

Une méthode mécanique pour déterminer la porosité totale d'un sol

A mechanical method to determine the total porosity of soil

Samuel Ouoba^{*1}, Bruno Cousin², Fabien Cherblanc², Jean Kouliadiati¹, Jean-Claude Béné²

¹Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, UFR-SEA, 03 BP 7021, Burkina Faso

²Université Montpellier 2, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095, Montpellier cedex 5, France

RÉSUMÉ

Cette note présente une méthode mécanique pour la détermination de la porosité totale d'un sol. La méthode présentée consiste à placer un échantillon de sol dans une cellule régulée dont on peut faire varier le volume par paliers grâce à un piston. La porosité du sol se déduit de la variation de la pression totale de la phase gazeuse lors des incréments de volume. La méthode a été validée sur un sol en considérant 5 échantillons de porosités différentes. Les résultats expérimentaux sur la porosité totale sont en bon accord avec les résultats théoriques sur l'ensemble des essais réalisés.

Mots clés : sol ; porosité totale ; teneur en eau ; pression de vapeur d'équilibre ; volume mort ; activimètre.

ABSTRACT

This paper presents a mechanical method for the determination of the total porosity of soil. The presented method consists to place a sample of soil in a cell which can be regulated by varying the volume of the gas by increments using a piston. The porosity of the soil is deduced by the variation of the total pressure of the gaseous phase during the realization of volume increments. The method has been validated on a soil considering 5 samples of different porosities. The experimental results on the total porosity are in good agreement with the theoretical results on all experimental tests.

Keywords: soil; total porosity; water content; equilibrium vapour pressure; dead volume; activity-meter

Abridged English version

This article presents a mechanical method for the determination of the total porosity of a soil. Indeed the structure of soil depends on the texture. Very sandy soils are furnished without aggregation while the clay or loam soils often form an unstructured mass. One consequence of the arrangement of particles in aggregates is to let in the soil a certain proportion of voids [1, 2]. It is the ratio n defined by:

$$n [\%] = \frac{\text{volume of voids}}{\text{total volume}} \times 100$$

that is called total porosity.

Knowledge of the total porosity of a soil is an essential step in many areas as civil engineering and agriculture. In agriculture, for example, the total porosity is essential because it is what allows soil aeration and permeability [3, 4, 5] and it is even higher than the structure is best. It is assumed that the total porosity of a good soil is of the order of magnitude of 50% to 70 % [6, 7]. When the total porosity is less than or equal to 40%, we can estimate that we are dealing with a compacted soil [2]. Otherwise, in civil engineering for example, high soil compaction would be an advantage for the stability of structures and, in this context, a low porosity is desirable.

*Corresponding author, 03 BP 7021 LPCE/UFR-SEA Université de Ouagadougou (Burkina Faso) 03.
Tel.: (+226) 70 13 03 01 / (+226) 76 67 15 57
E-mail address : samuel_ouoba1@yahoo.fr (Samuel Ouoba)

In this manuscript, we propose a simple and practical method for the determination of the total porosity of soil. The study was carried on Silty Clay Soil (SCS). The experimental device depicted in Fig. 1 is called activity-meter and is relatively simple in design and easy to handle. Recent works on saturated salt solutions [8] and several liquid compounds [9] have contributed to validate the proposed method. The experimental results on the total porosity of 5 samples analyzed give an idea about the accuracy of the method to obtain results with good agreement.

1. Introduction

Cet article présente une méthode mécanique pour la détermination de la porosité totale d'un sol. En effet la structure d'un sol est, dans une certaine mesure, dépendante de la texture. Les sols très sableux sont meubles sans agrégation tandis que les sols très argileux ou très limoneux forment souvent une masse non structurée. Une des conséquences de l'arrangement des particules en agrégats est de laisser dans le sol une certaine proportion de vides [1, 2].

