

S. ANDREI  
S. MANEA  
A. CIOCALTEU

Université Technique  
de Génie Civil, Bucarest,  
Roumanie

# La systématisation, le stockage et la réutilisation des informations géotechniques. Principe d'organisation d'une banque de données géotechniques

## Résumé

L'article présente une méthode pour la systématisation et le stockage des données géotechniques en tenant compte des principaux facteurs qui conditionnent le comportement du sol, c'est-à-dire sa nature et son état d'humidité et de serrage.

La nature du sol est caractérisée par « l'empreinte » à partir des caractéristiques d'identification (courbe granulométrique et plasticité pour l'empreinte « A »).

La similitude des empreintes est la première condition pour un comportement analogue. La seconde condition est d'avoir la même teneur en eau ( $w$ ) et le même volume spécifique ( $V = 100/p_d$ ), tous deux figurant sur un diagramme d'état ( $w, V$ ).

L'article présente l'application de la méthode pour prévoir le comportement du sol soumis aux actions mécaniques et hydrauliques.

## Abstract

Paper presents a method for systematisation and stockage of geotechnical information taking into account the main factors determining soil behaviour that is its nature on one hand, moisture and density on other hand.

The nature of soil is characterised by means of « prints » constructed from identification indexes (grain size distribution curve and soil plasticity for « A » print). Similarity of prints is the first condition for an analogous behaviour. The second condition is to have the same water content ( $w$ ) and the same specific volume of soil ( $V = 100/p_d$ ), which are represented on a state diagram ( $w, V$ ).

Paper presents the application of the method to forecast soil behaviour submitted to mechanical and hydraulic actions.

## Introduction

L'implantation d'un nombre d'ouvrages toujours croissant sur les sites encore disponibles, où les conditions géotechniques sont de plus en plus défavorables, a eu comme résultat l'augmentation du volume de prospections et d'essais géotechniques. En même temps, les exigences accrues envers les qualités du terrain de fondation ou des ouvrages en terre ont stimulé le perfectionnement des méthodes d'investigation, toujours plus complexes, autant du point de vue des équipements que de l'interprétation des résultats. Il faut aussi ajouter que les nombreuses informations géotechniques concernant les types de sols qui ont déjà été étudiés ne sont pas entièrement valorisées pendant les investigations des terrains contenant des sols analogues.

A cet égard il faut signaler que les systèmes de représentation et d'interprétation des résultats, qui ont été développés surtout dans les pays à climat humide, ne sont pas adaptés à l'étude des sols non saturés.

Toutes ces considérations montrent la nécessité et l'actualité d'une méthode d'étude et d'interprétation des informations géotechniques qui permet le classement, le stockage et la réutilisation des paramètres employés dans la conception, adaptée aussi bien aux sols saturés que surtout aux sols non saturés.

Une telle méthode a été élaborée et développée à la Chaire de Géotechnique et Fondations de l'Université Technique de Génie civil de Bucarest, par les auteurs.

Pour l'élaboration de la méthode, les facteurs suivants déterminant le comportement des sols ont été pris en considération :

- la nature du matériau constitutif, caractérisé à l'aide des figures géométriques simples nommées « empreintes » : empreinte « A » basée sur la granulorité et la plasticité des sols et quelquefois les empreintes « M » et « CH » reflétant la composition minéralogique et chimique ;

- l'état d'humidité et de serrage, représenté par un diagramme d'état avec la teneur en eau ( $w$  %) en abscisse et le volume ( $V$  cm<sup>3</sup>/100 g) en ordonnée.

## Caractérisation du matériau constitutif du sol

A l'heure actuelle, pour le matériau constitutif du sol, on fait généralement appel à la composition granulométrique du sol ou à sa plasticité. Malheureusement, à présent on regarde séparément la granulométrie et la plasticité du sol.

L'utilisation de l'empreinte A, construite à partir de la granulométrie et de la plasticité, présente l'avantage de réunir en une seule image expressive ces informations (Fig. 1).

Ainsi, le premier quadrant est consacré au diagramme de plasticité de Casagrande sur lequel est représenté le point  $P_1$ , correspondant à la limite de liquidité ( $w_L$ ) et l'indice de plasticité ( $I_p$ ). Dans le troisième quadrant on représente la courbe granulométrique ; pour les sols granulaires (non plastiques) on retient seulement la portion  $P_{10}$  à  $P_{90}$ , comprise entre les

pourcentages ( $x_d$ ) 10 et 90 % ; pour les sols à granulation fine on retient la portion  $P_{90}$  à  $P_{2\mu}$ , ce dernier point correspondant au pourcentage à 2  $\mu\text{m}$  ( $x_{2\mu}$ ).

Dans le deuxième quadrant on marque le point  $P_2$  ( $x_{2\mu}$ ,  $I_p$ ) ; la pente de la droite  $P_2O$  représente l'indice d'activité, d'après Skempton ( $I_A = I_p/x_{2\mu}$ ). Dans le même quadrant on a représenté aussi les domaines d'activité en tenant compte des dégâts subis par les constructions réalisées sur les argiles expansives (Van der Merve, 1964). Le point  $P_4$  du quatrième quadrant a comme abscisse la limite de liquidité ( $w_L$ ) et la même ordonnée que celle du troisième quadrant ( $d_{10}$  ou  $d_{2\mu}$  en fonction du type de sol).

Réunissant les points P des quadrants voisins on obtient une figure simple dont la forme et les dimensions fournissent les informations nécessaires à l'identification et la classification des sols.

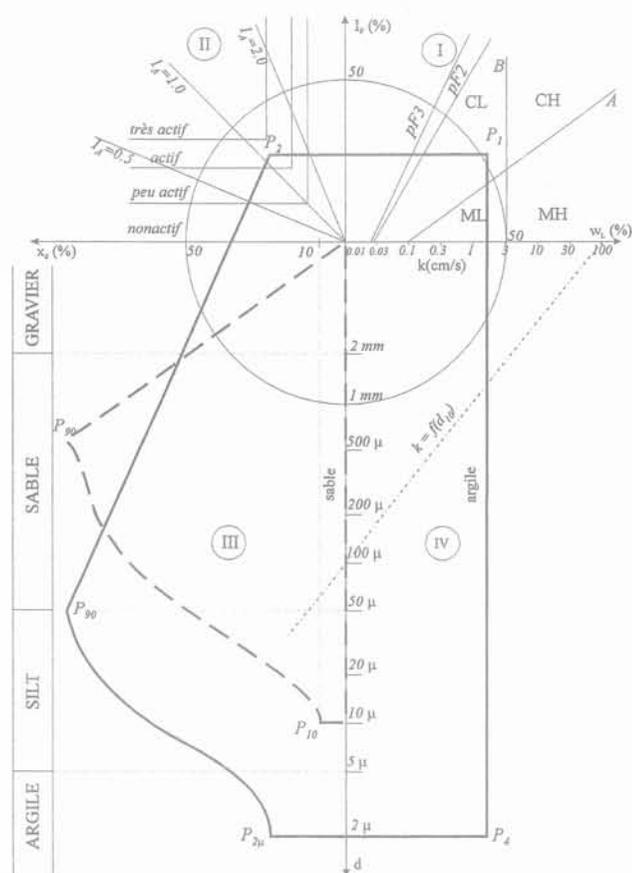


FIG. 1 Les empreintes « A » d'un sable et d'une argile.  
« A » Prints of a sand and a clay.

Lorsqu'on dispose des données concernant la composition minéralogique ou chimique, on peut construire les empreintes « M » et « Ch » (Fig. 2), dont la forme et les dimensions constituent une image bien plus suggestive qu'une série de chiffres dans un tableau. L'analyse des données de la littérature nous a permis d'aboutir à la conclusion que l'empreinte « M » doit contenir des informations concernant les pourcentages de huit minéraux : quartz, feldspath, kaolinite, montmorillonite, vermiculite (chlorite), mica, halloisite (illite) et oxydes (Fig. 2a). Quant à la composition chimique, on a considéré opportun de représenter sur les huit échelles les taux de sulfates et chlorures, carbo-

nates,  $R_2O_3$  et  $SiO_2$ , de matières organiques, la valeur pH et la capacité d'échange d'ions. On remarque que, dans le premier quadrant, on peut tracer les droites d'égal rapport  $SiO_2/R_2O_3$ , qui séparent les sols latéritiques de ceux qui ne le sont pas (Fig. 2b).

