

# PROPOSITION DE SPÉCIFICATIONS BASÉES SUR LES PERFORMANCES POUR LA SÉLECTION ET LA MISE EN ŒUVRE DE MATÉRIAUX NATURELS DANS LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS ROUTIERS

S.COMENALE PINTO  
Studio Comenale, Italie  
salcompi@iol.it

## RÉSUMÉ

Les matériaux naturels, dits « sols » dans le champ des constructions routières, sont jugés utilisables ou non utilisables selon qu'ils satisfont ou non aux spécifications. Puisque les spécifications pour la sélection des sols pour la construction des remblais routiers changent considérablement selon le pays et selon le moment, un même sol peut être jugé utilisable ou non utilisable.

À propos de sols, seulement un nombre très étroit de notions sont largement acceptées.

À chaque énergie de compactage, pour de différentes teneurs en eau de compactage, une courbe Proctor décrit bien leur densité, tandis qu'une courbe CBR (California Bearing Ratio) décrit bien leur stabilité. Le CBR n'est pas une caractéristique mécanique, bien que pour sa détermination on mesure des forces et des déplacements.

L'énergie de compactage de référence change selon le pays, mais jusqu'à maintenant, sur les chantiers, on retenait que plus on compacte un sol, plus haut soit son CBR. Au contraire sur plusieurs chantiers on a trouvé qu'au-delà d'une certaine énergie de compactage, le CBR diminue sa valeur. Ce phénomène était connu depuis longtemps: les courbes CBR tracées pour de différentes énergies se coupent. Au-delà de la teneur en eau qui marque le point d'intersection, le CBR plus haut se trouve sur la courbe à compactage mineur. Donc, l'énergie Proctor modifiée ne donne pas toujours des propriétés mécaniques des sols qui soient meilleures que celles que l'énergie Proctor standard ne donne. En particulier, les meilleures propriétés mécaniques des sols fins peuvent être plus facilement obtenues en choisissant l'énergie Proctor standard.

La sélection des sols pour la construction des remblais routiers est jusqu'à maintenant basée sur des classifications, c'est-à-dire sur leur courbe granulométrique (une propriété géométrique) et leur plasticité (la propriété d'un sol qui définit la possibilité de la modeler dans un domaine plus ou moins grand de teneur en eau) et non pas sur leurs propriétés mécaniques.

En conclusion, on propose d'abandonner les classifications pour la sélection des sols et d'adopter une procédure basée sur le CBR qui choisit l'énergie et l'intervalle de teneurs en eau pour compacter un sol au but d'obtenir une bonne stabilité mécanique et volumétrique. Cette procédure devrait permettre d'utiliser presque la totalité des sols pour les remblais, d'éliminer la nécessité d'étudier les matériaux "hors spécifications courantes", d'établir l'équivalence mécanique de matériaux naturels et non naturels.

## MOTS CLÉS

CLASSIFICATION DES SOLS / ÉNERGIE DE COMPACTAGE / COURBE PROCTOR / COURBE CBR/UTILISABILITÉ DES SOLS.

# 1. LES SPÉCIFICATIONS BASÉES SUR LA CLASSIFICATION POUR LA SÉLECTION DES SOLS À UTILISER DANS LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS NE SONT PAS SATISFAISANTES