La connaissance de la porosité totale d'un sol est une étape essentielle aussi bien dans le domaine du génie civil que dans le domaine de l'agriculture. En agriculture par exemple la porosité totale est une donnée essentielle car, c'est elle qui permet l'aération du sol et la perméabilité [3, 4, 5] et elle est d'autant plus élevée que la structure est meilleure. On admet que la porosité d'un bon sol est de l'ordre de 50 % à 70 % [6, 7]. Par contre, dans le domaine du génie civil par exemple, une forte compacité du sol serait un avantage pour la stabilité des structures et dans ce contexte une faible porosité est souhaitable.

Dans ce manuscrit, nous proposons une méthode simple et pratique pour la détermination de la porosité totale d'un sol. L'étude a été portée sur un sol limono-argileux. Le dispositif expérimental appelé activimètre est relativement simple dans sa conception et facile à manipuler. Les travaux récents réalisés sur des solutions salines [8] ainsi que sur plusieurs composés liquides [9] ont permis de valider la méthode proposée.

2. Méthode de mesure de la porosité totale

2.1. Définition du système et hypothèses de travail

Le matériau étudié est un sol limono-argileux. Dans la suite de ce travail, nous admettrons que les hypothèses suivantes sont vérifiées pour le système étudié:

- H1 : La phase solide est incompressible et chimiquement inerte,
- H2 : Compte tenu du premier séchage effectué à l'étuve pendant 24 heures avant la préparation des échantillons, on suppose que les phénomènes de retrait ont quasiment atteint leur limite pour être négligés lors du séchage des échantillons,
- H3 : La température du milieu est imposée constante et égale à 30°C.

La pertinence de toutes ces hypothèses sera jugée conformément aux résultats expérimentaux obtenus sur la porosité comparativement aux résultats théoriques.

2.2. Principe expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 1) a été initialement développé pour la détermination de l'activité de l'eau et c'est pour cette raison qu'il porte le nom activimètre. Ce dispositif ainsi que la méthode qui lui est associée ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [10]. Ses dimensions caractéristiques sont données dans le Tableau 1.

L'échantillon de sol (a) est mis en relation avec un capteur de pression (b) (Druck, PMP4030AB) et un thermocouple (c) (type K). La pression totale, P_g , ainsi que la température, T , du gaz dans le système sont enregistrés grâce à un logiciel LABVIEW. Le déplacement du piston (d) au dessus de l'échantillon est rendu possible grâce à une tige filetée (e) connectée à un tambour gradué (f).

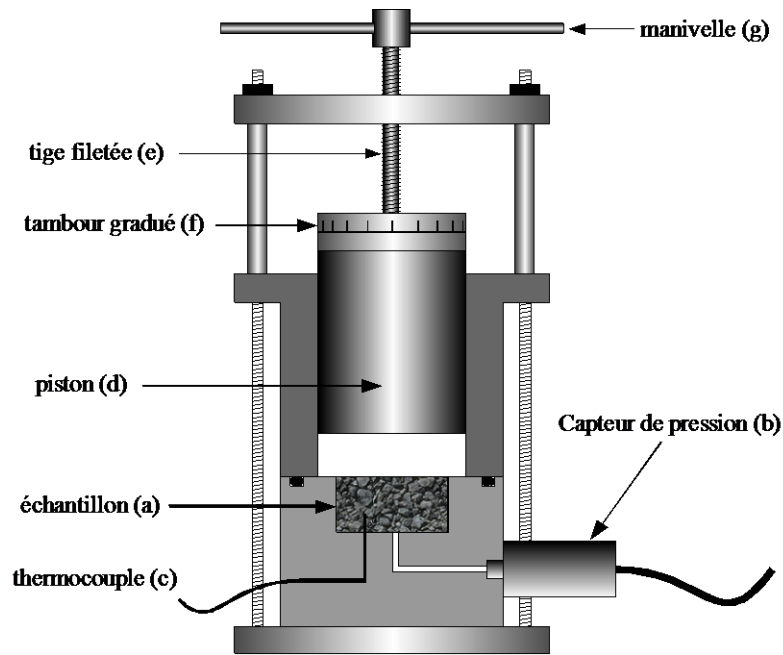


Figure 1. Schéma de l'activimètre.

