



**International Test and Evaluation
Program
for Humanitarian Demining**

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

AACEN 15044 : 2009 ; Complément 3

RETOUR D'EXPERIENCE

**Test et évaluation de l'équipement de déminage mécanique selon
l'accord d'atelier du CEN (AACEN 15044:2004, remplacé par l'AACEN
15044:2009)**

**3^{ème} Partie: Mesure du compactage et de la teneur en humidité du sol
dans les zones de test de l'équipement de déminage mécanique
(dernière mise à jour : 3 décembre 2009)**

ITEP Working Group on Test and Evaluation of Mechanical Assistance Clearance Equipment
(ITEP WGMAE)

Table des matières

1. Contexte.....	2
2. Définitions.....	3
3. Mesure de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol	5
3.1. Introduction.....	5
3.2. Détermination de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol des échantillons prélevés sur le terrain.....	5
3.2.1. Prélèvement des échantillons.....	5
3.2.2. Calcul de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol.....	6
3.3. Détermination de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol directement sur le terrain (in situ)	7
3.3.1. Densimètre Nucléaire (densité du sol et teneur en humidité).....	7
3.3.2. Pénétromètre (résistance du sol).....	8
3.3.3. Sonde et compteur à constantes diélectriques (teneur en humidité du sol).....	11
4. Références.....	12
5. Annexe 1: Relation, dite « standard de Proctor », entre la teneur en humidité optimale et la densité apparente sèche.....	14
6. Annexe 2: Protocoles et formules pour déterminer la densité apparente du sol humide, la densité apparente du sol sec et la teneur en humidité sur des échantillons de sol.....	17
6.1. Protocole pour l'extraction d'échantillon du sol.....	17
6.2. Protocole pour déterminer le poids d'un échantillon de sol séché à l'étuve.....	18
6.3. Protocole pour déterminer la masse et le volume de gros fragments/roches dans un échantillon de sol.....	19
6.4. Formules pour calculer la densité apparente humide, la densité apparente sèche et la teneur en humidité.....	19
6.5. Extraction d'échantillons de sol selon la technique d'excavation – illustrations.....	21

1. Contexte

L'accord d'atelier CEN sur le test et l'évaluation des Machines de Déminage (AACEN 15044) recommande la mesure du compactage de la terre (ou de la densité apparente) dans les zones de test avant l'exécution d'un essai de performance ou d'acceptation pour évaluer la neutralisation de la mine et/ou la performance de pénétration dans le sol. Il est démontré que le compactage du sol est un facteur important, qui influence la performance de l'équipement mécanique travaillant dans le sol, ainsi qu'une caractéristique cruciale déterminant la fiabilité des résultats des tests de performance [voir document 1 de la liste de références, en pages 12 et 13]. De plus, la connaissance du compactage du sol peut aussi être fondamentale pour optimiser les paramètres du fléau, comme le type de marteau du fléau et la vitesse de rotation du fléau, pour des conditions opérationnelles spécifiques [24]. Ce document fournit un résumé des définitions utilisées dans l'AACEN 15044 et répertorie les méthodes habituellement utilisées pour mesurer le compactage et l'humidité du sol.

2. Définitions

Le compactage est une réduction du volume d'une masse donnée de terre, composée de particules solides de terre, d'air et d'eau, par application d'énergie mécanique. Il implique une expulsion de l'air sans modification importante de la quantité d'eau dans la masse de terre (figure 1). Ainsi, *la teneur en humidité* de la terre, définie comme le rapport du poids de l'eau au poids des particules de terre sèche, est normalement la même pour la terre meuble et pour la même terre après compactage [2].

Quand la terre est compactée, sa porosité diminue. Le degré de compactage est mesuré en termes de *Masse Volumique apparente (M_{Va})* ou encore *Densité Apparente Sèche*. La Masse volumique apparente est le rapport entre la masse de solides/particules séchés à l'étuve (105° - 110° C) et le volume de terre, qui inclut le volume des particules et l'espace entre les particules de terre (g/cm³)¹ [5].

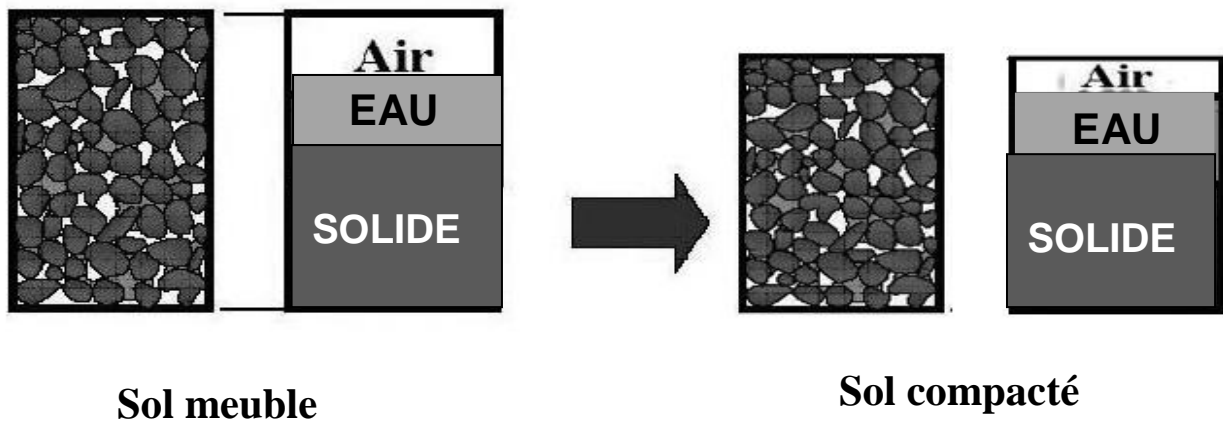


Figure 1: Le compactage du sol implique une expulsion d'air sans changement significatif de la quantité d'eau dans la terre

Pour n'importe quel type de terre et pour une somme d'effort de compactage donnée, la masse volumique apparente obtenue dépend de la teneur en humidité. Dans le cas d'une faible teneur en humidité, il y a une plus grande friction entre les particules de terre, rendant leur déplacement plus difficile et donc le compactage plus délicat. Une teneur en humidité croissante réduit la friction entre particules et permet un compactage plus important et donc des densités apparentes plus importantes. La densité apparente augmente lorsque la teneur en humidité augmente, jusqu'à un certain point. Au-delà de ce point, toute augmentation de la teneur en humidité a tendance à réduire la densité apparente, car l'eau occupe l'espace entre particules solides [3, 4]. Ce pic de densité apparente est la **densité apparente maximale** qui peut être obtenue, tandis que la teneur en humidité correspondant à la densité apparente maximale est souvent appelée **teneur en humidité optimale** (figure 2).