Actuellement, la sélection et l'acceptation des matériaux naturels pour l'emploi dans les constructions routières, dit "sols", sont basées sur la classification des sols exhaustivement discutée et mise à point à l'occasion d'un symposium tenu à Atlanta en 1950 sur l'identification et la classification des sols. La publication (ASTM, 1950) permet de se rendre compte jusqu'à quel point les sols fussent un argument nouveau pour les ingénieurs. Burmister remarquait que les ingénieurs étaient "nouveaux venus" dans le champ de la science des sols et par conséquent, « ils ont emprunté des idées, théories, techniques et procédures de ceux qui les avaient précédés, comme ceux qui s'occupaient d'agriculture, céramique et géologie ». Alors les ingénieurs n'employaient pas les concepts de résistance des matériaux ou la théorie de l'élasticité. En 1950 l'on n'avait pas encore publié une méthode standard pour la détermination de la relation teneur en eau de compactage - densité des sols, même si le Tentative Method of Test ASTM D698-42T avait été préparé dès le 1942. On n'avait pas encore publié non plus une méthode standardisée pour la détermination de l'indice CBR, même si un Suggested Method of Test for California Bearing Test fut soumis par le Corps of Engineers et publié en 1950 (ASTM, 1950). Ça veut dire que toutes les discussions à la base de la classification des sols ont été produites sans pouvoir tenir compte ni de la relation teneur en eau de compactage-densité ni du CBR.

Une classification des sols comporte que la possibilité d'utiliser un sol dans une construction routière ne dépend pas de la procédure utilisée pour son compactage, ni de sa nature minéralogique, mais seulement de sa granulométrie et de sa plasticité. Dès le début, à part ce principe, il coexistaient de diverses classifications des sols, plus ou moins différentes, adoptées dans les diverses administrations. Il est surprenant de voir comment le concept de classification des sols se soit préservé pour des décades et se soit diffusé dans le monde entier. Certaines administrations ont cherché de connoter la classification avec un nom particulier ou avec une procédure particulière, mais à la fin, l'on peut reconnaître que chaque classification des sols se base seulement sur l'analyse granulométrique, en particulier sur le passant à un tamis à petite ouverture des mailles, et sur les limites plastiques.

D'autre part, les deux instances suivantes vont contre la stabilité de la classification et induisent des variations:

- l'exigence d'utiliser les sols localement disponibles
- l'exigence d'empêcher d'utiliser des sols dont l'emploi a été mise en relation avec insuccès en précédentes constructions routières.

Ces variations se vérifient d'un pays à l'autre et au cours des temps dans un même pays. Bien que peu importantes formellement, elles peuvent produire, des effets de relief comme le changement d'un sol de "non utilisable" à "utilisable" ou au contraire, de "utilisable" à "non utilisable". La possibilité d'utiliser un sol est jusqu'à maintenant décidée selon de tels critères tout formels sans aucun regard à une analyse rationnelle en termes de résistance, de résistance à la fatigue ou de déformation de la structure. C'est très probablement la raison pour laquelle depuis plus de dix ans, les ingénieurs routiers discutent comment utiliser les matériaux marginaux dans les constructions routières, c'est-à-dire, matériaux qui ne répondent pas aux spécifications. Le fait même que la discussion a été posée suggère que il n'y a aucune confiance dans les spécifications courantes, qui sont basées sur la classification des sols.

## **2. ESSAIS CBR, MODULES E ET DURÉE DE LA CHARGE**

Il a été observé que l'indice CBR et les modules d'élasticité E fournissent des renseignements très semblables et l'on reconnaît généralement que il y a des corrélations entre eux. En effet, pendant un essai CBR, on mesure des déplacements (pénétrations) et les forces nécessaires à les produire. En outre, la géométrie d'un essai CBR est pareille à celle d'un essai de charge sur plaque infiniment rigide qui, dans l'hypothèse d'homogénéité et d'élasticité du sol permet de déterminer son module E. En réalité, la bien connue relation  $E=10 \text{ CBR}$  (E mesuré en MPa) ou  $E=100 \text{ CBR}$  (E mesuré en Kg/cm<sup>2</sup>) peut être dérivée en exprimant soit le CBR que le module E en termes de forces et pénétrations mesurées pendant le même essais CBR. D'autre part, le module E des sols dépend plus que celui d'autres matériaux de construction, soit des modalités d'application des forces, soit des procédures de préparation des échantillons. L'essai CBR, très pratique et diffusé dans le monde entier, fournit des renseignements sur les performances mécaniques des sols même si la procédure d'application des forces n'est pas considérée satisfaisante au but de définir le module E. En effet, la durée de la charge pour évaluer le module E des matériaux routiers devrait reproduire les effets de la circulation et donc tenir compte soit de la vitesse de la circulation que de la profondeur du matériau routier (Barksdale, 1971), (Comenale, 2000), (Bird, 2001), (Comenale, 2001). Théoriquement, le paramètre approprié pour caractériser les sols et les sélectionner est le module E, utilisé ensuite pour le calcul des épaisseurs de la chaussée. Après des années d'efforts, la recherche a fourni des procédures pour la détermination du module E (LTTP, 1996).