Tableau 1
Dimensions Caractéristiques de l'activimètre.

Diamètre de l'échantillon	32 mm
Hauteur de l'échantillon	15 mm
Volume de l'échantillon	12,06 cm ³
Diamètre du piston	74 mm
Déplacement du piston pour un tour de manivelle	1,5 mm
Incrément de volume pour un tour de manivelle	6,45 cm ³

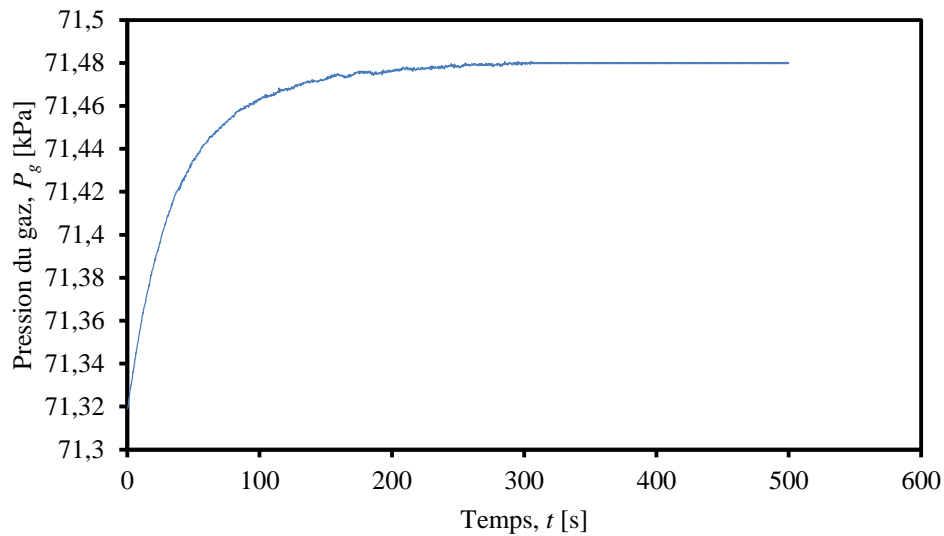


Figure 2. Evolution de la pression du gaz.

L'ensemble est ainsi immergé dans un bain thermostaté où la température est imposée constante et égale à 30°C.

L'échantillon utilisé doit être totalement sec de telle sorte que la phase gazeuse puisse être considérée comme composée uniquement d'air. Ainsi, à partir d'une position initiale du piston pour laquelle le volume entre le

piston et l'échantillon est égal à zéro (piston en contact avec l'échantillon), le principe consiste à ramener le piston dans une nouvelle position plus haute en actionnant la tige filetée à l'aide de la manivelle (g) et enregistrer la pression relative de la phase gazeuse à l'équilibre ainsi que la température dans le système. L'étanchéité à l'air le long du piston est assurée par des joints toriques. Le capteur de pression fonctionne en dépression pour des pressions relatives $P \leq 1$ bar mais, pour les essais que nous avons réalisés, la pression relative du gaz P_g est telle que $0,3 \text{ bar} < P_g < 1 \text{ bar}$. L'incertitude sur le capteur de pression (Druck, PMP4030AB), donnée par le fabricant, est $\delta P = \pm 40 \text{ Pa}$ tandis que l'incertitude sur la température est estimée à $\delta T = \pm 0,1^\circ\text{C}$. L'incertitude sur la mesure de la variation de volume par tour de manivelle est estimée à $\delta V = \pm 0,01 \text{ cm}^3$. Afin de donner une idée sur l'ordre de grandeur de T et P_g , nous présentons une illustration graphique des mesures réelles de pression (Figure 2) et de température (Figure 3) pour un incrément de volume type. On peut remarquer qu'au bout de quatre minutes environ, l'équilibre thermodynamique du système est atteint et la pression relative ainsi que la température à l'intérieur du système restent quasiment constantes. La baisse de la température au début de l'essai est due à la détente du gaz qui est un processus endothermique (Figure 3). On remarque que la régulation thermique permet effectivement d'assurer une température très voisine de 30°C à l'intérieur du système.

