

SYNTHÈSE

Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux : revue bibliographique et mise au point technique

Jérôme GUÉRIF

avec la collaboration technique de Jean ROYÈRE et Denis GRISON (*)

I.N.R.A., Station de Science du Sol, Centre de Recherches d'Avignon, Domaine St-Paul, B.P. 91, F 84140 Montfavet

RÉSUMÉ

L'auteur se propose, pour étudier les comportements mécaniques de matériaux terreux hétérogènes, d'analyser leur résistance mécanique à différentes échelles d'organisation et plus particulièrement à l'échelle d'agrégats de 2 à 3 mm de diamètre. En adéquation avec les objectifs fixés et leurs impératifs techniques, un « test de résistance à l'écrasement » est choisi comme méthode de mesure, parmi les différentes techniques proposées dans la littérature. Les interprétations en termes de contraintes mécaniques, et plus particulièrement en termes de résistance en traction, sont présentées, en insistant sur les hypothèses qu'elles requièrent.

Des améliorations méthodologiques sont apportées :

- au niveau de l'échelle d'organisation à laquelle se situe la mesure, et de l'interprétation que l'on peut en donner ;
- au niveau de la maîtrise des conditions expérimentales, et notamment du contrôle de la géométrie des agrégats soumis au test : une méthode permettant d'arrondir des agrégats naturels est proposée ;
- au niveau de l'estimation du nombre de mesures à effectuer pour atteindre une précision donnée.

Mots clés additionnels : *Rupture, compression simple, sphère, organisation texturale.*

SUMMARY

Determination of the tensile strength of soil aggregates : review and proposal for an improved technique.

In order to study the mechanical behaviour of heterogeneous soils, the author proposes to determine the failure resistance at different scales of soil organization and especially to determine, as a reference for a given soil, the failure resistance of 2 to 3 mm aggregates. A crushing test was selected among the different techniques proposed in the literature. The relationships between crushing force and tensile strength are presented, as well as the required hypothesis (homogeneity, continuity, and elasticity). Improvements to the technique are proposed : 1) the importance of controlling the shape of aggregates is discussed and a method to obtain spherical aggregates out of natural ones is given ; 2) the number of measurements to be performed to obtain a given precision is discussed according to the mineral constitution of soils.

Additional key words : *Rupture, uniaxial compression, sphere, textural porosity.*

I. INTRODUCTION

La résistance mécanique des matériaux terreux est une propriété dont la connaissance est nécessaire à l'analyse, à la modélisation, et à la prévision de nombreux phénomènes intervenant dans les couches de sur-

face des sols agricoles. Il en est ainsi pour la fragmentation des éléments structuraux par les alternances d'humectations et dessiccations, le travail du sol, ou les actions de compactage par les engins, mais aussi pour la pénétration racinaire ou l'émergence des plantules.

Toutefois, cette grandeur physique ne sera utilisable pour la modélisation et la prévision de comportement que si l'on sait, d'une part la déterminer aisément et d'une façon fiable et, d'autre part la relier à des caractéristiques

(*) Etudiant à l'I.N.A. Paris-Grignon ; D.A.A. Sciences et Techniques des productions végétales (1985).

téristiques permanentes des matériaux terreux notamment à leurs constitutions minérales et organiques.

Dans cet article on se propose, après une revue bibliographique méthodologique, de définir la grandeur physique la plus impliquée dans les phénomènes précédemment cités, de choisir les moyens techniques de l'apprécier, et de définir l'échelle de mesure la plus appropriée à sa mise en relation avec les caractéristiques de constitution du matériau.

II. DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Parmi les caractéristiques mécaniques, la résistance en traction est considérée, généralement, comme la grandeur la mieux corrélée à des propriétés mécaniques des couches de surface des sols agricoles telles que la résistance des éléments structuraux à la désagrégation par l'eau, la résistance des croûtes de battance à l'émergence des plantules (QUIRK & PANABOKKE, 1962 ; ROGOWSKI *et al.*, 1968 ; ROGOWSKI & KIRKHAM, 1976), et la résistance de massifs d'agrégats au compactage (DEXTER, 1975 ; BRAUNACK *et al.*, 1979), la résistance des éléments structuraux à la rupture par les pièces travaillantes (FARREL *et al.*, 1967 ; VOMOCIL *et al.*, 1961 ; GODWIN & SPOOR, 1977).

La détermination de la résistance en traction se fait directement ou indirectement, en soumettant l'éprouvette de sol soit à des efforts en traction, soit à des efforts en compression ou flexion.

Les méthodes directes permettent d'évaluer simplement la résistance en traction en mesurant la force maximale de traction lors de la rupture, et l'aire du plan de rupture. Mais l'application de l'effort nécessite de saisir l'échantillon à deux de ses extrémités, par des mâchoires, qui génèrent éventuellement des contraintes parasites, ou à l'aide de résines, qui induisent éventuellement des discontinuités mécaniques. Ces difficultés sont d'autant plus marquées que l'éprouvette est humide.

