme la plus intéressante en ce qui concerne les véhicules. Son épaisseur peut être plus importante. Mais nous ne nous intéresserons pas à ce problème, ces variations n'apportant que peu de modifications dans l'évaluation théorique du cône index.

L'essai étant mené de cette manière, le cône index est défini comme suit :

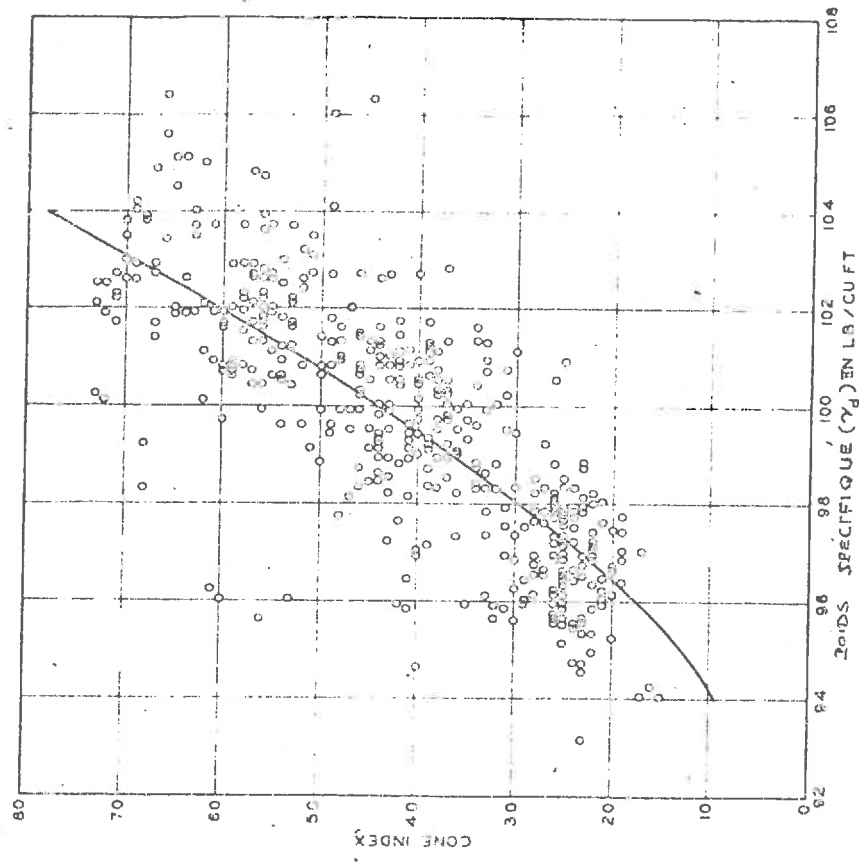
$C.I. = \frac{\text{Somme des résistances de pointe pour 1,2,3,4,5 et 6 inches}}{6}$

6

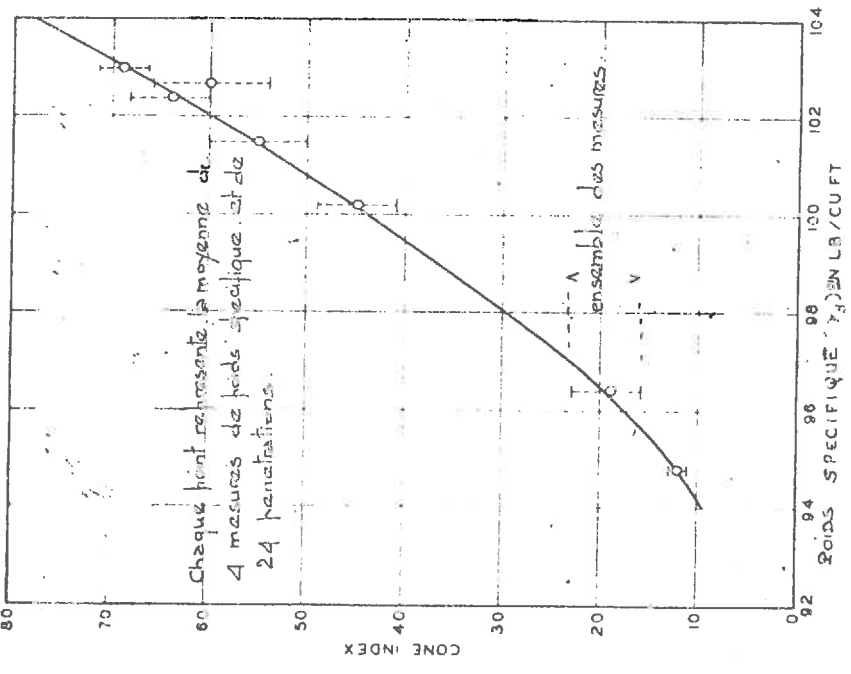
C'est une pression exprimée en psi : pound par square inch. Nous aurons la correspondance suivante (10 psi = 0,690 bars).