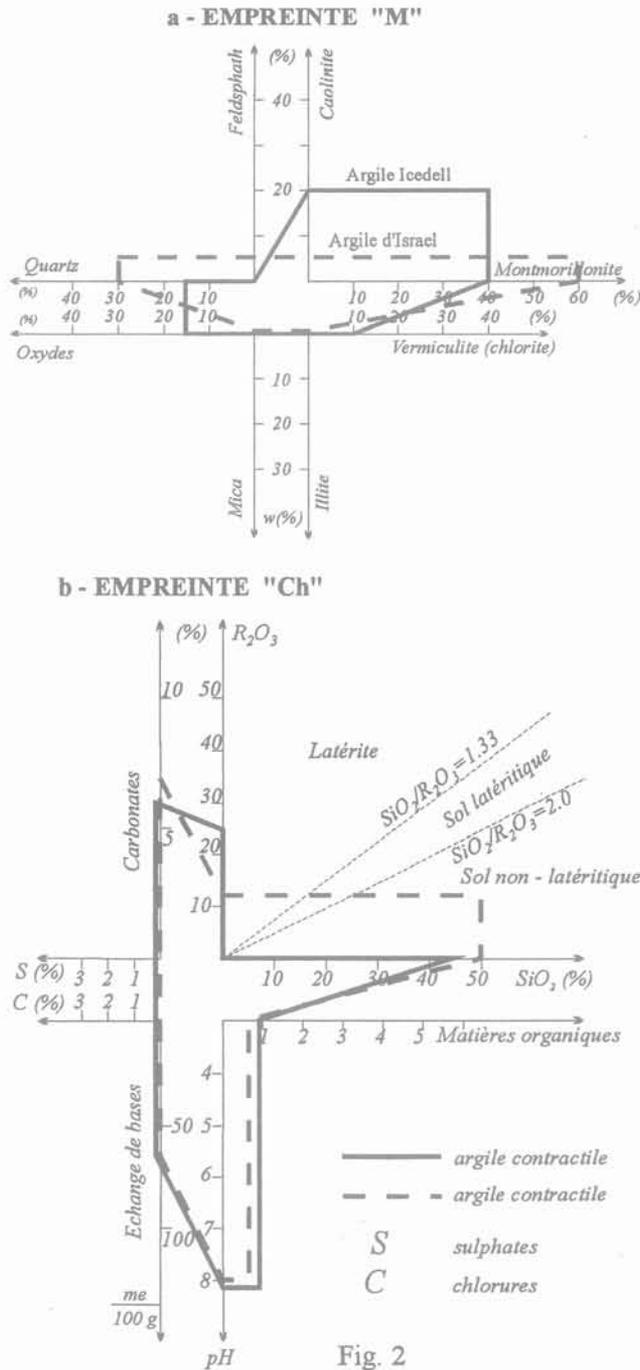


FIG. 2 Les empreintes minéralogiques (« M ») et chimique (« Ch »).  
Mineralogical (« M ») and chemical (« Ch ») prints.

En utilisant les empreintes, on ne fait pas appel aux critères arbitraires de classification, mais en même temps on est capable de répondre à quelle catégorie, prévue par différents systèmes de classification, appartient le sol considéré. Pour cela on peut représenter sur le diagramme de l'empreinte les domaines correspondant à différentes classes de chaque système de classification.

Par exemple, sur la figure 3 sont représentés les domaines correspondant à la classification prévue par la « Réalisation des remblais et des couches de forme » (1992). Dans ce cas, on a ajouté dans le quatrième quadrant une échelle logarithmique pour les valeurs au bleu de méthylène (VB) et sur la limite droite ( $P_1P_4$ ) de l'empreinte un petit cercle correspondant à la valeur VB du sol considéré. D'après cette classification, le loess de Fetesti (Roumanie), appartient à la classe  $A_1$ , presque à la limite ( $VB = 2,5$ ) vers la classe  $A_2$ . On a représenté aussi les domaines correspondant à d'autres systèmes de classification (roumain, américains ASTM-2487, AASHO, FFA). Par exemple, sur la figure 4 sont représentés les domaines correspondant à la classification utilisée par Federal Aviation Agency (FAA). Dans ce cas, le deuxième quadrant est utilisé pour établir la dénomination du sol en fonction de son contenu en sable et en silt; aussi dans le premier quadrant sont représentées les deux droites, établies par Cronney en 1977, qui expriment les corrélations entre l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et les teneurs en eau correspondant aux indices sorptionnels  $pF_2$  ( $w_{pF_2}$ ) et  $pF_3$  ( $w_{pF_3}$ ). D'après cette classification, pour le même loess de Fetesti, le point  $P_1$  de l'empreinte est situé dans le domaine  $E_5$  et le contenu en fraction fine ( $< 53 \mu$ ) est de 98 %, donc on a affaire à un silt.

De cette matière on a la possibilité d'établir, en superposant l'empreinte sur les diagrammes avec les domaines, à quelle classe de chaque classification correspond le sol considéré.

Pour faciliter cette opération on a élaboré un petit programme pour l'ordinateur.

En dehors de l'avantage d'être indépendante d'un certain système de classification, la représentation par l'empreinte permet d'obtenir rapidement des informations sur le comportement des sols du point de vue de l'activité (deuxième quadrant), de la sensibilité au gel ou la possibilité d'appliquer les différents procédés de traitement (Fig. 5a), ainsi que la capacité de drainage, en partant de la composition granulométrique (troisième quadrant) (Fig. 5b).

En général on a constaté que la forme et la surface de l'empreinte sont très sensibles à la modification de la nature du sol.

### 3

## État non saturé. Mode de représentation simultanée de l'état de serrage et de l'état d'humidité

Généralement on définit un sol comme saturé si les pores de la matrice constituant le squelette solide sont remplis par la phase liquide (l'eau).

Dans ce cas, il existe une correspondance biunivoque entre l'état d'humidité et l'état de serrage, qui s'exprime par la relation :

$$w_{sat} (\%) = [n\rho_w / (1 - n)\rho_s] 100 = e(\rho_w / \rho_s) 100 = \rho_w (V - 100 / \rho_s) \quad (1)$$

où :

$w_{sat}$  est la teneur en eau pondérale ;

$n$ , la porosité ;

$e$ , l'indice des vides ;

$\rho_w$  et  $\rho_s$ , les densités de l'eau et du squelette ;

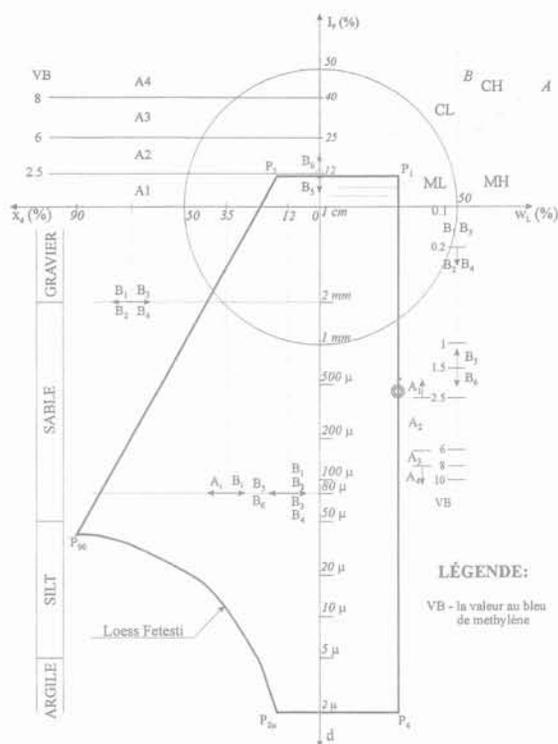


FIG. 3 Les domaines correspondant à la classification française. Domains corresponding to the French classification.

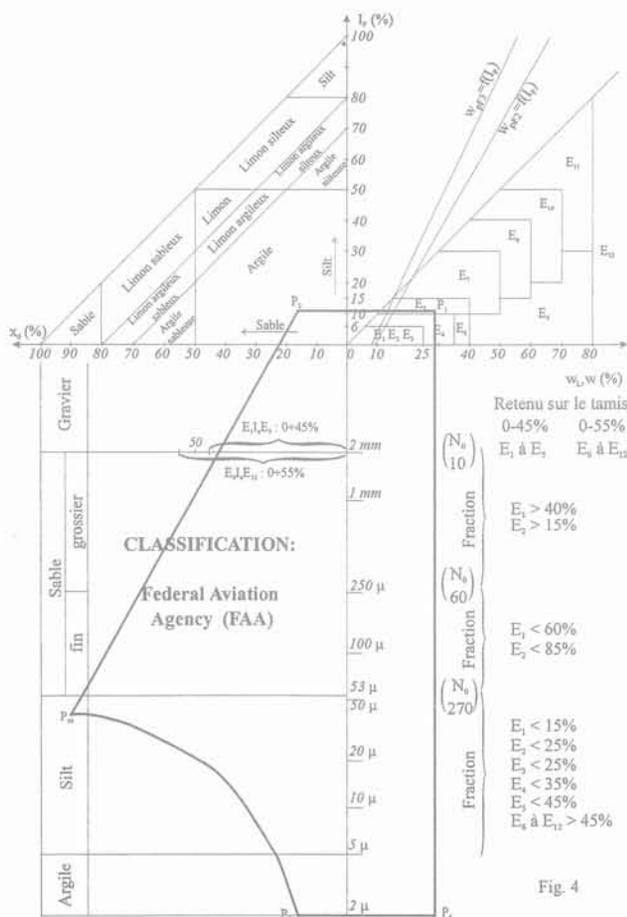


FIG. 4 Les domaines correspondant à la classification américaine FFA. Domains corresponding to the American classification FFA.