Les méthodes indirectes se ramènent, pour la plupart, à des mesures de la résistance soit en compression, soit en flexion. Le calcul de la résistance en traction, composante du tenseur des contraintes à la rupture, dépend des hypothèses retenues et de la géométrie des éprouvettes (RICHARDS, 1953 ; KIRKHAM *et al.*, 1959 ; FRYDMAN, 1964 ; KRISHNAYYA & EISENSTEIN, 1974 ; ROGOWSKI & KIRKHAM, 1976 ; DEXTER & KROESBERGEN, 1985). Les hypothèses couramment admises, bien que rarement satisfaites en toute rigueur, concernent :

— l'élasticité du matériau : la linéarité de la relation contrainte déformation, et sa réversibilité,

— l'unicité du module d'élasticité en traction et en compression (HIRAMATSU & OKA, 1966 ; KRISHNAYYA & EISENSTEIN, 1974), ainsi que sa constance, quelle que soit l'humidité de l'éprouvette (DEXTER, 1975). Les géométries d'éprouvettes les plus couramment retenues sont :

— le parallélépipède rectangle, pour les mesures en traction directe ou en flexion (RICHARDS, 1953 ; FARREL *et al.*, 1967) ;

— le cylindre pour les mesures en traction directe ou en compression. Dans ce dernier cas, on parle alors de l'essai brésilien, et de ses dérivés (CARNEIRO & BAR-

CELLOS, 1953 ; FRYDMAN, 1964, KRISHNAYYA & EISENSTEIN, 1974) ;

— la sphère pour les mesures en compression. Il s'agit, le plus généralement, de petits éléments structuraux de quelques millimètres, voire de quelques centimètres de diamètre, dont on admet la sphéricité pour les calculs (ROGOWSKI *et al.*, 1968 ; DEXTER, 1975).

Dans tous les cas, on admet implicitement que la déformation de l'éprouvette, préalable à la rupture, est négligeable. Ceci est d'autant moins vérifié que l'échantillon est humide (FRYDMAN, 1964 ; KRISHNAYYA & EISENSTEIN, 1974).

Pour s'affranchir des inconvénients afférents aux techniques les plus classiques, certains auteurs ont développé des méthodes originales, comme la méthode par centrifugation de VOMOCIL *et al.* (1961), mais qui peut provoquer des redistributions de l'eau dans l'éprouvette, ou la méthode pneumatique de SNYDER & MILLER (1985a-b) qui est fondée sur la combinaison d'une théorie capillaire de la cohésion et d'une théorie de la rupture dans les milieux élastiques fissurés (théorie de GRIFFITH, 1921, 1924), mais très lourde, techniquement, à mettre en œuvre.

III. ANALYSE DU PROBLÈME. DÉFINITION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La définition du concept de résistance mécanique des matériaux terreux pose quelques problèmes liés à la nature des sols, mais aussi à la difficulté d'y définir la notion de rupture et de contrainte de rupture. Le caractère fragmentaire et agrégé de la structure des sols cultivés ne permet pas d'appliquer directement les concepts classiques de la résistance des matériaux continus. Leur structure hétérogène est telle que le niveau d'organisation auquel se situe la mesure, détermine sa signification.

Ainsi HARTGE (1974) met en évidence l'effet de la cohésion intra-agrégats dans la mesure de la cohésion de massifs de structure hétérogène. De même MCMURDIE & DAY (1958) ; DAVIS *et al.* (1973) ; DEXTER (1975) ; BRAUNACK *et al.* (1979) ; GUÉRIF (1982) montrent l'intérêt de prendre en compte la résistance à l'écrasement interne des éléments structuraux dans l'analyse et la modélisation de la compressibilité de milieux agrégés.

Il convient donc de distinguer :

— la résistance mécanique au niveau élémentaire : dans ce cas, on cherchera à prendre essentiellement en compte la cohésion de l'assemblage des particules élémentaires du matériau résultant, entre autre, de la cimentation par les argiles ;

— la résistance mécanique globale du matériau terreux qui intégrera le caractère hétérogène (fissures, coalescence des éléments structuraux...) de la structure du sol.

On peut rapprocher cette nécessaire partition en 2 niveaux, de l'analyse des systèmes de porosité proposée par FIES (1971), STENGEL (1979), FIES & STENGEL (1981). Ces auteurs ont en effet montré qu'une fraction de l'espace poral, dit « espace poral textural » résulte de l'assemblage des particules élémentaires constitutives du sol. Son complémentaire dans l'espace poral total, appelé espace poral structural, varie sous l'effet d'actions extérieures que subit le matériau.

On se propose de la même manière, de distinguer 2 niveaux d'organisation pour définir la résistance mécanique :

- un premier niveau se situant à l'échelle de l'assemblage des constituants granulométriques élémentaires, on définit ainsi une résistance mécanique principalement issue de l'organisation texturale, pouvant avoir, de ce fait, un caractère intrinsèque ;

- un deuxième niveau relatif à l'assemblage des éléments structuraux : on définit alors une résistance mécanique structurale qui intégrera l'effet du travail du sol, du climat, et des tassements. Cette grandeur sera donc plus conjoncturelle que la précédente.