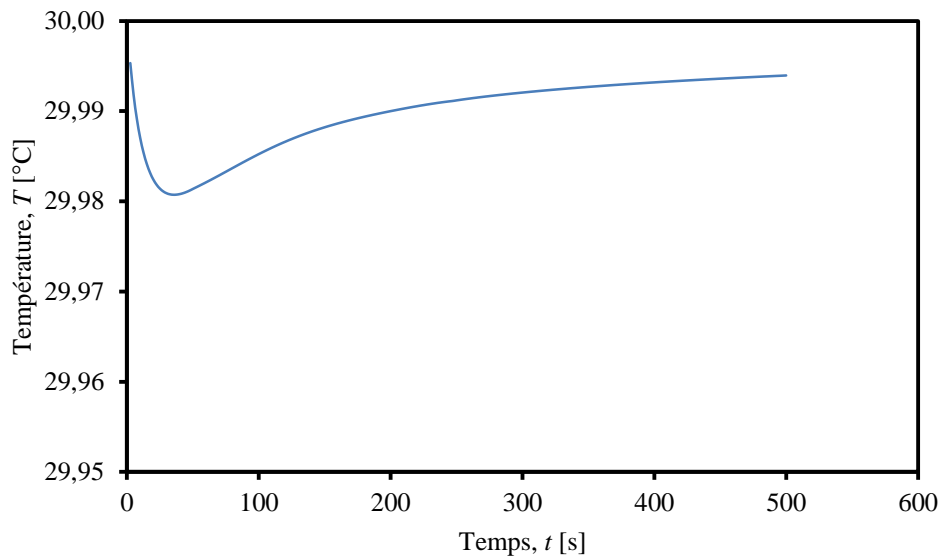


Figure 3. Evolution du profil de température.

Le processus est répété plusieurs fois afin d'obtenir un ensemble de doublets $(\Delta V^i, P_g^i)$, où ΔV^i est l'incrément de volume imposé par le piston et P_g^i est la pression relative du gaz à l'équilibre donnée par le capteur de pression. Sachant que le seul composé présent dans le sol est l'air, la pression relative de la phase gazeuse, P_g^i , est égale à la pression relative de l'air, P_a^i .

En supposant que l'air se comporte comme un gaz parfait, la pression relative de la phase gazeuse pour chaque état d'équilibre peut être exprimée comme étant égale à la pression relative partielle de l'air:

$$P_g^i = P_a^i = n_a \frac{RT}{V_0 + \Delta V^i} \quad (1)$$

Où :

- n_a est le nombre de moles d'air dans le dispositif et reste constant grâce à l'étanchéité assurée par les joints toriques.
- V_0 est le volume total occupé par le gaz pour la position initiale du piston ; position dans laquelle le piston est en contact avec l'échantillon. Ce volume prend en compte le volume des vides, V_v , à l'intérieur de l'échantillon ainsi que le volume mort, V_m , dans le reste du système. Les trois paramètres V_0 , V_v et V_m sont liés par la relation :

$$V_0 = V_v + V_m \quad (2)$$

Le piston étant toujours ramené dans sa position initiale où il est en contact avec l'échantillon, on fait l'hypothèse que V_m reste constant et connu pour tous les essais de telle sorte que V_0 ne dépende que de V_v . En remplaçant l'expression de V_0 l'équation (1) devient :

$$P_g^i = P_a^i = n_a \frac{RT}{V_v + V_m + \Delta V^i} \quad (3)$$

Où P_a^i et T sont enregistrées par le capteur de pression et ΔV^i est l'incrément de volume correspond au $i^{ème}$ palier.

