

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DU CONFINEMENT D'UN SOL SUR SON EVOLUTION STRUCTURALE

LEFEBVRE Jean-Pierre, ZANTE Patrick

*Laboratoire d'hydrophysique
Centre Orstom d'Ile de France, 93143 Bondy cedex*

RESUME

Le protocole expérimental développé autour d'un banc d'essais rhéologiques permet d'intégrer, au cours d'études au laboratoire, l'influence des conditions de confinement sur le comportement global d'un sol argileux lors d'humectations *per ascensum*. On peut de cette façon estimer l'action d'une contrainte intrinsèque générée par le gonflement des argiles sur l'échantillon maintenu dans des conditions de confinement données, en terme de fonctionnement mécanique (transmission de contrainte, résistance mécanique du squelette...) et hydrique du sol (variation de porosité, taux de saturation...). Les résultats obtenus permettent d'appréhender les liens entre ces deux fonctionnements en fonction de paramètres de confinement et d'envisager des corrections lors d'essais au laboratoire, visant à se rapprocher du fonctionnement *in situ* des échantillons prélevés.

Mots-clefs : rhéologie, structure, porosité, vertisol

INTRODUCTION

L'état structural d'un sol résulte de la nature et de l'arrangement des particules qui le composent, ainsi que de la qualité des liaisons mécaniques les unissant. Tous ces facteurs sont à l'origine de la résistance mécanique du matériau et de la transmission des contraintes. La combinaison de la force de pesanteur avec l'action d'agents externes concourt à l'évolution de la structure des sols (DEXTER, 1988). Dans le cas particulier des sols gonflants, des forces intrinsèques dues au comportement mécanique de la phase argileuse se surajoutent aux actions externes précédemment mentionnées et contribuent également à une modification des caractéristiques globales de la structure du sol (TESSIER et PEDRO, 1980; GRIMALDI, 1986; BRAUDEAU, 1988a et b; SALA et TESSIER, 1993).

On impute généralement à la géométrie de l'espace poral, les propriétés de transfert hydrique, et à l'arrangement de la phase solide, les propriétés mécaniques, sans que les interactions de ces deux phases ne soient clairement déterminées. Ainsi, un certain nombre d'études ont été menées en considérant l'un ou l'autre de ces aspects:

- d'une part, les modifications de structure du sol sous l'action d'agents externes ont fait l'objet de nombreuses études, visant en particulier à mieux comprendre les effets des pneumatiques et des opérations culturales (MANICHON, 1982; PAPY, 1987; HADAS *et al.*, 1988). Certains de ces travaux ont plus particulièrement porté sur la caractérisation des changements de propriétés mécaniques sous l'effet de contraintes externes (compression, cisaillement...), sans insister sur les implications fonctionnelles qu'entraînaient ces modifications. Les résultats des tests de résistance mécanique (GUERIF 1982, 1988a, 1988b, 1990) montrent qu'il est cependant nécessaire de connaître l'histoire rhéologique complète de l'échantillon (humidité au compactage, pression appliquée) pour pouvoir caractériser son comportement mécanique à une contrainte donnée.

- d'autre part, d'autres recherches ont porté sur des modifications fonctionnelles (succion, teneur en eau...), sans définir précisément les conditions mécaniques en jeu. L'analyse de la porosité (STENGEL, 1979; FIES et STENGEL, 1981a et b; MONNIER et STENGEL, 1982) fournit une quantification des espaces poreux mais oblige à des mesures complémentaires de la taille des pores ou de la morphologie structurale pour établir les relations avec les propriétés mécaniques et physiques.

Bien que rarement menées conjointement, ces deux approches semblent complémentaires, notamment dans le cas de matériaux gonflants. Le comportement mécanique du squelette ainsi que les propriétés dynamiques des argiles, dépendent fortement de la teneur en eau et des forces de rétention. A l'inverse, des contraintes mécaniques peuvent modifier la distribution de porosité, l'orientation des particules argileuses (HICHER *et al.*, 1994; GRUNBERGER *et al.*, 1994), et avoir des répercussions sur le fonctionnement hydrique du sol. Cependant, du fait de la difficulté d'obtenir conjointement des informations sur l'assemblage des particules (structure) et sur son complémentaire, l'espace poral, on ne peut pas toujours préciser les interactions entre ces deux ensembles (STENGEL, 1990).

Dans la présente approche, on étudiera les forces développées par les sols eux-mêmes ainsi que les modifications de structure du matériau sous l'effet des contraintes générées par le gonflement des particules argileuses dans des conditions proches de celles du sol en place. Pratiquement, on considérera que l'énergie développée par gonflement des argiles s'applique sur un squelette présentant une certaine plasticité, elle-même liée à la teneur en eau, altérant la transmission de cette contrainte. Cette énergie s'exprimera à la fois sous forme de modifications de structure (gonflement, modification de la porosité...) et de transmission d'une contrainte suivant les conditions de l'expérimentation.