¹ La densité de particules du sol (D_p) renvoie à la masse d'une unité de volume des particules d'un sol compact. Elle diffère de la densité apparente dans la mesure où elle ne prend pas en compte l'espace entre les particules.

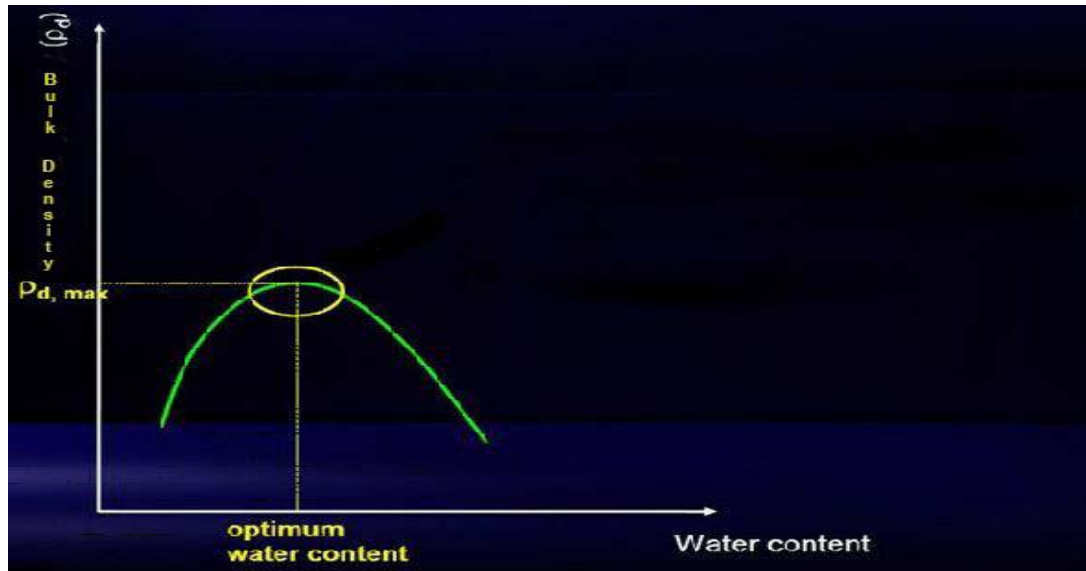


Figure 2 : Exemple d'une courbe de compactage indiquant la teneur en humidité optimum du sol et la densité apparente maximale pour un effort de compactage spécifié (adapté de [6])

La densité apparente maximale et la teneur en humidité optimum dépendent de la texture de la terre et de l'effort de compactage. Par conséquent, les densités apparentes sont souvent, quand cela est spécifié, indiquées par un certain pourcentage de la densité apparente maximale, déterminée par un test de compactage parfaitement défini, tel que le **Test de compactage standard de Proctor**. Ce test de compactage est le plus fréquemment utilisé pour déterminer de façon expérimentale la relation entre la teneur en humidité et la densité apparente, et donc la teneur en humidité optimale et la densité apparente maximale d'un sol. C'est un test de laboratoire où l'on tasse le sol avec des teneurs en humidité variables ; il est défini par the «American Association of Highway Officials» et «American Standard Testing Material» (ASTM D-698, AASHTO T-99) [9]. De plus amples détails peuvent être trouvés dans [7], [8] et [25]. Le test de Proctor est conçu pour aider dans le compactage du terrain de terrassement et est souvent utilisé pour la construction de routes, afin d'indiquer le compactage du sol qui devrait être obtenu avant le revêtement routier [25.] En général, ces spécifications sont données sous la forme d'un pourcentage de la densité apparente maximale ; cette valeur est appelée la **Densité relative du sol ou le Compactage Relatif**². En général, la teneur en humidité optimum tirée du test de Proctor pour un sol donné est un guide utile pour évaluer la teneur en humidité qui convient au compactage du sol³ [23].

Le AACEN 15044 recommande la détermination de la relation, selon le standard **de Proctor**, entre la teneur en humidité/densité sèche pour tous les couloirs de test utilisés pour les tests de performance du déminage mécanique. Beaucoup de laboratoires d'*Ingénierie et d'analyse du sol* peuvent réaliser le test Standard de Proctor. Le compactage des couloirs de test standards est

² Les spécifications communes pour la construction de route sont des compactages relatifs de 90 à 95% de la densité sèche maximale standard de Proctor [23].

³ En général, pour les conditions climatiques du Royaume-Uni, les sols de bonne qualité ou classés « uniformes » sont propices au compactage si leurs teneurs en humidité in-situ ne dépassent pas de plus de 0,5 à 1,5% la teneur en humidité pour la densité sèche maximale déterminée avec le test standard de Proctor [23].

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

décrit dans le AACEN 15044 comme une densité relative du sol, c'est-à-dire le gravier, le sable et les couloirs de test du sol local doivent, avant le test, être compactés à 92-96 %, 88-92% et 83-87% de leurs densités apparentes maximales respectives. L'annexe 1 fournit un exemple de courbe de la relation entre la teneur en humidité et la densité apparente (standard de Proctor) pour les couloirs de test du SWEDEC dans le sol local du complexe destiné au test de l'équipement de déminage mécanique à Nora Kulla. De plus cela illustre la manière dont les informations données par cette courbe sont utilisées pour préparer le couloir du test avant l'exécution du test de performance du AACEN 15044.

3. Mesure de la densité apparente et de la teneur en humidité du sol

3.1 Introduction

La détermination de la densité apparente sèche du sol et de la teneur en humidité du sol s'effectue généralement à partir du prélèvement d'un volume de sol défini (échantillon de terre) qui est séché dans un four (105 degrés C ou 220 degrés F) puis pesé. Le poids sec du sol divisé par le volume donne la densité apparente sèche en g/cm^3 . Plusieurs méthodes existent, qui diffèrent sur la façon dont l'échantillon est obtenu et dont son volume est déterminé (méthode de l'échantillon carotté et du volume d'excavation) [11]. À l'exception des sols récemment travaillés, la densité apparente sèche varie peu quand on se déplace. Ainsi, environ quatre échantillons d'un sol, de type et de profondeur particuliers, devraient suffire pour estimer la densité sèche moyenne avec un écart inférieur à 10 % par rapport aux vraies valeurs, dans 95 % des cas [28].