Par ailleurs, la notion de rupture doit être convenablement définie. En effet, suivant la répartition des contraintes dans le volume de sol soumis à l'effort, suivant l'échelle à laquelle on considère la rupture, celle-ci peut avoir lieu en cisaillement, en traction ou, en combinant les deux, en compression ou en flexion, suivant un ou plusieurs plans de rupture. Or la connaissance de l'aire du ou des plans de rupture, et de leurs directions, est nécessaire au calcul de la contrainte à la rupture à partir de la force mesurée et la rendre ainsi indépendante de la taille et de la forme de l'éprouvette.

Techniquement, il convient donc de se placer dans des conditions telles que la « rupture » soit définie au mieux en termes :

- d'intensité de la force à la rupture. Il faudra se limiter aux gammes hydriques de comportements mécaniques où les hypothèses retenues sont vérifiées ;

- de direction de la force par rapport au plan de rupture, ce qui nécessite d'imposer *a priori* un type de rupture, et donc un protocole particulier ;

- d'unicité du plan de rupture de manière à pouvoir mesurer ou estimer son aire.

Dans ce travail, on se limitera à la mise au point de la méthode de détermination de la résistance en traction à l'échelle texturale.

IV. MATÉRIEL ET MÉTHODE

A. Choix d'une technique d'appréciation de la résistance mécanique

L'analyse des relations entre la masse volumique d'un échantillon et son volume a montré que l'espace poral d'un fragment de matériau terreux dont le volume est suffisamment petit (agrégats de 2 à 3 mm de diamètre) est essentiellement d'origine texturale (FIES & STENGEL, 1981). C'est donc à cette échelle que nous pratiquerons la mesure pour apprécier la résistance en traction résultant essentiellement de l'assemblage des constituants élémentaires du sol.

La mesure de la masse volumique texturale étant effectuée sur un échantillon d'une centaine d'agrégats environ, on accède à une estimation directe de la valeur moyenne. Par contre, pour la résistance en traction, la mesure s'effectue nécessairement agrégat par agrégat et, on doit avoir un nombre suffisant de répétitions pour accéder à la distribution des résistances en traction.

Par ailleurs, les mesures doivent être effectuées dans une gamme de teneurs aussi large que possible, car les propriétés mécaniques sont très sensibles à ce facteur.

La méthode doit donc permettre :

- des mesures sur des éprouvettes de faible taille, et dont la géométrie n'est pas subordonnée à un remaniement. En pratique, on doit pouvoir utiliser notamment, des agrégats naturels de quelques millimètres, obtenus par fragmentation et tamisage à sec ;

- l'obtention d'un grand nombre de répétitions : la manipulation doit donc être aisée ;

- un enregistrement de la relation contrainte – déformation, pour apprécier la « netteté de la rupture » : donc, la validité de la mesure de l'intensité de la force maximale à l'écrasement.

On a donc écarté les méthodes directes de mesure de la résistance en traction pour des problèmes techniques de fixation des éprouvettes, et les méthodes directes ou indirectes qui nécessitent, pour conférer une géométrie donnée à l'éprouvette (parallélépipèdes ou cylindres), un remaniement préalable de l'échantillon susceptible de modifier la résistance en traction texturale.

Dans notre cas, le meilleur compromis est offert par la mesure de la résistance à l'écrasement de sphère. Toutefois les agrégats, obtenus par fracture et tamisage, présentent des géométries variées, et des arêtes anguleuses. Pour s'approcher de la forme désirée (2 à 3 mm) les agrégats obtenus par fragmentation ménagée, tamisés entre 3 et 5 mm, séchés à l'air, sont arrondis mécaniquement, par usure et brassage, sur un disque rotatif abrasif. On verra par la suite quels biais une telle méthode est susceptible d'entraîner.

Pour la mesure proprement dite, on a construit une presse à compression simple (fig. 1), pour échantillons

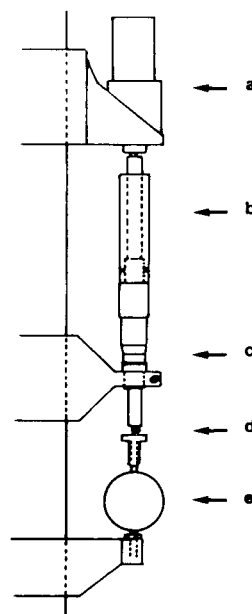


Figure 1

Presse à compression simple pour éprouvette millimétrique.

- a) moteur électrique,
- b) raccord coulissant,
- c) butée micrométrique,
- d) agrégat,
- e) capteur de force (jauge extensiométrique).

Unconfined compression apparatus for millimetre sample.

