



HAL
open science

Analyse de la porosité

Pierre Stengel

► **To cite this version:**

Pierre Stengel. Analyse de la porosité. Séminaire CEE Agrimed, Mar 1983, Avignon, France. hal-02779875

HAL Id: hal-02779875

<https://hal.inrae.fr/hal-02779875>

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

161

Séminaire CEE-Agrimed

14-18 Mars 1983

ANALYSE de la POROSITE

P. STENGEL

CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE DU SOL

PRINCIPES DES METHODES

1° Porosité totale.

Nous avons précédemment défini le sol comme un milieu poreux, constitué de particules solides dont l'organisation à différentes échelles définit un réseau de cavités ou pores. Les volumes relatifs des particules solides et des pores sont les caractéristiques les plus globales d'un tel milieu.

Soit (figure 1) :

V_p le volume des pores ou volume poral
 V_s le volume des particules solides
 $V_T = V_p + V_s$ volume du massif poreux (volume de l'échantillon de sol, souvent appelé volume apparent)

On exprime généralement le volume relatif des pores par la variable :

$$n^T = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_p}{V_p + V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T}$$

n^T est appelé la porosité totale : c'est le rapport entre le volume des pores et le volume total (ou apparent) de la couche de sol considérée. Sa valeur est fréquemment donnée en %.

On utilise également la variable :

$$e = \frac{V_p}{V_s}$$

rapport entre le volume des pores et le volume de solide, appelée indice des vides. Elle présente l'avantage que le volume poral est dans ce cas rapporté à un volume constant : les variations d'indice des vides d'une masse donnée de sol sont donc additives. La figure 2 présente quelques exemples des valeurs de porosité rencontrées dans les sols cultivés.

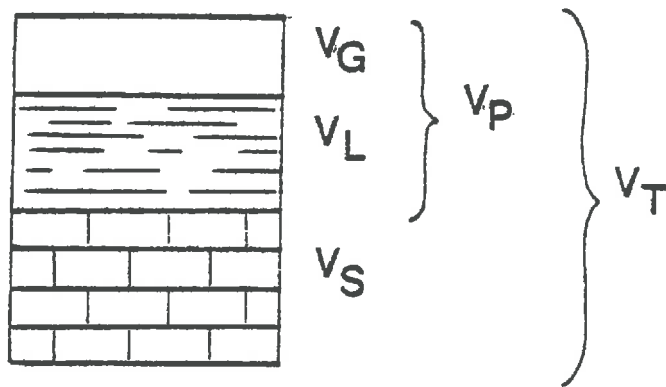


Figure n° 1 : Schéma des différentes phases présentes dans un volume de sol (V_T).

V_G Volume de phase gazeuse

V_L Volume de la phase liquide

V_S Volume de la phase solide

	Sol Sableux très tassé	Sol de limon à structure continue	Sol travaillé depuis plusieurs semaines	Sol Fraîchement travaillé
Densité	1.8	1.6	1.4 - 1.2	0.9
Porosité Totale n_T	0.32	0.40	0.47 - 0.55	0.66
Indice des Vides e	0.47	0.66	0.89 - 1.21	1.94

Figure 2 : Variations de porosité observées en sol cultivé
(valeurs indicatives)

Les pores du sol peuvent être remplis d'air ou de gaz divers, ou d'eau contenant des produits dissous. Il est important de connaître les fractions d'espace poral respectivement occupées par la phase gazeuse et la phase liquide. Il suffit, pour ce faire, de connaître la teneur en eau massique (grammes d'eau par grammes de sol sec) ou volumique (cm^3 d'eau par cm^3 de sol humide). On en déduit aisément la teneur en air puisque (figure 1) : $v_p = v_L + v_G$

On exprime souvent l'importance relative de la phase liquide par le rapport :

$$s = \frac{v_L}{v_p}$$

appelé taux de saturation. Lorsque $s = 1$ la porosité est entièrement occupée par la phase liquide. On dit que le sol est saturé.

A partir de trois évaluations portant sur le sol : volume total (ou volume apparent), volume de solide et teneur en eau, on établit donc un bilan en volume des trois phases qu'il comporte, qui est une caractérisation très globale de son état physique. Nous verrons que porosité totale, teneur en eau et teneur en air sont fortement liées aux propriétés du sol : propriétés hydriques, thermiques, aération, comportement mécanique.

Cependant, dans la plupart des cas, la prévision de ces propriétés fait intervenir d'autres caractéristiques, plus analytiques, de l'état physique du sol. Ce sont en particulier des caractères de formes et de dimensions des pores : distribution des diamètres, tortuosité, continuité.

2° Analyse des systèmes de porosité.

Il est donc nécessaire de compléter la caractérisation de l'espace poral du sol par d'autres critères que son volume total. Ceux-ci peuvent être très nombreux. Il faut choisir les plus adéquats en fonction de l'objectif poursuivi. Ainsi, lorsque cet objectif est de prévoir les effets des différents facteurs d'évolution de l'état physique du sol, paraît-il logique de distinguer dans l'espace poral les volumes résultant de l'action de chacun de ces facteurs. Ceci revient à s'efforcer de classer différentes fractions de volume poral suivant leur origine. Telle est l'idée directrice de l'analyse des systèmes de porosité

a) Principe.

Dans une première étape, on peut distinguer dans l'espace poral du sol deux sous ensembles :

- d'une part des pores résultant de l'assemblage des particules solides élémentaires, telles que les définit l'analyse granulométrique (argiles, limons, sables). Ces particules ne sont pas indéfiniment déformables, leurs formes et leurs dimensions sont variées, elles ne peuvent donc s'emboîter parfaitement et ménagent entre elles un volume poral. Il a été qualifié de textural. Nous pouvons déjà noter que dans les matériaux contenant des argiles gonflantes (smectites) ce volume poral sera fonction, non seulement de la constitution minérale et organique, mais aussi de la teneur en eau du matériau.

- d'autre part des pores résultant de l'action de facteurs externes au matériau, ou de ce que l'on peut appeler son "histoire" : travail du sol, actions du climat et des êtres vivants. Ce second volume poral est qualifié de structural. C'est en effet ce type de pores qui sépare les éléments structuraux que l'on décrit en observant un profil cultural.

Du fait de la disparité de ses origines et des caractéristiques des pores qui le constituent, ce second volume poral n'est pas évalué directement. Il n'est en fait défini que par différence à partir de l'équation :

$$n^T = n^t + n^s$$

où : n^t = porosité texturale }
 n^s = porosité structurale } rapportées au volume de sol en place

d'où : $n^s = n^T - n^t$

b) Techniques de mesure.

Dans la pratique les mesures de la porosité sont le plus souvent indirectes. On mesure généralement la densité sèche ρ_d du sol considéré (appelée fréquemment densité apparente). C'est le rapport masse de sol sec / volume de sol humide.

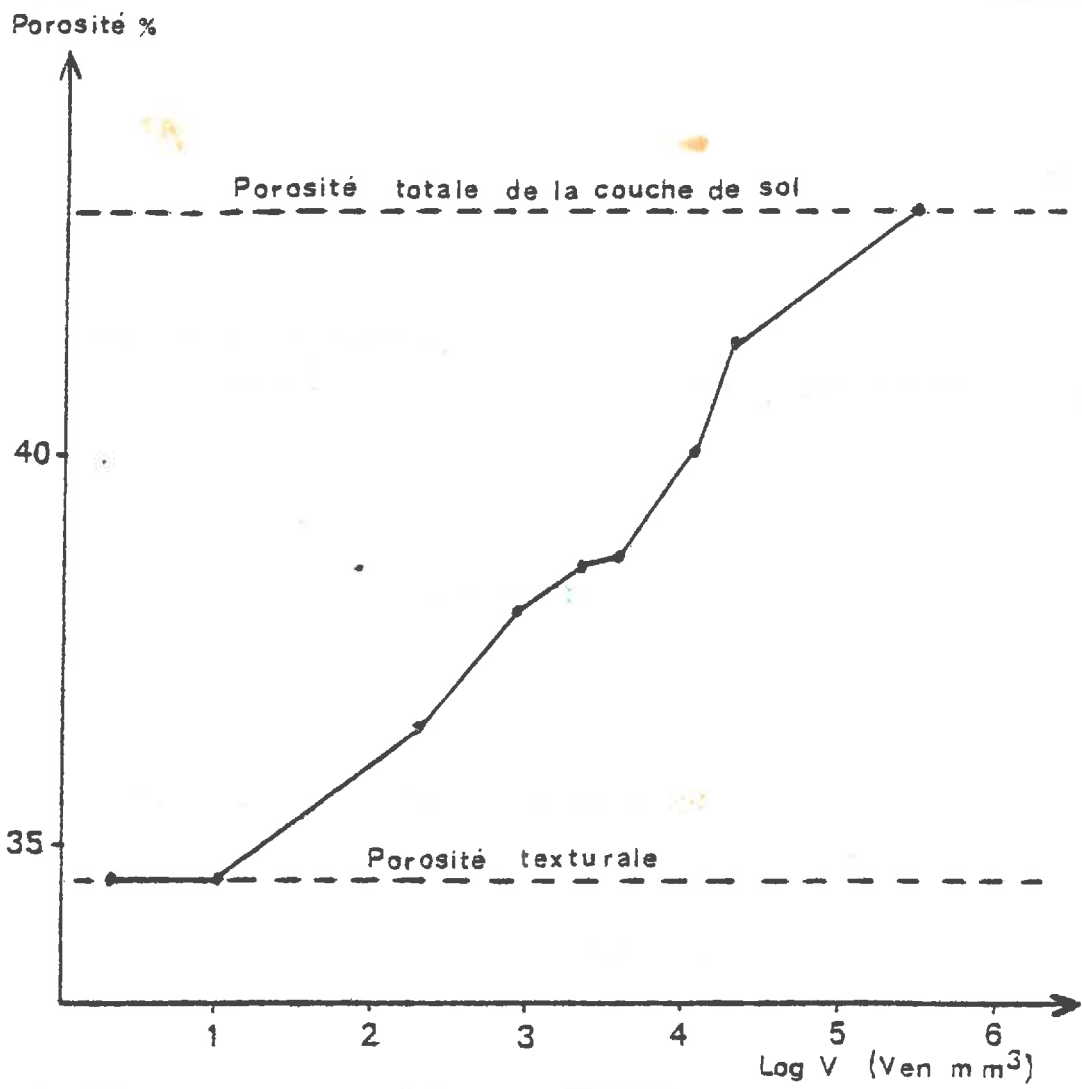


Figure 3 : Variation de la porosité en fonction du volume des échantillons.