C.I. = 5	correspond à une résistance de pointe	$R_p = 0,35$ bars.
C.I. = 10	" " " "	$R_p = 0,69$ bars.
C.I. = 50	" " " "	$R_p = 3,45$ bars.
C.I. = 100	" " " "	$R_p = 6,90$ bars.

Divers essais ont été faits pour relier ces valeurs de Cône Index aux classifications de sols classiques.



SABLE DE YUMA



d. TESTS SPECIAUX

Fig n° 6 : VARIATION DU CONE INDEX AVEC LA DENSITE D'après SMITH (1964)

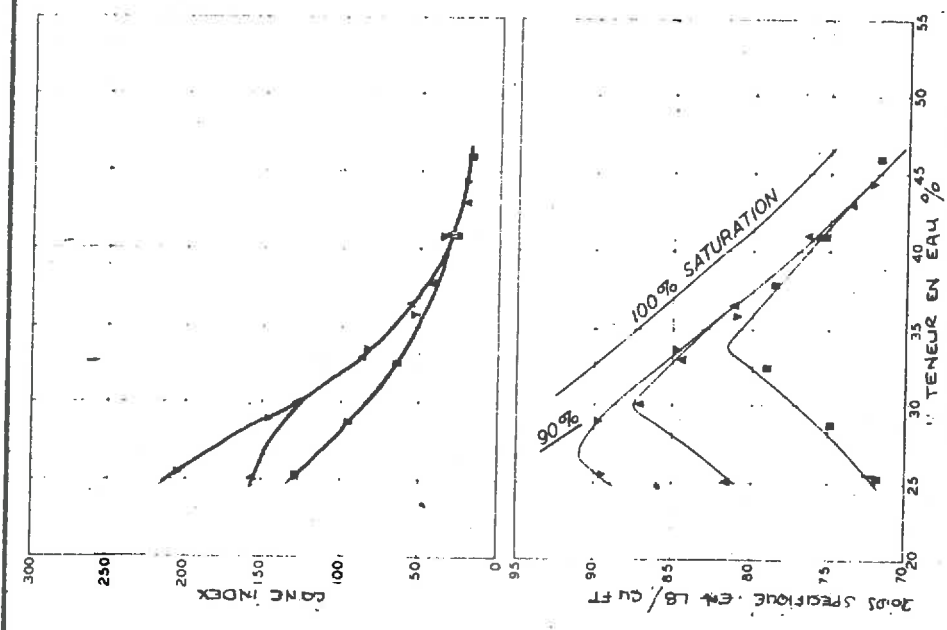


FIGURE B. ARGILE LOURDE

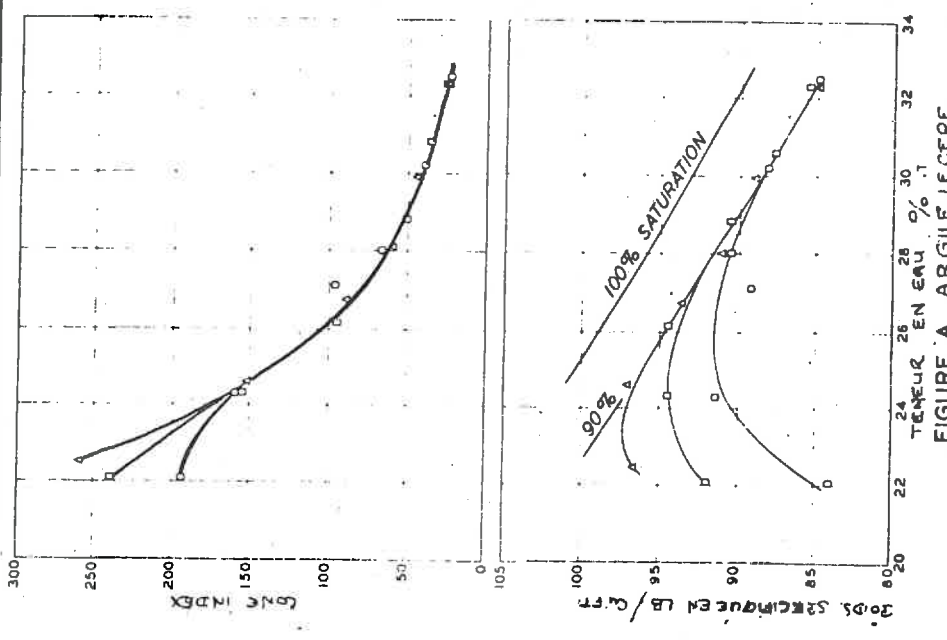


FIGURE A. ARGILE LEGERE

LEGENDE
 40 100% SATURÉS PAR COUPE
 80 100% SATURÉS
 120 100% SATURÉS
 200 100% SATURÉS
 (COMPACTAGE DE L'ÉCHANTILLON)

100% SATURÉS (nature)

100% SATURÉS

X M. MERCKLE (réf. 34) a mis au point à Grenoble un appareil semblable au pénétromètre à cône américain. Cet appareil permet de mesurer CI puisqu'il est conforme aux normes du pénétromètre WES. De plus, il peut servir de vane test.

I.222. Relation entre CI, C et φ pour un sol de γ donné.

Nous avons déjà souligné que le CI associé à un sol l'était de manière purement expérimentale. Ajoutons que l'ensemble de l'essai décrit ci-dessous est bien adapté à un milieu cohérent, faiblement pulvérulent (argile, limon, sable très argileux, vase, tourbe).