- a) electric motor,
- b) sliding junction,
- c) micrometre screw,
- d) aggregate,
- e) force transducer (extensometric gauge).

de taille millimétrique. Elle comprend :

- un moteur électrique ;
- une vis micrométrique permettant, d'une part de mesurer le diamètre des agrégats et, d'autre part, de transformer le mouvement de rotation du moteur en translation. La vitesse de déplacement du piston est de $4,33 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- un capteur de force, à jauge extensométrique, d'une étendue de mesure de 0 à 5 daN, permettant de mesurer la force maximale à la rupture.

On suit les variations de la force, exercée sur l'agrégat, en fonction du temps grâce à un enregistreur graphique.

B. Méthode de calcul de la résistance en traction

ROGOWSKI puis DEXTER ont proposé une méthode de calcul de la résistance en traction à partir des résultats d'écrasement d'agrégats terreux. Les fondements mécaniques de la relation proposée, ont été établis par STERNBERG & ROSENTHAL (1952) et par HIRAMATSU & OKA (1966) pour une sphère soumise à l'action de charges ponctuelles, diamétralement opposées. Lors de la mise en charge, la force appliquée f augmente progressivement jusqu'à ce que l'intensité de la contrainte en traction interne t qui se développe perpendiculairement à la direction de l'application de f atteigne celle de la résistance en traction T . La sphère se rompt alors selon un plan diamétral passant par les points d'application des charges. La résistance en traction (T en Pa) est donnée par l'équation suivante :

$$T = k (4 F / \pi d^2) \quad (1)$$

où F est la force maximum à la rupture (N) ; d est le diamètre de la sphère (m), et k est un coefficient d'ajustement.

Dans ces calculs il est admis que les agrégats sont continus, isotropes, et homogènes, et qu'ils ont un comportement élastique, jusqu'au moment de la rupture (ROGOWSKI *et al.*, 1968).

Les valeurs attribuées au coefficient k dépendent des auteurs et des matériaux étudiés (sols, roches, etc...), et sont généralement obtenues par comparaison avec d'autres méthodes. A partir des résultats de ROGOWSKI, DEXTER réduit l'équation (1) à :

$$T = 0,576 F/d^2 \quad (2)$$

Il considère que le coefficient k est indépendant du type de sol et de l'état d'hydratation des agrégats, tant qu'ils ont un comportement fragile (« brittle ») et présentent donc une « cassure franche ». La validité de ces hypothèses, donc l'unicité, et l'invariance de ce coefficient k est bien entendu contestable, quand varient la teneur en eau, la composition minérale... mais aucun élément d'ordre théorique ou expérimental ne permet d'aller plus loin dans l'analyse des phénomènes.

C. Méthodes annexes de caractérisation des agrégats

La dessiccation des agrégats à l'étuve à 105 °C étant susceptible d'entraîner une microfissuration, les agrégats « secs » sont préparés sous silicagel, en enceinte calorifugée, jusqu'à l'arrêt de la perte de poids.

Les teneurs en eau des agrégats sont déterminées par gravimétrie après passage à l'étuve à 105 °C.

Pour limiter et contrôler d'éventuelles reprises d'eau en cours de mesure, en fonction de l'hygroscopicité de l'air, les agrégats sont répartis par lots, dans des pèse-filtres conservés dans un dessiccateur. Seuls 10 agrégats sont utilisés par lots, la teneur en eau est mesurée avant et après la manipulation, sur 2 aliquotes prélevées dans chaque pèse-filtre.

Les paramètres morphologiques relatifs aux agrégats, arrondis ou non, sont obtenus par analyse d'image. On a estimé :

— Le « diamètre moyen » qui est défini comme le périmètre mesuré divisé par

— L'aire des plans de rupture des éprouvettes sphériques et ellipsoïdales de matériau remanié, définie comme la demi-somme des aires des facettes des zones de fracture, mesurées sur chacun des fragments issus de la rupture.

D. Matériaux choisis

Les sols choisis (tabl. 1) correspondent au souci d'avoir une gamme de teneurs en argile (5 à 52 p. 100),

TABLEAU 1

Teneurs en argile (< 2 µm) et en matières organiques des matériaux étudiés.

Clay (< 2 µm) and organic matter (MO) of the studied soils.

Echantillons	Argile en %	MO en ‰
1	5,7	24,40
2	11,5	16,00
3	12,9	10,60
4	13,8	37,80
5	15,2	9,40
6	15,5	23,00
7	16,1	22,30
8	16,6	2,04
9	19,6	2,22
* 10	24,7	26,60
11	24,8	7,00
* 12	25,6	16,60
* 13	26,7	38,50
14	30,1	24,00
* 15	30,3	16,00
16	51,5	56,50
* 17	51,9	16,80

et en matières organiques (2 à 57 p. 1 000), dosées par la méthode d'ANNE (1945), suffisamment différenciées (le rapport MO/A varie de 0,02 à 0,40). Les échantillons signalés par une astérisque dans le tableau 1 ont été utilisés pour mettre au point la méthode en étudiant plus particulièrement certains éléments du protocole (technique de préparation des agrégats par exemple).