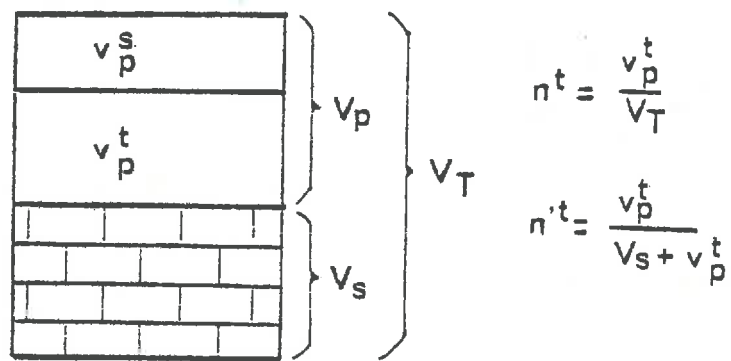


Fig.4 - DIFFERENTES EXPRESSIONS DE LA POROSITE TEXTURALE.

v_p^s : Volume des pores structuraux
 v_p^t : " " " " " " texturaux

En mesurant également la densité des particules solides ρ_s , on calcule la porosité totale à partir de l'équation :

$$n^T = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

- Mesure de la porosité texturale :

Le principe de la technique repose sur l'idée suivante : les pores texturaux ont des dimensions du même ordre de grandeur que les particules constitutives du sol, les pores structuraux sont généralement de plus grande dimension. En brisant un échantillon en morceaux suffisamment petits, ceux-ci auront peu de chance de contenir des pores structuraux. On pourra considérer qu'ils ont une structure continue et ne contiennent que des pores texturaux. La figure 3 confirme la validité de cette hypothèse pour un sol limoneux. On a mesuré la porosité d'une couche de sol en place, puis séparé par rupture et tamisage des fragments de plus en plus petits. On observe une diminution de la porosité de ces fragments quand leur volume décroît jusqu'à un palier qui correspond à la porosité texturale.

Dans la pratique, la mesure est réalisée sur un ensemble de fragments ou agglomérats extraits par rupture et tamisage entre 2 et 3 mm. Le volume de cette population d'agglomérats, dont la masse totale est de l'ordre de 2 g, est mesuré de la façon suivante : on sature l'échantillon dans du pétrole du commerce, puis on mesure la poussée d'Archimède dans ce même liquide. Ayant pesé l'échantillon humide puis après séchage, on calcule sa densité et son humidité.

Cette technique a l'avantage d'être praticable dans une large gamme d'humidité. On peut donc évaluer la densité texturale du sol ρ_d^t à son humidité de prélèvement. On en déduit la porosité texturale du matériau :

$$n^t = 1 - \frac{\rho_d^t}{\rho_s}$$

Notons que cette valeur est différente de la porosité texturale n^t de la couche de sol en place car elle n'est pas rapportée au même volume de référence (figure 4).

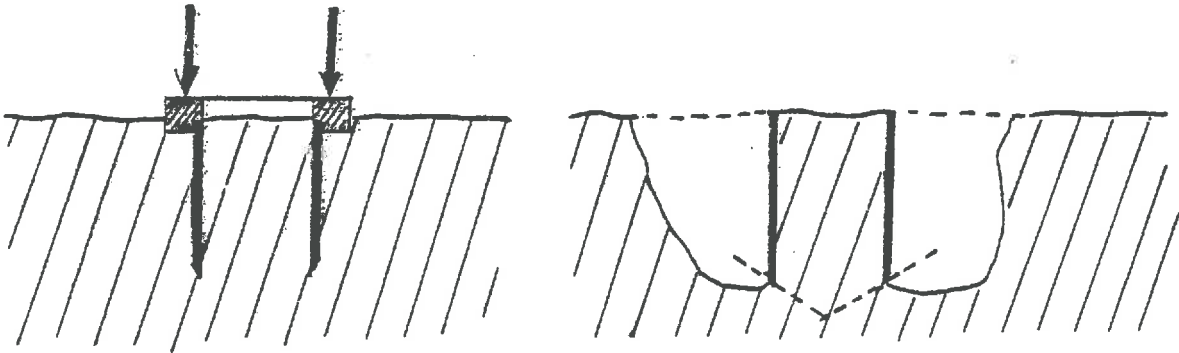


Fig. 5 MESURE DE LA DENSITE EN PLACE
TECHNIQUE DES ANNEAUX

- Mesures de la Porosité totale.

Connaissant la densité texturale ρ_d^t , la porosité structurale est calculée à partir de la densité de la couche de sol considérée ρ_d par la relation :

$$u^s = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_d^t}$$

On est donc ramené au problème des techniques de mesure de la densité (ou de la porosité totale) du sol en place.

- Technique des anneaux : (figure 5)

Elle consiste à prélever un échantillon de sol de volume fixe, dont on détermine la masse humide, puis la masse sèche, donc la densité. Concrètement, on enfonce précautionneusement dans le sol un cylindre à bord tranchant jusqu'à ce qu'il soit entièrement rempli de terre. Puis, on l'extrait avec son contenu et on l'arrase soigneusement aux extrémités.

Les limites de cette technique sont liées :

- au risque de tassement ou au contraire de foisonnement, lors de l'enfoncement de l'anneau. On s'efforce de le réduire en augmentant le diamètre par rapport à la hauteur et en réduisant au maximum l'épaisseur des parois.

- à l'impossibilité d'opérer lorsque le sol n'est pas suffisamment cohérent (sol fraîchement travaillé, fissures de grandes dimensions) ou lorsqu'il l'est trop (sol compact et sec).

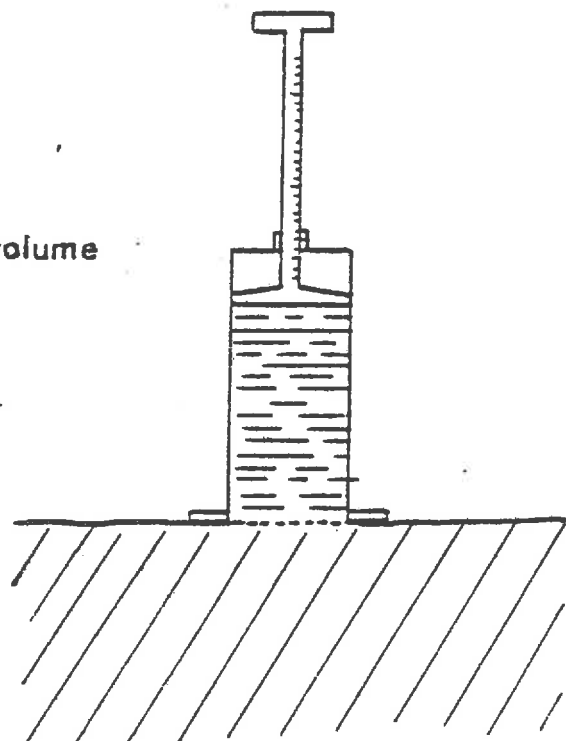
- au nombre nécessairement limité de répétitions possibles (durée de l'opération, volume important à manipuler)

- Densitomètre à membrane (figure 6).

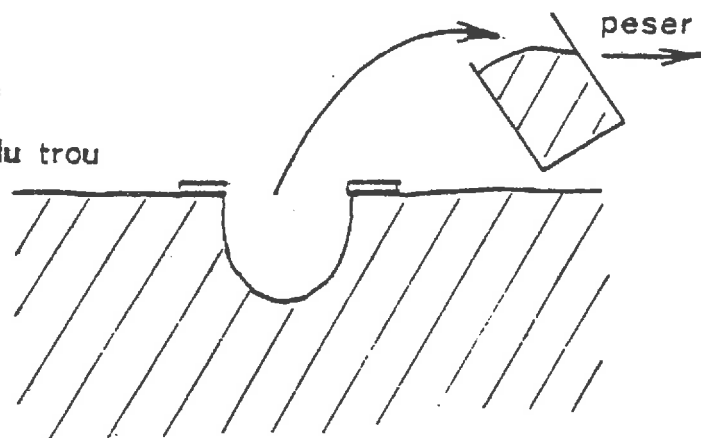
L'appareil est un cylindre métallique contenant de l'eau dans lequel se déplace un piston, monté sur une tige graduée. Il est fermé à sa base par une membrane souple, capable d'épouser étroitement le microrelief du sol ou de se mouler sur les parois d'un trou qu'on y creuse.

Le mode opératoire est résumé sur la figure 6.

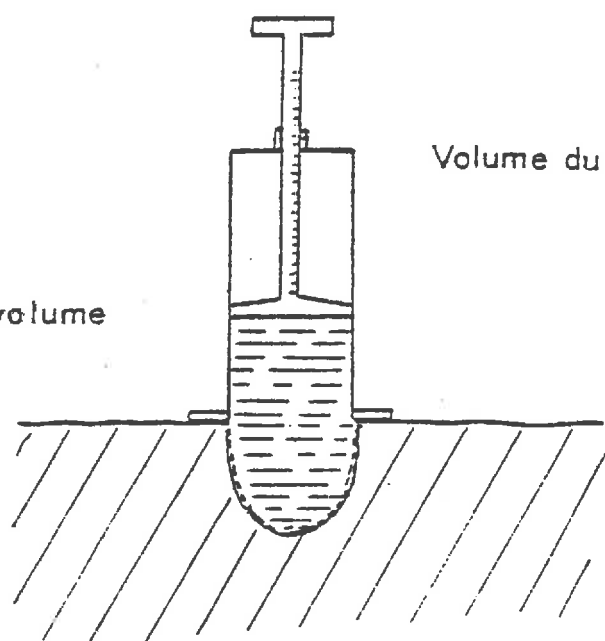
1. Lecture du volume initial V_0



2. Creusement du trou



3. Lecture du volume final V_1



Volume du trou = $V_1 - V_0$

Fig. 6 . MESURE DE LA DENSITE EN PLACE : TECHNIQUE DU DENSITOMETRE A MEMBRANE

Les limitations de cette technique sont :

- elle n'est pas praticable dans des sols facilement déformables (fraîchement travaillés ou très humides), la pression exercée par la membrane risquant dans ce cas d'accroître le volume du trou.