Le module E représente mieux que le CBR les conditions des remblais sous l'effet des charges de la circulation à cause de la plus courte durée de la charge dans l'essai. D'autre part, les procédures actuelles (LTTP, 1996) pour la détermination du module E requièrent de compacter des échantillons avec la même teneur en eau de compactage et la même densité sèche du sol sur place ou, si ces données ne sont pas disponibles, à la teneur en eau optimum et avec le 95 % de la densité sèche maximale. Telle procédure ne permet pas de caractériser trois aspects importants du comportement des sols que l'on peut connaître en effectuant des essais CBR à teneur en eau de compactage variable.

## **3. LES ESSAIS CBR MONTRENT QUE LES PERFORMANCES DES SOLS DÉPENDENT DE L'ÉNERGIE ET DE LA TENEUR EN EAU DE COMPACTAGE**

Le CBR peut se déterminer par de différentes énergies de compactages à teneur en eau de compactage optimum ou à teneur en eau de compactage variable (AASHTO, 1993) (ASTM, 1994).

La détermination du CBR à teneur en eau de compactage variable permet de connaître les trois aspects suivants du comportement d'un sol et d'en tenir compte soit dans la phase de sélection que dans la phase de construction:

- a) Les performances mécaniques d'un sol (le CBR) dans une construction routière ne dépendent pas tant de sa teneur en eau actuelle et de sa densité sèche, que des modalités avec lesquelles il a été compacté, c'est-à-dire, de l'énergie de compactage et de la teneur en eau de compactage ;
- b) Il n'est pas toujours vrai que un accroissement d'énergie de compactage améliore les performances mécaniques d'un sol ;
- c) Un sol se regonfle pour effet des variations de sa teneur en eau. Le regonflement aussi dépend des modalités de compactage, c'est-à-dire, de l'énergie de compactage et de teneur en eau de compactage.

Malheureusement le CBR pour le projet et la construction des routes est presque toujours déterminé à la teneur en eau de compactage optimum dans l'attente que le CBR

augmente proportionnellement à la densité sèche. Au contraire, il se passe parfois que un accroissement de compactage n'induit aucun accroissement du CBR ou quelquefois induit des diminutions du CBR. Ce type de données sont parfois erronément attribués à des erreurs expérimentales, tandis qu'ils sont tout cohérents avec le comportement des sols indiqué au-dessus in b). Plusieurs fois des résultats apparemment contradictoires des essais CBR à la teneur en eau optimum ont été expliqués d'une façon satisfaisante à travers des essais CBR à teneur en eau variable. Enfin les essais CBR à teneur en eau de compactage optimum fournissent des renseignements partiels, n'ont pas une répétabilité satisfaisante et peuvent conduire à des interprétations erronées.