V. RÉSULTATS

A. Détermination du nombre de mesures à effectuer

En admettant que la résistance en traction d'agrégats T est une variable aléatoire pratiquement normale il

faut, pour déterminer le nombre de mesures N à effectuer, connaître au préalable sa variance σ^2 . En effet pour déterminer la moyenne de T avec une marge d'erreur δ pour un degré de confiance $1-\alpha$, il faut que :

$$N = (U_{1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2) / \delta^2 \quad (3)$$

où : $U_{1-\alpha/2}$ est l'abscisse de la variable normale réduite telle que sa fonction de répartition soit :

$$\Phi(U_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha/2. \quad (4)$$

Dans une première étape on a mesuré la résistance en traction d'un lot de 546 agrégats. Ceux-ci ont été tirés au hasard dans une population d'agrégats, secs sous silicagel, obtenus par tamisage entre 3 et 5 mm et arrondis mécaniquement jusqu'à obtention d'un diamètre de 2 à 3 mm (échantillon-13, fig. 2). Les caractéristiques de la distribution de T ont été estimées.

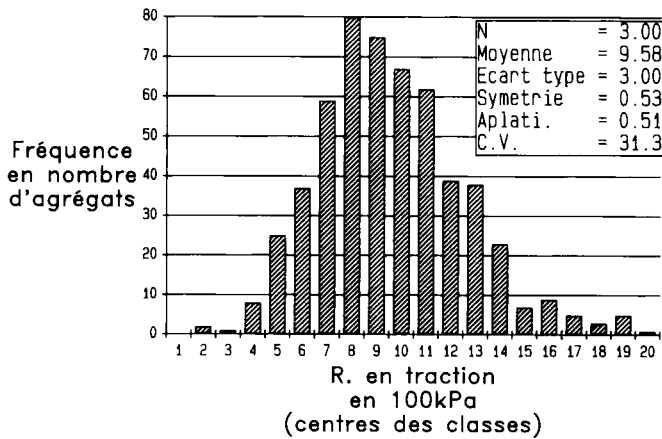


Figure 2
 Histogramme des résistances en traction d'une population de 546 agrégats naturels arrondis mécaniquement.
 Histogram of the tensile strengths of a population of 546 natural aggregates mechanically rounded.

En admettant une marge d'erreur de 10 p. 100 sur l'estimation de la résistance en traction moyenne, le nombre minimum de mesures à effectuer est de 45 et de 74 pour des degrés de confiance de 95 et 99 p. 100 (tabl. 2).

Pour généraliser ce résultat, on a mesuré la résistance en traction de 100 agrégats préalablement arron-

TABLEAU 2

Nombre de mesures à effectuer pour estimer la résistance en traction moyenne d'un échantillon, avec une marge d'erreur de 10 %.
 Number of measurements to be done to estimate the mean tensile strength of a sample, with an error of 10 %.

Numéro ech.	Argile en %	Traction en 10 ² kPa	Ec-type en 10 ² kPa	C.V. en %	N $\alpha = 5\%$	N $\alpha = 1\%$
1	5,70	0,95	0,36	38	58	97
3	12,9	3,34	1,22	36	13	22
4	13,8	3,43	1,54	45	21	35
10	24,70	8,89	2,29	26	28	47
12	25,60	10,79	3,23	30	30	50
13	26,70	8,95	2,57	29	33	55
14	30,10	10,67	2,80	26	44	74
15	30,30	12,63	3,01	24	34	57
16	51,50	20,58	6,49	31	40	67
17	51,90	22,92	7,22	31	40	67

dis, issus de 10 matériaux différents (tabl. 3), et estimé le nombre de mesures nécessaires. Pour une gamme de résistance en traction comprise entre 10² kPa et 23.10² kPa et pour des teneurs en argile variant de 5 à 50 p. 100, le nombre de mesures nécessaires pour les degrés de confiance choisis varie peu. Dans les domaines de variations ainsi définies, on peut obtenir une estimation de la résistance en traction à 10 p. 100 près, avec un degré de confiance de 99 p. 100, en effectuant une centaine de mesures.

TABLEAU 3

Comparaison des caractéristiques des distributions des résistances en traction, de 2 populations d'agrégats naturels, d'un même échantillon de sol, arrondis ou non.

Comparison of the parameters of the distributions of the tensile strength of 2 populations of natural aggregates, rounded or not.

	Echantillon (12)	
	Non arrondis	Arrondis
Nombre	100	100
Mini	2,01	4,79
Maxi	25,03	20,97
Gamme	23,01	16,10
Moyenne	8,91	10,79
Ecart-type	4,12	3,39
Variance	17,01	11,50
C.V.	46,26	31,43
Aplatissement	2,48	- 0,27
Symétrie	1,17	0,39
W (Shapiro & Wilk)	0,93	0,97
N pour $\alpha = 5\%$	84	41
N pour $\alpha = 1\%$	140	67

B. Importance de la géométrie des agrégats

L'aspect souvent anguleux, et la géométrie variable des agrégats obtenus par fragmentation sont à l'origine d'erreurs dans la localisation du plan de rupture par rapport aux points d'application des efforts. On n'est plus alors dans les conditions d'application de l'expression choisie pour traduire la force mesurée en contrainte de résistance en traction. De plus l'estimation de l'aire du plan de rupture à partir d'une hypothèse géométrique simple et d'une mesure d'un diamètre moyen n'est pas suffisante. Des erreurs sont donc commises dans l'estimation de l'intensité de la contrainte.