Nous allons éliminer aussi l'influence de la densité. Expérimentalement, la variation du CI avec la densité a été très bien étudiée (fig. 6, réf. 81). Il en est de même pour la teneur en eau (fig. 7).

Pour une densité donnée fixée ici arbitrairement à $\gamma = 1,5$ (c'est la densité moyenne lors des essais réalisés par SKITH), nous allons essayer de prévoir le CI en fonction de la cohésion et de l'angle de frottement interne mesurés au laboratoire dans l'essai triaxial.

a) Méthode de calcul (fig. n° 9).

Il nous faut prévoir la résistance de pointe sous un cône dont les caractéristiques sont définies sur la fig. n° 4.

Le calcul sera fait en plasticité puisque les résistances des pointes sont mesurées pour des déformations relativement grandes :

$$1 < \frac{D}{R} < 7,5$$

TERZAGHI a adapté sa formule classique au cas de fondations circulaires.

$$R_{pT} = \frac{W}{S} = \frac{4W}{\pi B^2} = 0,3 B N_{\gamma T} + \gamma D N_{qT} + 1,3 c N_{cT}$$

MERCKLE a montré que si R_{pT} est la résistance de pointe trouvée par TERZAGHI pour D moyen = 7,5 cm. et R_{pM} la résistance de pointe mesurée au pénétromètre, nous avons :

$$\frac{R_{pT}}{R_{pM}} = 0,45$$

Ce résultat a été obtenu par l'exploitation des résultats expérimentaux de SMITH (réf. 81, fig. 11).