- La membrane peut s'insinuer dans des pores grossiers qui ne faisaient pas partie du volume de terre enlevé : grosses fissures ouvertes dans la paroi du trou par exemple. Il en résulte une sous-évaluation de la densité.

On peut rapprocher de cette technique la technique "au sable". Elle consiste à évaluer le volume d'un trou creusé en pesant la quantité de sable nécessaire pour le remplir. La densité du sable utilisé étant supposée constante, on en déduit le volume. Son avantage est d'être praticable sur des volumes de plusieurs litres et en sol caillouteux. Bien que peu commode, elle permet dans ce cas (et elle est la seule si les cailloux sont grossiers) d'évaluer la densité de la terre fine en tenant compte de la teneur en cailloux.

- Techniques Radiométriques.

Dans tous les cas, les appareils utilisent une source radioactive émettant un rayonnement γ (^{137}Cs le plus souvent), dont l'intensité I_0 dans des conditions standard est connue.

Un compteur permet d'évaluer l'intensité I du rayonnement parvenant à travers le sol à une certaine distance de la source (figure 7) :

- soit après diffusion (déviation des photons γ de leur trajectoire par interaction avec les électrons périphériques des atomes de la matière du sol),

- soit en transmission (quantité de photons γ transmis directement qui n'ont pas eu d'interaction avec la matière du sol).

Dans les deux cas une courbe d'étalonnage de l'appareil permet de passer du rapport $\frac{I}{I_0}$ à la densité humide ρ du sol. En mesurant parallèlement sa teneur en eau, on connaît sa densité sèche ρ_d .

La différence des performances entre les deux types d'appareils résulte de leur géométrie. Les appareils à transmission sont particulièrement adaptés à l'étude des variations de densité avec la profondeur (profils de densité) dans les horizons superficiels. Ils ont une

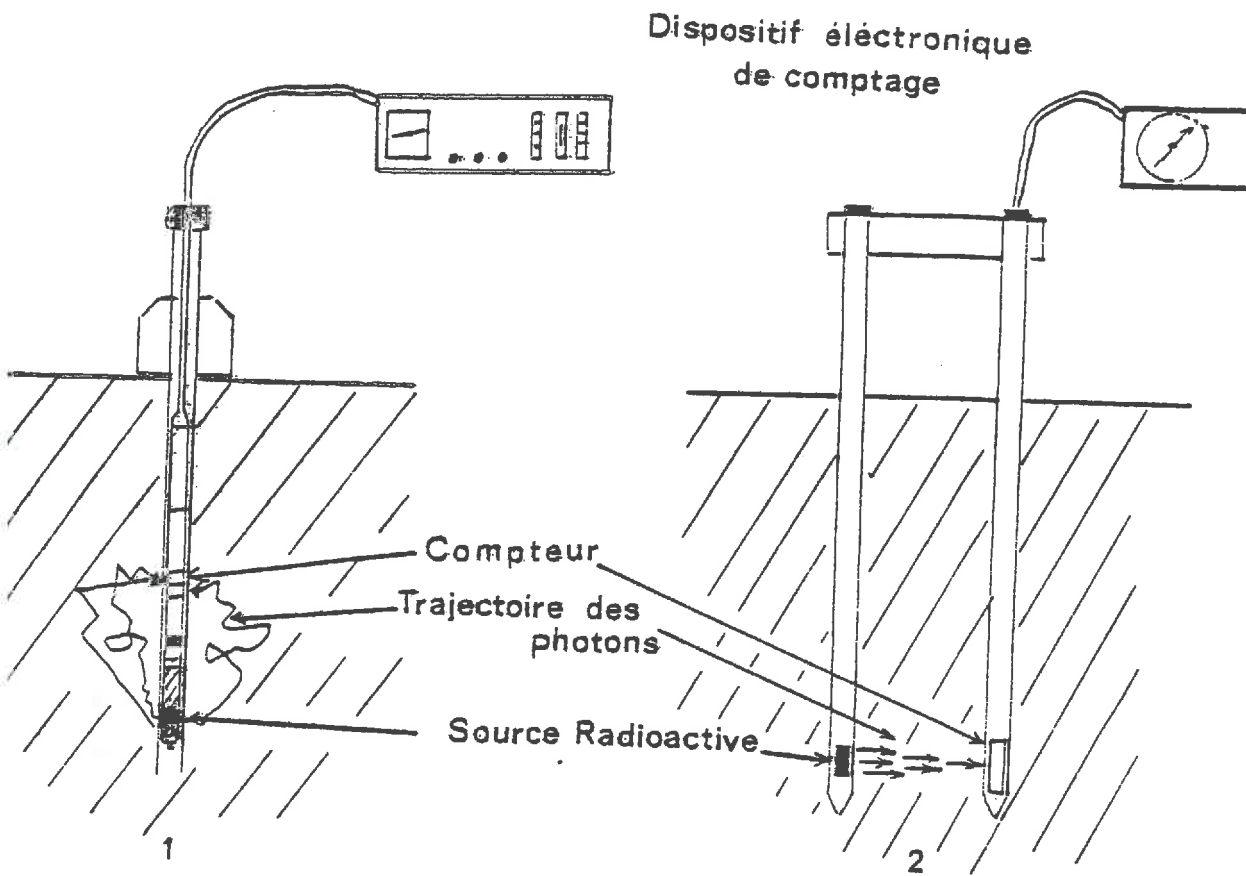


Fig. 7- Schéma de principe des densimètres

- 1. à diffusion
- 2. à transmission

bonne résolution de l'ordre de 4 cm et permettent de travailler à proximité de la surface (-5 cm), ce qui n'est pas le cas des appareils à diffusion.

Dans les deux cas, la rapidité et la commodité de la mesure sont sensiblement améliorées. Compte tenu des grandes variations de densité, mesurées dans une parcelle cultivée par exemple, cet avantage est très important. Enfin, les techniques radiométriques sont beaucoup moins perturbatrices que les techniques classiques, puisqu'il suffit de creuser à la tarière des trous de quelques centimètres de diamètre.

c) Variations de la porosité texturale.

- A l'état sec :

Lorsque la texture est suffisamment fine (teneur en argile A > 20 % squelette limoneux), la porosité mesurée sur petits agglomérats secs est très peu variable dans le temps pour un matériau donné. Le sol ayant subi entre les différentes dates de prélèvements de ces agglomérats des "histoires" climatiques et culturelles variées, ce résultat confirme qu'on mesure ainsi une porosité déterminée essentiellement par la constitution du matériau.

Ce fait se manifeste également par l'existence de liaisons statistiques étroites entre la composition de différents matériaux et leur porosité texturale à l'état sec (figure 8). Ainsi pour des teneurs en argile comprises entre 5 et 50 % la porosité texturale diminue avec la teneur en argile, ou ce qui revient au même la densité texturale ρ_{dd}^t augmente, suivant la régression :

$$\rho_{dd}^t = 0,0074 A \% + 1,603 \quad (\text{FLIES-STENGEL, 1981})$$

La matière organique a au contraire pour effet d'accroître la porosité texturale, c'est-à-dire de diminuer la densité texturale. Ceci est particulièrement vrai de la matière organique libre (débris organiques non décomposés) dont l'effet est très intense comme le montre la relation suivante obtenue sur un sol limoneux du Bassin Parisien :

$$\rho_{dd}^t = 0,0076 A(\%) - 0,41 C_1(\%) + 1,73$$

ou C_1 : teneur en Carbone libre %

Sableux	Limoneux	Limono - Argileux			Argileux	Argile pure
		Sans matière organique libre	Matière Organique libre 3 %.	Riche en Calcaire fin		Kaolinite 0.52
0.33	0.38	0.31	0.36	0.46	0.30	Montmorillonite 0.29

Figure 8 : Exemples de variation de la porosité texturale à l'état sec n_d^t , suivant la constitution du matériau.

Parmi les autres constituants du sol, le calcaire est également susceptible d'augmenter fortement la porosité texturale, s'il est présent dans la fraction granulométrique fine (particules de dimensions inférieures à 2 μm).

- Influence de l'humidité :

Les matériaux contenant des phyllites (argiles minéralogiques : voir Chapitre III30 Constituant du sol) en quantité supérieure à 15 ou 20 % gonflent généralement de façon mesurable quand leur teneur en eau dépasse un seuil appelé limite de retrait. Leur porosité, et en particulier leur porosité texturale, est donc fonction de leur humidité. Ce phénomène est à l'origine d'une des principales difficultés méthodologiques et techniques rencontrées lorsqu'on cherche à caractériser l'état structural ou l'espace poral du sol. Il implique en effet :

- qu'une caractérisation de l'espace poral n'a de sens que si l'ensemble des mesures ou observations est réalisé sans modifier l'état de gonflement naturel du matériau. Cette condition est réalisée dans le cas de l'analyse du système de porosité. La porosité texturale est en effet mesurée sur les agrégats dans leur état de gonflement (c'est-à-dire à leur teneur en eau) en place, donc dans les mêmes conditions que la porosité totale.

- que cette caractérisation n'a de validité que pour cet état de gonflement. Or, il est évident que quand on compare les effets de traitements modifiant l'espace poral (travail du sol, roulage) ou lorsqu'on suit l'évolution de l'état physique au cours du temps, les résultats sont obtenus pour des humidités donc des états de gonflement variables. L'intérêt de l'analyse des systèmes de porosité est de pouvoir séparer dans les variations de la porosité totale ce qui est dû à des différences de gonflement au niveau textural, de ce qui résulte de l'effet propre des traitements.

Par ailleurs, l'expérience a montré que dans les couches de surface des sols cultivés, on peut considérer qu'à une humidité correspond une seule valeur de la porosité texturale. La relation porosité texturale-humidité étant établie pour un sol donné, on peut par la suite l'utiliser pour calculer la porosité structurale à partir des mesures de la densité en place et de l'humidité. Enfin, dans certains cas simples (absence de travail du sol), les variations de la porosité structurale avec l'humidité peuvent être prévues statistiquement,

L'analyse des systèmes de porosité, parmi les autres moyens de caractérisation de l'espace poral, présente donc l'avantage considérable de rendre possible des extrapolations et des comparaisons pour différentes teneurs en eau.

- Relations avec la microporosité :

Une des méthodes les plus classiques de classification de l'espace poral consiste à distinguer deux classes : la micro et la macro porosité.