PRESENTATION DE L'ETUDE

Lors de l'humectation de l'échantillon de sol, la phase argileuse de celui-ci produira une énergie se traduisant par une contrainte intrinsèque totale, à laquelle on pourra opposer une résistance constante recréant des conditions comparables à celles du confinement de l'échantillon *in situ*. La fraction de l'énergie absorbée par la résistance de confinement induit des modifications de structure sans augmentation de volume du milieu alors que la fraction non-absorbée de cette énergie pourra s'exprimer par une modification du volume de l'échantillon.

Le but de ce travail consiste à étudier les modifications obtenues sur la structure du sol suivant différentes conditions de confinement (embedding). On pourra ainsi, en fonction de la valeur de résistance de confinement,

prélever une fraction de l'énergie totale produite, et observer l'action de la partie résiduelle en terme de déformation du milieu.

On a choisi dans un premier temps, de travailler sur des échantillons reconstitués dont on mesure, dans un plan donné, une expression de la transmission de l'énergie développée lors de l'humectation, dans un environnement mécanique contrôlé (composante verticale de la résistance mécanique variable). Ceci nous permet de mesurer, en fonction des propriétés mécaniques de l'environnement, la modification dynamique de structure du sol (contrainte développée en fonction de la teneur en eau...) ainsi que la modification de ses états d'équilibre pour des conditions données (porosité, taux de saturation...).

On suppose qu'en considérant un faible volume de sol parmi un milieu homogène, il n'existe un gradient de pression que suivant l'axe vertical, celui-ci traduisant la résultante de la contrainte produite par le volume de sol étudié et de la résistance générée par le sol environnant. Cette configuration ne prétend pas constituer une simulation adéquate du problème, mais seulement une première étude compatible avec les moyens technologiques dont nous disposons.

Dans cette approche, nous avons considéré :

- comme moteur, l'énergie délivrée par les particules argileuses en cours d'humectation. Cette force mécanique dépendant d'une part de la quantité et du type d'argile en présence, et d'autre part, de la teneur en eau de cette phase
- comme support, le squelette du sol, dépendant du matériau, de l'arrangement des particules, et de la teneur en eau
- comme résultante, une modification de la porosité de l'échantillon.

Pour se rapprocher du comportement du sol en place, on quantifiera en fonction de la valeur de résistance, les modifications de structure du matériau sous l'effet de ses propres contraintes, en terme de modifications de porosité. Il ne s'agit donc pas d'exercer une contrainte sur l'échantillon, ce qui est réalisé lorsqu'on étudie l'action de forces externes (effet du machinisme agricole...), mais d'opposer à la contrainte développée par l'échantillon une résistance constante.

MATERIEL ET METHODES

Préparation des échantillons

Les échantillons ont été confectionnés à partir de vertisol provenant de la moyenne vallée du fleuve Sénégal (Donaye). La composition granulométrique (%) est la suivante :

sables grossiers : 0.53
sables fins : 13.33
limons grossiers : 5.18
limon fin : 33.33
argiles : 47.62

La fraction argileuse est composée de 60% de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés), 30% de kaolinite, 5% de chlorite et 5% d'illite. Le sol broyé et tamisé à 2 mm est réparti en trois fractions représentatives de celles du sol original :

25% inférieur à 500 μm
40% de 500 μm à 1000 μm
35% de 1001 μm à 2000 μm

Le mélange de ces trois fractions (masse du sol sec à 105° C : 67.7 g) est versé dans des anneaux métalliques, amené à saturation sur plaque poreuse, puis à pF 3.0 dans une presse à membrane (RICHARDS, 1941). Deux séries ont été établies suivant deux valeurs de compression mécanique initiale pratiquée à pF 3.0 :

- série 1 (V1 à V6) : compression de $10.68 \cdot 10^4 \text{ N} / \text{m}^2$ (densité apparente à pF 3.0 : 1.64)

- série 2 (V7 à V12) : compression de $32.05 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ (densité apparente à pF 3.0 : 1.92)

Les échantillons sont ensuite amenés à pF 4.2 (teneur massique en eau moyenne : 18.4 %) puis conditionnés dans des cylindres de 49.6 mm de diamètre moyen. Le rapport moyen hauteur / diamètre est de l'ordre de 0.5.

Matériel

Le banc rhéologique (fig. 1) permet de mesurer des grandeurs mécaniques telles que des pressions exercées et des déplacements. Il permet en outre d'asservir, dans une certaine mesure, ces deux grandeurs l'une par rapport à l'autre.