MEYERHOFF propose pour $\frac{D}{B} > 4$ (et ici en fait $\frac{D}{B} \approx 3,7$) (réf. n° 35) :

$$R_{pM} = c N_{cM} + \gamma_0 N_{qM} + \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma M}$$

N_{cM} , N_{qM} , $N_{\gamma M}$ sont fonctions de φ , de λ , demi-angle au sommet du cône du pénétromètre et de la rugosité de la surface du cône. La théorie est faite à deux dimensions. MERCKLE a montré que l'on obtenait pour $\lambda = 15^\circ$ avec un cône rugueux :

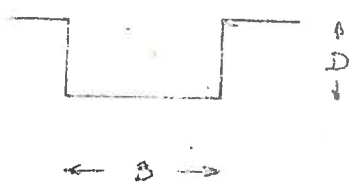
$$\frac{R_{pM}}{R_{pM}} = 1,25$$

Il semblerait que l'on doive considérer ici un cône lisse plutôt que rugueux. Or nous ne disposons pas de renseignements précis donnés par MEYERHOFF pour les cônes lisses.

LE GALL (réf. 30) a repris le calcul de la force portante des fondations circulaires peu profondes par la théorie de l'équilibre limite en symétrie axiale, donc à

Fig n° 9

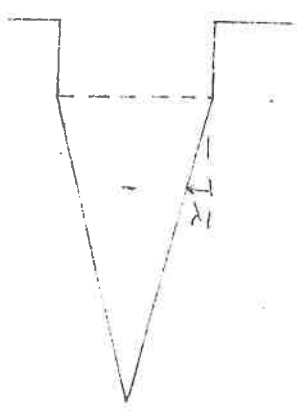
MODE DE CALCUL DU CONE INDEX théorique



TERZAGHI

$$R_{pT} = 0,3 \gamma B N_{\gamma T} + \gamma D N_{q T} + 1,3 c N_{c T}$$

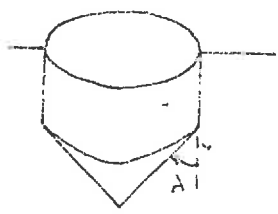
$$\frac{R_{pT}}{R_{pm}} = 0,45$$



MEYERHOFF $\frac{D}{B} > 4$ et cône rugueux

$$R_{pM} = c N_{cM} + p_0 N_{qM} + \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma M}$$

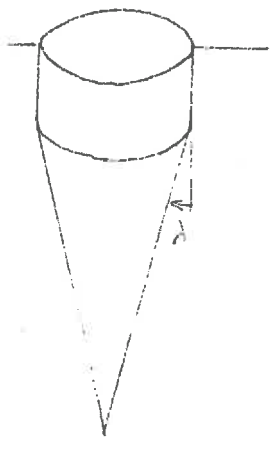
$$\frac{R_{pM}}{R_{pm}} \lambda = 15^\circ = 1,25$$



LE GALL λ du coin minimal

$$R_{pL} = \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma R} + \gamma D N_{qR} + c N_{cR}$$

$$\frac{R_{pL}}{R_{pm}} = 0,66$$



LE GALL $\lambda = 15^\circ$

idem

$$\frac{R_{pL}}{R_{pm}} \rightarrow A \dots$$

trois dimensions. Il propose la formule classique :

$$f_L = \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma R} + \gamma D N_{q R} + c N_{c R}$$

$N_{\gamma R}$, $N_{q R}$, $N_{c R}$ étant les coefficients calculés en symétrie axiale pour un coin de sol solidaire de la fondation minimum. C'est-à-dire pour un certain λ correspondant à un R_{pL} minimum.

En comparant les résultats expérimentaux de SMITH au calcul théorique proposé par LE GALL, MERCKLE a trouvé :

$$\frac{R_{pL}}{R_{pm}} = 0,60$$

et nous

$$\frac{R_{hL}}{R_{pm}} = 0,66$$

soit :

$$\frac{R_{pm}}{R_{hL}} = 1,5$$

En fait, la résistance de pointe calculée par la méthode de LE GALL est une résistance de pointe minimum pour un certain λ . R_{pL} calculé par la même méthode pour $\lambda = 15^\circ$ serait forcément plus grand.

$$R_{pL} > R_{pL}$$

$\lambda = 15^\circ$ coin minimal

Nous n'avons pas voulu refaire le calcul sur machine pour $\lambda = 15^\circ$, mais de simples extrapolations à partir des résultats de LE GALL confirment qu'il est raisonnable de passer que :

$$R_{D_L} = 1,5 R_{D_L}$$

$\lambda = 15^\circ$ coin minimal

En attendant de disposer des coefficients N_{C_R} , N_{C_R} , N_{γ_R} pour $\lambda = 15^\circ$, nous utiliserons les coefficients de LE GALL en multipliant par 1,5 la résistance de pointe théorique obtenue.