FIG. 1a

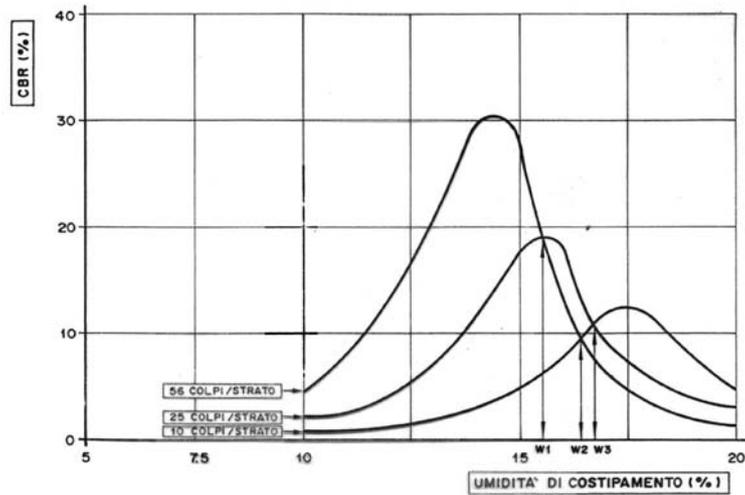


Figure 1a - Familles de courbes CBR

FIG. 1b

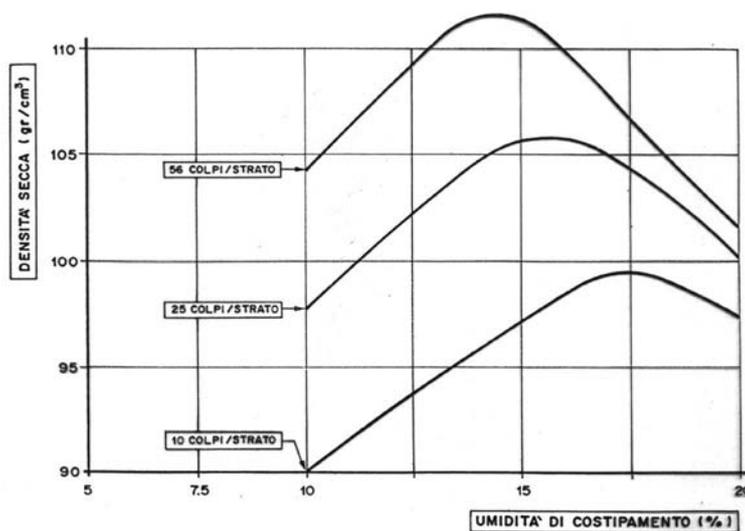


Figure 1 b – Familles de courbes de densité

En plus, seul apparemment les essais CBR à teneur en eau de compactage variable requièrent plus de temps que des essais CBR à teneur en eau de compactage optimum. En effet ces derniers requièrent la préventive détermination de la courbe de compactage, qui est une opération en plus et introduit d'autres possibilités d'erreur. Au contraire, la procédure de détermination du CBR à teneur en eau de compactage variable comprend la détermination de la courbe de compactage sur les mêmes échantillons préparés pour être pénétrés dans la presse CBR.

### 3.1 Les performances mécaniques d'un sol (le CBR) dans une construction routière dépendent de l'énergie et de la teneur en eau de compactage

L'essai CBR à teneur en eau de compactage variable permet de tracer une famille de courbes du type montré dans la figure 1.a. Chaque courbe correspond à un niveau d'énergie et fournit la valeur de l'indice CBR pour chaque teneur en eau au moment du compactage. Les courbes montrent comment les performances mécaniques d'un sol (son indice CBR) dépendent de l'énergie et de la teneur en eau de compactage. À la première vue, les courbes CBR (figure 1.a) sont semblables à celles des densités sèches (figure 1.b) qui ont été déterminées sur les mêmes échantillons CBR, immédiatement après le compactage.