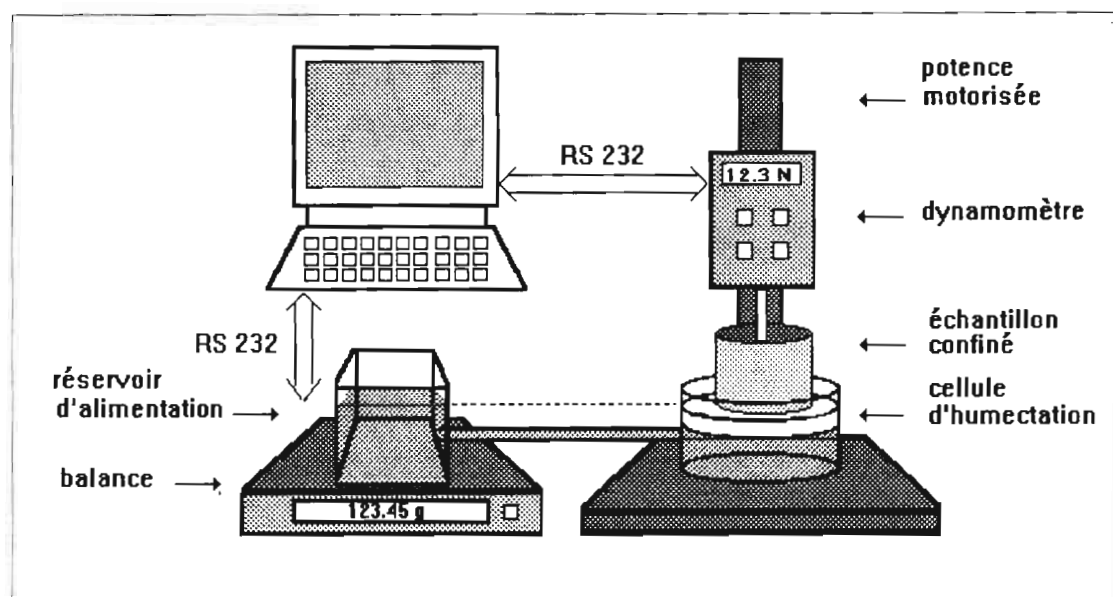


Figure 1 : schéma général du montage

Le banc est constitué d'une part, d'un dynamomètre (DFIS 50, INDELCO) monté sur une potence motorisée (TCD 200, INDELCO) et d'autre part d'une cellule d'humectation (fig. 2) comprenant un réservoir d'alimentation, maintenant saturé un fritté via une chambre. L'absorption d'eau *per ascensum* par l'échantillon est suivie dynamiquement grâce à une balance de précision (PM 2000, METTLER). L'ensemble du système est piloté par un micro-ordinateur via des liaisons RS 232. Dans le cas de mesure sans contrainte, on a préféré au système dynamomètre/potence motorisée, une mesure plus classique par capteur de déplacement (D2/200, RDP ELECTRONICS LTD) pratiquée dans les mêmes conditions.

Les échantillons de sol sont confinés dans des anneaux métalliques, le couplage des forces exercées par le sol avec le dynamomètre est assuré par un disque perforé, rigide et léger, de diamètre connu.

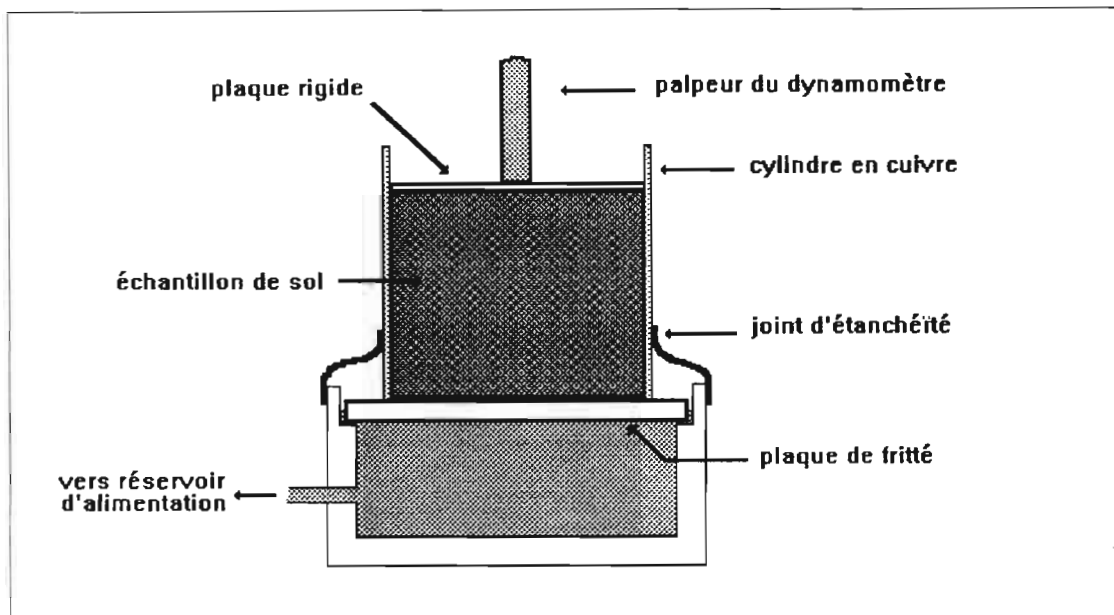


Figure 2 : détail de la cellule d'humectation

Méthode

L'échantillon conditionné dans un anneau métallique, est placé dans la cellule d'humectation préalablement amenée à l'équilibre. La plaque rigide perforée, posée au sommet de celui-ci, permet au palpeur du dynamomètre de se positionner au contact. On fixe au préalable la valeur de résistance de confinement.