Des principes complètement différents sont employés quand la densité apparente du sol est déterminée avec la méthode ayant recourt aux radiations (densimètre nucléaire) ou estimée par la méthode de la résistance du sol (pénétrromètre). Ces méthodes impliquent la mesure des radiations gamma transmises ou dispersées [10] et la détermination de la résistance du sol à la pénétration verticale d'une sonde ou d'un cône [19]. Alors que les densimètres nucléaires permettent la conversion directe des relevés en valeurs de densité apparente du sol sec (et de la teneur en humidité du sol), les pénétrromètres fournissent une mesure relative de la densité du sol (index du cône de sol) qui ne peut être directement convertie en valeurs absolues de densité du sol.

3.2 Détermination de la densité apparente et de la teneur en humidité du sol des échantillons prélevés sur le terrain

3.2.1 Prélèvement des échantillons

Le carottage est la technique de prélèvement de sol la plus répandue pour mesurer la densité apparente du sol sec pour les terres agricoles. Un outil de terrain utilisé pour le carottage (figure 3) comprend un cylindre enfoncé dans le sol pour extraire un échantillon d'un volume défini (cylindre). Cette méthode est relativement simple et rapide. Cependant, la tarière a une utilité limitée dans les terrains très secs ou très humides, et perd en précision dans les terrains caillouteux ou rocaillieux [11].

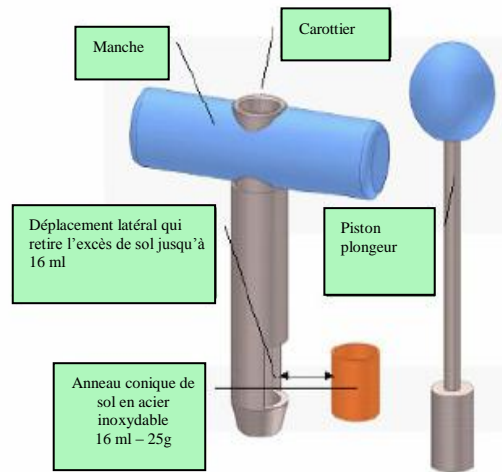


Figure 3: Exemple d'un kit de carottage de sol

La **technique d'excavation d'un volume** est plus souvent utilisée par les techniciens afin d'effectuer les prélèvements pour mesurer la densité apparente du sol sec. Un petit trou est creusé et tout le sol en est retiré. Le volume du trou est mesuré en y insérant un film de plastique dans lequel on verse une substance d'une densité définie (sable, eau ou huile) pour déterminer le volume de matière requis pour remplir le trou. Pour une estimation précise du volume, on doit bien niveler la surface du sol avant toute prise d'échantillon et recueillir toute la terre retirée du trou [11]. Le faible coût et la grande disponibilité des outils requis pour la technique d'excavation d'un volume en font une technique appropriée afin de déterminer la densité apparente du sol lors des tests d'équipements de déminage. Cette technique a été utilisée lors des essais du Bozena-4 et du Fléau MV-4 [1]. Cependant, lorsque les échantillons doivent être prélevés à différentes profondeurs dans le profil du sol, la méthode d'excavation ne peut être appliquée, car elle requiert une surface plane relativement grande autour de chaque trou.

Le poids sec et le volume de l'échantillon de terre sont ensuite utilisés pour calculer la densité apparente sèche du sol et la teneur en humidité. Notez que, quand la densité apparente du sol est ainsi déterminée, on obtient la densité apparente de la fraction de sol fin (taille de la particule < 2 mm). Quand des gros fragments/rochers sont présents dans le sol, leur densité est soustraite de la densité de l'échantillon total du sol afin d'obtenir la densité apparente du sol [13].

3.2.2 Calcul de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol

L'annexe 2 fournit les protocoles détaillés pour 1) prélever un échantillon du sol selon la méthode d'excavation du sol, 2) déterminer le poids d'un échantillon de terre séché à l'étuve et 3) déterminer la masse et le volume de gros fragments/rochers dans un échantillon de terre. De plus, elle inclut toutes les formules requises pour calculer la densité apparente du sol humide, la densité apparente du sol sec et la teneur en humidité du sol.

3.3 Détermination de la densité apparente du sol et de la teneur en humidité du sol sur le terrain (in situ)

3.3.1 Densimètre Nucléaire (densité du sol et teneur en humidité)

Les densimètres nucléaires sont une série d'appareils qui mesurent la détérioration d'une source radioactive ; ils établissent une corrélation entre cette détérioration et la densité ainsi que la teneur en eau du sol. Lorsque les densimètres nucléaires sont utilisés, deux paramètres indépendants sont déterminés : la densité humide du sol et la teneur en humidité du sol.

Pour déterminer la densité humide du sol, soit une source radioactive-isotope (Césium 137) est placée sur la surface du sol (rétrodiffusion), soit une sonde est plantée dans le sol (transmission directe). La source de l'isotope dégage des photons (normalement des rayons gamma) qui sont éparpillés en raison des collisions avec les électrons d'atomes rencontrés. Plus la densité du milieu environnant est élevée, plus l'éparpillement est important. Dans le domaine des densités normalement rencontrées dans les sols, une plus grande dispersion a pour résultat un nombre moins important de rayons Gamma lus par le détecteur situé à la partie inférieure de l'unité, et donc des relevés de densité du sol plus faibles [7, 17].

La mesure de la teneur en humidité du sol est basée sur le principe suivant : lorsque les neutrons rapides émis par une source radioactive (Américium 241/Béryllium) entrent en collision avec des atomes d'hydrogène, ils sont ralentis de façon bien plus importante que lors de collisions avec d'autres atomes. Le nombre de neutrons lents ainsi produits est une mesure du nombre d'atomes d'hydrogène présents aux alentours de la source. Parce que l'eau est la source principale des atomes d'hydrogène dans un sol [20], la teneur en humidité du sol est immédiatement mesurée par la jauge comme la quantité de neutrons lents renvoyés [7]. Plus l'humidité du sol est importante, plus il y a de neutrons lents. Notez que la technique de mesure de l'humidité du sol utilisant les neutrons rapides donne l'humidité du sol sur une base volumétrique⁴ [22].