2.3. Fabrication des échantillons de sol

La fabrication des échantillons comprend les étapes suivantes :

- Séchage du sol : Le sol utilisé doit d'abord être sec ; il est donc entreposé dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. Le sol sec est ensuite sorti de l'étuve et entreposé dans un récipient étanche afin qu'il se refroidisse,
- Prélèvement de la quantité de sol sec nécessaire : à l'aide d'une balance de très haute précision ($\delta m_s = 10^{-4}$ g), on pèse une masse (m_s) de sol sec nécessaire à la fabrication d'un échantillon de porosité théorique n_{th} définie par :

$$n_{th} = \frac{V_v}{V_{ech}} \quad (4)$$

avec

$$V_v = V_{ech} - V_s \quad (5)$$

Où V_s correspond au volume spécifique de sol sec utilisé.

Tableau 2

Valeurs de la masse de sol sec ainsi que de la masse d'eau en fonction de la porosité théorique.

Porosité théorique, n_{th} [%]	20±0,4	30±0,4	40±0,4	50±0,4	60±0,4
Masse de sol sec, m_s [g]	25,5672±0,0001	22,3713±0,0001	19,1754±0,0001	15,9795±0,0001	12,7836±0,0001
Masse d'eau, m_e [g]	4,0908±0,0001	3,5794±0,0001	3,0681±0,0001	2,5567±0,0001	2,0454±0,0001

On sait que la masse spécifique de sol sec est donnée par :

$$m_s = \rho_s \cdot V_s \quad (6a)$$

En considérant les équations (4) et (5), l'équation (6a) devient :

$$m_s = V_{ech} \rho_s (1 - n_{th}) \quad (6b)$$

Comme $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ et $V_{ech} = 12,06 \text{ cm}^3$ alors la masse théorique de sol sec vaut :

$$m_s = 31,959(1 - n_{th}) \quad (6c)$$

Le Tableau 2 donne les résultats de la masse spécifique de sol sec pour différentes valeurs de la porosité théorique ainsi que les incertitudes de mesure.

- Ajout d'eau : une fois que la masse de sol sec est prélevée, on y ajoute une masse, m_e , d'eau afin d'obtenir une teneur en eau w liée à m_e et m_s par la relation :

$$m_e = w \cdot m_s \quad (7)$$

Tous les échantillons sont fabriqués à la même teneur en eau de 16%. En effet pour le type de sol utilisé, l'optimum Proctor est obtenu pour une teneur en eau de 16% correspondant à une masse volumique sèche de 2,14 g/cm³ soit une porosité minimale de 19,24%. Compte tenu, d'une part, du fait que la porosité

minimale du sol à l'optimum Proctor (19,24%) est très voisine de l'une des porosités que nous avons étudiée (20%), et, d'autre part, souhaitant réaliser les essais dans les mêmes conditions c'est-à-dire avec la même teneur en eau du sol, nous avons retenu la valeur de 16% de teneur en eau pour la fabrication des échantillons de sol. Ainsi, le sol humide est malaxé jusqu'à l'obtention d'une mixture d'apparence homogène qui est ensuite entreposée dans un récipient étanche pendant 24 heures pour permettre une redistribution de l'humidité. Le Tableau 2 donne la masse d'eau correspondant à chaque valeur de la porosité théorique.