Lors de l'humectation de l'échantillon, le dispositif permet simultanément d'enregistrer la masse d'eau absorbée, et de maintenir la résistance de confinement effective à une valeur inférieure ou égale à celle fixée.

Trois points sont distingués sur les courbes obtenues (fig. 3 et 4). Ils correspondent respectivement :

- au début de l'humectation (**point A**)
- au point où la contrainte intrinsèque est égale à la résistance de confinement fixée (**point B**)
- à l'atteinte d'un état d'équilibre (**point C**).

Ces trois points délimitent deux parties :

- **partie AB** : la contrainte intrinsèque, développée par les argiles en cours d'humectation, et transmise par le milieu à la surface considérée (matérialisée par la plaque supérieure), est inférieure à la valeur de résistance de confinement fixée préalablement. On mesure, en fonction du temps, la teneur en eau et cette contrainte, sans autoriser de gonflement du matériau.

- **partie BC** : la contrainte intrinsèque est supérieure à la valeur de résistance de confinement. On autorise le gonflement jusqu'à obtenir une contrainte résiduelle égale à la valeur préfixée. On mesure alors, en fonction du temps, la déformation du matériau et sa teneur en eau.

Ces différentes courbes tiennent compte d'ajustements divers (caractéristiques initiales de l'échantillon, perte d'eau par évaporation...).

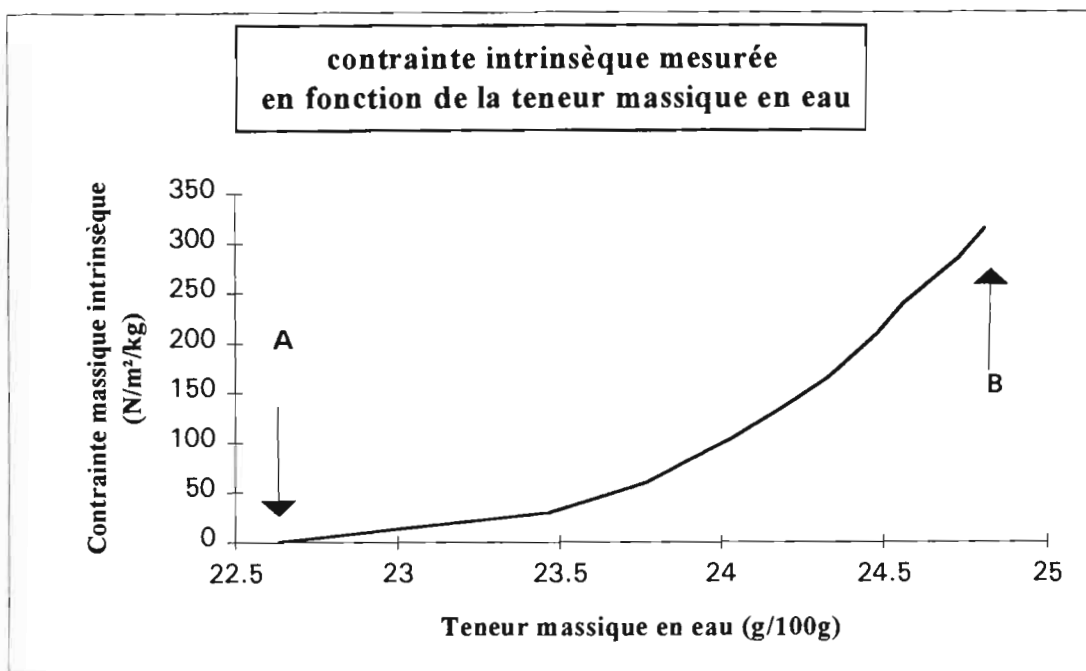


Figure 3 : contrainte intrinsèque développée avant atteinte du seuil de confinement