A cet égard DEXTER & KROESBERGEN (1985) soulignent que la source majeure de variation de la résistance en traction vient de la multiplicité de forme des agrégats. En particulier, leur position lors de la mesure influence fortement les résultats.

On a été ainsi amenés à arrondir les agrégats par abrasion mécanique préalablement à la mesure. Pour estimer les conséquences d'une telle technique sur le résultat on a comparé les distributions des résistances en traction de 2 lots d'agrégats d'un même matériau, arrondis ou non (fig. 3).

La préparation des agrégats arrondis a pour conséquence :

— une diminution de la gamme de variation, due essentiellement à une disparition des agrégats de moindre résistance. Ainsi 10 p. 100 des agrégats non arron-

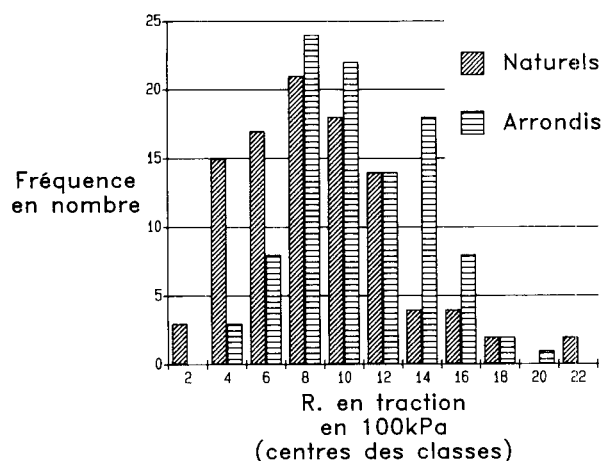


Figure 3

Distributions comparées des résistances en traction de 2 populations d'agrégats naturels, arrondis ou non, et issues d'un même échantillon.

Compared distributions of the tensile strengths of 2 populations of natural aggregates, rounded or not, from the same soil sample.

dis présentent une résistance en traction T inférieure à $4,35 \cdot 10^2$ kPa, alors que la limite inférieure de la distribution de T pour les agrégats arrondis est de $4,79 \cdot 10^2$ kPa ;

— une augmentation de la moyenne des résistances en traction ;

— une diminution des paramètres de dispersion (variance et coefficient de variation). Il s'en suit que le nombre de mesures à effectuer pour obtenir une estimation de T à 10 p. 100 près pour le degré de confiance choisi diminue considérablement ;

— une diminution des coefficients d'aplatissement et de symétrie.

La valeur du coefficient de SHAPIRO & WILK permet de considérer que les distributions observées sont normales, avec un degré de confiance de 95 p. 100.

Dans une autre expérience, on a estimé T sur 2 populations de 40 agrégats, arrondis ou non, en estimant le diamètre à partir :

- de la distance entre les 2 points d'appui des forces (« diamètre mesuré »),
- du périmètre mesuré par analyse d'image divisé par π (« diamètre moyen »).

On constate (fig. 4) que le fait d'arrondir les agrégats permet réellement une meilleure appréciation du diamètre moyen, et donc de la résistance en traction T , à partir de la seule mesure de la distance entre points d'appui.

Par ailleurs, l'importance de la qualité de l'arrondi a été vérifiée expérimentalement en fabriquant des agrégats continus artificiels de formes définies. Des cubes et des parallélépipèdes rectangles ont été découpés dans des massifs continus de matériau remanié (échantillon n° 15). Après séchage sous gel de silice, jusqu'à stabilisation de la perte de poids, ils ont été arrondis mécaniquement jusqu'à obtention, de sphéroïdes et d'ellipsoïdes de révolution. La mesure de la force maximale à la rupture a été effectuée comme décrite précédemment, en appliquant l'effort selon le plus petit diamètre. L'aire du ou des plans de rupture a été mesurée par analyse d'image. Dans certains cas la rupture ne s'effectue pas en effet dans un plan unique, ce phénomène étant accentué par l'augmentation de la taille des sphères et par l'écart à la sphéricité. On constate (tabl. 4) qu'une prise en compte précise de l'aire du/des plans de rupture diminue la variabilité de la résistance en traction. L'existence de plans de rupture multiples entraîne, de surcroît, une surestimation de la résistance en traction.

D'un point de vue pratique, on ne doit donc, tenir compte que des agrégats ayant généré 2 fragments (plan de rupture unique) et choisir les agrégats les plus sphériques, pour avoir la meilleure estimation possible de l'aire du plan de rupture.