- Compactage de l'échantillon : Le mélange homogène de sol humide est alors versé dans un porte-échantillon, celui-ci est fermé par un piston guidé par un cylindre. L'ensemble est placé entre les plateaux d'une presse hydraulique. Compte tenu de l'épaisseur de l'échantillon de sol (1,5 cm), le compactage quasi statique et la mise en forme se font en une seule couche et les échantillons ainsi obtenus peuvent être considérés comme homogènes de volume $V_{ech} = 12,06 \text{ cm}^3$ avec une incertitude de $\delta V_{ech} = \pm 0,02 \text{ cm}^3$.
- Séchage de l'échantillon : L'échantillon ainsi obtenu est entreposé à nouveau dans une étuve à 105°C pendant 24 heures pour que toute l'eau de l'échantillon s'évapore. Les différents échantillons de porosité théorique de 20%, 30%, 40%, 50% et 60% qui ont été utilisés lors des essais correspondent respectivement à une masse volumique sèche de $2,12 \text{ g/cm}^3$, $1,86 \text{ g/cm}^3$, $1,59 \text{ g/cm}^3$, $1,33 \text{ g/cm}^3$ et $1,06 \text{ g/cm}^3$.

3. Résultats

De façon simplifiée, le système étudié peut être considéré comme composé de deux sous systèmes : un premier sous système constitué par l'échantillon de sol de volume V_{ech} et un deuxième sous système de volume, V_m dont on ne connaît pas la valeur.

3.1. Calibration du volume mort, V_m

Dans cette section, l'objectif est de déterminer le volume mort, V_m , supposé constant dans le système. Pour ce faire, l'échantillon de sol a été remplacé par un matériau métallique continu sec de même nature que le porte échantillon et dont les surfaces de base sont parfaitement lisses. L'usinage du matériau continu a été fait avec une très bonne précision et l'incertitude sur son volume est estimée à $\pm 0,02 \text{ cm}^3$; il peut donc être considéré comme ayant les mêmes dimensions que l'échantillon de sol ($12,06 \text{ cm}^3$). Dans ce cas le volume des vides dans le matériau, $V_v = 0$ et l'Equation 3 prend la forme suivante :

$$P_g^i = P_a^i = n_a \frac{RT}{V_m + \Delta V^i} \quad (8)$$

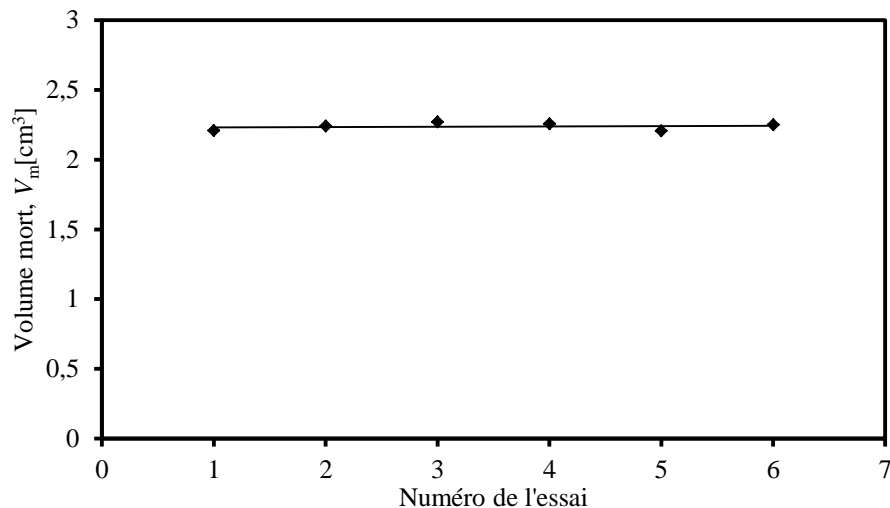


Figure 4. Valeurs du volume mort pour différents essais.