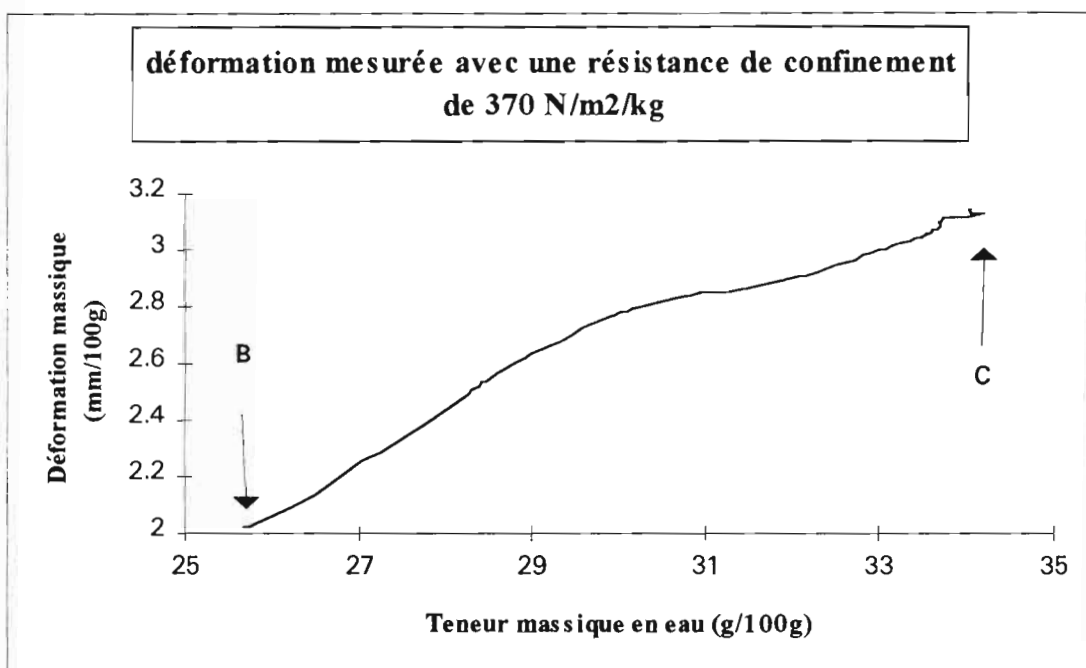


Figure 4 : déformation massique avec une résistance de confinement de 370 N/m²/kg

Suivant les valeurs de la résistance de confinement, trois types d'essais sont possibles :

- mesure de la pression transmise par l'échantillon de sol à l'extérieur sans augmentation de volume (valeur de résistance de confinement infinie : phase AB uniquement)
- mesure de la déformation résiduelle du sol lorsqu'on produit une réaction telle que la pression effective mesurée est égale à une valeur donnée (valeur de résistance de confinement maintenue à une valeur fixée : phases AB et BC)
- mesure de gonflement libre de l'échantillon (valeur de résistance de confinement nulle : phase BC uniquement).

On obtient donc *in fine* (fig. 5 et 6) des courbes relatives au fonctionnement des sols (porosité) dépendant de paramètres purement mécaniques (résistance de confinement) :

- courbe de porosité totale en fonction de la teneur massique en eau
- courbe de saturation de la porosité en fonction de la teneur massique en eau.