V, le volume correspondant à une masse de 100 g de la phase solide.

Puisque les forces d'interaction entre l'eau et le squelette minéral sont compensées, la pression interstitielle dans les sols saturés est généralement égale ou supérieure à la pression atmosphérique.

Les sols sont non saturés s'il y a de l'air dans leurs pores : ce sont alors des systèmes triphasiques.

Dans ce cas, la correspondance biunivoque mentionnée ne subsiste plus, c'est-à-dire qu'à une même porosité peuvent correspondre une infinité de teneurs en eau en fonction du degré de remplissage des pores par l'eau (degré de saturation  $S_r$ ) ou qu'à une même teneur en eau le sol peut avoir des porosités différentes.

Comme les propriétés des sols non saturés sont déterminées par des relations réciproques entre les phases constituantes, on doit disposer pour leur étude, d'un système de représentation permettant de suivre en même temps l'influence de l'état de serrage et de l'état d'humidité.

Ainsi, Proctor a proposé un diagramme où la teneur en eau ( $w$ , %) est en abscisse et la densité sèche ( $\rho_d$ ) en ordonnée (Fig. 6). Un inconvénient de la représentation Proctor est constitué par la non-linéarité des courbes d'égalité saturation  $S_r$ , teneur en eau volumique  $\theta$ , masse volumique humide  $\rho$  et l'indice de vides  $e$ .

Norton, puis Terracina (1958) ont proposé un abaque, ayant  $w$  en abscisse et le volume spécifique  $V$  ( $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ ) correspondant à 100 g du phase solide en ordonnée (Fig. 7) et qui, à notre avis, est plus convenable. Dans ce cas, entre la masse volumique sèche  $\rho_d$  et  $V$  on a la relation :

$$\rho_d = 100V^{-1} \quad (2)$$

On peut marquer en ordonnée des valeurs  $\rho_d$  et tracer des droites horizontales correspondant à des chiffres ronds. Sur l'abaque on a représenté aussi les droites inclinées d'égalité masse volumique humide  $\rho$ , correspondant à la relation :

$$\rho = \rho_d(1 + 0,01w) = (100V^{-1})(1 + 0,01w) \quad (3)$$

D'après cette relation on peut déduire que sur l'axe des ordonnées ( $w = 0$ )  $\rho$  et  $\rho_d$  ont la même valeur. D'après l'expression de la porosité :

$$n = 1 - \rho_d \rho_s^{-1} = 1 - V_s V^{-1} \quad (4)$$

et de l'indice des vides :

$$e = \rho_s \rho_d^{-1} - 1 = V V_s^{-1} - 1 \quad (5)$$

on en déduit que, pour une certaine masse volumique des grains ( $\rho_s$ ), il existe des relations biunivoques entre  $V$  et les valeurs  $n$  et  $e$ .

Dans le cas des sols à pores remplis d'eau ( $S_r = 1$ ), les teneurs en eau à saturation correspondant à une droite inclinée à  $45^\circ$  par rapport aux axes et qui rencontre l'axe des ordonnées ( $w = 0$ ) au point  $V_s = 100 \rho_s^{-1}$ ; la position de ce point est donc déterminée par la masse volumique des grains.

En tenant compte de la définition du degré de saturation ( $S_r = w/w_{\text{sat}}$ ), on obtient les teneurs en eau correspondant à un certain degré de saturation :

$$w = S_r w_{\text{sat}} = S_r \rho_w (V - 100 \rho_s^{-1}), \text{ ou } V = w(S_r \rho_w)^{-1} + 100 \rho_s^{-1} = w(S_r \rho_w)^{-1} + V_s \quad (6)$$

et, pour l'état de saturation ( $S_r = 1$ ), considérant pour l'eau  $\rho_w = 1$ , on obtient :

$$V = V_s + w_{\text{sat}} \quad (7)$$

Admettant l'hypothèse que  $\rho_s$  est constante, on obtient pour les valeurs rondes de  $S_r$  un faisceau de droites concourantes passant par le même point

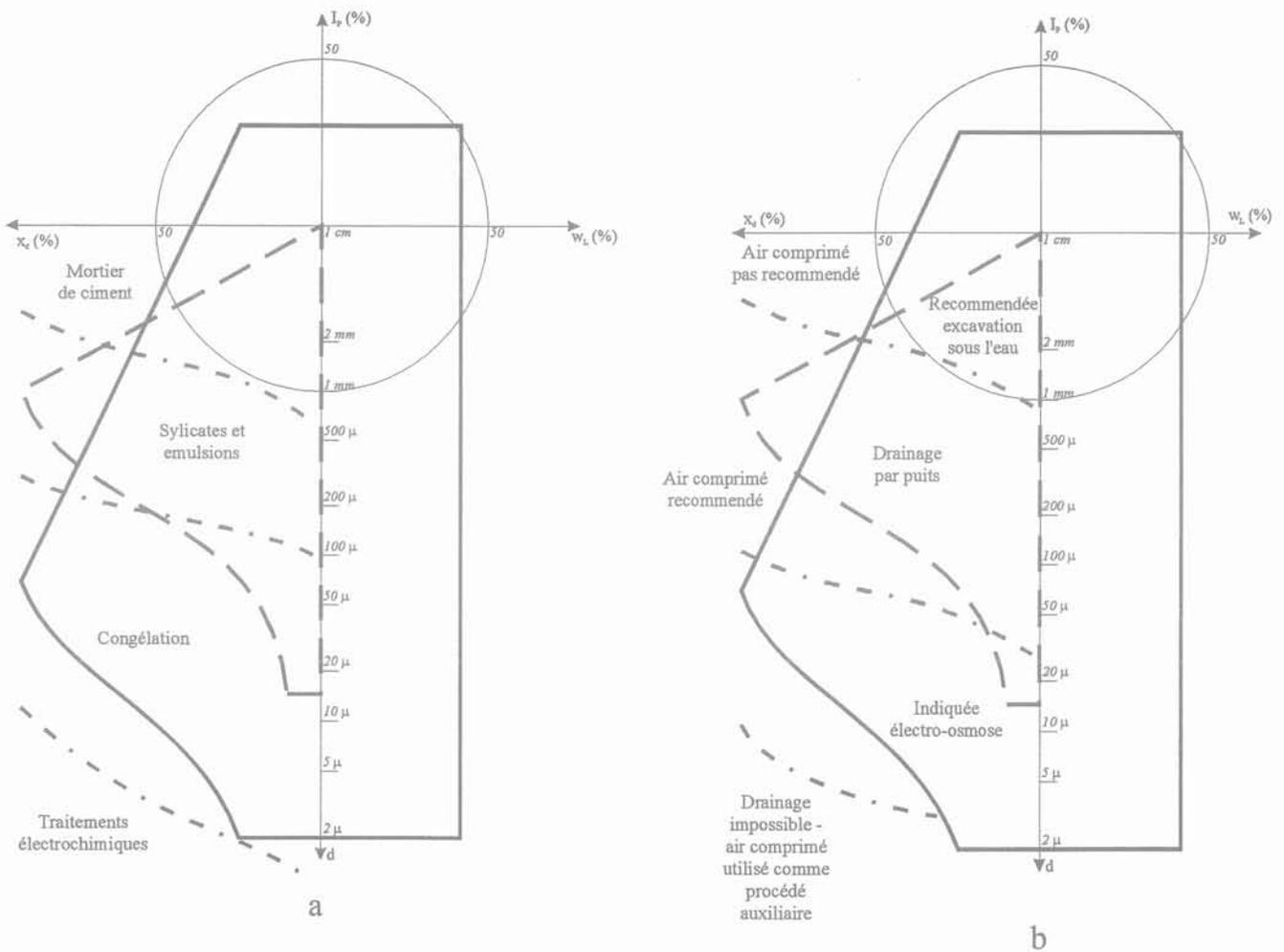


FIG. 5 Les domaines correspondant aux différents procédés de traitement du sol. Domains corresponding to different soil treatment processes.