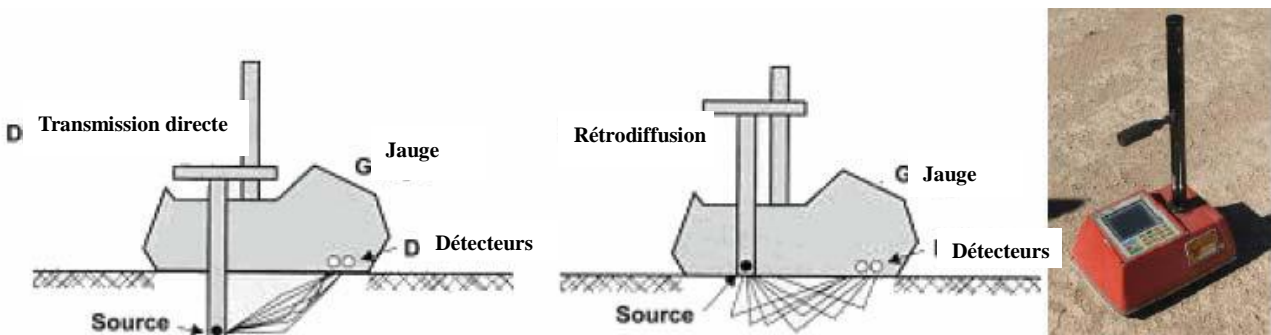


Figure 4: Présentation du principe de fonctionnement du densimètre nucléaire [7] et le densimètre nucléaire PortaProbe CPN MC-3, utilisé par le Centre suédois SWEDEC

⁴ voir annexe 2 pour les explications des termes de « teneur en humidité volumétrique » et « gravimétrique ».

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

La majorité des densimètres nucléaires disponibles dans le commerce affichent des relevés directs de la densité apparente humide du sol, de la teneur volumétrique en humidité et de la densité apparente sèche ainsi que de la densité relative du sol⁵. Avant chaque session de mesure, ils doivent être calibrés à l'aide d'un ensemble standard de matières à densité définie, habituellement livré avec le densimètre.

Les densimètres nucléaires permettent des mesures rapides, précises et renouvelables. Les instruments sont transportables et peuvent être utilisés facilement. Les inconvénients résident dans le fait que du matériel radioactif est utilisé, ce qui requiert une autorisation d'emploi ainsi que des opérateurs correctement entraînés. De plus, le matériel est cher et requiert un calibrage adéquat pour chaque site [21.] Par conséquent, les densimètres nucléaires ne sont probablement pratiques que pour une utilisation dans des zones de test permanentes ou pour des organisations effectuant beaucoup de mesures⁶.

Les instructions détaillées sur l'emploi du densimètre nucléaire peuvent être trouvées dans le document [18].

3.3.2 Pénétrromètre (résistance du sol⁷)

Le compactage du sol est lié à la résistance du sol, qui peut être mesurée à l'aide d'un pénétromètre à cône. Cet instrument mesure la résistance du sol à la pénétration verticale d'une sonde ou d'un cône. Il existe des pénétromètres portatifs et des pénétromètres installés sur des véhicules. Ces derniers sont enfoncés dans le sol à vitesse constante et à grande profondeur, et sont principalement utilisés pour des recherches concernant l'environnement et la géotechnique. Les pénétromètres à cône portatifs sont, de leur côté, principalement utilisés dans l'agriculture et l'horticulture, car ils s'efforcent de mesurer la résistance rencontrée par une racine lorsqu'elle pousse dans le sol. Ils sont plutôt faciles à utiliser, fournissent un résultat immédiat et sont relativement économiques [17.] Cependant, ils donnent seulement une donnée relative du compactage du sol et ne peuvent donc pas être utilisés comme un substitut pour des mesures directes de la densité apparente du sol [26]. Un calibrage adéquat des instruments est également requis, et des tests périodiques de la stabilité du calibrage, avant, pendant, et immédiatement après une utilisation sur le terrain sont recommandés [27].

Les pénétromètres à cône portatifs sont composés d'une tige ou d'un manche, qui est enfoncé dans le sol, de façon verticale généralement, et qui utilise un appareil pour mesurer la force requise pour insérer le dispositif jusqu'à une profondeur désirée. L'extrémité de la tige (la pointe) enfoncée dans le sol a, la plupart du temps, une forme conique. De la même façon, un certain nombre de méthodes pour mesurer la force sont utilisées, ainsi qu'une variété de dispositifs d'enregistrement. Les données du pénétromètre sont habituellement définies comme la résistance à la pénétration du sol, en termes de force de pénétration par unité de surface, exprimée en unités de pression. Pour les pénétromètres utilisant des pointes coniques, la pression de résistance est souvent appelée **l'index du cône (IC)**, exprimée en kilopascals (KPa) ou en livres par pouce carré (LPC, ou PSI en anglais) [26, 27.] La plupart des pénétromètres utilisés répondent aux standards de « l'American Society of Agricultural Engineers » (ASAE) adoptés en 1999, et ont un cône d'un angle de 30 degrés [27].

⁵ pour la densité relative du sol, les valeurs standards de Proctor (densité sèche maximum et teneur en humidité optimum) doivent être entrées.

⁶ le centre suédois SWEDEC utilise le [PortaProbe CPN MC-3](#) pour déterminer le compactage du sol dans les couloirs d'essais utilisés pour tester l'équipement mécanique de déminage.

⁷ Certains pénétromètres ont aussi été développés pour mesurer la teneur en eau du sol [27]. Ils ne sont pas inclus dans ce document.

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire



(a)



(b)



(c)

Figure 4: Pénétrömètre à cône statique portable (a) avec cadran indicateur, ce pénétrömètre étant utilisé lors de test de déminage mécanique (b) (© GICHHD) et pénétrömètre à cône statique portable avec affichage électronique (c).

Plusieurs facteurs affectent une lecture du pénétrömètre, particulièrement la teneur en eau du sol et la contexture du sol. Les valeurs de l'humidité du sol devraient être prises en compte lors de comparaisons entre les relevés du pénétrömètre, car elles changent les relevés de manière significative.

Les pénétrömètres sont classés en statiques ou dynamiques, selon la manière dont la force est appliquée au cône. Les pénétrömètres à cône statiques mesurent la force nécessaire pour enfoncer un cône métallique dans le sol à vitesse constante (Figure 4). La force est mesurée par une cellule de charge (ou une jauge de contrainte) à affichage analogique ou électronique. Bien que les méthodes d'utilisation du pénétrömètre statique soient standardisées (ASAE 1999), comparer les relevés peut encore s'avérer problématique [25]. Les pénétrömètres statiques doivent être déplacés dans le sol à vitesse constante (c.-à-d. à pression constante), ce qui signifie que des vitesses d'insertion différentes par des experts différents peuvent donner des résultats variables et affecter la répétabilité⁸. [26, 27.] Même la pression exercée par un même opérateur peut être difficile à appliquer à rythme constant et reproductible. La force de l'opérateur peut aussi limiter l'utilisation des pénétrömètres statiques dans les sols secs. La répétabilité, et les difficultés à prélever des échantillons sur des sols durs ou secs, sont les

⁸ Quelques pénétrömètres commerciaux portatifs disposent d'aides pour indiquer lorsque le taux de poussée souhaitable est dépassé [27].