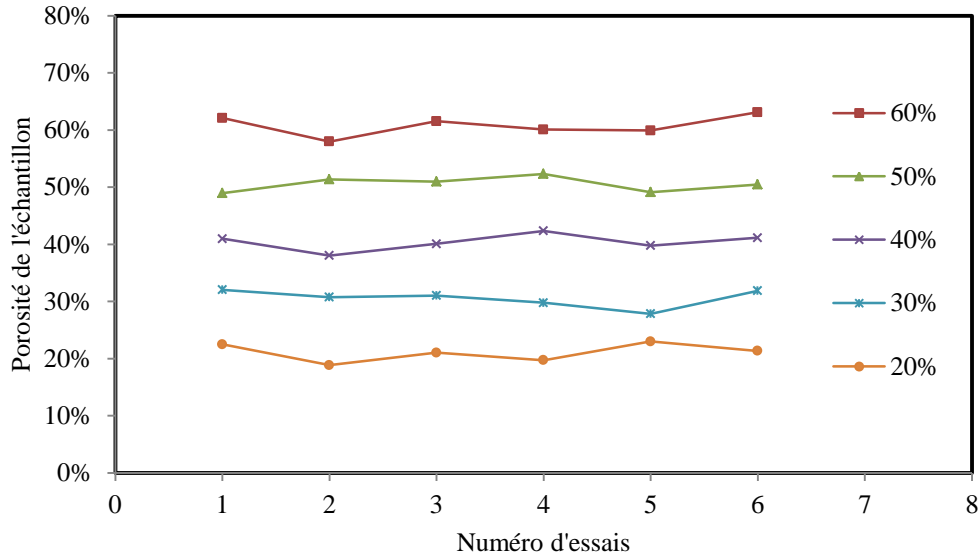


Figure 5. Résultats de la porosité obtenue sur 5 échantillons de sol.

de telle sorte que les seules inconnues à déterminer se résument à V_m et n_a . Pour pouvoir déterminer ces 2 inconnues, 2 états d'équilibre suffisent: $(\Delta V^i, P_g^i) i \in [1..2]$. Toutefois, pour accroître la précision sur la mesure, quatre à six incréments de volume sont réalisés et la résolution du système se fait en utilisant une méthode de minimisation de Levenberg-Marquadt (Matlab). Cette méthode avait déjà été validée dans nos précédentes publications pour le cas de l'eau en utilisant deux approches [8, 9]. Six essais expérimentaux ont été réalisés sur le matériau continu et la Figure 4 présente les résultats du volume mort, obtenus pour les six essais. On remarque que V_m est quasiment constant pour tous les essais et la loi linéaire de distribution des points permet de déterminer la valeur moyenne du volume mort donné par :

$$V_m = 2,24 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

Sachant que $\delta T = \pm 0,1^\circ\text{C}$, $\delta P_a = \pm 40 \text{ Pa}$, $\delta V = \pm 0,01 \text{ cm}^3$ et $\Delta V^i = 6,45 \text{ cm}^3$, un calcul d'incertitude sur le volume mort à partir de l'équation (8) donne $\delta V_m = \pm 0,04 \text{ cm}^3$.

3.2. Détermination expérimentale de la porosité d'un sol

Compte tenu du fait que, avant chaque essai, le piston est en contact avec l'échantillon de sol, nous faisons l'hypothèse que les irrégularités à la surface du matériau sol ne modifie pas de façon significative le volume mort V_m dont la valeur est supposée être identique à celle déterminée dans la section 3.1) c'est-à-dire que $V_m = 2,24 \pm 0,04 \text{ cm}^3$. Ceci étant, les essais ont été réalisés sur cinq échantillons de sol de porosité théorique variant entre 20% et 60%. Six essais sont réalisés sur chaque échantillon. Connaissant la valeur du volume mort V_m , le système d'équations ainsi obtenu à partir de l'Equation (3) est résolu en utilisant la méthode de Levenberg Marquadt pour déterminer les seules inconnues (V_p, n_a) et ensuite déduire la porosité totale du sol. La Figure 5 donne les résultats obtenus sur la porosité pour les cinq essais réalisés sur chaque échantillon. L'incertitude sur le volume des vides est estimée à $\delta V_p = \pm 0,02 \text{ cm}^3$. On remarque sur cette figure que pour chaque échantillon les cinq valeurs de la porosité sont quasiment identiques. Les valeurs moyennes obtenues sur les porosités expérimentales ainsi que les mesures d'incertitude correspondantes sont consignées dans le Tableau 3.

On peut remarquer que les résultats expérimentaux sur la porosité sont, dans l'ensemble, en bon accord avec les valeurs théoriques. On note tout de même que les valeurs expérimentales sont légèrement supérieures aux valeurs théoriques. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats :

- Des phénomènes de retrait ont pu contribuer à augmenter légèrement la porosité du milieu,

Tableau 3

Comparaison des résultats sur les porosités théoriques (n_{th}) et expérimentales (n_{exp}).

Porosité théorique, n_{th} [%]	20±0,4	30±0,4	40±0,4	50±0,4	60±0,4
Porosité expérimentale, n_{exp} [%]	21,08±0,62	30,56±0,65	40,40±0,67	50,54±0,69	60,79±0,72

- Le volume mort ne serait pas exactement le même selon que l'on utilise le matériau continu ou l'échantillon de sol.
- Le système hydraulique qui assure le compactage n'a pas réussi à donner à l'échantillon la compacité théorique escomptée,
- Il y a eu probablement une perte de masse de sol lors du processus de préparation des échantillons.

Toutefois, l'ensemble des résultats montrent que la méthode proposée permet de déterminer, avec une bonne approximation, la porosité totale d'un sol.

4. Conclusion

La méthode objet de la présente note présente plusieurs avantages pour la détermination de la porosité totale d'un sol. Le dispositif expérimental utilisé ainsi que la méthode qui lui est associée permettent de rendre accessibles et à moindre coût des résultats sur la porosité d'un sol dont la détermination par les méthodes actuelles s'avère complexe et demande des moyens d'investigation très coûteux et très lourds à mettre en œuvre. L'argument qui plaide le plus en faveur de la présente méthode est la possibilité de mesurer la porosité d'autres milieux poreux que le sol. L'appareil présenté dans cette note ainsi que la méthode d'identification associée ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [10].

Références

- [1] M. Bonneau, Évaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture, Bull. A.F.E.S. 8 (1961) 16–26, n°spécial.
- [2] M. Bonneau, L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière, Rev. For. Fr. (1963) 19–31.
- [3] M. Hallaire, Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous-sols nus et cultivés, Ann. Agr. Sér. A (mars–avril 1953) 143–244.
- [4] S. Henin, A. Feodoroff, R. Gras, G. Monnier, Le profil cultural. Principes de physique du sol, Société d'Éditions des Ingénieurs Agricoles, Paris, 1960, 320p.
- [5] L. Turc, Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle, Ann. Agron. 12(1) (1961) 13–49.
- [6] Ph. Duchaufour, Précis de Pédologie, Masson et Cie, Edit., Paris, 1960, 438p.
- [7] R.J.B. Williams, G.W. Cooke, Some effects of farmyard manure and of grass residues on soil structure, Soil Sci. 92(1) (1961) 30–39.
- [8] S. Ouoba, B. Cousin, F. Cherblanc, J.-C. Bénet, Une méthode mécanique pour mesurer la pression de vapeur d'équilibre de l'eau dans un milieu complexe, C. R. Mécanique 338 (2010) 113–119.
- [9] S. Ouoba, F. Cherblanc, B. Cousin, J.-C. Bénet, A new experimental method to determine the sorption isotherm of a liquid in a porous medium, Environ. Sci. Technol. 44 (2010) 5915–5919.
- [10] J.-C. Bénet, B. Cousin, F. Cherblanc, S. Ouoba, Device for measuring the activity of a liquid in a complex medium and associated method, United States Patent Application Publication, Pub. noUS 2012/0266663 A1, Oct. 25, 2012.