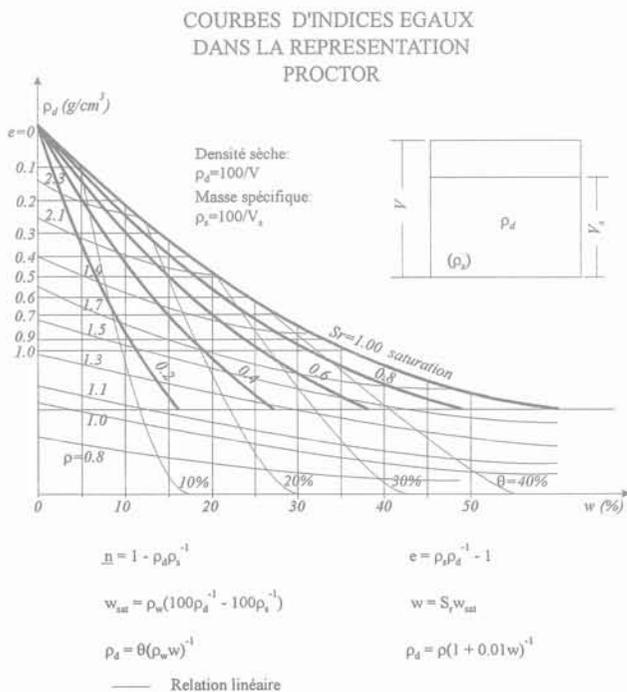


FIG. 6 Le diagramme d'état de Proctor. Proctor's state diagram.

( $V_s = 100/\rho_s$ ) sur l'axe des ordonnées, qui se confond avec le point d'intersection de la droite de saturation avec cet axe. Sur l'abaque (Fig. 7), on a représenté les droites d'égales valeurs  $S_r$  (0,1; 0,2; 0,3; jusqu'à 0,9),  $\theta$  et  $p$ .

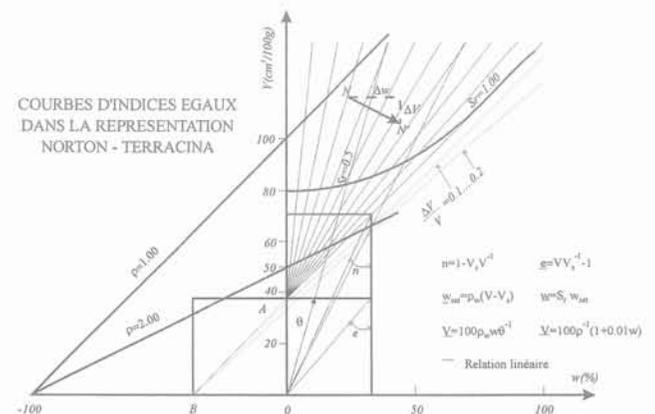


FIG. 7 Le diagramme d'état de Norton-Terracina. Norton-Terracina state diagram.

Parmi les abaques proposés par différents auteurs, celle de Norton-Terracina présente certains avantages dus principalement à la linéarisation des courbes d'égales valeurs  $w_{sat}$ ,  $S_r$ ,  $\rho$  (Fig. 8). En conséquence, l'abaque permet de suivre facilement les modifications de l'état d'humidité ou de serrage du sol sous l'action des différents facteurs naturels ou artificiels. Sur le même abaques on a représenté aussi, par une ligne courbe interrompue les états probables, correspondant à l'optimum de compactage, établis par Hilf (1981) d'après 1300 essais.

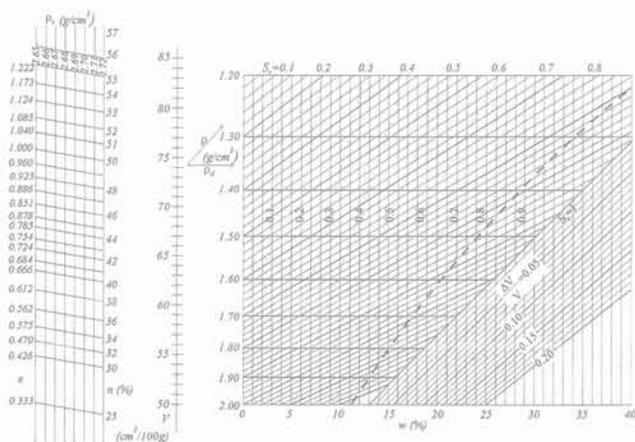


FIG. 8 L'abaque pour le contrôle des résultats des essais.  
Abacus for the control of test results.

En Roumanie, nous avons utilisé cet abaques depuis de nombreuses années et en plus des propriétés établies par Terracina on y a mis en évidence d'autres possibilités. Ainsi, on peut représenter sur cet abaques (Fig. 7) la courbe de retrait ( $w$ ,  $V$ ) d'un sol cohérent: tant que le sol reste pratiquement saturé, la courbe de retrait est une ligne droite parallèle à la droite de saturation inclinée à 45° par rapport aux axes de coordonnées; au moment où l'air pénètre dans les pores, la droite devient une courbe à concavité tournée vers le haut qui s'éloigne de la droite de saturation et tend vers une droite parallèle à l'axe des abscisses pour les teneurs en eau réduites. L'abaques donne aussi la possibilité de suivre les variations de volume ( $\Delta V/V$ ). Ainsi, on peut, par exemple, suivre facilement les modifications de l'état de serrage pendant l'essai œdométrique. Par exemple, entre l'état initial (N) et l'état final (N') correspond une modification de volume  $\Delta V$  (Fig. 7).

4

## Exemples d'application du système proposé

En général, à l'aide du système proposé on peut représenter tous les indices principaux caractérisant les propriétés physiques et mécaniques d'un sol, en remarquant les modifications des valeurs de ces indices en fonction des modifications de l'état (teneur en eau ou serrage).

Par exemple, le diagramme présenté sur la figure 9 permet de déceler l'influence de l'état de serrage et de la teneur en eau sur le module œdométrique  $M$  d'un certain sol.

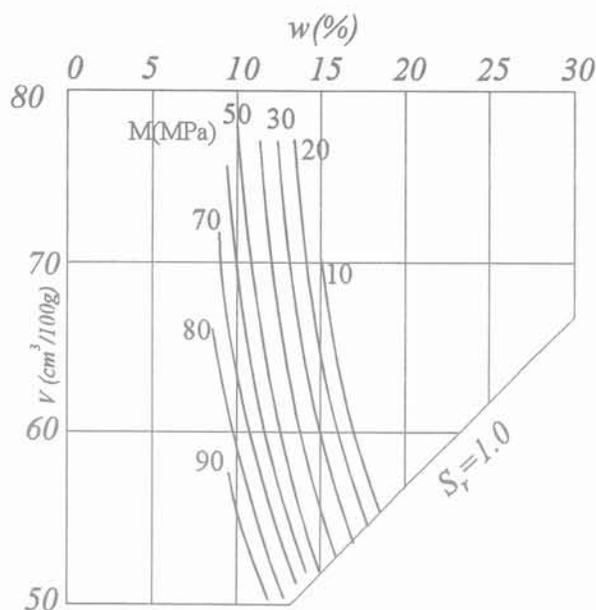


FIG. 9 L'influence de l'état du sol sur le module œdométrique  $M$ .  
Influence of soil state on oedometrical modulus  $M$ .

En représentant les résultats obtenus pendant le cisaillement des sols on obtient des diagrammes (comme ceux de la figure 10), sur lesquels on a marqué les courbes correspondant à l'état critique au cisaillement pour différentes pressions  $p$ . A l'aide de ces courbes on peut prédire le changement du volume  $\pm \Delta V$  (dilatante ou contractante) associé au cisaillement. Dans les diagrammes de la figure 11 on peut suivre l'influence de l'état sur les paramètres de la résistance au cisaillement:  $c$ ,  $\phi$ .

Le diagramme d'état est aussi très pratique lorsqu'on veut étudier le comportement des sols dits « régionaux », qui font preuve d'une réaction particulière en présence de l'eau, comme les sols effondrables (loess et sols loessiques) ou bien les argiles contractiles et expansives.