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

principaux défauts pour ce type de pénétromètre.

Les pénétromètres dynamiques (figure 5] ne dépendent pas d'une vitesse constante de pénétration, car ils utilisent un extracteur à inertie, dont la masse et la hauteur de largage sont prédéterminées pour appliquer une énergie constante à chaque coup. Sont mesurés soit le nombre de coups requis pour atteindre une profondeur spécifiée, soit la profondeur de la pénétration de chaque coup. Le poids du marteau, la distance de glissement et l'angle du cône influencent l'énergie délivrée et peuvent être adaptés aux conditions locales (par exemple, sol dur plutôt que meuble). La résistance du sol est calculée à l'aide d'équations de référence qui prennent en compte les différences de poids du marteau, la hauteur de chute et la taille du cône. Les pénétromètres dynamiques ont tendance à donner des résultats plus constants et à avoir un plus grand potentiel de répétabilité, car ils ne dépendent pas du changement d'opérateur. Ils ont aussi moins de limitations dans les sols secs et ont tendance à être moins onéreux que les pénétromètres statiques (19, 26).

Un autre type de pénétromètre est le pénétromètre conique à chute libre. Cet instrument peu onéreux est facile à utiliser, rapide et précis et permet l'obtention de beaucoup d'échantillons sur une courte période, mais il ne peut être utilisé que pour mesurer les effets du compactage sur la surface du sol. Le dispositif se compose d'un cône de métal à 30 degrés et d'une tige, pesant en tout 2kg, et d'un tube-guide long de 1m en PVC ou en acrylique. Pour prendre une mesure, la base du tube-guide est placée sur la surface du sol et le cône est soulevé jusqu'à ce que son sommet soit au même niveau que le sommet du tube. Le cône est libéré et pénètre la surface du sol. La profondeur de pénétration est disponible au sommet du tube-guide, en relevant la mesure de la règle incrustée dans la tige [19].

Parce que les pénétromètres portatifs sont largement disponibles et relativement faciles à utiliser, ils peuvent fournir une indication utile sur le compactage du sol lorsque des tests de l'équipement mécanique de déminage sont menés sur le terrain. Cependant, il faut faire attention à les employer correctement et à n'utiliser les valeurs obtenues qu'à titre indicatif.



(a)



(b)

Figure 5 : Pénétromètre dynamique à cône avec un extracteur à inertie, des extensions de tige et le cône (a) et pénétromètre conique à chute libre en position (b)

3.3.3 Sonde et compteur à constantes diélectriques (teneur en humidité du sol).

Il y a diverses méthodes pour déterminer la teneur en humidité du sol. La méthode gravimétrique et les techniques par dispersion de neutrons ont été décrites dans les paragraphes précédents. Les méthodes des constantes diélectriques (figure 6) sont d'autres techniques fréquemment utilisées. Elles mesurent le contenu volumétrique d'humidité dans le sol (voir aussi annexe 2).

Les méthodes des constantes diélectriques cherchent à mesurer la capacité du sol à conduire des ondes ou des impulsions électromagnétiques à haute fréquence. Les valeurs obtenues sont liées, par calibrage, à la teneur en humidité du sol. Deux approches ont été développées pour mesurer la constante diélectrique du sol et en déduire la teneur en eau volumétrique du sol : *réflectométrie dans le domaine temps* (RDT) et *réflectométrie dans le domaine fréquence* (RDF). La différence est que la RDT mesure le temps mis par une onde électromagnétique pour traverser le sol d'une sonde à l'autre, alors que la RDF utilise des ondes radio pour mesurer la capacité du sol [22].

Les sondes RDF et RDT sont relativement bon marché, les sondes RDF étant les moins chères. Chaque type d'instrument fournit un affichage direct de la teneur en eau (pourcentage volumétrique) et est relativement précis sous réserve d'un calibrage minutieux [22]. De plus amples informations sur les sondes à constantes diélectriques, ainsi qu'une liste d'exemples, figurent en [12].

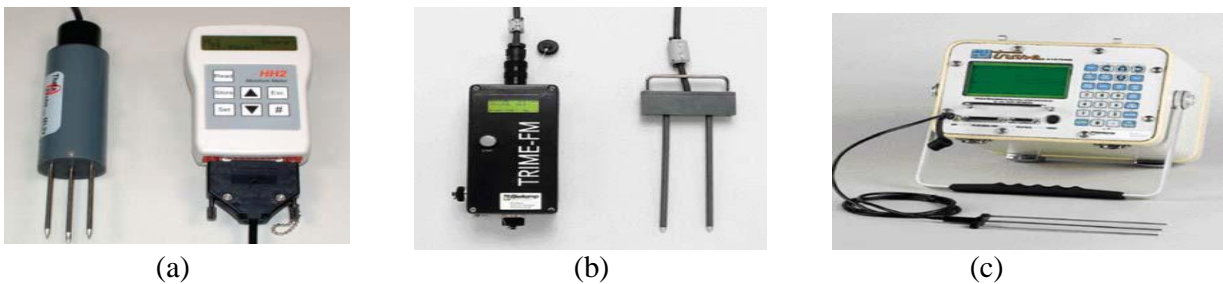


Figure 6 : Exemples d'appareils RDF (a) et RDT (b, c) composé d'un compteur et d'une sonde de mesure