Expérimentalement, ces deux classes sont définies en soumettant un échantillon de sol saturé d'eau à une succion définie, correspondant à ce qu'on appelle la capacité de rétention (quantité d'eau maximale restant en réserve dans le sol après drainage).

En effet, les lois de la capillarité permettent d'établir une correspondance entre la succion nécessaire pour vidanger un pore et un diamètre dit "équivalent", car les pores du sol ne peuvent être assimilés à des cylindres. Les pores restant pleins d'eau à cette succion sont donc des pores fins ou micropores, ceux qui se vident des pores grossiers ou macropores.

Les pores texturaux ont des dimensions qui sont de l'ordre de grandeur de celles des particules du sol. Il en résulte que pour les textures fines, la microporosité et la porosité texturale à la capacité de rétention sont peu différentes. On constate, en effet, qu'à cette teneur en eau la porosité texturale est presque saturée ($s \geq 85 \%$). Mais dans le cas des sols gonflants cette coïncidence n'a plus de sens à toute autre humidité, car la distinction entre macro et micro porosité n'est établie que pour une teneur en eau donnée. Son objectif n'est pas d'ailleurs la caractérisation de l'espace poral en soi, mais l'évaluation de la réserve hydrique du sol et de la teneur en air après ressuyage (risque d'asphyxie à la capacité de rétention).

Lorsque la granulométrie est grossière, les pores texturaux ne peuvent, même approximativement, être assimilés à la microporosité.

- Influence des contraintes mécaniques :

Les matériaux dont la teneur en argile est inférieure à 40 % ont une porosité texturale qui peut être schématisée par la figure 9. Les contraintes mécaniques exercées sur le sol sont susceptibles de provoquer la fermeture plus ou moins complète des lacunes, entraînant ainsi un tassement textural.

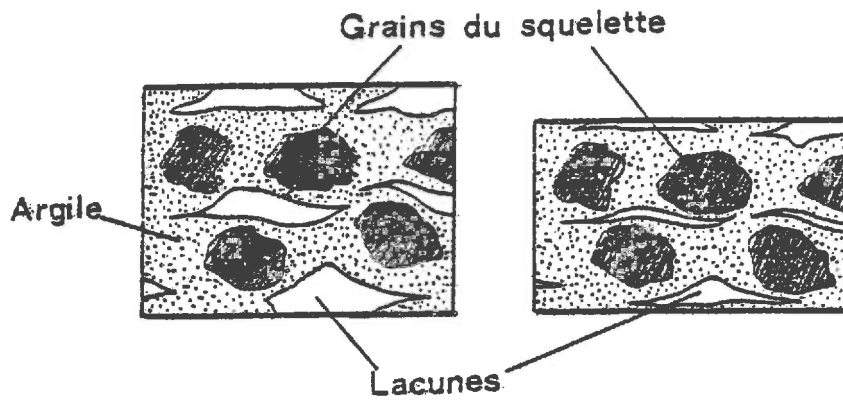


Fig. 9. Représentation schématique d'un tassement textural

Un tel tassement modifie l'architecture du matériau à une échelle où il est a priori très difficile d'agir ensuite par le travail du sol. De fait, les observations au champ indiquent qu'il peut subsister plusieurs années après l'action qui l'a provoquée.

En fait, compte tenu des valeurs les plus fréquentes des contraintes développées par les engins agricoles, de tels tassements ne sont généralement observables que pour des teneurs en argile inférieure à 20 % approximativement. Et ils sont surtout intenses quand cette argile est associée à un squelette sableux. Ceci s'explique par le fait que lorsque la teneur en argile s'élève, les contraintes mécaniques qui apparaissent lors du séchage, par le simple effet du retrait, deviennent très fortes et supérieures à celles qui résultent des pratiques agricoles. Le matériau est en quelque sorte tassé naturellement.

d) Variations de la porosité structurale.

Si nous exceptons le phénomène que nous venons de décrire, on peut dire, en schématisant, que classer l'espace poral en textural et structural revient à distinguer un volume de pores sur lequel les possibilités d'action humaine sont très faibles (la porosité texturale) et celui sur lequel on peut agir (la porosité structurale). Cette analyse présente donc un intérêt tout particulier pour l'étude du travail du sol. La figure 10 montre clairement que le travail du sol est le facteur de variation le plus puissant de la porosité structurale. Elle montre également que la porosité totale exprime très mal les différences entre situation, car elle n'isole pas la classe de pores qui est seule affectée.

	Fraîchement travaillé	Plusieur Mois après travail		Non Travaillé	
		Non roulé	Roulé		
Densité ρ_D	0.92	1.28	1.42	1.55	
Porosité Totale n^T	0.66	0.53	0.48	0.43	
Porosité Structurale n^s	0.44	0.23	0.14	0.064	Biologique 0.014 Fissurale 5.0
Porosité texturale n^t	0.22	0.30	0.34	0.37	
$\frac{n^t}{n^T}$	0.33	0.57	0.71	0.85	

Figure 10: Analyses de la porosité d'un sol limono-argileux dans différents états structuraux (humidité : capacité de rétention).

CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE DU SOL

TECHNIQUES DE MESURE

CARACTERISATION de l'ETAT PHYSIQUE du SOL

DEFINITION des VARIABLES UTILISEES

POROSITE TOTALE :

C'est le rapport :
$$\frac{V_p}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T}$$

Généralement exprimé en %

$$n^T = 100 \left(1 - \frac{V_s}{V_T} \right)$$

INDICE des VIDES :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1$$

$$e^T = \frac{V_T}{V_s} - 1$$

Ces deux variables sont liées par la relation :

$$e^T = \frac{n^T}{100 - n^T}$$

DENSITE :

Les deux variables précédentes sont le plus souvent calculées à partir des mesures de masse volumique ou de densité. Nous utiliserons dans la suite la densité, rapport entre la masse volumique du corps étudié et la masse volumique de l'eau que nous considérerons comme égale à 1000 kg.m³.

Deux mesures de densité sont nécessaires :

- la densité du sol en place ρ_d . Il s'agit de la densité sèche

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_T} \cdot \frac{1}{\rho_w}$$

où m_s est la masse de sol sec à l'étuve à 105°C

ρ_w la masse volumique de l'eau

- la densité de solide ρ_s :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w}$$

En remplaçant V_T et V_s par leur expression en fonction de ρ_d et ρ_s dans les définitions de n^T et e , on obtient :

$$n^T = 100 \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right)$$

$$e^T = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Remarque : la densité humide a pour expression :

$$\rho = \frac{m_s + m_L}{V_T} \cdot \frac{1}{\rho_w}$$

avec : m_L masse de la phase liquide. Elle ne sera pas utilisée par la suite. Elle est liée à la densité sèche par la relation :

$$\rho = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

ou : w est la teneur en eau massique exprimée en %.

TENEUR en EAU :

La teneur en eau utilisée dans les différentes expressions est la teneur en eau massique exprimée en % de la masse du sol sec à 105°C.

$$w = \frac{m_L}{m_s} \cdot 100$$

La teneur en eau volumique est le rapport :

$$\theta = \frac{V_L}{V_T}$$

Elle est généralement exprimée en %, soit :

$$\theta = w \cdot \rho_d$$

On en déduit le taux de saturation, exprimé en % :

$$s = \frac{\theta}{n} \cdot 100$$

ANALYSE de la POROSITE :

La définition des porosités texturale et structurale et les principes de l'analyse sont exposés en introduction générale. L'analyse requiert la mesure de la densité texturale ρ_d^t et de la densité du sol en place ρ_d correspondant à un même état d'hydratation. C'est-à-dire que la mesure de la densité texturale doit avoir été réalisée sur des agrégats ayant la même teneur en eau qu'au moment de la mesure de densité du sol en place.

A partir de ces mesures, les différents termes de l'analyse sont exprimés comme suit.

- Expression sous forme d'indice des vides :

- Indice des vides textural

$$e^T = \frac{\rho_s}{\rho_d^t} - 1$$

- Indice des vides structural :

$$e^s = e^T - e^t$$

$$e^s = \rho_s \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_d^t} \right)$$

- Expression en termes de porosité :

L'analyse doit être exprimée par rapport au volume de sol en place.

La porosité structurale a alors pour expression :

$$n^s = 100 \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_d^t} \right)$$

La porosité texturale s'en déduit :

$$n^t = n^T - n^s$$

Mais on ne peut comparer des porosités texturale entre elles sur cette base. Il faut alors rapporter le volume des pores texturaux au volume "textural". C'est-à-dire à la somme :

$$V_t = V_s + V_p^t$$

où V_p^t est le volume de pores texturaux.

La porosité texturale a alors pour expression :

$$n^t = 100 \left(1 - \frac{\rho_d^t}{\rho_s} \right)$$

Compte-tenu de la lourdeur de cette double expression de la porosité texturale et des risques d'erreur qu'elle implique, il est préférable d'utiliser l'expression en termes d'indice des vides.

MESURES de la DENSITE du SOL en PLACE

A. METHODE du CYLINDRE

I. PRINCIPE.

On prélève un échantillon de sol de volume imposé par la géométrie du cylindre. En mesurant sa masse à l'état humide et après séchage à 105°C, on calcule sa densité et sa teneur en eau.

II. DESCRIPTION.

- Dégager la surface des débris gênants
- Placer le cylindre et le poussoir (figure 1)
- Enfoncer le cylindre avec précaution jusqu'à ce que la surface de la couche mesurée dépasse la section supérieure du cylindre
- Retirer le poussoir
- Extraire le cylindre avec un couteau à lame forte, en passant sous le cylindre à distance suffisante pour éviter tout arrachement (figure 2)
- Araser progressivement les deux cotés du cylindre, d'abord avec le couteau, puis à la règle pour finition des deux sections planes
- Refermer hermétiquement le cylindre avec deux couvercles
- Au cas où le cylindre doit être utilisé à d'autres fins que les mesures de densité (détermination du potentiel de l'eau, mesure de paramètres de transfert), le transporter dans un emballage le préservant au maximum des vibrations et des chocs
- Au laboratoire :
 - peser à l'état humide
 - sécher à l'étuve à 105°C pendant 48h minimum
 - peser à l'état sec

III. POINTS DELICATS.

L'enfoncement du cylindre ne doit pas provoquer de variation de densité dans le volume de mesure. Ceci impose des conditions :

- de conception des cylindres
- d'enfoncement et de prélèvement.