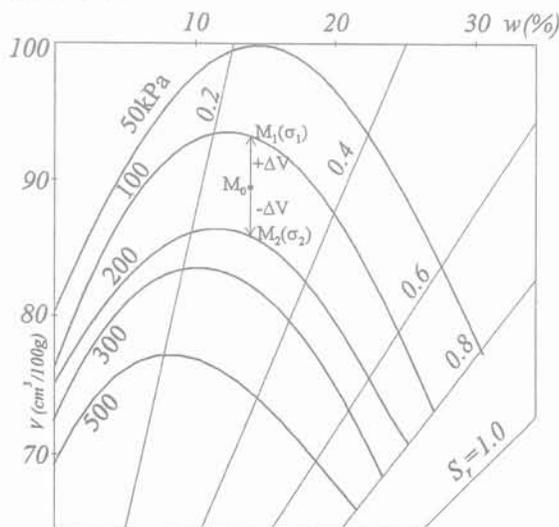
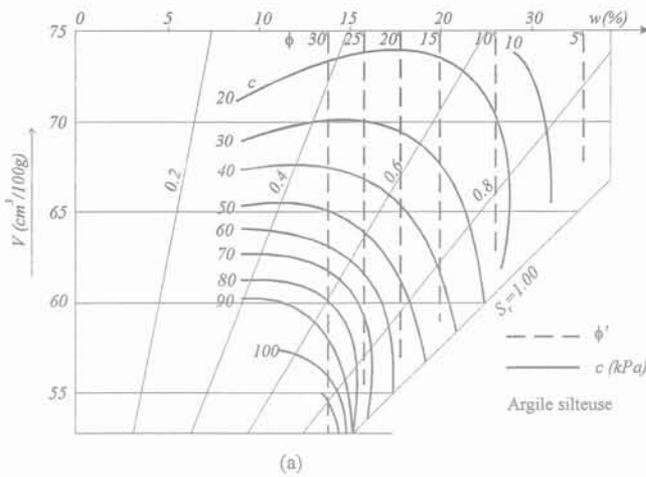
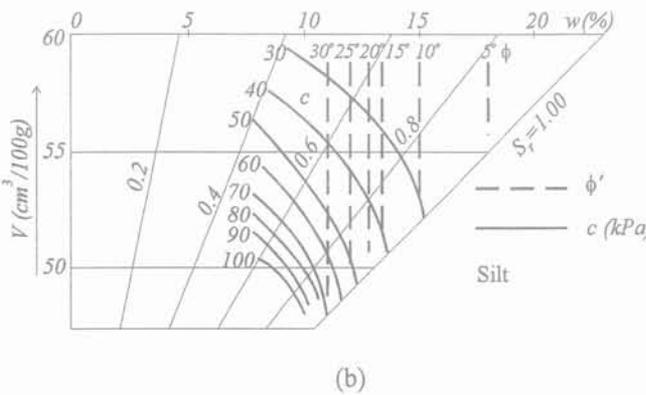


FIG. 10 Diagramme avec les courbes d'équilibre d'état pour différentes pressions normales pendant le cisaillement.  
Diagram with equilibrium state during direct shear for different normal pressures.

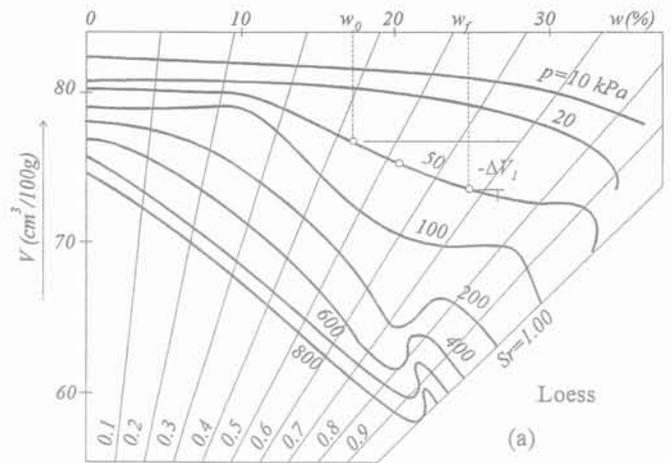


(a)

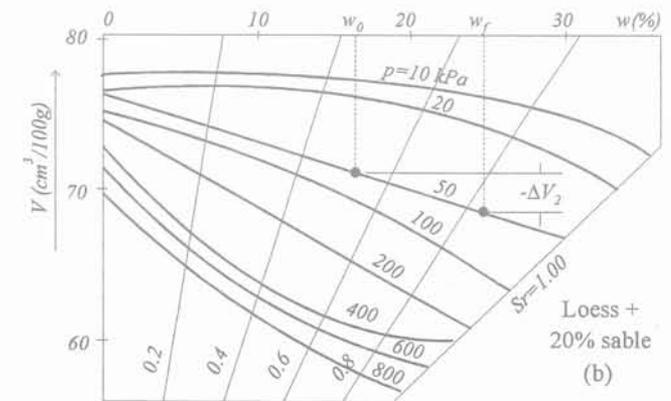


(b)

**FIG. 11** Diagramme avec les courbes d'égal paramètre de cisaillement  $c$  et  $\phi$ . Diagram with equal shear parameters curves,  $c$  and  $\phi$ .



(a)



(b)

**FIG. 13** Diagrammes avec des courbes d'égal résistance structurale pour un lœss (a) et un mélange avec 20 % de sable (b). Diagrams with equal structural resistance curves for a loess and a mixture with 20 % sand.

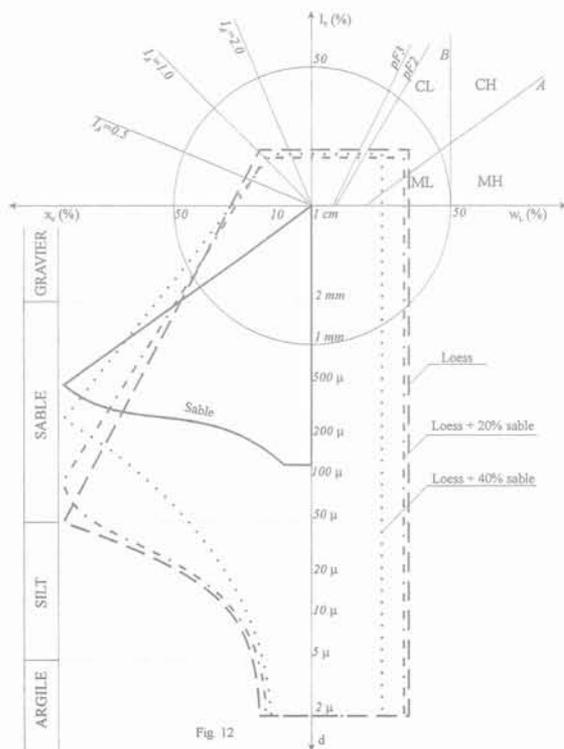


Fig 12

**FIG. 12** Empreintes pour les mélanges de sable et de lœss. Prints for sand and loess mixtures.

Par exemple, en ce qui concerne le lœss, dont l'empreinte est représentée sur la figure 12, les résultats des essais œdométriques en partant des différents états d'humidité donnent la possibilité de tracer sur le diagramme d'état des courbes d'égal résistance structurale à l'aide desquelles on peut pronostiquer les variations de volume  $\Delta V$  engendrées par le changement de la teneur en eau, en particulier par l'inondation du sol (Fig. 13a). La méthode présentée a permis aussi d'étudier l'influence des additifs (comme le sable ou le ciment) sur les caractéristiques de compressibilité (Fig. 13b). On remarque que l'augmentation du pourcentage de sable réduit la sensibilité du lœss, ce qui se reflète d'un côté dans l'empreinte (Fig. 12) et de l'autre dans le diagramme d'état (Fig. 13).

De même, le diagramme de la figure 14 représente les trajectoires d'état correspondant à des essais œdométriques sur les argiles expansives qui, d'une manière analogue à celle utilisée pour les sols effondrables, donnent la possibilité de prévoir les variations de volume  $\Delta V$  en fonction des changements de teneur en eau ( $\Delta w$ ) ou de pression ( $\Delta p$ ).

Le système décrit plus haut a été utilisé aussi pour l'interprétation des données obtenues par le Road Research Laboratory en compactant une gamme assez large de sols dont les empreintes sont représentées sur la figure 15. La représentation des courbes de compactage permet d'observer l'effet des différents engins sur des sols variés, comme: un tout venant, un sable, un limon, une argile et une argile très active (Fig. 16, 17, 18).

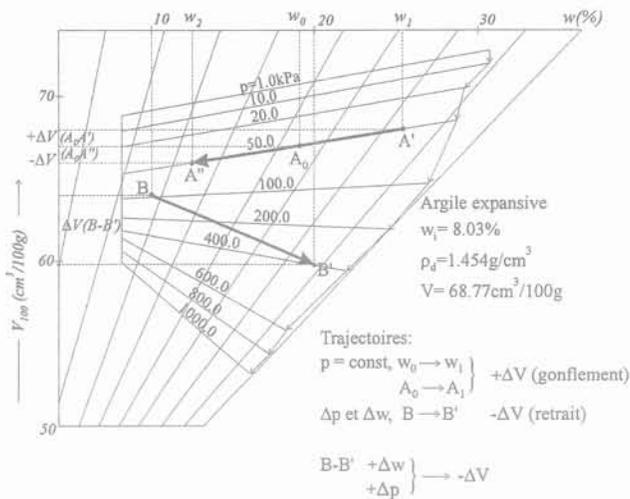


FIG. 14 Diagramme avec les trajectoires d'état d'une argile expansive.  
Diagram with state paths of an expansive clay.