4. Références

- [1] Demonstration Trial of Bozena-4 and MV-4 Flails, G. C. Coley, D. J. Roseveare, P.G. Danielsson, T.T. Karlsson, S. M. Bowen, L. M. Wye, F. C. A. Borry
<http://www.itep.ws/pdf/NairobiFinal.pdf>
- [2] Soil Compaction and Stability, C. S. Gresser
http://www.gilesengr.com/Literature/soil_compaction_and_stability_long.pdf
- [3] CE 240 Soil Mechanics and Foundations, Lecture 3.3. Soil Compaction, Das
<http://www.engr.uconn.edu/~lanbo/CE240LectW033Compaction.pdf>
- [4] Wikipedia, Proctor Compaction Test
http://en.wikipedia.org/wiki/Proctor_compaction_test
- [5] Bulk Density Determination, IUPUI, Indiana University, Purdue University, Indianapolis, Department of Earth Sciences
<http://www.geology.iupui.edu/research/SoilsLab/Procedures/bulk/Index.htm>
- [6] What is Compaction, Presentation, N. Sivakugan, Center for Integrating Information on Geoengineering
<http://www.geoengineer.org/files/Compaction-Sivakugan.ppt#257>
- [7] Soil Compaction Handbook, Multiquip Inc.
http://www.concrete-catalog.com/soil_compaction.html
Standard Proctor Compaction Test, University of Texas, Arlington
[8] <http://geotech.uta.edu/lab/Main/cmpct/index.htm>
- [9] <http://www.pdhonline.org/courses/c167/c167content.pdf>
- [10] Field Compaction Methods for Soils, V. D. Reynolds, PDH Center
<http://www.geology.iupui.edu/research/SoilsLab/Procedures/bulk/Index.htm>
- [11] An Evaluation of Volume Excavation and Core Sampling Techniques for Measuring Soil Bulk Density, J.M. Lichter and L.R. Costello, Journal of Arboriculture 20(3), May 1994
<http://joa.isa-arbor.com/request.asp?JournalID=1&ArticleID=2622&Type=2>
- [12] Soil sensor types and technology, SoilSensor.com
<http://www.soilsensor.com/soilsensors.aspx>
- [13] Bulk Density Protocol, Global Learning and Observations to Benefit the Environment (GLOBE) Student Data Archive
<http://archive.globe.gov/sda/tg/bulkden.pdf>
- [14] Volumetric Water Content, Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy
<http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/volcont.htm>
- [15] Gravimetric Soil Moisture Protocol, University of Arizona, GLOBE,
<http://www.hwr.arizona.edu/globe/globe3/SMGrav.html>
- [16] Measurement of Soil Moisture, Colorado State University
<http://www.ext.colostate.edu/drought/soilmoist.html>
- [17] Measuring Soil Compaction on Construction Sites: A Review of Surface Nuclear Gauges and Penetrometers, T.B. Randrup and J. M. Lichter, Journal of Arboriculture 27 (3), May 2001
http://www.treelink.org/joa/2001/may/01_MEASURING_SOIL_COMPACTON_ranndrup.pdf

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

- [18] Field Density and Moisture Tests of Soils by Nuclear Gauge (Kansas Test method KT-51), Kansas Department of Transportation
http://www.ksdot.org/burConsMain/Connections/ConstManual/pdfact5/16_51.pdf
- [19] Guide to Sampling Soil Compaction using Hand-Held Soil Peneometers, The Center for Environmental Management of Military Grounds, Colorado State University
http://www.cemml.colostate.edu/files/TPS_04-1_Sampling_Compaction.pdf
- [20] Measurement of Moisture Content and Density of Soil Masses using Radioactivity Methods, I. Goldberg, L. J. Trescony, J. S. Campbell Jr. and G. J. Whyte, Clays and Clay Minerals; 1954 v. 3; no. 1
<http://www.clays.org/journal/archive/volume%203/3-1-516.htm>
- [21] Measuring of Stockpile Density by Nuclear Densitometer, S. Treasure, AAMHATCH
http://fr.aamhatch.com/resources/pdf/publications/documents/AIMS2006Density_1.pdf
- [22] Soil Moisture Measurement Technology, T.L. Prichard, University of California Davis,
<http://ceeldorado.ucdavis.edu/files/45069.pdf>
- [23] Highways: the Location, Design, Construction and Maintenance of Road Pavements, C.A. O' Flaherty, Book, 2002.
http://books.google.com/books?id=Ren4sWQ3jKkC&source=gbs_navlinks_s
- [24] Performance of Flail Hammers, F. Guerne, Journal of ERW and Mine Action, Issue 13.1, Summer 2009
<http://maic.jmu.edu/journal/13.1/rd/guerne/guerne.htm>
- [25] Achieving and Measuring Proper Road Compaction, D. MacGuire, University of New Hampshire, technology Transfer Center Technical Note
<http://www.t2.unh.edu/spring06/7-10.pdf>
- [26] Hand-Held Electronic Cone Penetrometers for Measuring Soil Strength, U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
<http://www.fs.fed.us/t-d/pubs/pdfpubs/pdf05242837/pdf05242837dpi300.pdf>
- [27] Soil Penetrometers, R. Fee, Spectrum Technologies, Inc
http://www.specmeters.com/articles/soil_penetrometers.pdf
- [28] Soil Sampling and Methods of Analysis, M.R. Carter, E.G. Gregoric, Book, Canadian Society of Soil Science, 2007
http://books.google.com/books?id=ZTJsbXsikagC&source=gbs_navlinks_s

5. Annexe 1: *relation standard* de Proctor, entre la teneur en humidité optimale et la densité apparente sèche

La figure 1 répertorie les données de la courbe standard de Proctor, utilisées par le SWEDEC pour produire un des trois couloirs de test standards utilisés pour le test de performance du AACEN 15044 dans la zone de test mécanique de Norra Kulla.

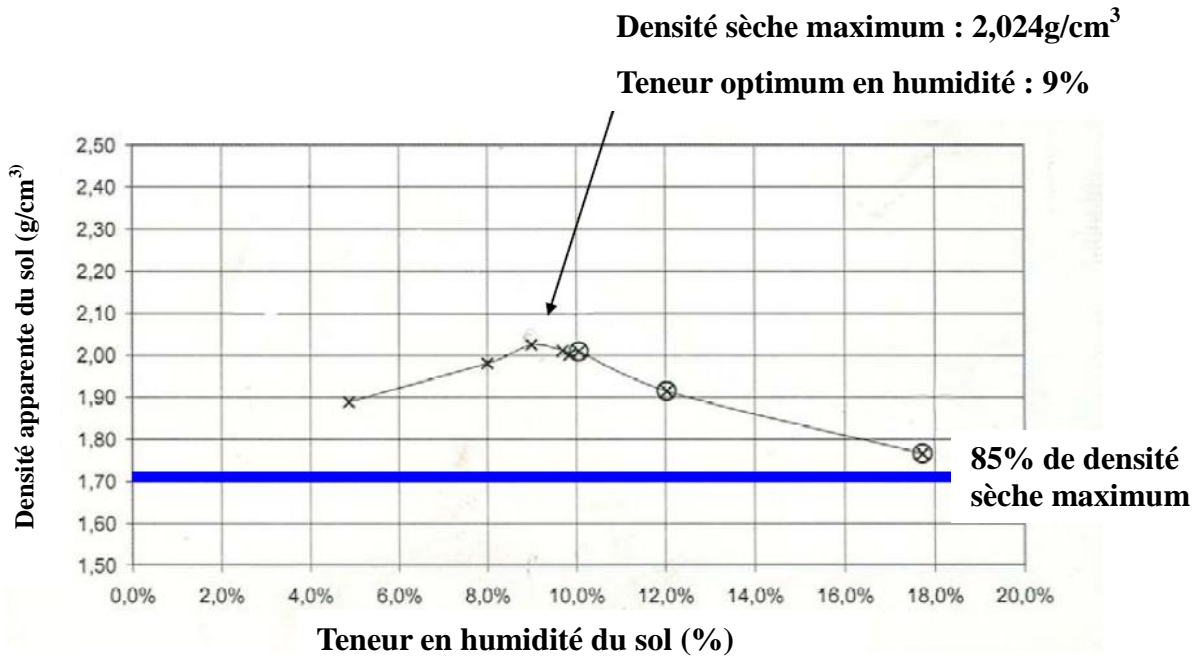


Figure 1 : Courbe de Proctor pour le sol local dans la zone de test mécanique de Norra Kulla.