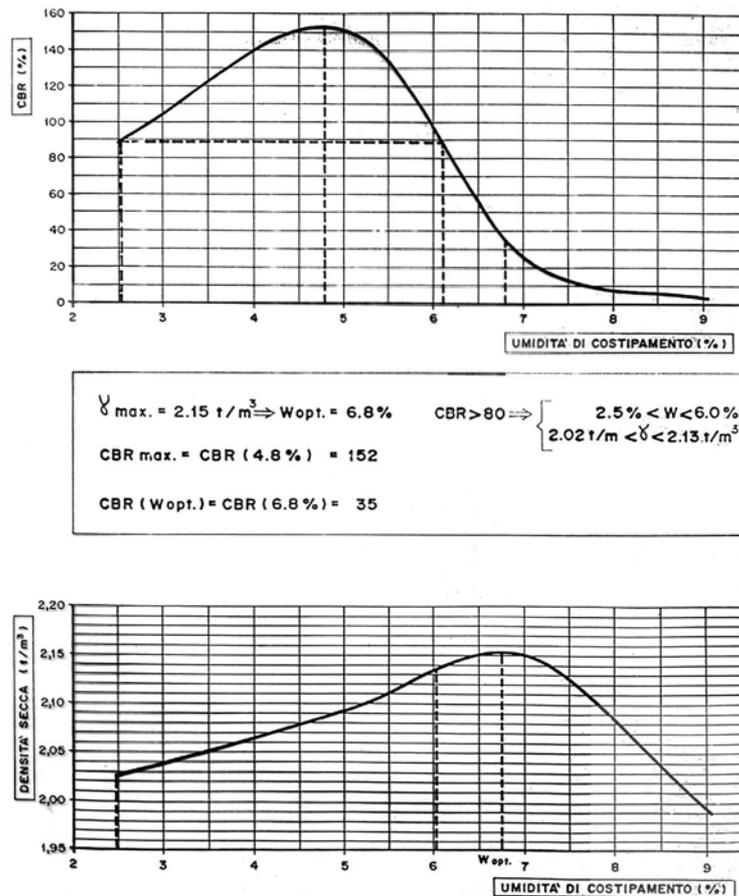


Figure 2 – Courbe CBR et courbe de densité sèches (mêmes échantillons)

La densité sèche d'un sol elle aussi dépend de l'énergie et de la teneur en eau de compactage. Soit les courbes CBR que les courbes de compactage présentent une valeur maximum qui est d'autant plus haute que l'énergie de compactage est plus haute. Le côté "humide" des courbes CBR est souvent plus raide et de petites variations de teneur en eau autour de la teneur en eau de compactage optimum peuvent comporter des variations fortes de l'indice CBR. Pour cette raison, l'essai CBR à teneur en eau variable peut être facilement répété, tandis que l'essai CBR à teneur en eau de compactage optimum peut avoir une répétabilité insatisfaisante.

### 3.2. Il n'est pas toujours vrai qu'un accroissement d'énergie de compactage améliore les performances mécaniques d'un sol.

La teneur en eau de compactage correspondante à la densité maximale est appelée teneur en eau de compactage "optimum". La teneur en eau correspondante au maximum de la courbe CBR et celle qui correspond à la densité sèche maximale (teneur en eau de

compactage optimum) pour la même énergie de compactage ont presque la même valeur, quelquefois la même valeur. Des fois, comme dans le cas illustré dans la figure 2, la teneur en eau de compactage optimum est plus haute que la teneur en eau de compactage correspondante au maximum de valeur CBR. Cette circonstance, pas rare, fut individuée (Demario Aeronautico, 1954) dans le Laboratoire Géotechnique de l'Aéronautique Militaire Italienne, où depuis alors, l'on retient utile exécuter l'essai CBR à teneur en eau de compactage variable.

Cette circonstance est importante pour les deux raisons suivantes.

a) Puisque le côté "humide" d'une courbe CBR est souvent très raide, il peut se passer que la valeur de CBR à la teneur en eau de compactage optimum, presque la seule utilisée jusqu'à maintenant, soit considérablement plus basse que la valeur maximum de CBR.