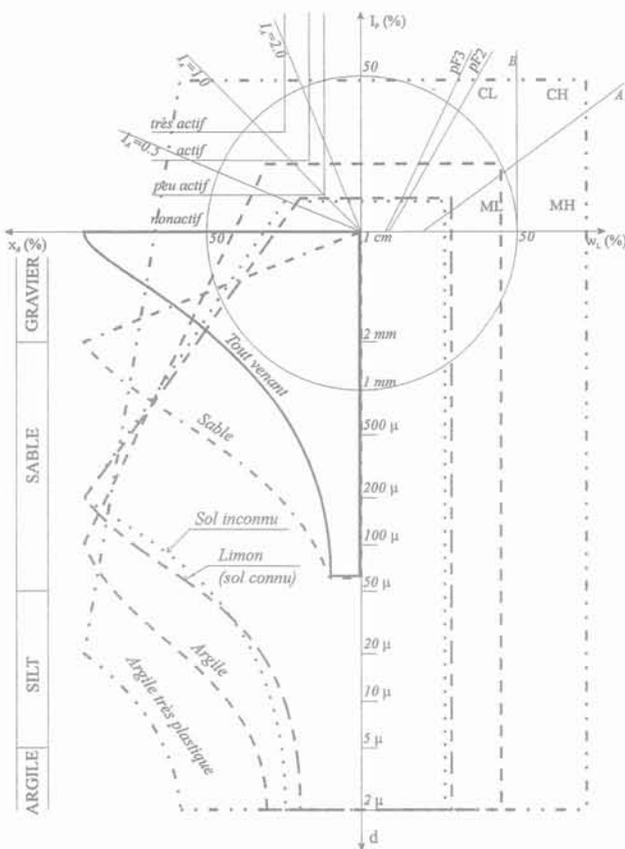


FIG. 15 Empreintes des sols utilisés pour des essais de compactage par le RRL.  
Prints of soils used in compaction trials by RRL.

Une méthodologie similaire a été utilisée pour l'interprétation des résultats des essais concernant l'indice portant californien (CBR) entreprise par Davis (1949) pour six sols dont les empreintes sont représentées sur la figure 19. A titre d'exemple, les courbes d'égales valeurs CBR pour une argile très active sont représentées sur la figure 20.

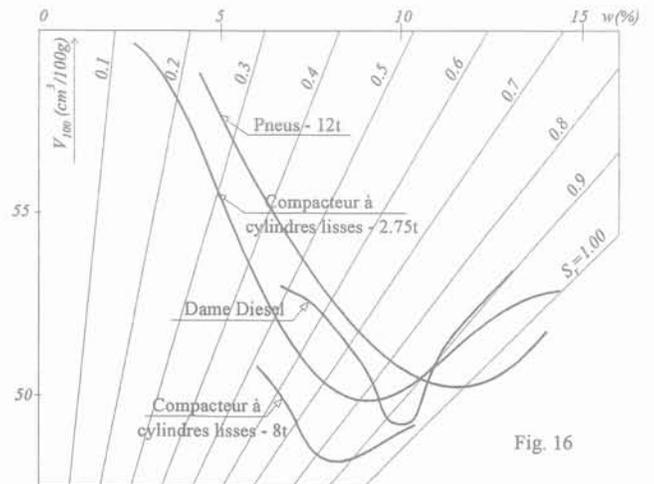
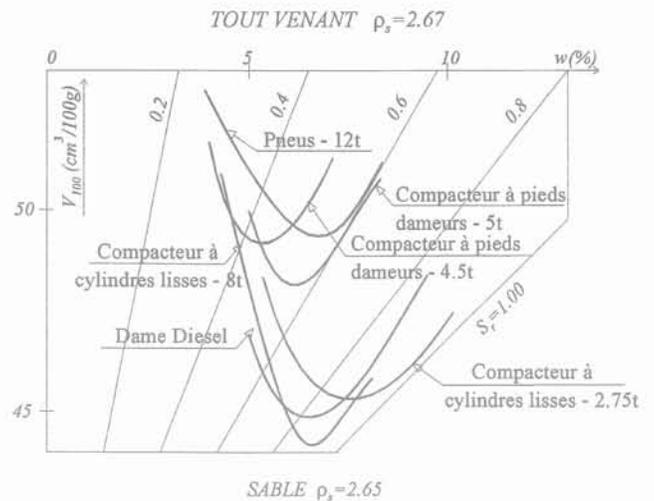


FIG. 16 Diagrammes avec les courbes de compactage d'un tout-venant (a) et d'un sable (b).  
Diagrams with compaction curves of a gravel-sand-clay mixture (a) and a sand (b).

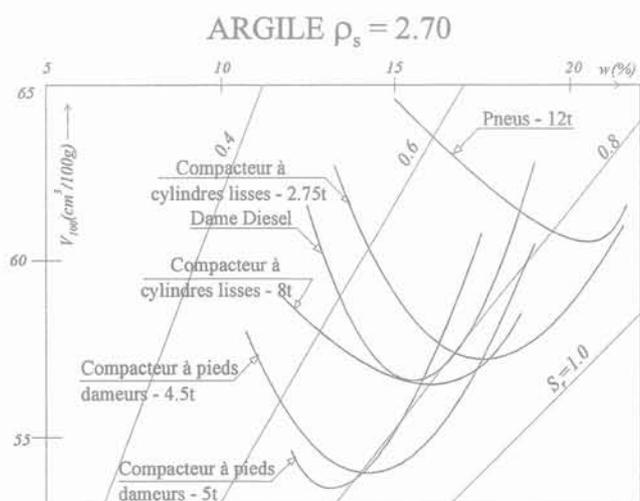
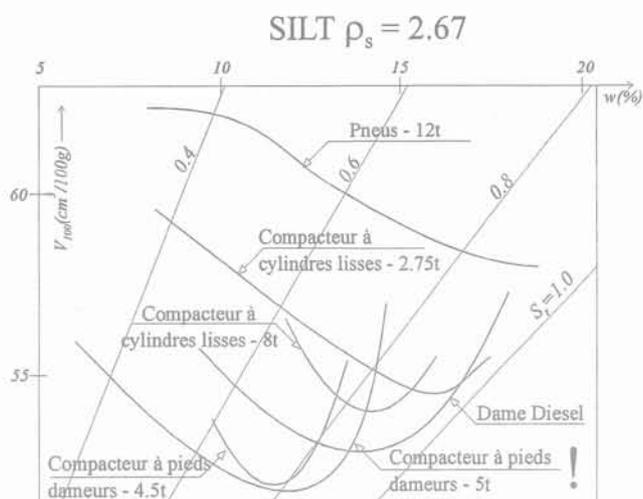
Le stockage de ce type de données permet leur réutilisation. Par exemple, en étudiant un nouveau sol qui, d'après l'empreinte, est semblable à un autre, on peut utiliser les données existantes pour le sol connu pour prédire son futur comportement.

Pour vérifier cette possibilité, on a utilisé les résultats obtenus par Brüll pour un « limon » de Sterrebeek (Belgique) et par Skoglund (1976) pour un « loess » de Vicksburg (USA), deux sols ayant des empreintes très semblables (Fig. 21), même s'ils ont des noms différents. Les résultats obtenus pour le limon à l'aide de la colonne résonante pour une pression de confinement  $\sigma_0 = 40$  kPa ont permis de tracer sur le diagramme d'état les courbes d'égal module dynamique  $E_d$  et  $G_d$  (Fig. 22). Pour le loess de Vicksburg, ayant une teneur en eau  $w = 20,4\%$  et le volume  $V = 61,1$  cm<sup>3</sup>/100 g on a obtenu par la même méthode  $E_d = 105,9$  MPa et  $G_d = 39,7$  MPa. Pour le même état ( $w = 20,4\%$ ;  $V = 61,1$  cm<sup>3</sup>/100 g) on obtient de la figure pour le limon de Sterrebeek les valeurs  $E_d = 89$  MPa et  $G_d = 40,1$  MPa. Il y a ainsi entre les valeurs mentionnées de petites différences :