Néanmoins, la diminution de la variabilité des esti-

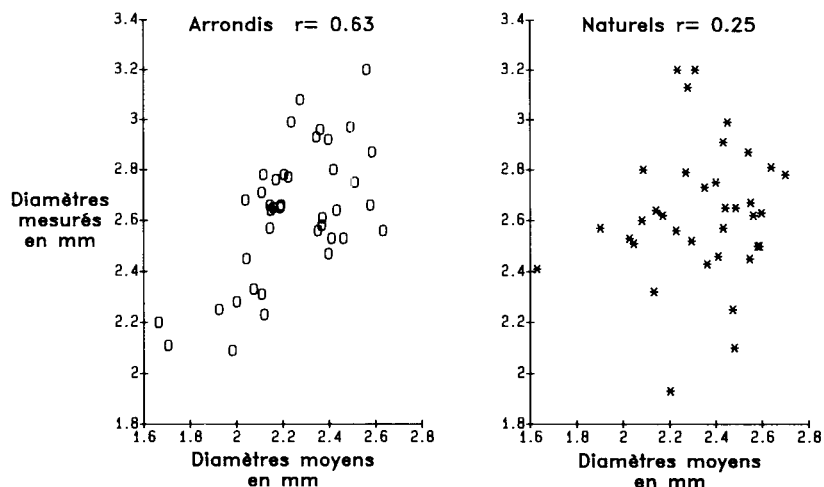


Figure 4

Amélioration de l'estimation du diamètre des agrégats par le contrôle de l'arrondi.

Improvement of the estimate of aggregate diameter by controlling sphericity.

TABLEAU 4

Importance d'une bonne estimation de l'aire du/des plans de rupture, dans la détermination de la résistance en traction.
Importance of a good estimate of the area of the rupture plane or planes, for the determination of tensile strength.

	Diamètres (en cm)		Force (F) (en daN)	Section mesurée (S) (en cm ²)	Contrainte	
	petit (d)	grand (D)			$k \frac{4 F}{\pi d^2}$ (en 10 ² kPa)	kF/S
Sphéroïdes	1,44	1,55	25,9	2,52	7,19	4,65
	1,10	1,10	13,6	1,54	6,47	3,99
	1,10	1,10	13,9	1,39	6,61	4,52
Ellipsoïdes	1,24	2,10	26,8	2,88	10,04	4,21
	1,24	2,10	25,4	2,50	9,51	4,60
	1,08	1,60	15,0	1,58	7,41	4,29
	1,50	1,52	15,8	1,73	7,52	4,13

mations de T à partir d'agrégats arrondis, ne peut être imputée à la seule amélioration de l'appréciation du diamètre moyen des agrégats. En effet la modification de la distribution de T est également due à l'élimination d'agrégats de moindre résistance en traction. La distribution de T des agrégats arrondis est donc en partie tronquée pour les faibles valeurs.

Ces agrégats éliminés du fait de leur moindre résistance sont, soit des agrégats microfissurés ou résultant d'une micro-agrégation — leur suppression est alors justifiée — soit des agrégats ayant une constitution (notamment organique) et/ou une organisation particulières. Dans ce cas, l'estimation de la résistance en traction moyenne de l'échantillon est biaisée.

La stabilité de l'estimation de T a été vérifiée, pour des petites variations de la calibration d'agrégats arrondis. Les résistances en traction de 139 agrégats ayant des diamètres compris entre 1 mm et 4,5 mm, ont été mesurées. Les paramètres des distributions, de la population totale et des sous-populations définies par classes de diamètres sont reportés tableau 5. On constate une légère tendance à l'accroissement de la

résistance en traction avec le diamètre des agrégats, néanmoins les différences entre classes de diamètre ne sont pas significatives.

VI. DISCUSSION ET CONCLUSION

Deux éléments nouveaux interviennent dans ce travail par rapport aux méthodes utilisées auparavant :

— D'une part une amélioration de l'évaluation de la résistance en traction en apportant une meilleure maîtrise des conditions expérimentales (contrôle de la sphéricité des agrégats, estimation du nombre de mesures à effectuer).

— D'autre part et surtout, dans la définition d'un volume de référence, sur lequel pratiquer la mesure. Une suite de ce travail consistant à étudier les facteurs de variations de la résistance en traction à l'échelle texturale, tels que la constitution minérale et organique et l'état d'hydratation, devrait permettre de donner à la notion de résistance en traction des agrégats terreux un caractère intrinsèque.

Le protocole retenu dans ce travail permet d'estimer la résistance en traction d'une population d'agrégats (T) en abaissant significativement le coefficient de variation (C.V.). Ainsi les valeurs des coefficients de variation de la résistance en traction de populations d'agrégats *naturels arrondis* sont de l'ordre de 0,30, alors que les valeurs des coefficients de variation de la résistance en traction d'agrégats *naturels non arrondis* sont de l'ordre de 0,40. Ces dernières valeurs sont semblables à celles obtenues par DEXTER & KROESBERGEN (1985).

La grande sensibilité de la mesure en fait un outil d'investigation appréciable en sachant que la diversité des causes de la variabilité inter-agrégats de T, peut rendre son interprétation difficile, sur des échantillons de sol.