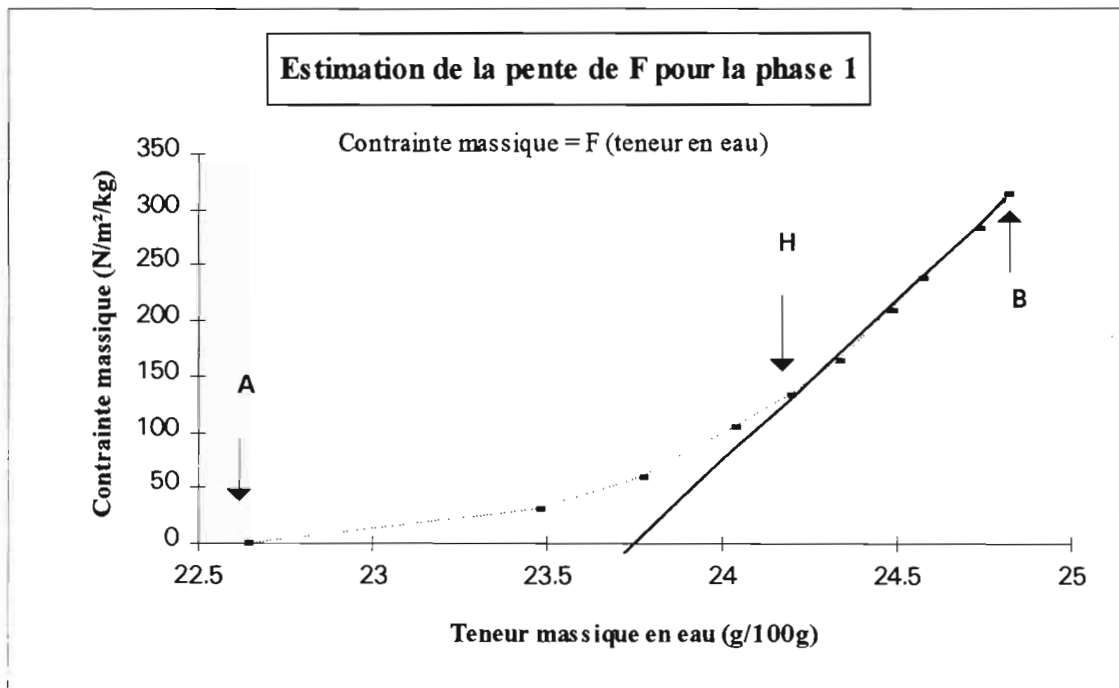


Figure 5 : estimation de la pente de F pour la phase 1

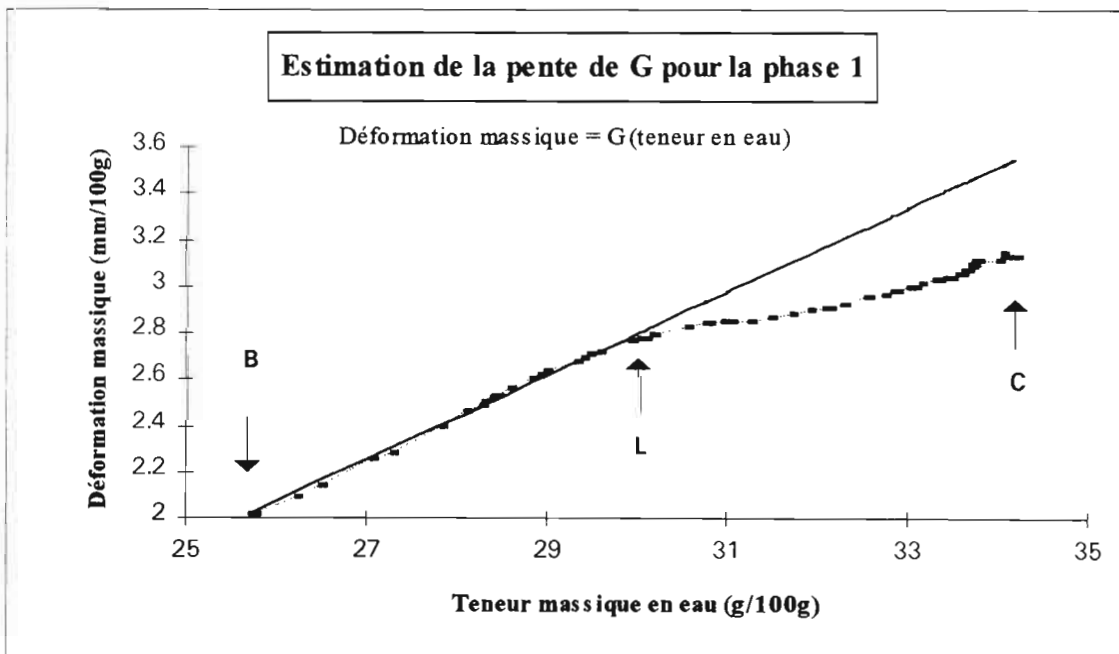


Figure 6 : estimation de la pente de G pour la phase 1

RESULTATS

Les mesures obtenues sont normalisées par la masse de sol sec à 105°C. A partir de ces données, on peut suivre l'évolution des trois compartiments du sol en fonction de la teneur massique en eau, ce qui permet de calculer les paramètres suivants:

$$\text{Création de pores (\%)} = 100 \times (\text{volume poral final} - \text{volume poral initial}) / \text{volume poral initial}$$

Taux de saturation de la porosité (%) = $100 \times \text{volume d'eau final} / \text{volume poral final}$

N° d'échantillon	condition d'embedding (N/m ² /kg)	Création de pores entre A et C (%)	Taux de saturation de la porosité en C (%)
V5	infini	0	82.82
V2	770	1.47	87.97
V3	370	6.11	89.51
V4	0	21.44	91.42

tab. 1: influence des conditions d'embedding sur la porosité. Résultats obtenus sur la série faiblement compressée ($10.68 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$).

Il ressort de ces essais que pour la plage de résistances de confinement explorée :

- le taux de saturation du milieu est très peu dépendant des conditions d'embedding
- la création de pore est fortement dépendante des conditions d'embedding

Les résultats obtenus ont montré l'existence d'un point L caractérisant une discontinuité de comportement lors des mesures effectuées aussi bien en ce qui concerne la contrainte intrinsèque (partie AB) que la déformation volumique (partie BC). Ce point permet de distinguer deux phases correspondant à une variation nette des propriétés mécaniques du sol pour une valeur limite de teneur massique en eau. Il semble qu'un taux de compression initial plus élevé tende à diminuer cet effet. Ceci s'expliquerait par un arrangement initial privé d'une latitude de réarrangement. Nous avons été amené à introduire un second point, H, à partir duquel l'humectation de la phase argileuse est supposée homogène.

On peut alors subdiviser les courbes obtenues en trois phases :

- phase 0 : séquence d'humectation progressive de la fraction argileuse. Elle est caractérisée par une croissance lente de la contrainte développée, en fonction de la teneur en eau
- phase 1 : la contrainte développée est linéairement dépendante de la teneur massique en eau. On suppose dans cette séquence, que l'ensemble de la phase argileuse est humectée de manière homogène et que les caractéristiques du support sont conservées
- phase 2 : au delà d'une teneur massique en eau limite, la structure du sol se modifie sous la contrainte reçue, ce qui conduit à un comportement différent de celui de la séquence précédente et variant selon l'état de compression initiale du sol.