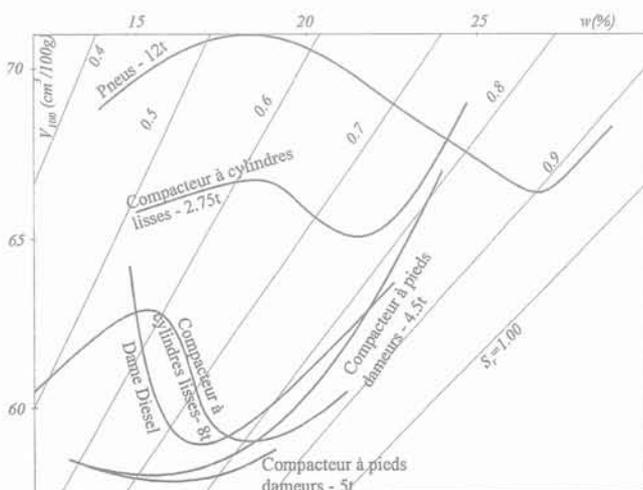
$$\Delta E_d / E_d = (105,9 - 89) / 89 = +0,19 \text{ ou } 19\%$$

$$\Delta G_d / G_d = (39,7 - 40,1) / 39,7 = -0,01 \text{ ou } 1\%$$

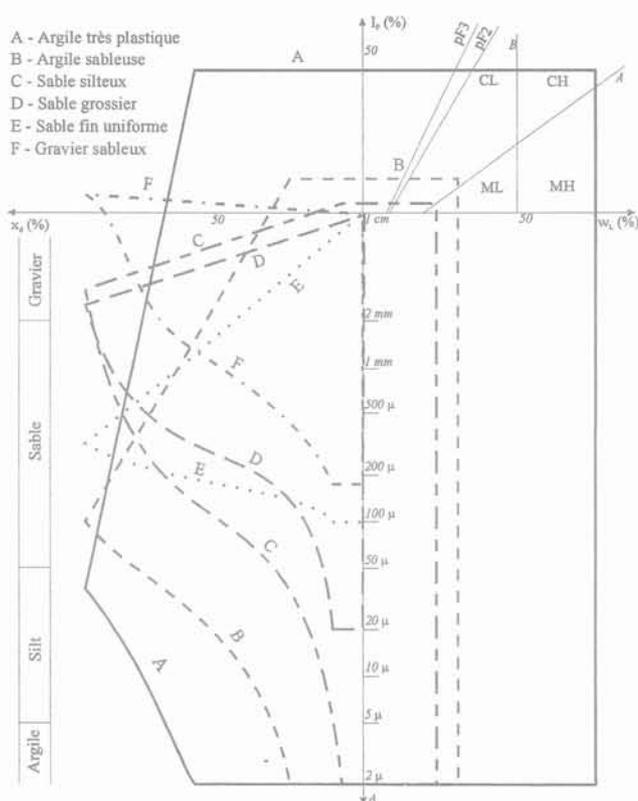
C'est-à-dire que pour deux sols, de deux continents différents, mais ayant des empreintes semblables et le même état de serrage et de teneur en eau, le comportement mécanique est analogue.



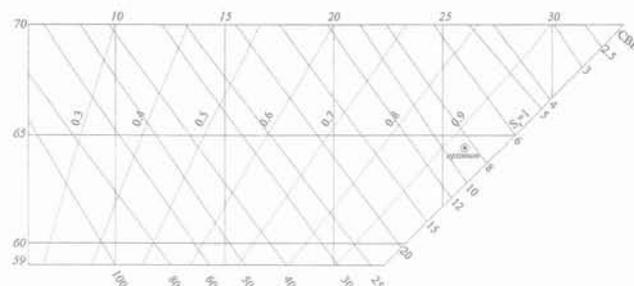
**FIG. 17** Diagrammes avec les courbes de compactage d'un silt (a) et d'une argile (b).  
Diagrams with compaction curves of a silt (a) and a clay (b).



**FIG. 18** Diagrammes avec les courbes de compactage d'une argile très plastique.  
Diagrams with compaction curves of a very plastic clay.



**FIG. 19** Empreintes de cinq sols étudiés du point de vue de l'Indice Portant Californien (CBR).  
Prints of five soils studied from the CBR point of view.



Argile très plastique:  $I_p = 42\%$ ,  $w_L = 75\%$ ,  $w_p = 33\%$ ,  $s_{60} = 55\%$ ,  $I_c = 42/55 = 0.76$ ,  
Optimum pour le compactage:  $w_o = 26\%$ ,  $V = 64.43 \text{ cm}^3/100\text{g}$ ,  $\rho_d = 1.552 \text{ t/m}^3$

**FIG. 20** Diagramme avec courbes d'égal CBR pour une argile très plastique.  
Diagram with equal CBR curves for a very plastic clay.

## 5

### Conclusions

La méthode de systématisation, de stockage et de réutilisation des informations géotechniques à l'aide des empreintes et des diagrammes d'état présente les avantages suivants par rapport aux autres méthodes:

1) Par rapport aux systèmes classiques de caractérisation des sols, l'utilisation de l'empreinte (Fig. 23a):

- réunit en une seule image expressive les principales informations sur la composition des sols (distribution dimensionnelle des particules et des vides, plasticité, activité);

- ne fait pas appel à des critères arbitraires de classification et permet, par superposition sur les dia-

grammes représentant les domaines correspondant à différentes classes de chaque système de classification (ex. : ASTM, AASHO, FAA, STAS, SNIP) de reconnaître la classe où le sol considéré s'encadre ;

- permet l'estimation du danger de phénomènes défavorables (gel, liquéfaction) ou de l'applicabilité des divers procédés d'amélioration ou d'assèchement du sol considéré ;

- permet l'identification rapide du sol étudié et l'établissement de ressemblances avec des sols étudiés précédemment et dont le comportement est mieux connu ; de cette façon, la connaissance approfondie des variétés de sols caractéristiques d'un certain territoire, la systématisation géotechnique, l'établissement de corrélations et la prévision du comportement des nouveaux sols rencontrés sont facilités ;

- facilite la représentation et l'étude des systèmes mixtes composés de sols et d'autres matériaux poreux non granulaires (ex. géotextiles).

2) L'utilisation des diagrammes d'état ( $w, V$  - Fig. 23b) présente les avantages suivants, par rapport à d'autres systèmes de représentation de l'état, par exemple le système Proctor ( $w, \rho_d$ ) :

- permet de suivre simultanément la modification de l'état d'humidité et de serrage (volume  $V$ ) et, par conséquent, ces diagrammes sont convenables pour l'étude des sols à l'état non saturé, quand il n'y a plus de correspondance biunivoque entre la teneur en eau ( $w$ ) et la densité ( $V$  ou  $\rho$ ) ;

- la plupart des courbes d'égal indice (degré d'humidité  $S_r$ , indice des vides, masse volumique, humidité volumique  $\theta$ , égale variation de volume  $\Delta V/V$ ) deviennent des droites, facilitant ainsi la représentation du seul domaine intéressant ;

- permet la représentation des courbes de contraction-gonflement ( $w, V$ ) et la détermination du coefficient de compression qui indique dans quelle mesure la pression extérieure est répartie dans l'eau des pores ;

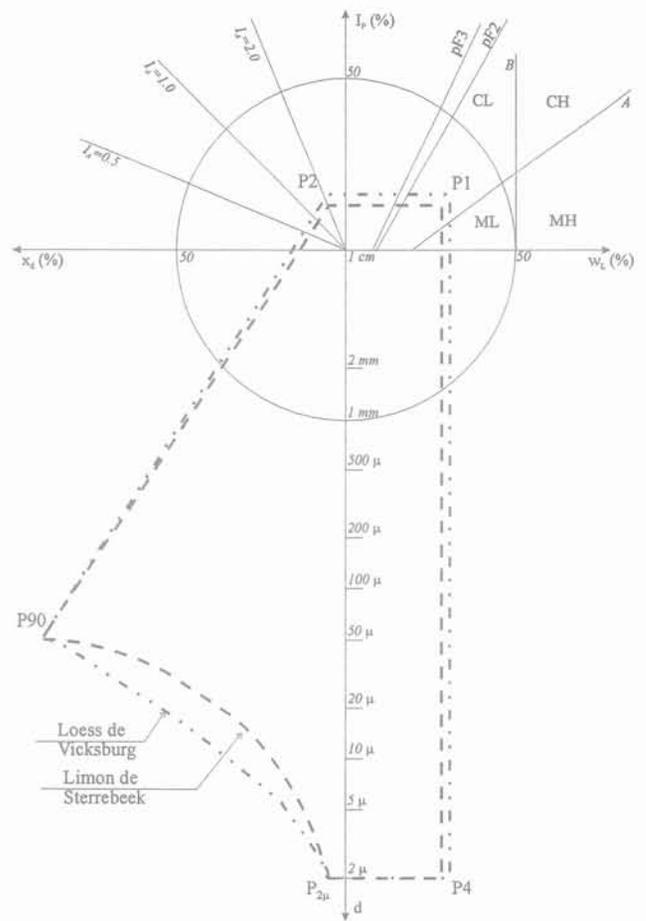


FIG. 21 Ressemblance de deux sols. Similarity of two soils.