b) Les courbes CBR se croisent (figure 1.a), tandis que les courbes de densité ne se croisent pas (figure 1.b). Ce qui signifie qu'un sol avec une teneur en eau de compactage donnée, soumis à compactage progressif, augmente toujours sa densité, mais non toujours son CBR. En particulier (figure 1.a), on voit tracées les trois courbes CBR correspondantes aux énergies de 10, 25 et 56 coups de dame Proctor. Les deux courbes CBR correspondantes aux énergies de 56 et 25 coups se croisent en correspondance de la teneur en eau de compactage  $w_1$ , plus haute que la teneur en eau de compactage correspondante au CBR maximum. On voit que pour la teneur en eau de compactage inférieure à  $w_1$ , le  $CBR_{56}$  de l'échantillon compacté avec 56 coups par couche est plus grand que le  $CBR_{25}$  de l'échantillon compacté avec 25 coups par couche et que ce dernier est supérieur au  $CBR_{10}$  de l'échantillon compacté avec 10 coups par couche. Pour des teneurs en eau de compactage supérieures à  $w_1$ , le  $CBR_{56}$  de l'échantillon compacté avec 56 coups par couche est plus bas que le  $CBR_{25}$  de l'échantillon compacté avec 25 coups par couche. Cela veut dire que en compactant un sol avec une teneur en eau de compactage plus haute que  $w_1$  avec l'énergie correspondante à 56 coups de dame Proctor, l'on obtient une densité sèche plus haute que celle que l'on obtient en le compactant avec l'énergie correspondante à 25 coups par couche, mais l'on obtient un indice CBR plus bas. Puisque la teneur en eau de compactage optimum peut être plus haute que la teneur en eau de compactage correspondante au maximum CBR, il peut se passer que la teneur en eau de compactage optimum coïncide, ou soit plus haute, que la teneur en eau de compactage  $w_1$  correspondante au pont d'intersection entre les courbe CBR des 56 et des 25 coups. En tel cas, le  $CBR_{56}$  à la teneur en eau de compactage optimum a la même valeur que le  $CBR_{25}$ , ou plus basse et la majeure énergie de compactage produit le résultat non voulu de la même valeur CBR qui puisse être obtenue avec une énergie mineure, ou d'une valeur même inférieure.

En général, un sol avec une certaine teneur en eau de compactage, progressivement compacté, au-delà d'un certain niveau d'énergie, a des valeurs décroissantes de CBR, c'est-à-dire, performances mécaniques décroissantes, tandis que sa densité continue à croître.

3.3. Le regonflement aussi dépend de la procédure de compactage, c'est-à-dire de l'énergie et de la teneur en eau de compactage.

L'essai CBR saturé permet de tracer la courbe du regonflement après quatre jours de saturation. Tel regonflement est un indice de stabilité volumétrique au cours de la variation de la teneur en eau du sol qui à la mise en œuvre est la teneur en eau de compactage et varie ensuite avec les cycles successifs de séchage et d'imbibition. Les valeurs de regonflement mesurées dans un essai CBR à teneur en eau de compactage variable se disposent sur une courbe régulière, sont répétables, faciles à interpréter au but de prévoir

les regonflements pendant la vie de la route. Pour une énergie donnée de compactage, il est possible d'évaluer l'intervalle de regonflement correspondant à un intervalle de teneur en eau de compactage. Les trois regonflements qui se mesurent dans un essai CBR exécuté à la teneur en eau de compactage optimum conduisent à trois valeurs qui peuvent être très diverses entre elles, peu répétables et pas susceptibles de aucun emploi pratique.

Il a été déjà reporté (Comenale, 1998) que les critères usuels de classification ne sont pas valides pour les matériaux marginaux latéritiques, sols communs dans les climats chauds et utilisées avec de bons résultats dans les constructions routières malgré leur fraction fine et la plasticité de leur fraction fine. Il a été trouvé aussi qu'il est nécessaire de recourir aux essais CBR à teneur en eau de compactage variable pour obtenir un degré de connaissance satisfaisante des latérites, utilisable ensuite pour établir des spécifications de compactage cohérentes. On a mis au point que l'on doit poursuivre des valeurs satisfaisantes de CBR et non la teneur en eau de compactage optimum, ni hautes valeurs de densité. Tout cela a été illustré à travers une ample quantité de données relatifs à des essais CBR à teneur en eau de compactage variable.