Il est possible d'estimer pour la phase 1, la dépendance linéaire existant entre les courbes de déformation volumique en fonction de la teneur en eau d'une part, et de contrainte intrinsèque lue en fonction de la teneur en eau d'autre part.

Lorsque la valeur de résistance de confinement correspond à un point compris dans la phase 1, il est possible de calculer les pentes des fonctions linéaires F et G, correspondant respectivement à la mesure de contrainte (partie HB) et à la mesure de déformation (partie BL), en fonction de la teneur massique en eau.

$$F : \text{contrainte massique intrinsèque} = a \times \text{teneur massique en eau} + b$$

$$G : \text{déformation massique} = a' \times \text{teneur massique en eau} + b'$$

On observe (tab. 2) une variation peu importante de la pente de la fonction F suivant le taux de compression initiale, celle-ci agissant davantage sur le fonctionnement de la phase 2.

série	compression initiale (N/m ²)	F : pente moyenne (N/m ² /kg)	écart-type	G : pente moyenne (N/m ² /kg)	écart-type
V1 - V5	10.68 10 ⁴	23.00 10 ⁹	0.0582 10 ⁹	25.28 10 ⁹	4.071 10 ⁹
V7 - V12	32.05 10 ⁴	22.47 10 ⁹	1.667 10 ⁹	14.95 10 ⁹	6.682 10 ⁹

tab.2 : pente des fonctions F et G estimées dans la phase 1

On peut estimer la relation liant la contrainte intrinsèque à la déformation volumique dans la phase 1, en ajustant les paramètres des deux fonctions F et G par (fig. 7):

$$F = \alpha G + \beta$$

avec : $\alpha = a / a'$

et $\beta = (a'.b - a.b') / a'$

soit pour l'exemple présenté fig. 7, $\alpha = 0.0161$ et $\beta = - 0.0267$. Cette estimation de la relation liant contrainte intrinsèque et déformation permet, à partir de la partie BL de la courbe, d'estimer dans le plan considéré, la contrainte équivalente transmise par le sol, pour une condition de confinement donnée.

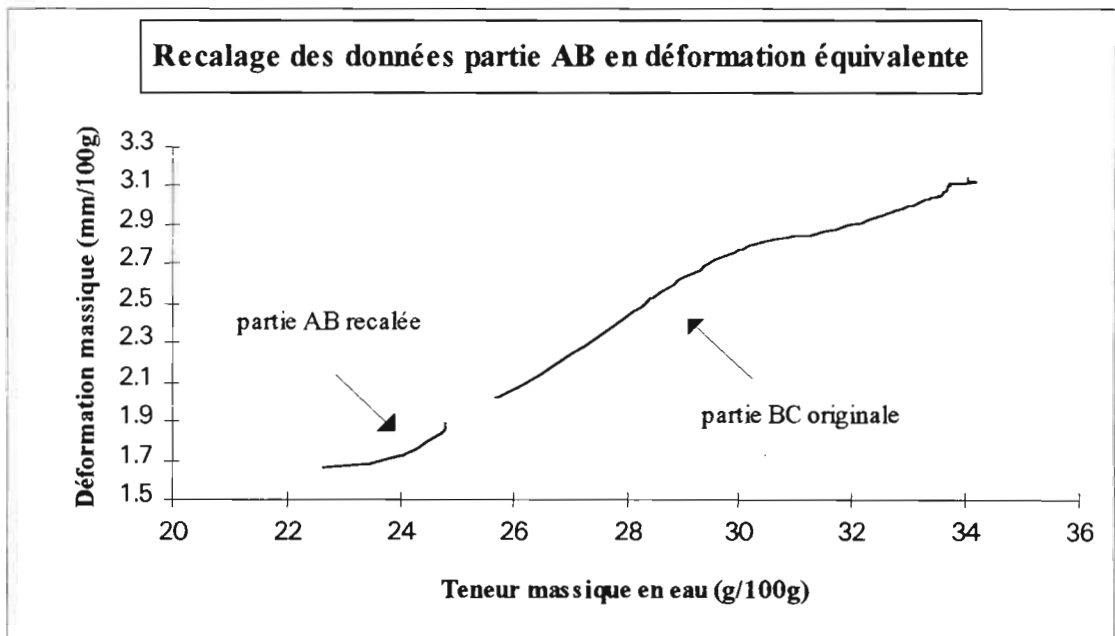


Figure 7 : recalage de la contrainte pendant la phase AB en déformation équivalente

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les premiers résultats obtenus ont confirmé l'importance des propriétés mécaniques de l'environnement de l'échantillon lors de mesures au laboratoire. La méthode mise au point permet donc de préciser la dépendance des paramètres de fonctionnement dynamique des sols vis à vis des conditions de confinement. Si le taux de saturation à l'équilibre reste constant quelques soient les conditions d'expérimentation, il ressort des résultats obtenus que la quantité de porosité créée est limitée par les conditions de confinement.