Le AACEN 15044 spécifie que le couloir de test en sol local pour le test de performance devrait être compacté à environ 85% (+-2%) de la densité apparente sèche maximale, c'est-à-dire à 1,72 g/cm³. La courbe Standard de Proctor (voir ci-dessus) montre qu'on peut obtenir le compactage spécifié pour des teneurs en humidité du sol variant de 4 à 20%.

Procédure pour la préparation du couloir de test :

1. Déterminer la teneur en humidité du sol du couloir-test et vérifier qu'elle convient pour un compactage du sol relatif de 85% ;
2. Remuer le sol. Ceci peut être fait avec du matériel agricole ou de construction classique (figure 2)
3. Tasser le sol jusqu'au niveau spécifié à l'aide de compacteurs comme celui montré sur la figure 3 (compacteur à vibration). Surveiller la densité relative jusqu'à ce que le niveau défini pour ce type de sol soit obtenu. La surveillance du compactage du sol peut être faite à l'aide d'une des techniques de mesure décrites dans le corps de ce document. Au SWEDEC, cela est fait à l'aide du densimètre nucléaire (CPN international model MC3 Portaprobe, figure 5).

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire



*Figure 2 : préparation de couloirs de test standards –décompactage du sol
image © SWEDEC*



*Figure 3 : Préparation des couloirs de test standards – compactage du sol
image © SWEDEC*

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire



*Figure 4 : couloir de test préparé avec le sol compacté
image © GICHHD*



Figure 5 : Densimètre nucléaire modèle MC-3 Portaprobe utilisé par le SWEDEC pour surveiller les niveaux de compactage du sol des couloirs de test standards

6. Annexe 2 : Protocoles et formules pour déterminer la densité apparente de sol humide, la densité apparente de sol sec et la teneur en humidité sur des échantillons de sol

6.1 Protocole pour prélever un échantillon de sol

Equipements:

- des conteneurs étanches avec couvercle, ou des sacs plastiques à fermeture réutilisable et hermétique, pour conserver les échantillons ;
- des outils servant à creuser - pelle ou truelle, tournevis ou couteau solide ;
- une bâche en matière non poreuse, par exemple un sac en polyéthylène ;
- un récipient gradué ou au volume défini ;
- un récipient d'eau ;
- une balance (style pèse personne) ;
- un instrument de marquage - un marqueur indélébile, etc...

Méthode:

1. Peser le récipient vide destiné à l'échantillon et marquer le poids sur celui-ci (par exemple: 15g) ;
2. Marquer le récipient avec le numéro de l'échantillon et l'emplacement du prélèvement ;
3. Nivelier la surface du sol où sera creusé le trou ;
4. Placer le tissu non-poreux à côté de l'endroit où le trou sera creusé et placer le récipient destiné à l'échantillon sur le tissu non poreux ;
5. A l'aide de la pelle ou de la truelle, creuser le trou en s'assurant que **toute** la matière retirée lors de l'excavation est placée dans le récipient. Prélever les échantillons le plus rapidement possible ;
6. Sceller et peser immédiatement le récipient et marquer le poids brut sur celui-ci (exemple: 1600,90 g.). Le poids du sol humide peut alors être calculé en soustrayant le poids du récipient vide du poids brut (exemple: $1600,90 \text{ g} - 15 = 1585,90\text{g}$) ;
7. Lisser les côtés et le fond du trou avec la truelle ou le couteau, sans retirer davantage de matière ;
8. Placer le tissu non-poreux dans le trou, en s'assurant qu'il est en contact parfait avec les côtés et le fond ;
9. Remplir le récipient gradué avec le contenu du récipient d'eau et noter la quantité d'eau dans le récipient gradué (exemple/1000ml) ;
10. Verser l'eau du récipient gradué dans le trou doublé par la bâche. Remplir le trou avec l'eau en prenant soin d'aller au plus près que possible du niveau du sol, sans déborder, et noter la quantité d'eau restante dans le récipient gradué (exemple: 500ml) ;
11. Soustraire la quantité restante de la quantité initiale (exemple: $1000 \text{ ml} - 500 \text{ ml} = 500 \text{ ml}$). La différence est la quantité d'eau utilisée pour remplir le trou et représente le volume d'excavation (ici : 500 ml.) Marquer ce volume sur le récipient contenant l'échantillon.

6.2 Protocole pour déterminer le poids d'un échantillon de sol séché à l'étuve

Equipements :

- Récipients peu profonds. Noter que si un micro-onde est utilisé pour sécher l'échantillon, des récipients en plastique ne doivent pas être utilisés car ils risqueraient de fondre ;
- Balance (style pèse-personne) lisible et précise à 0,01g près (pour des sols au grain fin) ou à 1g (pour des sols au grain épais) ;
- Source de chaleur (plaque chauffante, four de laboratoire à lampe chauffante ou four à micro-ondes) ;
- Spatule.

Méthode :

1. Peser un récipient peu profond et enregistrer son poids (exemple : 11g) ;
2. Mélanger minutieusement l'échantillon dans son récipient initial de recueil pour garantir la répartition uniforme de l'échantillon ; ensuite, verser l'échantillon de son récipient initial dans le récipient peu profond ;
3. Placer le récipient peu profond avec la terre sur la plaque chauffante ou dans le four ;
4. NE PAS SURCHAUFFER. De petits morceaux de papier mélangés avec la terre agiront comme indicateurs et vireront au marron en cas de surchauffe ;
5. En cas d'utilisation d'une plaque chauffante, remuer fréquemment la terre avec une spatule. Le temps de séchage dépendra de la méthode utilisée⁹ mais un pesage répétitif doit être effectué pour déterminer le temps de séchage minimal nécessaire ;
6. Pesages de contrôle :
 - a) Retirer le récipient peu profond (contenant la terre) de la source de chaleur, le couvrir et laisser refroidir. Le récipient peut être pesé dès qu'il a assez refroidi pour être manipulé ;
 - b) Enregistrer ce poids ;
 - c) Chauffer à nouveau, laisser refroidir et peser l'échantillon jusqu'à ce que le poids ne change plus ; enregistrer le poids sec final (exemple : 1446,20g) ;
7. Déterminer le poids de l'échantillon de terre sec en soustrayant le poids du récipient au poids sec mesuré (exemple : 1446,20 g – 11 g = 1435,20 g).

⁹ La bonne marche à suivre pour le séchage au four à micro-ondes est la suivante:

- Placer l'échantillon dans le micro-onde et faire fonctionner le four pendant 10 minutes ;
- Peser l'échantillon et le remettre dans le four pendant 5 minutes, puis le repeser. Si le poids de l'échantillon a changé, le remettre dans le four 5 minutes supplémentaires. Répéter jusqu'à ce que le poids de l'échantillon ne change plus. Le temps de séchage ordinaire pour un échantillon mouillé est d'environ 20 minutes. L'eau est le premier composant du sol à chauffer et à s'évaporer. Si l'échantillon est déjà sec et que le séchage au micro-onde continue, la température de l'échantillon va augmenter et oxyder la matière organique. Cela faussera le résultat [16].

Si vous utilisez un four traditionnel, placer les échantillons dans le four à 105 degrés centigrade (220 Fahrenheit) pendant 24 heures [16].

6.3 Protocole pour déterminer la masse et le volume de gros fragments (gravier/rocaille) dans un échantillon de terre.

Equipements :

- Tamis (mailles de 2mm) ;
- Grand morceau de papier ;
- Balance (de type pèse-personne) ;
- Cylindre gradué avec de l'eau (100 ml minimum).

Méthode:

- Placer le tamis sur un grand morceau de papier et verser un échantillon dans le tamis ;
- Presser minutieusement, au-dessus du papier, la terre séchée à travers la maille du tamis. Les cailloux resteront sur le tamis (si on ne dispose d'aucun tamis, retirer avec précaution les cailloux à la main) ;
- Peser les cailloux restés sur le tamis et enregistrer leur masse (exemple : 70g) ;
- Verser 30 ml d'eau dans un cylindre gradué de 100 ml et déposer délicatement les cailloux dans l'eau ;
- Relever le niveau de l'eau après avoir ajouté tous les cailloux (exemple : 95 ml) et soustraire la quantité d'eau initiale pour obtenir le volume des cailloux (exemple : 95 ml – 30 ml = 65 ml).

6.4 Formules pour calculer la densité apparente humide, la densité apparente sèche et la teneur en humidité

Pour calculer la densité humide, la densité apparente sèche et la teneur en humidité¹⁰ au moment du prélèvement, vous avez besoin du poids humide de l'échantillon (en g) du poids sec de l'échantillon (en g) et du volume de l'échantillon (en cm³).

$$\text{Densité humide } (\rho_w) = \text{Poids humide (g)} \div \text{volume (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Exemple: } \rho_w = 1585,90 \div 500 = 3,17 \text{ g / cm}^3 = 3170 \text{ Kg / m}^3$$

$$\text{Densité apparente sèche } (\rho) = \text{Poids sec (g)} \div \text{volume (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Exemple: } \rho = 1435,20 \div 500 = 2,87 \text{ g / cm}^3 = 2870 \text{ Kg / m}^3$$

¹⁰ la méthode pour déterminer l'humidité du sol, en utilisant le pesage et le séchage d'un échantillon de sol, est appelée méthode gravimétrique [15].

$$\text{Densité apparente corrigée d'un sol sec} = [\text{poids sec de terre (g)} \div \text{volume de terre (cm}^3)] - [\text{poids sec des cailloux(g)} \div \text{volume de cailloux (cm}^3)]$$

Exemple : ρ corrigée = $[1435,20 \div 500] - [70 \div 65] = 2,87 - 1,08 = 1,79 \text{ g / cm}^3 = 1790 \text{ Kg / m}^3$

(densité apparente sèche de l'échantillon, moins la densité apparente sèche des cailloux).

La teneur en humidité de l'échantillon au moment du prélèvement peut être exprimée par un rapport masse à masse (teneur en humidité gravimétrique) ou par un rapport volume à volume (teneur en humidité volumétrique) selon les formules suivantes:

$$\text{Teneur en humidité gravimétrique } (\Theta\% \text{ gravimétrique}) = [(\text{poids humide} - \text{poids sec}) \div \text{poids sec}] \times 100$$

Exemple : Θ % gravimétrique = $[(1585,90 - 1435,20) \div 1435,20] \times 100 = 10,5 \%$

$$\text{Teneur en humidité volumétrique } (\Theta \% \text{ volumétrique}) = \Theta \% \text{ Gravimétrique} \times \rho$$

Exemple : Θ % volumétrique = $10,5 \times 2,87 = 30,1 \%$

Afin d'éviter la confusion entre ces deux rapports de la teneur en eau sans unité de mesure, leur base de calcul (i.e. la masse ou le volume) devrait toujours être indiquée. Cependant, quand aucune indication n'est donnée, on suppose que le chiffre fourni est celui de la masse car dans la détermination de la teneur en eau du sol, le chiffre relatif à la masse est habituellement obtenu en premier, puis converti en un chiffre fondé sur le volume [14].

6.5 Prélèvement d'échantillons de sol selon la technique d'excavation – illustrations



Carottage avec la technique d'excavation.
La terre dure est remuée à l'aide d'un tournevis puis extraite avec une cuillère. La terre extraite est placée sur une feuille de plastique afin de s'assurer que toute la terre extraite est recueillie.
La profondeur du trou est égale à la profondeur d'enfouissement de la mine-cible.



Toute la terre extraite de l'excavation est mise dans un sac plastique qui est immédiatement scellé.

Noter qu'un écran protégeant du vent a été placé à côté de l'excavation afin d'empêcher la terre extraite de sécher entre l'excavation et la fermeture du sac.

Programme International d'Essais et d'Évaluations pour le Déminage Humanitaire

Verser de l'eau du récipient gradué dans le trou recouvert par la matière non poreuse, pour déterminer le volume d'excavation.

Lorsque l'eau est versée dans le trou, il faut faire attention à ce que le plastique soit en contact avec les rebords et le fond.

La date, le numéro de l'échantillon, les détails du couloir de test, le poids de l'échantillon et le volume du trou sont marqués sur le sac plastique contenant l'échantillon.