Reçu le 30 septembre 1987.

Accepté le 14 février 1988.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été en grande partie effectué dans le cadre de l'A.T.P. tripartite C.N.R.S.-I.N.R.A.-M.E.R./M.E.C.V. : MATIÈRES ORGANIQUES DANS LES SOLS, dont la coordination était assurée par le PIREN/C.N.R.S. (1984-1986).

TABLEAU 5

Influence de petites variations du diamètre des agrégats sur l'estimation de la résistance en traction d'un échantillon.

Influence of slight variations of the diameter of aggregates on the estimate of the tensile strength of a soil sample.

Echantillon n° 14				
Variable		N	Moyenne	Ecart-type
1-4 mm	Diamètre (mm)	139	2,66	0,76
	Force (daN)	139	1,58	0,99
	Traction (10 ² kPa)	139	11,67	3,57
1-2 mm	Diamètre (mm)	38	1,69	0,29
	Force (daN)	38	0,54	0,18
	Traction (10 ² kPa)	38	10,81	3,11
2-3 mm	Diamètre (mm)	46	2,53	0,26
	Force (daN)	46	1,28	0,44
	Traction (10 ² kPa)	46	11,38	3,55
3-4 mm	Diamètre (mm)	55	3,45	0,27
	Force (daN)	55	2,56	0,73
	Traction (10 ² kPa)	55	12,51	3,77

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anne P.**, 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron. Sér. A*, p. 165.
- Braunack M. V., Hewitt J. S., Dexter A. R.**, 1979. Brittle failure of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.*, **30**, 653-668.
- Carneiro F., Barcellos A.**, 1953. Concrete tensile strength. *Bull. R.I.E.M.*, Paris, **13**.
- Davis P. F., Dexter A. R., Tanner D. W.**, 1973. Isotropic compression of hypothetical and synthetical tilth. *J. Terramechanics*, **10** (4), 21-34.
- Dexter A. R.**, 1975. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. *J. Terramechanics*, **12** (1), 3-14.
- Dexter A. R., Kroesbergen B.**, 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. agric. Eng. Res.*, **31**, 139-147.
- Farrel D. A., Greacen E. L., Larson W. E.**, 1967. The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **31**, 445-450.
- Fies J. C.**, 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22** (6), 655-685.
- Fies J. C., Stengel P.**, 1981. Densité texturale des sols naturels. 1. — Méthode de mesure. *Agronomie*, **1** (8), 651-658.
- Frydman S.**, 1964. The applicability of the Brazilian (indirect tension) test to soils. *Aust. J. applied Sci.*, **15**, 335-343.
- Godwin R. J., Spoor G.**, 1977. Soil failure with narrow tines. *J. agric. Eng. Res.*, **22**, 213-228.
- Griffith A. A.**, 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc., London*, A. **221**, 163-198.
- Griffith A. A.**, 1924. The theory of rupture, p. 55-63. In : *First Int. Congr. appl. Mech.*, Delft, Netherlands.
- Guérif J.**, 1982. Comportement au compactage d'un massif d'agrégats : effets de la pression et de la teneur en eau. *Agronomie*, **2** (3), 287-294.
- Hartge K. H.**, 1974. Résistance au cisaillement de massifs d'agrégats. *Trans 10th intern. Congr. Soil Sci.*, **1**, 194-201.
- Hiramatsu Y., Oka Y.**, 1966. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **3**, 89-99.
- Kirkham D., De Boedt M. F., De Leenheer L.**, 1959. Modulus of rupture determination on cylindrical core samples. *Meded. Landbouwhogesh. Gent.*, **24**, 369-376.
- Krishnayya A. V. G., Eisenstein Z.**, 1974. Brazilian tensile test for soils. *Can. geotech. J.*, **11**, 632-641.
- McMurdie J. L., Day P. R.**, 1958. Compression of soil by isotropic stress. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **22** (1), 18-21.
- Quirk J. P., Panabokke R.**, 1962. Incipient failure of soil aggregates. *J. Soil Sci.*, **13** (1), 60-70.
- Richards L. A.**, 1953. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 161-167.
- Rogowski A. S., Don Kirkham**, 1976. Strength of soil aggregates. Influence of size, density and clay and organic matter content. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*, **41** (1), 85-100.
- Rogowski A. S., Moldenhauer W. C., Don Kirkham**, 1968. Rupture parameters of soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 720-724.
- Snyder V. A., Miller R. D.**, 1985a. Tensile strength of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **49**, 58-65.
- Snyder V. A., Miller R. D.**, 1985b. A pneumatic method for measuring the tensile strength of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **49**, 1369-1374.
- Stengel P.**, 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Ann. agron.*, **30** (1), 27-51.
- Sternberg E., Rosenthal F.**, 1952. The elastic sphere under concentrated loads. *J. appl. Mech.*, **19**, 413-421.
- Vomocil J. A., Waldron L. J., Chancellor W. J.**, 1961. Soil tensile strength by centrifugation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **25**, 176-180.