C'est par cette méthode que nous ferons le calcul du CI pour un couple de valeurs C, φ donné. Nous pouvons même calculer à φ donné la valeur de la cohésion nécessaire pour obtenir un certain CI.

En effet: $CI (psi) = R_{pm} (psi) = 1,5 R_{pl} (psi)$

ou $R_{pl} (bars) = 0,68 R_{pm} (psi) \cdot 0,069 = 0,045 CI$

Soit $CI (psi) = 22,2 R_{pl} (bars)$

et enfin $CI = 22,2 \left[\gamma \frac{B}{2} N_{\gamma R} + \gamma D_m N_{qR} + c N_{cR} \right]$

avec, dans le cas du pénétromètre WES :

$B = 2 \text{ cm}$

$D_m = 7,5 \text{ cm}$

Et rappelons le γ , qui ici un poids spécifique vaut $1,5 \cdot 10^3 \text{ dynes/cm}^3$.

Dans l'espace C, φ nous pouvons donc déterminer les courbes $CI = Cst$ dont l'équation s'écrit :

$$C = \frac{1}{N_{cR}} \left[\frac{CI}{22,2} - 1,5 N_{\gamma R} - 11,43 N_{qR} \right]$$

C étant exprimé en bars et CI en psi.

b) Résultats (fig. 10).

Sur la figure n° 10, nous avons tracé les courbes d'équi cône index dans l'espace C, φ . Nous avons reporté également les résultats expérimentaux américains à partir de la fig. 11 extraite des travaux de Smith (réf. 81).

Nous voyons que la concordance est excellente pour $\phi < 10^\circ$.

Au delà de cette valeur, la courbure des équi CI américaines ne nous semble pas justifiée, les résultats expérimentaux étant trop peu nombreux pour ce propos.

Les américains ont essayé dans le cas de milieux purement pulvérulents de choisir une autre grandeur caractéristique. Mais si l'on est obligé de faire le changement, l'intérêt du CI est fortement affecté.

c) Conclusions.

La méthode du cône Index est une méthode simple pour caractériser la résistance d'un sol. Nous avons voulu l'étudier en détail parce qu'elle a reçu un très grand développement pratique dans la détermination de la traifiabilité d'un sol, c'est-à-dire de son comportement vis à vis d'un véhicule (voir II.2).

En même temps, nous avons là un excellent exemple illustrant le paragraphe I.13, qui nous permet de lier par un calcul théorique en plasticité les résultats expérimentaux du WES aux caractéristiques classiques, C et ϕ de la plasticité.

Enfin cette méthode reste purement expérimentale et ne débouche pas sur des lois. Elle n'a de valeur que statistique.

I.3. LA CHENILLE.

I.31. Généralités.

L'inventeur anglais Edgeworth l'a définie en 1770 comme une piste portative qui est placée en avant des roues et repliée vers l'arrière au fur et à mesure du mouvement

Fig n°10 COMPARAISON, POUR DES SOLS ARGILEUX, ENTRE LE CÔNE INDEX MESURÉ AU WES

ET LE CÔNE INDEX CALCULÉ.

Le calcul est fait d'après les résultats de LE GALL sur les fondations circulaires avec un coefficient correcteur de 0,66 préconisé par MERLE pour $\phi < 17^\circ$ et un coefficient correcteur de 0,66 mieux adapté que nous recommandons pour $\phi < 10^\circ$.

$\gamma = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$

——— CI mesuré
 - - - - CI calculé (0,66)
 - - - - CI calculé (0,66)

$$\text{COEFF. CORR.} = \frac{R_{pL}}{R_{pH}} = \frac{\text{CI calculé (LE GALL)}}{\text{CI mesuré (SMITH, WES)}} = 0,66$$