En général, l'essai CBR à teneur en eau de compactage variable fournit une connaissance adéquate des performances mécaniques des sols, en tant qu'il permet l'étude simultanée des courbes de compactage et des courbes CBR pour déterminer l'intervalle de teneur en eau et l'intervalle des densités qui correspondent à des valeurs satisfaisantes de CBR et à des valeurs acceptables de regonflements. Ces intervalles de teneur en eau et de densité seront poursuivis sur chantier. De telle façon, il est possible de déterminer pour chaque sol les meilleures modalités de compactage (énergie de compactage et intervalle admissible de teneur en eau), d'accepter pour les constructions routières une majeure variété de sols, d'avoir des emprunts avec une distance de transport limitée. La procédure de compactage a comme objectif non seulement une densité in situ plus hautes qu'une certaine valeur, mais aussi d'éviter des excès de densité et de teneur en eau de compactage qui peuvent conduire à des valeurs extrêmement basses de performances mécaniques (CBR) par rapport à celles qui ont été prévues.

#### **4. CONCLUSIONS**

On propose d'abandonner la classification des sols (granulométrie et limites de plasticité) pour la sélection des sols à employer dans les constructions des remblais routiers et par contre d'adopter l'essai CBR à teneurs en eau de compactage variable qui permet de connaître et de prévoir les performances de stabilité volumétrique et mécanique des sols.

Sur la base de telle connaissance, il est possible de choisir les meilleures modalités de mise en œuvre (énergie et teneur en eau de compactage) au but d'obtenir les meilleures performances mécaniques des sols disponibles. On propose de considérer utilisable un sol s'il est possible de déterminer des niveaux de énergie et des intervalles de teneur en eau de compactage qui fournissent des valeurs voulues de CBR et des valeurs acceptables de regonflement. Tels critères permettront d'éviter:

-de considérer des sols erronément non utilisables à l'emploi dans la construction des remblais

-des procédures de compactage erronés avec gaspillage d'énergie et baisses performances mécaniques.

Adopter le test CBR à teneur en eau variable pour sélectionner les sols à employer dans les remblais apporte l'avantage économique et écologique de permettre des prélèvements de sol distribués le long du tracé routier au lieu de grands prélèvements concentrés et l'épargne d'eau dans des pays où l'eau est précieuse.

On propose aussi d'adopter des procédures pour déterminer le module E d'un sol qui permettent d'apprécier ses variations par effet de tous les deux principaux paramètres qui influent sur les effectives performances mécaniques d'un sol, c'est-à-dire l'énergie et teneur en eau de compactage.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- ASTM (1950) Symposium on the identification and classification of soils. Special Technical Publication N° 113
- ASTM (1950) Procedures for Testing Soils. Nomenclature and definitions Standard Methods Suggested Methods
- Barksdale (1971) Compressive Stress Pulse Time in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing. Highway Research Board, pages 32-44
- Bird L. (2001) Pavement Response to moving and stationary loads. 24<sup>th</sup> Annual Airport Conference
- Comenale Pinto S. (1998) Alcune considerazioni sull'impiego di materiali marginali lateritici negli strati della sovrastruttura di strade locali nei paesi in via di sviluppo. XXIII Convegno Nazionale Stradale, pages 103-108
- Comenale Pinto, S. (2000) Analogie e differenze tra il carico applicato ad una pavimentazione con il FWD e quello applicato da una ruota in moto. Convegno SITEB sugli Aeroporti, pages 271-278
- Comenale Pinto S. (2001) Analogies and differences between the load applied to a pavement by the FWD and the load applied to a pavement by a wheel moving on it at constant speed. 1<sup>st</sup> European FWD User's Group Meeting (EuroFWD)
- Demanio Aeronautico (1954) Relazione. X Convegno Nazionale Stradale
- LTPP (1996) Protocol P46. Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils