



Méthode de mesure de la densité apparente d'un échantillon de sol



Élaboration

Groupe Sols et Substrats HEPIA HES-SO Genève, Pascal Boivin et Cédric Deluz
Service de géologie, sols et déchets, Bastien Guex

Illustrations

HEPIA

Version août 2024

TABLES DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
ABRÉVIATIONS	3
1. INTRODUCTION.....	4
2. DIFFICULTÉ PRINCIPALE	4
3. DÉFINITIONS	4
3.1. DENSITÉ ET DENSITÉ APPARENTE (DA).....	4
3.2. DENSITÉ RÉELLE (P)	4
3.3. VOLUME APPARENT (VA)	5
3.4. TERRE FINE (TF).....	5
3.5. FRACTION GROSSIÈRE (MASSE MG ET VOLUME VG).....	5
3.6. SUCCION OU POTENTIEL MATRICIEL	5
4. INTÉRÊT DE LA MESURE	5
5. CALCUL DE LA DENSITÉ APPARENTE.....	6
6. MODE OPÉRATOIRE	6
6.1. PRÉLÈVEMENT D'UN ÉCHANTILLON NON REMANIÉ	6
6.1.1. <i>Préleveur pour cylindre de sol extractible HEPIA</i>	6
6.1.2. <i>Mesure sur mottes</i>	7
6.1.3. <i>Méthode au cylindre d'acier (Burger) – Obsolète</i>	7
6.2. ÉQUILIBRAGE DES ÉCHANTILLONS DE SOL À UNE SUCCION (POTENTIEL MATRICIEL) STANDARD.....	7
6.3. MESURE DU VOLUME APPARENT VA D'UN ÉCHANTILLON SOL.....	9
6.3.1. <i>Mesure du volume à la poche plastique</i>	9
6.3.2. <i>Mesure du volume au scanner 3D de bureau</i>	9
6.4. MESURE DE LA MASSE ET DU VOLUME DES ÉLÉMENTS GROSSIERS.....	10
7. CALCULS.....	10
7.1. DENSITÉ APPARENTE DE LA TERRE FINE (G/CM ³).....	10
7.2. POROSITÉ P	10
7.3. TENEUR EN EAU GRAVIMÉTRIQUE W (G/G).....	10
7.4. TENEUR EN EAU VOLUMIQUE θ	11
8. ÉCHANTILLONNAGE	11
9. AUTRES APPLICATIONS	11
10. ERREURS LES PLUS COURANTES.....	12
10.1. UTILISER LA MASSE DE SOL FRAIS.....	12
10.2. NE PAS TENIR COMPTE DES GROSSIERS	12
RÉFÉRENCES	12

RÉSUMÉ

Prélèvement d'échantillon non remanié

Utiliser le préleveur type HEPIA présenté en Annexe 1. Ce modèle est distribué par Sol-Conseil. Contrôler l'état de l'échantillon après le prélèvement et avant retour du terrain.

En cas de sol trop caillouteux, prélever des mottes.

Équilibrer les échantillons au laboratoire

Utiliser une table à succion (Figure 1) et équilibrer les échantillons à -100 hPa.

Mesurer leur volume apparent

Utiliser la méthode à la poche plastique ou un scanner 3D de table (description détaillée dans le texte).

Mesures complémentaires

Sécher les échantillons à 105 °C et peser le poids sec.

Tamiser à 2 mm, prendre la masse et le volume du refus à 2 mm (éléments grossiers)

Calculs

Utiliser les équations de la section calculs pour obtenir les valeurs de densité apparente et de porosité totale de l'échantillon.

ABRÉVIATIONS

Da : densité apparente

Tf : terre fine

Me : masse de l'échantillon à -100hPa

Mg : masse fraction grossière, $\varnothing > 2$ mm

Mtf : masse terre fine, séchée à 105 °C

Ms : masse sèche

P : porosité

Va : volume apparent

Vtf : volume terre fine

Vg : volume fraction grossière, $\varnothing > 2$ mm

W : teneur en eau gravimétrique

θ : teneur en eau volumique

1. INTRODUCTION

La mesure de la densité apparente du sol est sans conteste la mesure physique la plus couramment et anciennement utilisée, dans le but d'apprécier le niveau de compacité d'un sol. C'est aussi la plus simple à effectuer.

Pourtant son utilité est le plus souvent compromise par des erreurs techniques et des erreurs d'interprétation. La densité étant une masse volumique, c'est techniquement sur la mesure du volume apparent du sol que réside la difficulté, toute relative.

Les techniques traditionnellement enseignées – la mesure au cylindre d'acier ou cylindre de Burger, engendrent des erreurs fatales à la qualité du résultat. Ces erreurs sont faciles à éviter car les protocoles alternatifs plus performants sont également plus rapides et plus économiques. De même, les calculs à effectuer, bien que très simples, sont souvent erronés par oubli des principes de calcul.

Le but de cette note est de faire le point technique et méthodologique pour des mesures de densité apparente techniquement correctes et bien interprétées, en introduisant de nouvelles méthodes et en expliquant pourquoi les méthodes précédentes sont inappropriées.

Une première partie permet d'introduire les notions et équations à utiliser. Pour une réalisation correcte on portera une attention particulière à la section Mode opératoire et aux procédures à suivre.

2. DIFFICULTÉ PRINCIPALE

Outre le respect des gestes techniques et des méthodes de calcul exposés ci-dessous, un élément clé du fonctionnement du sol intervient dans la compréhension de la méthode : le gonflement/retrait du sol. En effet, le sol gonfle lorsqu'il se recharge en eau, et se rétracte lorsqu'il sèche. De fait, son volume apparent change avec sa teneur en eau et dans les sols suisses, des variations de volume apparent de 30% entre l'état sec et l'état saturé en eau sont courantes. On comprend dès lors que si des volumes apparents ne sont pas déterminés au même état d'humidité (même succion), ils ne peuvent pas être comparés. Cette condition ne peut pas être respectée avec la méthode au cylindre d'acier (Burger), d'où la nécessité d'en changer. Les alternatives existent, or elles sont plus rapides et plus simples à mettre en œuvre.

3. DÉFINITIONS

3.1. Densité et densité apparente (D_a)

La densité est une masse volumique. La densité apparente d'un sol est la masse de terre fine sèche du sol par unité de volume apparent de la terre fine.

Il s'agit donc de g/cm^3 , ou de Kg/L , ou de t/m^3 . Ces trois systèmes d'unité sont homogènes : la valeur dans l'un est conservée dans l'autre.

3.2. Densité réelle (ρ)

Il s'agit de la densité des particules du sol. Elle peut être mesurée mais varie peu et par convention la valeur de $2.65 g/cm^3$ est utilisée.

3.3. Volume apparent (Va)

Il s'agit du volume du sol non remanié, c'est-à-dire y inclus la porosité. Pour le connaître on doit prélever un volume de sol intact.

3.4. Terre fine (tf)

Il s'agit de la fraction inférieure à 2 mm. Le sol prélevé doit donc être tamisé à 2 mm. Les éléments supérieurs à 2 mm ne sont pas pris en compte. Leur masse et leur volume doivent donc être soustraits.

Par convention, la masse de sol dans un résultat d'analyse correspond toujours à la masse de terre fine séchée à 105 °C.

3.5. Fraction grossière (masse Mg et volume Vg)

Par convention, il s'agit de la fraction de taille supérieure à 2 mm, donc du refus à 2 mm lors du tamisage de la terre fine.

3.6. Succion ou potentiel matriciel

C'est l'énergie de liaison entre l'eau et le sol que l'on mesure avec un tensiomètre. L'équilibrage des échantillons à un potentiel matriciel fixé se fait avec une table à succion (ci-dessous).

4. INTÉRÊT DE LA MESURE

En connaissant la densité apparente D_a , on peut connaître la porosité volumique d'un sol, soit le pourcentage de volume du sol occupé par de la porosité.

En notant P la porosité volumique (en % du volume), P est donné par :

$$P = 1 - \frac{D_a}{\rho} \quad \text{Avec } P \text{ en \% du volume}$$

Soit en % de volume, $P\% = P \cdot 100$

On verra qu'en général la porosité d'un sol est supérieure à 50% de son volume.

Attention, en accord avec ce qui précède, la porosité est celle de la terre fine, dont la masse est prise séchée à 105°C. Le volume V_a observé dépend de l'état de gonflement en fonction du potentiel matriciel imposé, et auquel le volume V_g des éléments grossiers > 2 mm a été déduit.

La mesure de D_a est utilisée pour savoir si un sol est plus ou moins compact. Nous verrons que cette mesure est fréquemment entachée d'erreurs, et que son interprétation a des limites. Cependant ces erreurs et limites sont aujourd'hui faciles à dépasser.

5. CALCUL DE LA DENSITÉ APPARENTE

Le calcul de la densité apparente nécessite de connaître :

- le volume apparent du sol V_a et sa masse sèche M_s à 105 °C ;
- la masse M_g et le volume V_g des éléments grossiers (refus au tamis à 2 mm) ;
- la masse de terre fine sèche M_{tf} et son volume apparent V_{tf} .

Le protocole de prélèvement et de mesure (ci-après) vise à obtenir ces informations. La densité apparente du sol est par définition le rapport entre la masse de la terre fine et le volume de la terre fine, soit :

$$D_a = M_{tf} \div V_{tf}$$

$$M_{tf} = M_s - M_g$$

$$V_{tf} = V_a - V_g$$

6. MODE OPÉRATOIRE

6.1. Prélèvement d'un échantillon non remanié

Pour connaître V_a il faut extraire du sol un élément non remanié (à structure conservée) et en déterminer le volume.

La méthode conventionnelle consiste à enfoncer un cylindre métallique (Burger) dans le sol, de volume intérieur connu. Les limitations de cette méthode justifient aujourd'hui de l'abandonner.

Il est désormais possible d'extraire un volume de géométrie variée et d'en mesurer très facilement le volume. Outre le gain de temps, cela procure un gain considérable de précision, notamment en permettant de ne pas dépendre de l'état de gonflement du sol au moment du prélèvement (ci-dessous).

6.1.1. Préleveur pour cylindre de sol extractible HEPIA

Ce préleveur cylindrique est conçu pour :

- permettre d'extraire l'échantillon du préleveur pour l'équilibrer à une succion standard, au laboratoire, sans exercer de contrainte sur son gonflement (ci-après) ;
- s'enfoncer facilement et rapidement dans le sol quel que soit l'état (sec ou humide) de ce dernier ;
- permettre de contrôler visuellement la qualité de l'échantillon (remanié ou non) après extraction ;
- garantir un transport sans risque de casser l'échantillon.

Son usage va de pair avec une méthode de mesure de volume au laboratoire ne nécessitant pas de recouper l'échantillon.

Ce préleveur et la mesure de volume associé améliore considérablement la capacité de diagnostic des mesures de densité apparente.

Vidéo de démonstration : https://www.youtube.com/watch?v=Y-CORRkH_xU

On trouvera un mode d'emploi avec un dossier photos en Annexe 1.

6.1.2. Mesure sur mottes

Ceci est également possible (par exemple lorsqu'un sol est trop caillouteux pour le préleveur). La motte est équilibrée à une succion standard au laboratoire puis son volume est mesuré avec l'une des deux méthodes ci-dessous (poche plastique ou laser).

6.1.3. Méthode au cylindre d'acier (Burger) – Obsolète

Cette méthode au cylindre d'acier est la plus répandue. Pour rappel, elle consiste à enfoncer un cylindre métallique dans le sol, de volume intérieur connu, puis de recouper le sol à raz de la limite de ce cylindre (araser perpendiculairement au cylindre à chaque extrémité). Elle ne donne pas satisfaction, car elle offre une capacité très limitée à distinguer des sols compactés et non compactés. En effet la mesure du volume est dépendante de l'état de gonflement sur le terrain. De ce fait, quand le volume initial est mesuré à un état sec, et le volume après atteinte est mesuré à un état humide, il est courant de trouver un volume de sol (et donc un volume poral) plus élevé après atteinte qu'avant !¹.

On ne peut pas rééquilibrer l'humidité du sol au laboratoire si le sol est prisonnier du cylindre d'acier il ne peut alors pas regonfler ce qui rend l'opération inutile.

À cela s'ajoutent les difficultés de prélèvement suivantes.

- En sol caillouteux, il est difficile d'introduire le cylindre dans le sol, au risque de l'endommager, ou encore de voir la structure interne perturbée par un élément grossier repoussé par le cylindre lors de l'enfoncement. Or ceci ne se voit pas !
- Il faut ensuite recouper le cylindre au droit des bords. Là encore en cas de présence d'éléments grossiers ou de racines, cette opération est délicate voire impossible, obligeant à répéter l'opération.

On trouvera des images d'illustration de la méthode en Annexe 2.

6.2. Équilibrage des échantillons de sol à une succion (potentiel matriciel) standard

Le sol exerce une succion sur l'eau. La notion de physique correspondante est celle de potentiel matriciel, qui exprime cette succion par différence avec la pression atmosphérique (pression de l'eau libre, non retenue). Le potentiel matriciel est donc négatif et par convention exprimé en Pascal. Cette pression est parfois exprimée en cm d'une colonne d'eau, ou en bars. La correspondance entre unités est la suivante : 1 mbar = 1 hPa = 1 cm H₂O. Les manomètres des tensiomètres sont souvent gradués en cbar, 1 cbar = 10 hPa = 1 kPa.

Enfin, si le potentiel matriciel est par convention négatif, on parle souvent de succion qui est le potentiel matriciel en valeur absolu (ce qui est plus simple). Un potentiel matriciel de -100 hPa correspond donc à une succion de 100 hPa ou 10 kPa ou 10 cbar.

¹ Voir par exemple (Boivin, et al., 2006) (Goutal, et al., 2012) (Schäffer, et al., 2008).

Un équilibrage des échantillons à une succion standard est à effectuer impérativement avant mesure du volume apparent V_a . En effet le volume apparent du sol change avec son humidité (potentiel matriciel ou succion). Pour disposer d'échantillons au même état de gonflement, et éliminer ainsi ce biais considérable, il faut utiliser une table à succion telle que celle proposée par Eijkelcamp (Figure 1).

On recommande d'équilibrer les échantillons à -100 hPa (pF2, capacité au champ) ce qui permet de réaliser les meilleurs diagnostics, notamment de calculer l'indice de dégradation de la structure (Johannes et al., 2019). La valeur -100 hPa correspond à la quantité d'eau maximale retenue par un sol après drainage rapide, appelée « capacité au champ » en agronomie.

Pour cela les échantillons doivent pouvoir gonfler librement, ils ne peuvent donc pas être dans des cylindres métalliques.

Il est aussi possible, en l'absence de cet équipement, de faire les mesures sur les échantillons secs à l'air². C'est toujours préférable que de mesurer le volume à l'état de gonflement lors du prélèvement, donc variable d'un échantillon à l'autre.



Figure 1 Table à succion également appelée table kaolin, source Eijkelcamp®

² Il est aussi possible d'équilibrer les échantillons à -10 hPa à faible coût au moyen d'un tissu éponge trempant dans de l'eau, posé sur une cale en bois de 5 cm de hauteur dans une bassine, sur lequel l'échantillon est posé et une seconde bassine est superposée (à l'envers) pour éviter l'évaporation pendant l'équilibrage.

6.3. Mesure du volume apparent V_a d'un échantillon sol

Cette détermination est la plus critique. Pour connaître V_a il faut extraire du sol un élément non remanié (à structure conservée) et en déterminer le volume.

6.3.1. Mesure du volume à la poche plastique

Cette méthode est présentée dans l'article (Boivin, et al., 1990). Elle est illustrée dans la vidéo https://www.youtube.com/watch?v=Y-CORRkH_xU et en Annexe 3. Elle est rapide (2 à 3 minutes) et non destructrice de l'échantillon. Sur échantillon humide il est recommandé de faire 3 mesures.

Résumé

- L'échantillon est placé dans un sachet de plastique fin et souple (petit sachet à congélation).
- Le vide est effectué dans le sachet au moyen d'une pompe à vide³.
- Le vide ne doit pas être trop élevé (400 à 600 hPa maximum).
- Dès que le plastique adhère au sol, on plonge ce dernier dans un seau d'eau placé sur une balance tarée, en évitant de toucher le fond et les parois du seau. La poussée d'Archimède est immédiatement lue sur la balance : la lecture en g correspond au volume du sol en cm³.
- On déduit le volume du plastique immergé.

Il est recommandé de s'exercer sur des pierres de volume proche de celui des échantillons de sol. Leur volume peut être mesuré par poussée d'Archimède en immergeant directement la pierre, et comparé à celui mesuré en utilisant la poche plastique. En s'exerçant sur une dizaine de pierres de forme variée, on maîtrise rapidement la technique, ce qui se contrôle en trouvant une régression 1 :1 entre les mesures directes et celles utilisant la poche plastique.

6.3.2. Mesure du volume au scanner 3D de bureau

Il existe maintenant des petits scanners de bureau 3D à faible coût (p.ex. EinScanSP 3D scanner form SHINING 3D[®] en Figure 2). En plaçant l'échantillon sur le plateau du scanner, on obtient son volume en quelques dizaines de secondes. La méthode est non destructrice.

³ Il existe de simples pompes à effet venturi en plastique se montant sur robinet en l'absence de pompe à vide.



Figure 2 Scanner 3D de bureau et son installation

6.4. Mesure de la masse et du volume des éléments grossiers

Après mesure du volume, l'échantillon est séché à 105°C, pesé (M_s), émiétté et tamisé à 2 mm. Les grossiers sont pesés (masse M_g) et leur volume V_g est soit mesuré (immersion et poussée d'Archimède directe à l'aide d'un sachet de gaze), soit déduit de la masse selon :

$$V_g = M_g \div 2.65$$

L'adoption d'une densité réelle des grossiers standard n'a que peu d'impact sur le volume déterminé. Cependant, selon leur nature, leur densité réelle peut varier de 2.8 g/cm³ à 2.4 g/cm³. En cas de doute et si leur volume est important, il est donc recommandé de mesurer ce volume.

7. CALCULS

7.1. Densité apparente de la terre fine (g/cm³)

$$D_a = \frac{(M_s - M_g)}{(V_a - V_g)} = \frac{M_{tf}}{V_{tf}}$$

Avec V_a : volume apparent de l'échantillon, V_g : volume des grossiers, M_s : masse de l'échantillon séché à 105°C, M_g : masse des grossiers ; M_{tf} masse de la terre fine sèche à 105°C, V_{tf} volume apparent de la terre fine.

7.2. Porosité P

$$P = 1 - \frac{D_a}{\rho}$$

Avec D_a densité apparente et ρ densité réelle des particules du sol (2.65 g/cm³)

7.3. Teneur en eau gravimétrique W (g/g)

W est calculé avec M_e : masse de l'échantillon à -100hPa.

$$W = \frac{(Me - Ms)}{Mtf}$$

7.4. Teneur en eau volumique θ

Par convention θ est exprimé en cm^3/cm^3 , c'est à dire la correspondance g/cm^3 avec $1 \text{ g eau} \approx 1 \text{ cm}^3$.

$$\theta = W \times Da$$

8. ÉCHANTILLONNAGE

Réaliser un diagnostic sur la base de ces mesures suppose un plan d'échantillonnage adapté. Le plan d'échantillonnage doit répondre aux questions et objectifs de l'étude.

Deux modèles de stratégies d'échantillonnage existent : réaliser un grand nombre de mesures dans l'hypothèse de représenter statistiquement chaque situation, ou réaliser un échantillonnage dirigé sur des situations a priori représentatives estimées visuellement.

La deuxième stratégie est plus économique et est souvent la seule possible. Elle est justifiée par la relation existant entre les propriétés visuelles (qualité de la structure) et tactiles (compacité), et la porosité totale. Cette relation n'est toutefois pas linéaire (Johannes, et al., 2017). Un échantillonnage intensif est plus coûteux mais sera nécessaire si une différence statistiquement défendable doit être mise en évidence.

Un échantillonnage dirigé permet des comparaisons relatives, par exemple pour comparer une zone de chantier d'une zone de terrain intacte. Néanmoins, la notion de zone homogène tant horizontale que verticale est fondamentale pour l'interprétation des résultats. Une observation préalable, p.ex. test bêche, aide à localiser les points d'échantillonnages pour les prélèvements. Les principes d'échantillonnage décrits dans le manuel OFEV (Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour analyse des substances polluantes, 2003) sont aussi applicables pour des analyses physiques.

9. AUTRES APPLICATIONS

Si la valeur de densité apparente est utile pour apprécier la compacité du sol, il est possible de recourir, sur la base des mesures effectuées, à deux considérations supplémentaires pour un diagnostic étendu.

Dans l'horizon A la densité apparente est fortement influencée par la teneur en carbone organique. La relation obtenue pour les sols du plateau Suisse est présentée en Annexe 4. Une valeur nettement supérieure à cette relation implique un sol compacté.

Compaction et dégradation de la structure ne signifient pas la même chose. Une compaction se fait au détriment des pores grossiers et se manifeste par une densité apparente relativement élevée. Une dégradation de la structure se manifeste par une absence d'air dans l'échantillon à la capacité au champ, sans que le sol soit nécessairement compacté (c'est un manque de pores à drainage rapide). L'indice de dégradation de la structure a été proposé dans le projet Strudel pour les sols du plateau suisse (Johannes, et al., 2019). Selon cette recherche, la valeur

critique pour une structure dégradée correspond à un seuil de teneur en air à -100 hPa de 0.068 cm³/g. Une teneur en air inférieure correspond à une structure dégradée.

La teneur en air Air_{-100} est obtenue par :

$$Air_{-100} = \frac{1}{Da} - W - \frac{1}{2.65}$$

10. ERREURS LES PLUS COURANTES

10.1. Utiliser la masse de sol frais

Il est absolument erroné d'utiliser la masse de sol frais. La valeur de densité apparente se réfère toujours à la masse de terre fine sèche à 105°C.

Utiliser la masse fraîche reviendrait à trouver plus dense (donc moins poreux) un sol plus humide. Il n'en est rien : l'eau se trouve dans la porosité.

Pourtant cette erreur est couramment constatée !

10.2. Ne pas tenir compte des grossiers

La présence d'un gravier ou d'un petit caillou dans l'échantillon est absolument aléatoire, non représentative de leur fréquence et distribution dans le sol. Elle ne nous renseigne en rien sur la porosité du sol qui se situe dans la terre fine.

Il faut donc absolument soustraire le volume V_g et la masse M_g des éléments grossiers, après passage au tamis à 2 mm, des volumes V_a et masse sèche M_s de l'échantillon.

Ce n'est pas un détail et c'est fréquemment oublié.

RÉFÉRENCES

Boivin, P., Brunet, D. & Gascuel-Oudou, C., 1990. Densité apparente d'échantillon de sol : méthode de la poche plastique. *Milieux Poreux Transf. Hydr. Bull GFHN*, Volume 28, p. 59–71.

Boivin, P. et al., 2006. Assessment of soil compaction using shrinkage curve measurement and modeling : Experimental data and perspectives. *Soil Tillage Res.*, Issue 88, p. 65–79.

Goutal, N., Ranger, J. & Boivin, P., 2012. Assessment of the natural recovery rate of soil specific volume following forest soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Issue 76, p. 1426–1435.

Johannes, A., Weisskopf, P., Schulin, R. & Boivin, P., 2017. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure?. *Soil Tillage Res.*, Volume 173, p. 24–32.

Johannes, A., Weisskopf, P., Schulin, R. & Boivin, P., 2019. Soil structure quality indicators and their limit values. *Ecol. Indic.*, Issue 104, p. 686–694.

Schäffer, B., Schulin, R. & Boivin, P., 2008. Changes in shrinkage of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery. *Eur. J. Soil Sci.*, Issue 59, p. 771–783.

ANNEXE 1 : PRÉLEVEUR HEPIA - MODE D'EMPLOI

Le préleveur HEPIA est constitué de 3 éléments vissés ensemble (Figure 3, de gauche à droite) : un emporte-pièce qui découpe le sol ; un cylindre d'acier ; un manche à frapper. Le cylindre en acier contient un cylindre en PVC fendu dans le sens de la longueur et dans lequel on introduit un sachet en plastique souple (Figure 4).



Figure 3 Différentes pièces du préleveur et cylindre de PVC interne



Figure 4 Cylindre de PVC fendu destiné à recueillir le sachet souple et l'échantillon de sol

Le préleveur est enfoncé dans le sol au moyen d'un marteau puis extrait du sol (Figure 5).



Figure 5 Prélèvement de l'échantillon de sol au moyen du préleveur HEPIA



Figure 6 Ouverture du préleveur et contrôle de la qualité de l'échantillon

La qualité de l'échantillon est immédiatement contrôlée, puis l'échantillon est remis dans le cylindre PVC, le tout dans un sachet plastique fermé pour le transport.



Figure 7 Contrôle de l'échantillon avant de le remettre dans le cylindre PVC pour le transport.

ANNEXE 2 : MÉTHODE AU CYLINDRE D'ACIER BURGER – ILLUSTRATIONS



Figure 8 Prélèvement de cylindre de sol non remanié, réalisation d'un pré-trou.



Figure 9 Prélèvement de cylindre de sol non remanié, enfoncement par percussion à l'aide d'un emporte-pièce.



Figure 10 Prélèvement de cylindre de sol non remanié, recoupage du cylindre au droit des bords.

ANNEXE 3 : MÉTHODE DE MESURE DU VOLUME À LA POCHÉ PLASTIQUE - ILLUSTRATIONS



Figure 11 Insertion de l'échantillon dans le plastique et application d'un vide partiel (-400 à -600 hPa).



Figure 12 Mesure du volume par poussée d'Archimède

ANNEXE 4 : RELATION ENTRE LA DENSITÉ APPARENTE DES SOLS ET LEUR TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE, HORIZONS A DU PLATEAU SUISSE

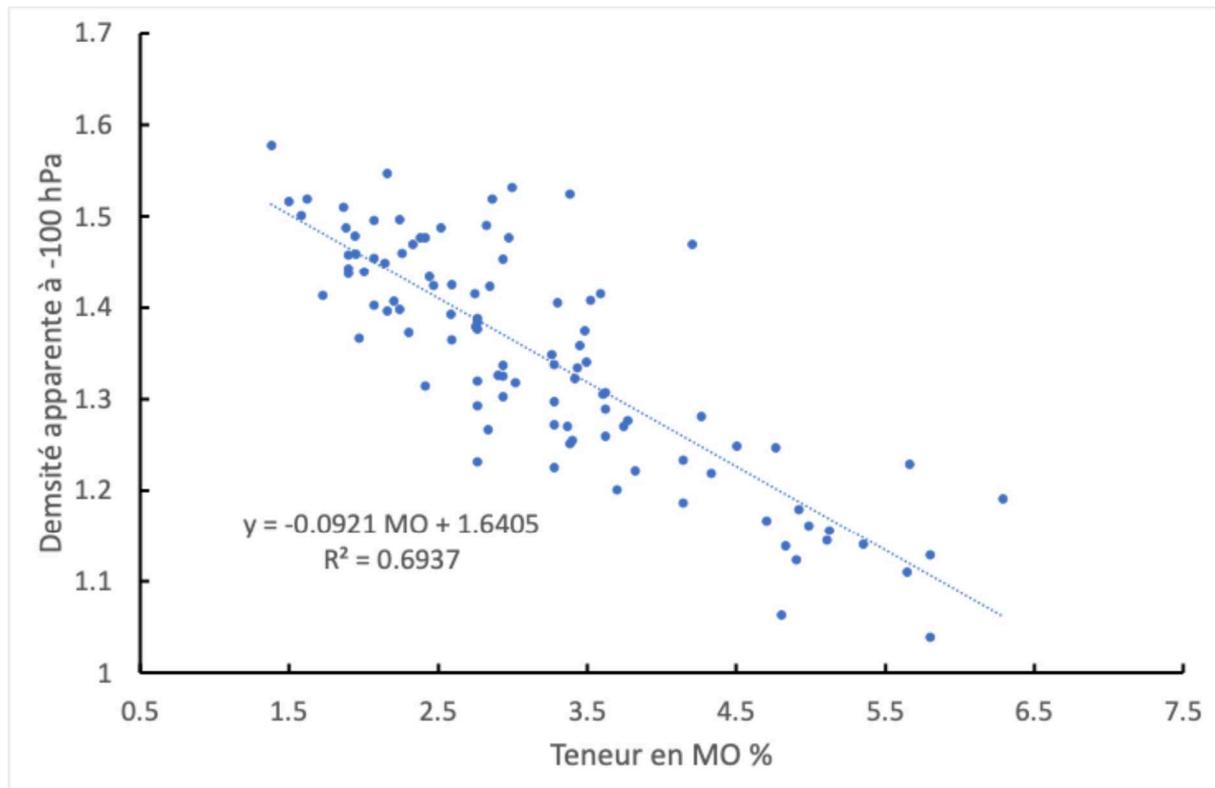


Figure 13 Relation régionale entre la densité apparente du sol à -100 hPa et sa teneur en matière organique pour le plateau suisse (base de données HEPIA sols et substrats).