L'évaluation de l'état fonctionnel d'un sol, à partir des seules porosité globale et teneur massique en eau est insuffisante pour appréhender parfaitement les modifications introduites notamment lors de la partie AB. Ainsi, bien que la porosité globale reste pratiquement constante, la nature de cette porosité varie sous l'effet de la contrainte interne de manière à augmenter la résistance mécanique du squelette. Une étude complémentaire, notamment par recours à l'imagerie, devrait permettre de quantifier ces modifications structurales.

A terme, il sera possible d'évaluer la distance entre l'expérimentation en laboratoire et l'approche de terrain puis de corriger les résultats obtenus au laboratoire à partir d'échantillons prélevés et isolés. Cette approche devrait également permettre de mieux comprendre les divers effets du gonflement de la phase argileuse sur la structure du sol. Pour ce faire, l'accent sera mis, d'une part, sur la quantification fine des modifications de la structure porale (par exemple, en exploitant des lames minces de sol), et d'autre part, sur la détermination plus précise des caractéristiques mécaniques du sol (par exemple, au moyen d'essais rhéologiques complémentaires). Néanmoins, un effort important devra être fait dans le domaine de la mesure rhéologique *in situ*, afin de permettre une validation complète de la méthode.

La valeur de contrainte intrinsèque mesurée dans le plan matérialisé par la plaque, dépend d'une part de l'énergie fournie par les argiles lors de leur humectation, et d'autre part, de la transmission de cette énergie vers la plaque, ce qui est lié aux propriétés mécaniques du squelette. Ces deux caractéristiques ont ceci en commun d'être fonction de la teneur massique en eau. La méthode fournit un moyen de quantifier simplement ces interactions.

Il apparaît qu'on ne peut en aucun cas prétendre reproduire au laboratoire un comportement proche de celui du sol en place sans précaution quant à l'environnement mécanique de l'échantillon. Le problème de la représentativité d'un échantillon par rapport à son sol d'origine se pose plus vivement, en l'absence de quantification des conditions de confinement avant prélèvement.

Références bibliographiques

- BRAUDEAU E., 1988a - Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structurés. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, 1731-1734.
- BRAUDEAU E., 1988b - Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, 1933-1936.
- CORDARY D., 1994 - Mécanique des sols. Lavoisier Tec et Doc, 380 p, Paris.
- DEXTER A.R., 1988 - Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research, 11, 199-238.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981a - Densité texturale des sols naturels I - Méthode de mesure. Agronomie 1 (8), 651-658.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981b - Densité texturale des sols naturels II - Eléments d'interprétation. Agronomie 1 (8), 659-666.
- GRIMALDI M., 1986 - Modifications structurales d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. Science du Sol, n°3, vol. 24, 269-284.
- GRUNBERGER D., DJERAN-MAIGRE I., VELDE B., TESSIER D., 1994 - Mesure de la réorientation des particules de kaolinite lors de la compaction par observation directe. C.R. Acad. Sci. Paris, T. 318, série II, 627-633.

- GUERIF J., 1982 - Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2, 287-294.
- GUERIF J., 1988a - Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux: revue bibliographique et mise au point technique. *Agronomie*, 8 (4), 281-288.
- GUERIF J., 1988b - Résistance en traction des agrégats terreux: influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *Agronomie*, 8 (5), 379-386.
- GUERIF J., 1990 - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques; in "La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur". Laon, France, 9/1/1990. Les colloques de l'INRA n° 53, Ed. INRA, Paris.
- HADAS A., LARSON W.E., ALLMARAS R.R., 1988 - Advances in modelling machine-soil-plant interactions. *Soil and Tillage Research*, 11, 349-372.
- HICHER P. Y., WAHYUDI H., TESSIER D., 1994 - Microstructural analysis of strain localisation in clay. *Computers and geotechnics* 16, 205-222.
- MANICHON H., 1982 - L'action des outils sur le sol: appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Sciences du Sol*, 203-219.
- MONNIER G., STENGEL P., 1982 - Structure et état physique du sol. *Encyclopédie des Techniques Agricoles*, Fasc. 1140 et 1141, Editions techniques, Paris.
- PAPY F., 1987 - Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état structural. *Agronomie*, 7 (2), 111-121.
- RICHARDS, 1941 - A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci.*, 51, 377-386.
- SALA G.H., TESSIER D., 1993 - Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 316, Série II, 231-236.
- STENGEL P., 1979 - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales agronomiques*, 30 (1), 27-49.
- STENGEL P., 1990 - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectif et méthodes. in "la structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Laon, France 9/1/1990. Les colloques de l'INRA n° 53, Ed. INRA Paris.
- TESSIER D., PEDRO G., 1980 - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. Note présentée par G. Millot, *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 291, Série D, 461-464.