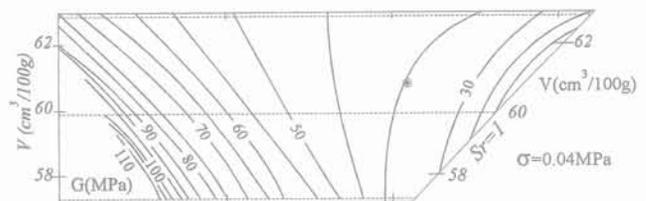
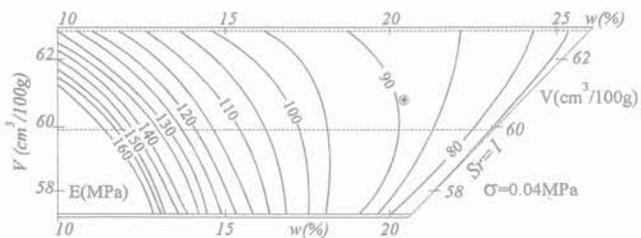


FIG. 22 Diagrammes avec courbes d'égal module dynamique  $E_d$  (a) et  $G_d$  (b). Diagrams with equal dynamic modulus curves  $E_d$  (a) and  $G_d$  (b).

- permet la représentation des domaines d'existence spécifiques des différents sols à l'état naturel ainsi que des modifications d'état dues aux sollicitations mécaniques ou hydriques ; par exemple, la représentation dans le diagramme d'état des charges œdométriques doubles ou triples permet de tracer les courbes d'équilibre d'état pour différentes pressions normales ( $w, V, p = Cte$ ) et sur cette base de prédire par interpolation des modifications d'état - chemins ou trajectoires - correspondant à des conditions différentes de celles de l'essai ;

- permet la représentation des courbes d'égal indice hydrique (suction, hydroconductivité  $k_w$ ) ou mécanique (résistance à la traction  $\sigma_t$ , ou à la compression  $\sigma_c$ , module de déformation œdométrique  $M$ , cohésion et

frottement interne  $c, \phi$ , indice portant californien CBR, etc.) mettant ainsi en évidence l'influence des modifications de la teneur en eau ( $\Delta w$ ) sur ces paramètres ;

- permet la représentation des courbes d'équilibre d'état pour différentes pressions normales ( $w, V, p = Cte$ ) pendant le cisaillement et sur cette base la prédiction des modifications de volume, dilatante ou contractante afférentes à ce phénomène ;

- facilite la représentation des résultats des essais de compactage au laboratoire ou *in situ*, utilisant différentes techniques ou énergies de compactage, la mise en évidence des conditions de serrage optimal, ainsi que l'établissement de certaines corrélations entre les paramètres qui conditionnent ce phénomène.

3) L'utilisation conjuguée des empreintes et des diagrammes d'état rend possible l'étude systématique du comportement de différents types de sols et l'élaboration d'albums de résultats obtenus, facilitant l'établissement des paramètres nécessaires à l'élaboration des projets pour les sols similaires. On peut traiter de la même façon le stockage d'informations sur les essais réalisés sur le terrain ou le comportement des ouvrages à l'échelle réelle ainsi que le classement des informations contenues dans les fiches bibliographiques.

Il faut aussi mentionner l'interprétation statistique des informations et l'établissement de corrélations entre différents principaux facteurs déterminant le comportement des sols.

4) La valabilité et l'utilité du système préconisé ont été testées par application à une série de travaux réalisés en Roumanie ainsi que par le traitement de données publiées dans la littérature spécialisée. Il faut remarquer que l'expérience actuelle avec les étudiants, les participants aux cours post-universitaires et le personnel auxiliaire de la Chaire a montré que l'apprentissage de la méthode préconisée se réalise en un temps très court (2-5 h) et ne nécessite pas de connaissances particulières.

5) En conclusion, nous considérons que la méthode de classement, stockage et réutilisation des informations géotechniques peut être considérée comme vérifiée et, par conséquent, peut être adoptée pour la réalisation d'une banque de données géotechniques.

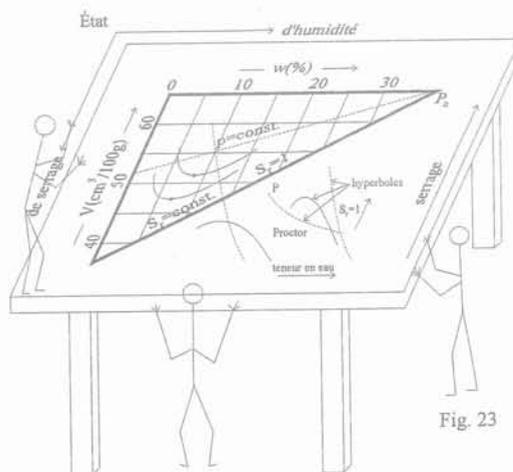
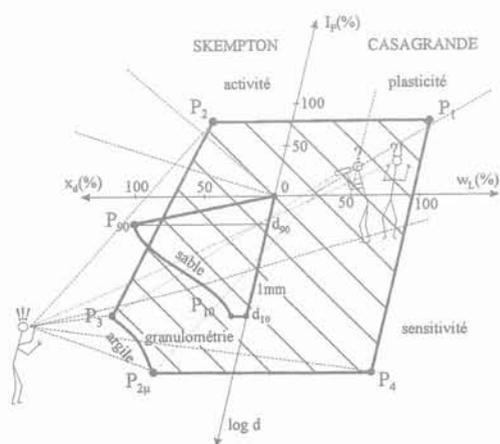


FIG. 23 Schémas concernant les empreintes (a) et les diagrammes d'état (b).  
Schemas concerning prints (a) and state diagrams (b).

## Bibliographie

- Andrei S. – Le drainage de l'eau dans les sols à granulation fine. *Cahiers de recherche IITBTP*, n° 22, Paris, Eyrolles, 1966.
- Andrei S., Athanasiu C. – Test Data Systematization and Stockage to Predict the Parameters Describing the Behaviour of Unsaturated Soils. Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics, Brighton, vol. 1, p. 91-94, 1979.
- Andrei S., Athanasiu C., Manea S. – Prediction of Expansive Clay Behaviour. International Conference on Expansive Clays, Boulder, Colorado, vol. 1, p. 76-95, 1980.
- Andrei S., Athanasiu C., Manea S. – Study of collapsible Soils Properties. Proceedings of the 6th Danube European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Varna, Section 1b, p. 7-22, 1980.
- Andrei S., Manea S. – Systematization, Stockage and re-use of Data Regarding Soil Stabilization. Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, vol. 2, p. 875-878, 1983.
- Andrei S., Manea S. – Collapsing Capacity of Loess and Loessial Soils. Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils, Beijing, p. 189-194, 1988.
- Andrei S., Manea S. – On Soil Collapse Prediction. Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, Texas, p. 67-72, 1992.
- Brüll A. – Effets mécaniques de l'eau interstitielle. Centre de Recherches Routières, Bruxelles, 1983.
- Croney D. – The Design and Performance of Road Pavement. Her Majesty Stationery Office, London, p. 123, 1977.
- Davis E.H. – The Californian Bearing Ratio Method for the Design of the Flexible Roads and Runways. *Geotechnique*, vol. 1, n° 3, p. 249-263, 1949.
- Hilf J.W. – A Rapid Method of Construction Control for Embankments of Cohesive Soil. Engineering Monograph, n° 26, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1981.
- Magnan J.-P., Youssefian G. – Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de Liaison de laboratoires de Ponts et chaussées*, n° 159, p. 79-92, 1989.
- Road Research Laboratory – Soil Mechanics for Road Engineers. Her Majesty Stationery Office, London, 1954.
- Skoglund G.R., Marcuson W.F. – Evaluation of Resonant Column Test Devices. *Journal of Geotechnical Engineering*, Division ASCE, vol. 132, GT11, May, 1976.
- Terracina F. – Variabilité des caractéristiques d'état des sols. Représentation graphique. *Revue générale des Routes et Aéroports*, n° 278, 1958.
- Tran N.L. – Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier. *Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 111, jan.-fév 1981.
- Van der Merwe D.H. – The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction. Transactions SA Institution of Civil Engineering, vol. 6, n° 6, p. 103-107, 1964.
- Winkerton H.F., Fang H.-Y. – Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York, p. 80-87, 1975.