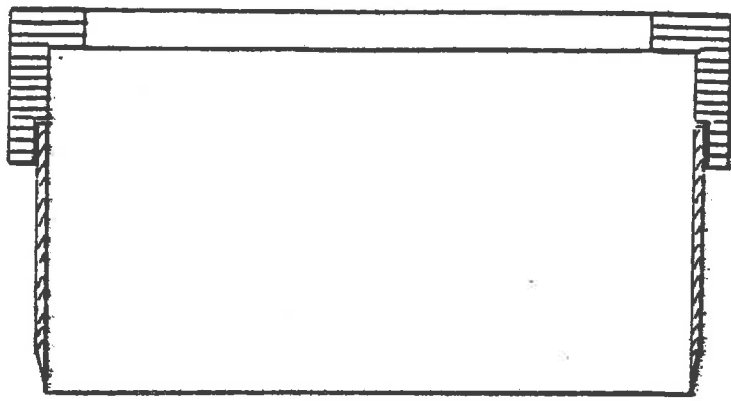


FIG. 1 Schéma du cylindre avec son poussoir

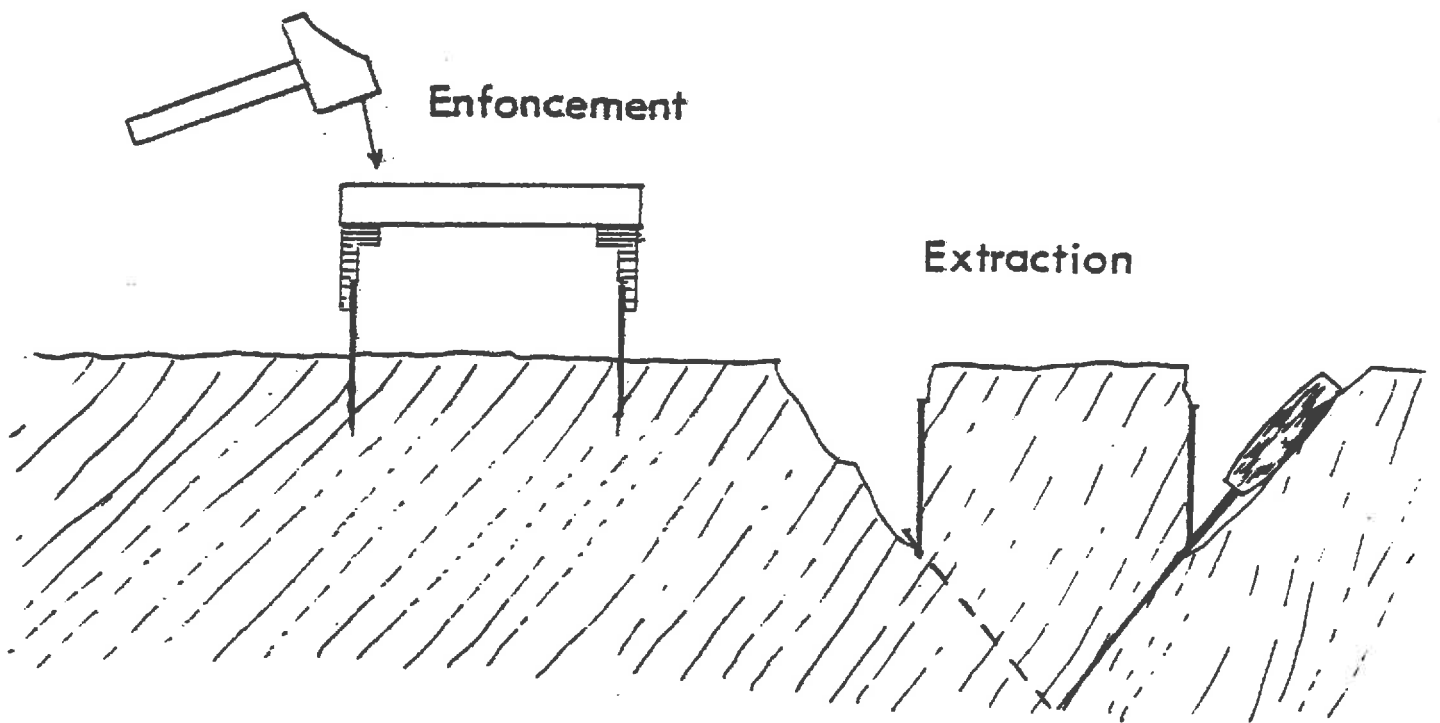


FIG. 2 Technique de prélèvement

1/ Conception des cylindres.

L'épaisseur des parois doit être faible par rapport à la section. Cette condition n'est pas fréquemment réalisée dans les matériels commercialisés. Dans l'exemple présenté, l'épaisseur est de 1 mm pour un diamètre de 150 mm. Le tassement maximal est donc égal à 1,3 %.

Le bord inférieur du cylindre doit être biseauté vers l'extérieur. Certains auteurs conseillent un amincissement intérieur de la paroi immédiatement après le biseau. Son effet serait double : réduire le frottement terre-paroi et permettre une récupération partielle du tassement provoquée par l'enfoncement.

Le rapport entre la hauteur et le diamètre doit être limité. Des valeurs de l'ordre de 1/2 paraissent satisfaisantes.

2/ Enfoncement.

Le graissage de l'intérieur du cylindre limite sensiblement le frottement terre-paroi en terre humide.

L'enfoncement doit être lent et régulier. L'utilisation d'un vérin ou d'un cric est bien adaptée dans le cas de prélèvement à l'horizontale. Elle est évidemment moins commode dans le cas d'un enfoncement vertical. La percussion avec un marteau peut alors être employée en modérant l'intensité des chocs et en conservant soigneusement la verticalité du cylindre.

IV. LIMITES.

1/ Conditions physiques du sol.

La technique est inutilisable en sol caillouteux.

Elle n'est recommandable ni en conditions trop humides (risques de tassement) ni en conditions trop sèches (risques de fissuration).

Les risques de biais sont importants en sol trop meuble. Il est alors difficile d'éviter le tassement, d'araser, voire de maintenir l'échantillon à l'intérieur du cylindre.

Il est impossible de prélever un volume comportant des pores trop grossiers : lumières entre bandes de labour, macro-fissures de sol argileux. La porosité totale d'un horizon comportant ce type de pores sera donc sous-évaluée.

2/ Volume de mesure.

Les cylindres les plus couramment utilisés ont des volumes de quelques centaines de cm³. Ceux que nous utilisons 1200 cm³ environ.

En réduisant le volume :

- on accroît généralement la dispersion des résultats
- on augmente les risques de tassement car le rapport épaisseur /diamètre augmente ainsi que l'importance des frottements
- si l'on réduit la hauteur, on accroît l'erreur relative due aux défauts d'arasement.

3/ Résolution.

Elle est égale à la hauteur du cylindre. Celle-ci ne peut être trop réduite car un aplatissement excessif rend l'échantillon très fragile.

Il semble difficile de descendre à un rapport $\frac{h}{D} < \frac{1}{2,5}$.

L'emploi de cylindres de faible hauteur implique donc une forte diminution du volume total des échantillons et entraîne les inconvénients mentionnés précédemment.

De tels cylindres permettent cependant de mesurer la densité de couches bien localisées (fond de travail compact par exemple). En revanche, compte-tenu de la durée des opérations, la technique n'est pas recommandable pour décrire des profils complexes de densité.

4/ Temps de mesure.

Les opérations sont aisément réalisables par une personne seule. Le temps de mesure dépend surtout de la profondeur à atteindre. On peut l'estimer à une dizaine de minutes sur le terrain par prélèvement pour la couche labourée.

V. PRECISIONS.

Elle est difficile à évaluer. Les effets de compactage ou de fissuration par l'enfoncement ne sont pas quantifiables.

L'incertitude sur le volume du cylindre métallique peut être très réduite par un usinage soigné.

La qualité de l'arasement est difficile à évaluer également et variable suivant les conditions de prélèvement. Dans les meilleures conditions, elle peut atteindre une précision de l'ordre de 10^{-1} mm. Pour $2 \cdot 10^{-1}$ mm et $h = 7$ cm, on a une erreur de l'ordre de 0,5 % au maximum.

Matériel nécessaire :

- Poussoir
- Cylindres acier inoxydable
- Couverts matière plastique
- Bandes adhésives
- Couteau à lame forte et longue
- Marteau ou cric pour enfoncement
- Règle d'arasement
- Caisse pour transport
- Balance
- Etuve.

MESURES de la DENSITE du SOL en PLACE

B. DENSIMETRE à MEMBRANE

I. PRINCIPE.

On mesure le volume d'une cavité creusée dans le sol. On récupère le matériau extrait de cette cavité. Par pesée à l'état humide, puis après séchage à 105°C, on peut ensuite calculer la densité et la teneur en eau.

II. DESCRIPTION.

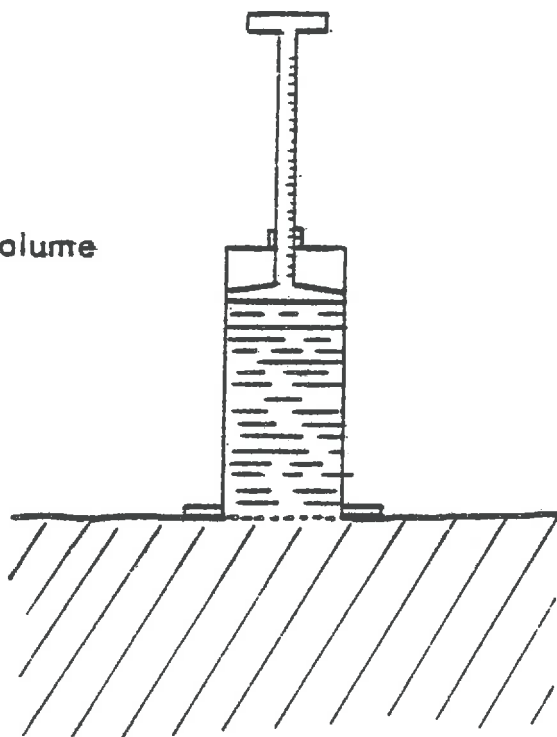
1/ Appareil.

C'est un cylindre rempli d'eau et fermé à sa base par une membrane souple. Dans le modèle présenté, le volume d'eau contenu dans le cylindre est lu sur une tige graduée reliée à un piston. D'autres modèles (moins précis) sont à lecture directe du niveau d'eau dans le cylindre.

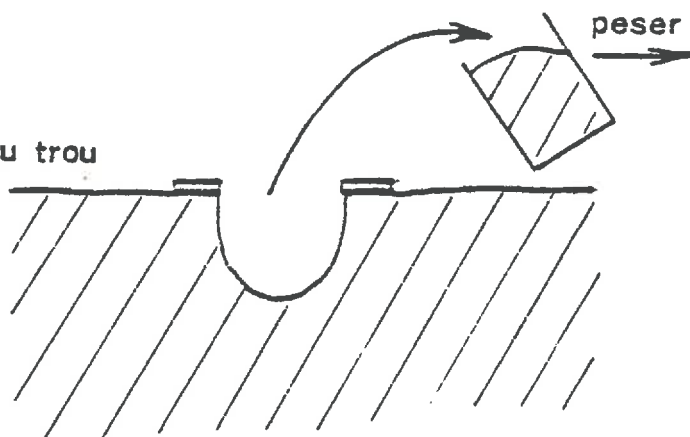
2/ Description de la technique.

- Préparer l'appareil en le remplissant d'eau bouillie dégazée afin d'éviter la formation de bulles lors de l'emploi.
- Préparer la surface de l'horizon étudié : dégager les débris et aplanir soigneusement afin d'assurer un bon contact entre la plaque de base et le sol et la stabilité de cette plaque.
- Fixer le densimètre sur la plaque de base en prenant soin de ne pas pincer la membrane. Régler le ressort de contrôle (dynamomètre) de la pression appliquée, vérifier l'absence de bulles.
- Mesurer le volume initial V_0 .
- Retirer le densimètre. Creuser une cavité aussi régulière que possible et approximativement en forme de calotte sphérique. Son volume doit être de l'ordre de 1 l. Elle peut être plus faible si l'on cherche à mesurer la densité d'une couche de faible épaisseur. La terre est récupérée dans une boîte. Celle-ci est fermée de façon étanche (bande adhésive).
- Replacer le densimètre sur la plaque de base et effectuer la seconde lecture de volume.
- Au laboratoire, peser la terre humide, puis après séchage à 105°C pendant au moins 48 heures.

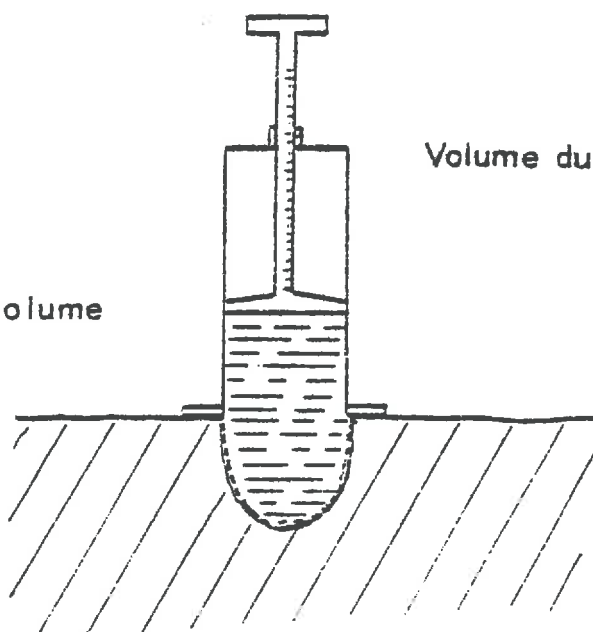
1. Lecture du volume initial V_0



2. Creusement du trou



3. Lecture du volume final V_1



Volume du trou = $V_1 - V_0$

Fig. 1. MESURE DE LA DENSITE EN PLACE : TECHNIQUE DU DENSITOMETRE A MEMBRANE

III. POINTS DELICATS.

Mis à part le remplissage et l'élimination des bulles, ils concernent :

- la mise en place de la plaque de base : il faut éviter que la membrane puisse s'insinuer entre la plaque et le sol ce qui fausse la valeur du volume initial V_0 . La plaque doit être aussi parfaitement immobilisée que possible. Tout déplacement au cours des opérations est une cause d'erreur.
- le creusement de la cavité et la récupération de la terre : il faut éviter de tasser en creusant, et de former une paroi rugueuse pour obtenir le meilleur contact terre-membrane. Il faut aussi récupérer soigneusement toute la terre de la cavité.

IV. CONDITIONS d'EMPLOI - LIMITES.

1/ Cailloux.

La mesure est praticable dans des sols contenant des graviers, à condition qu'ils soient arrondis (risque de crevaisson de la membrane). En présence de cailloux grossiers (plusieurs cm), utiliser un densimètre à grand volume de mesure (jusqu'à 3 l) ou la technique "au sable". La présence de graviers étant détectée lors du creusement, on peut déterminer la densité de la terre fine (v. fiche).

2/ Etat physique du sol.

La technique comporte de grands risques de biais dans les sols facilement déformables : très meubles ou très humides. La pression exercée par la membrane déforme alors le sol et le volume de la cavité est surévalué. La stabilité de la plaque de base est aussi très difficile à assurer.

Quand il existe des pores très grossiers (travail du sol, fissures des sols argileux), la limite de la cavité est mal définie. La membrane peut s'insinuer dans ces pores. Le volume est surévalué.

Ces deux restrictions sont très gênantes pour l'étude des techniques de travail du sol.

3/ Résolution.

Il est possible de réduire l'épaisseur de la cavité, mais la diminution du volume mesuré implique un accroissement proportionnel de l'incertitude relative. Concrètement, avec le modèle de densimètre présenté, on peut considérer 5 cm comme une limite.

Dans les cas de fort gradient de densité, la forme de la cavité détermine l'importance relative des différentes sous-couches prises en compte dans la mesure. La densité moyenne mesurée risque donc d'être biaisée.

4/ Temps de mesure.

Il dépend beaucoup de la profondeur à atteindre. Il est de l'ordre de 15 minutes sur le terrain dans la couche 0-30 cm pour un opérateur seul.

5/ Perturbation.

La surface à aplanir pour mise en place de l'appareil est d'environ 40 cm x 40 cm. La surface perturbée devient plus importante dès que l'on réalise des mesures en profondeur. Elle affecte environ 1 m² pour des mesures à 30 cm de profondeur.

V. PRECISION.

Si le volume de la cavité est suffisant, l'incertitude de lecture de l'appareil et sur la masse de sols sont faibles.

- Lecture du volume : un vernier permet de lire avec une précision de 1 cm³ qui est sans doute illusoire dans les conditions de terrain. On peut admettre 2 cm³ sur chacune des deux lectures (V_0 et V), soit $\frac{\Delta V}{V} \sim 0,5 \%$ pour une cavité de 1 l.

- Masse de sol : un opérateur soigneux prélève la terre de la cavité avec des pertes inférieures à 5 g. On a donc également pour 1 l

$$\frac{\Delta m}{m} \sim 0,5 \%$$

L'incertitude minimale est donc inférieure à 1 %. La précision réelle de la technique est en fait déterminée par les limites définies précédemment.

Matériel nécessaire :

- Densimètre à membrane + plaque embase
- Caisse de transport
- Membranes de rechange
- Eau bouillie dégazée
- Boîtes à humidité : grands modèles - 1 litre à 1,2 litres
- Récipient à eau bouillie dégazée
- Raclettes
- Couteau à lame forte
- Ruban adhésif
- Ciseaux
- Valets de fixation du socle (3)
- Marteau
- Pinceau
- Petite pelle
- Boîte fourre-tout.

MESURES de la DENSITE du SOL en PLACE

C. METHODE "au SABLE"

I. PRINCIPE.

On mesure le volume d'une cavité creusée dans le sol en la remplissant de sable calibré dont la densité est connue.

II. DESCRIPTION.

1/ Détermination de la densité du sable calibré déposé dans des conditions standardisées :

- On utilise un moule qui doit avoir un volume suffisant pour minimiser l'effet de contact paroi-sable.

En théorie, pour un moule cubique de côté "C", si le sable a un diamètre D :

$$\text{Il faut que le rapport } \frac{C}{D} > 100$$

- On utilise en pratique un cylindre en acier de 15 cm de diamètre et 7 cm de hauteur ($V = 1\,300 \text{ cm}^3$) pour un sable calibré entre 500 et 700 μm .

$$\text{On a un rapport } \frac{C}{D} > 150$$

Le sable est calibré dans un intervalle aussi étroit que possible afin de réduire le tri des particules lors du transport et du dépôt.

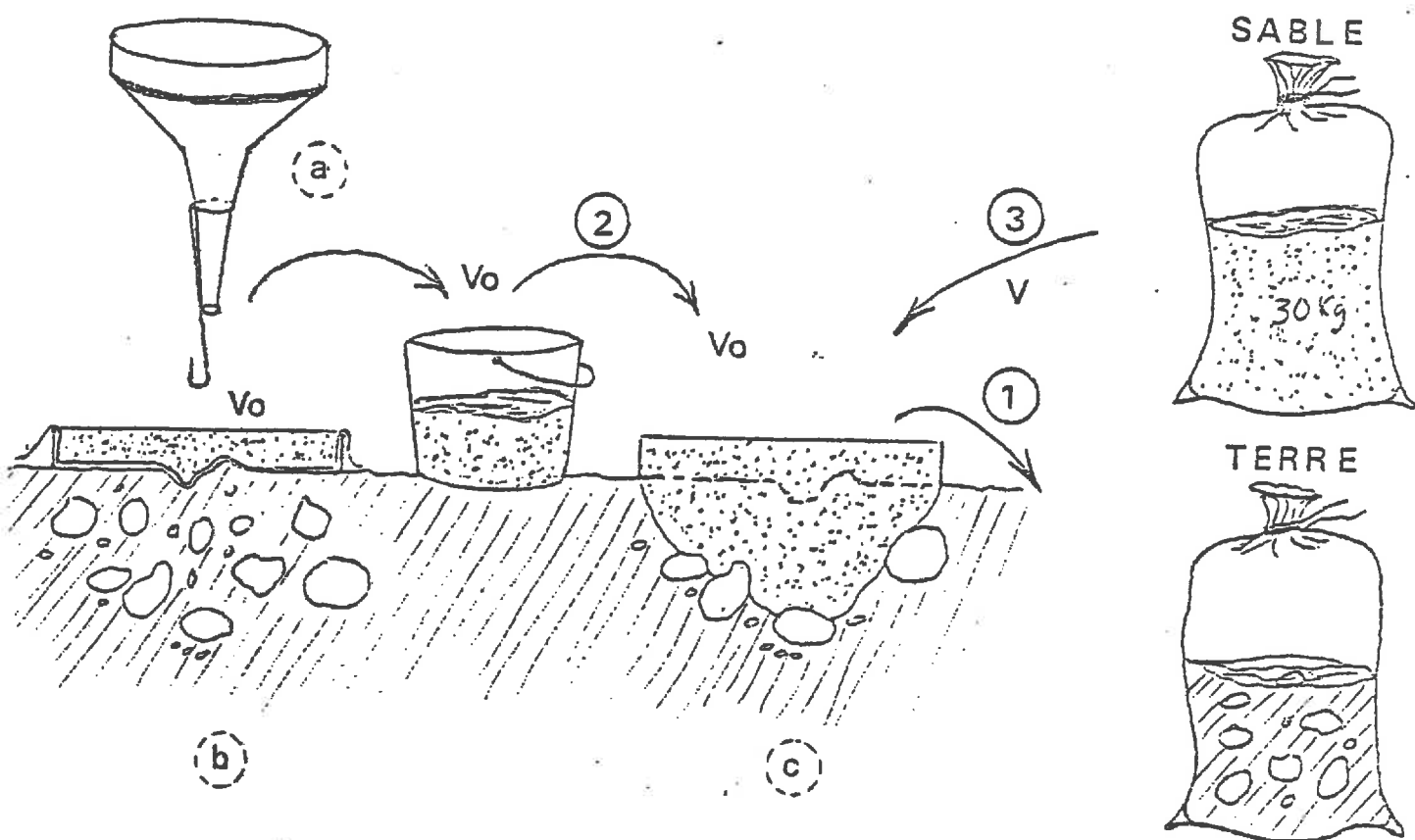
Un écoulement régulier des particules est assuré quand les particules sont relativement grossières.

Le remplissage du moule s'effectue avec un entonnoir à jauge (cf. 3.2.).

2/ Détermination de la densité du sol en place.

- Sur la couche de sol considérée, déterminer une surface plane où l'on place un "gabarit" (cerceau de 50 cm de \varnothing et 2 cm de hauteur en acier, muni de 3 pointes de fixation dépassant de 3 cm).
- Dégager délicatement herbes et débris divers
- Poser une feuille de plastique élastique très mince sur le gabarit

- Evaluer le volume dû au contact cerceau, surface du sol, en le remplissant avec du sable calibré versé à l'aide de l'entonnoir à jauge (voir figure : a,b) Le sable se dépose en tombant d'une hauteur "H" constante.
- Araser avec une règle
- Ensuite récupérer dans un seau, "tout" le sable contenu dans l'espace délimité par le gabarit, et la feuille plastique (Ce sable représente un volume V_0)
- Sans déplacer le gabarit (très important), creuser un trou, délicatement au couteau et à la raclette, d'environ 20 à 30 litres, soit 30 cm de profondeur
- Récupérer avec soin "tout" le matériau prélevé lors du forage du trou (cailloux + graviers + T. fine + débris) 1
- Refermer hermétiquement le sac contenant le matériau. Il sera pesé au laboratoire (poids de terre humide)
- Remplir le trou de sable calibré comme précédemment ; pour cela :
 - . Verser le contenu (V_0) du sable stocké dans le seau 2
 - . Verser un volume "V" du même sable calibré 3 provenant d'un sac contenant 30 kg exactement
 - . Araser délicatement et remettre dans le sac de 30 kg le sable en excès.



Le volume V de sable versé pour remplir la cavité est :

$$V = \frac{30 - x}{\rho_{ds}}$$

x : masse de sable restant dans le sac

ρ_{ds} : densité du sable sec

III. POINTS DELICATS.

La mise en place du gabarit doit éviter toute fuite de sable lors du 2ème remplissage.

La mise en place du sable doit être aussi standardisée que possible, en particulier la répartition sur toute la surface doit se faire régulièrement.

Le creusement de la cavité doit se faire précautionneusement, il faut en particulier éviter tout déplacement du gabarit.

L'arasement doit être soigné, ainsi que la récupération du sable excédentaire.

IV. CONDITION D'EMPLOIS - LIMITES.

1/ Conditions d'emploi.

La technique est utilisée pour les mesures portant sur de grands volumes. Celles-ci sont indispensables lorsque les cailloux sont abondants et/ou grossiers.

Dans ce cas, l'évaluation de la teneur en cailloux de l'échantillon prélevé et de la densité de ces cailloux permet de calculer la densité de la terre fine (v. fiche).

La présence de fissures grossières peut en limiter l'utilisation (écoulement de sable).

2/ Limites.

La réalisation de la mesure est longue : environ 1 heure sur le terrain par mesure dans la couche 0-30 cm.

La préparation du sable calibré est également une opération longue. Le volume de sol perturbé est important.

Le transport des échantillons et du sable peut devenir problématique.

En revanche, une mesure portant sur un grand volume a une dispersion plus faible. On peut donc évaluer la densité de terre fine avec un nombre de répétitions plus faible qu'avec les techniques portant sur des volumes plus réduits.

Ces limites sont telles que la technique est à réserver pour les cas où elle est seule utilisable.

V. PRECISION-

Compte-tenu du grand volume concerné, on peut dans la plupart des cas, si on agit précautionneusement, rendre négligeables les incertitudes dues à l'arasement et à l'indétermination des limites de la cavité, ainsi que celles concernant les masses de sable et de terre prélevées.

La précision dépendra donc du degré d'exigence de l'opérateur en la matière.

Elle dépend également de la validité de la densité attribuée au sable. Avec un sable correctement calibré, l'incertitude est de $\pm 1,5 \%$.

Matériel nécessaire

Mesure de la densité ρ_{ds} du sable calibré :

- 2 tamis de rapport d'ouverture 2 (TAMISOR)
Obtenir un sable calibré entre 500 μm et 1000 μm
(500 à 700 μm).
- 1 cylindre en acier inoxydable \varnothing 15 cm
épaisseur 2 mm, h 7 cm

Mesure de la densité du sol en place :

- 2 gabarits 50 cm \varnothing 2 cm de h
en acier 3 pointes de fixation
- 1 entonnoir large + jauge
- 1 couteau à lame très forte
- Grands sacs plastique (30 kg)
- Petits sacs plastique (10 kg)
- 1 paire de ciseaux
- 1 rouleau de ficelle
- 1 marqueur indélébile
- 2 raclettes (mains) en acier
- 1 petite pelle en acier
- 1 rouleau d'adhésif large
- 1 pinceau à longs poils
- 1 grande pelle
- 1 bêche
- 2 feuilles de plastique fin
- 2 règles en acier (arasement)
- 1 seau en plastique
- 1 marteau de pédologue (piochon)
- 1 mètre à ruban
- 1 marteau
- 1 pince à épiler
- 1 boîte (fourre-tout).

MESURE de la DENSITE du SOL en PLACE

D. TRANSMISSION d'un RAYONNEMENT γ

L. PRINCIPE DE LA METHODE.

La méthode de mesure gammamétrique de la densité apparente in situ est basée sur la loi d'absorption par la matière d'un rayonnement gamma émis par une source radioactive.

$$C = C_0 e^{-1 (\rho_d \mu_s + \rho_w \mu_w \theta)}$$

C = nombre de photons comptés après traversée du matériau (par seconde)

C₀ = nombre de photons émis par la source (par seconde)

l = épaisseur de matériau traversée

ρ_d = masse volumique sèche du matériau (g/cm³)

μ_s = coefficient d'absorption massique du matériau à l'état sec

ρ_w = masse volumique de l'eau (g/cm³)

μ_w = coefficient d'absorption massique de l'eau

θ = teneur en eau volumique du matériau

La loi d'absorption suppose que le nombre C de photons dénombrés n'aient subi aucune interaction avec le matériau et qu'ils aient conservé leur énergie initiale.

Cette condition est difficilement réalisable dans la pratique pour ce type d'appareillage. La loi est cependant conservée en appliquant un coefficient expérimental α caractérisant l'appareillage utilisé et s'écrit alors

$$C = C_0 e^{-\alpha l (\rho_d \mu_s + \rho_w \mu_w \theta)}$$

$$C = C_0 e^{-\alpha l (\rho_d \mu_s + \rho_w \mu_w \frac{W \rho_d}{\rho_w})}$$

W : teneur en eau pondérale

$$\ln C = \ln C_0 - \alpha l \rho_d (\mu_s + \mu_w W)$$

μ_s peut varier légèrement d'un sol à l'autre

$$\left(\frac{\Delta \mu_s}{\mu_s} < 1 \% \text{ dans la plus part des cas} \right)$$

$$\mu_w = 0,0857 \text{ cm}^2/\text{g}$$

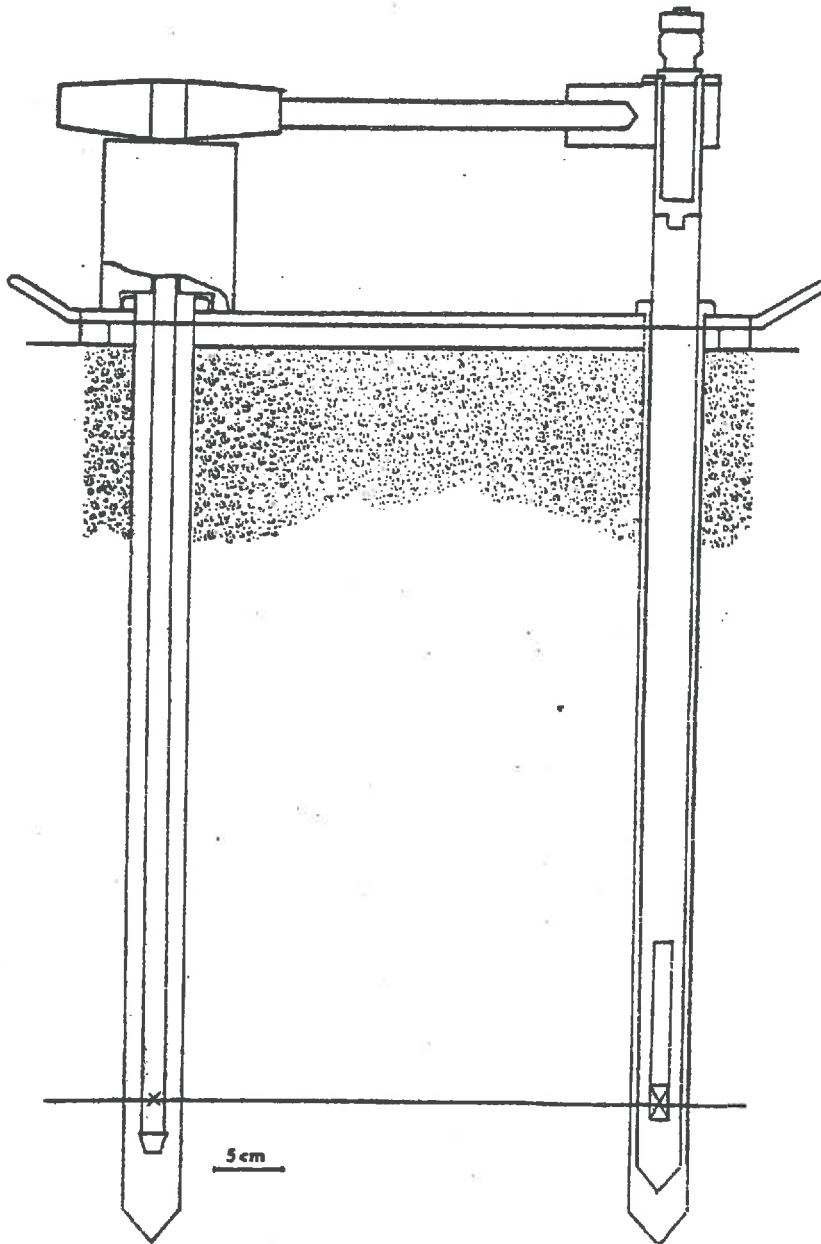
Container

Base plate
(stainless steel)

Access tubes

O.D. : 40 mm
(PVC or Al)

Source ^{137}Cs
5 mCi
or
1 mCi



Probe tubing (stainless steel)

O.D. : 31,8 mm

Thickness : 1 mm

Contains :

e.h.t. supply
amplifier
signal conditioner

Photomultiplier tube

Scintillator (NaI crystal)

∅ 12 mm

Filter :

1 mm Cd

1,5 mm Pb

On prend comme référence $\mu_0 =$ coefficient d'absorption massique du calcaire = $0,0776 \text{ cm}^2/\text{g}$

$$\ln C = \underbrace{\ln C_0}_b - \underbrace{\alpha l \mu_0 \rho_d}_a \underbrace{\left(\frac{\mu_s}{\mu_0} + \frac{\mu_w}{\mu_0} W \right)}_{\rho_c}$$

Un étalonnage réalisé sur matériaux connus permet d'établir une relation

$$\ln C_0 \approx - a \rho_c + b$$

a et b étant connus, on peut déterminer ρ_c en mesurant C. On en déduit :

$$\rho_d = \frac{\rho_c}{\frac{\mu_s}{\mu_0} + \frac{\mu_w}{\mu_0} W}$$

Avec :

$$\frac{\mu_s}{\mu_0} \approx 1$$

$$\frac{\mu_w}{\mu_0} \approx 1,1$$

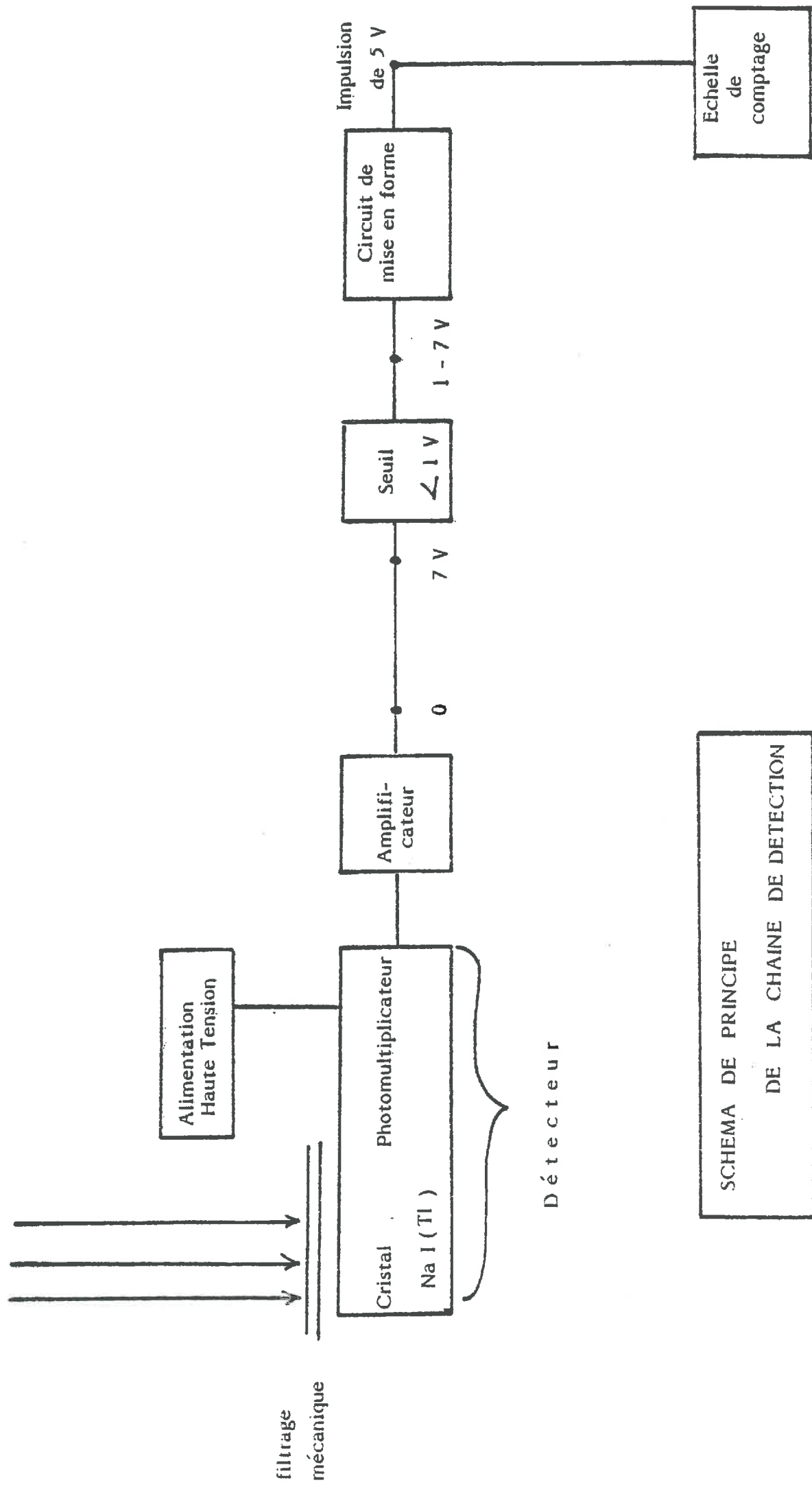
$$\text{d'où } \rho_d = \frac{\rho_c}{1 + 1,1 W}$$

W est déterminée à partir de prélèvements par méthode gravimétrique.

II. DESCRIPTION.

Schéma de principe.

- L'émetteur est constitué d'une source de 5 mCi de ^{137}Cs (période = 30 ans)
- Le compteur émet des impulsions d'une amplitude proportionnelle à l'énergie des photons reçus.
- Les impulsions correspondant à des niveaux d'énergies indésirables sont éliminées par le circuit de seuillage.
- Le signal est ensuite mis en forme pour être transmis par câble à l'échelle de comptage.



SCHEMA DE PRINCIPE
DE LA CHAINE DE DETECTION

Alimentation.

L'ensemble de détection-comptage est alimenté par batteries 6V Cadmium Nickel assurant une autonomie de 15 heures de mesures.

Assemblage Mécanique.

Il est destiné à maintenir la source et le détecteur face à face lors de la scrutation. Celle-ci est effectuée par deux tubes d'accès parallèles préalablement mis en place.

Cet assemblage est constitué d'une tige porte source et d'un tube porte détecteur, maintenus solidairement par une tige d'écartement qui permet de régler l'épaisseur de scrutation sur l'une des 4 positions disponibles :

10 cm	
15 cm	avec une source de 1 mCi
20 cm	
30 cm	avec une source de 5 mCi

Au repos, la source est placée dans un conteneur blindé destiné à protéger l'utilisateur d'un rayonnement. Diverses sécurités empêchent la mise à nu accidentelle de la source.

III. CONDITIONS ET LIMITES D'UTILISATION.

L'état physique et le volume du milieu de mesure peuvent limiter l'application de la technique gammamétrique. La durée des opérations peut également limiter le nombre de mesures effectuées.

1/ Etat physique.

La mesure est réalisable dans tous les états physiques du milieu, y compris les états agrégés, sans altération ou perturbation significative de l'état initial, moyennant une technique appropriée de mise en place de la sonde.

Seule la présence de cailloux limite la possibilité de perçage des avant-trous.

Pour une mesure en C/s

$$C \pm 2 \sqrt{\frac{\bar{C}}{t}}$$

N = nombre de photons dénombrés

\bar{C} = taux de comptage moyen (C/s)

t = temps total de comptage

- Erreur liée à l'indétermination sur l'épaisseur scrutée.

Elle constitue la source essentielle d'erreur sur ρ_c . L'erreur relative sur ρ_c est proportionnelle à l'erreur relative sur l. L'erreur sur l trouve son origine dans le défaut de parallélisme des tubes d'accès et augmente avec la profondeur de scrutation.

- Erreur liée à la représentativité du prélèvement pour le dosage d'humidité relative.

Il est nécessaire d'adapter la technique de prélèvement en fonction de la répartition des teneurs en eau dans le sol, particulièrement en présence de forts gradients verticaux ou horizontaux.

Température.

Certains éléments de la chaîne de détection présentent une légère instabilité en présence de variations de température. Il en résulte une légère erreur sur la valeur de densité obtenue qui varie de $6,5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

Etalonnage.

Le plus grand soin doit être apporté à la réalisation du banc d'étalonnage.

Les caractéristiques des blocs étalons doivent être déterminées avec la plus grande précision :

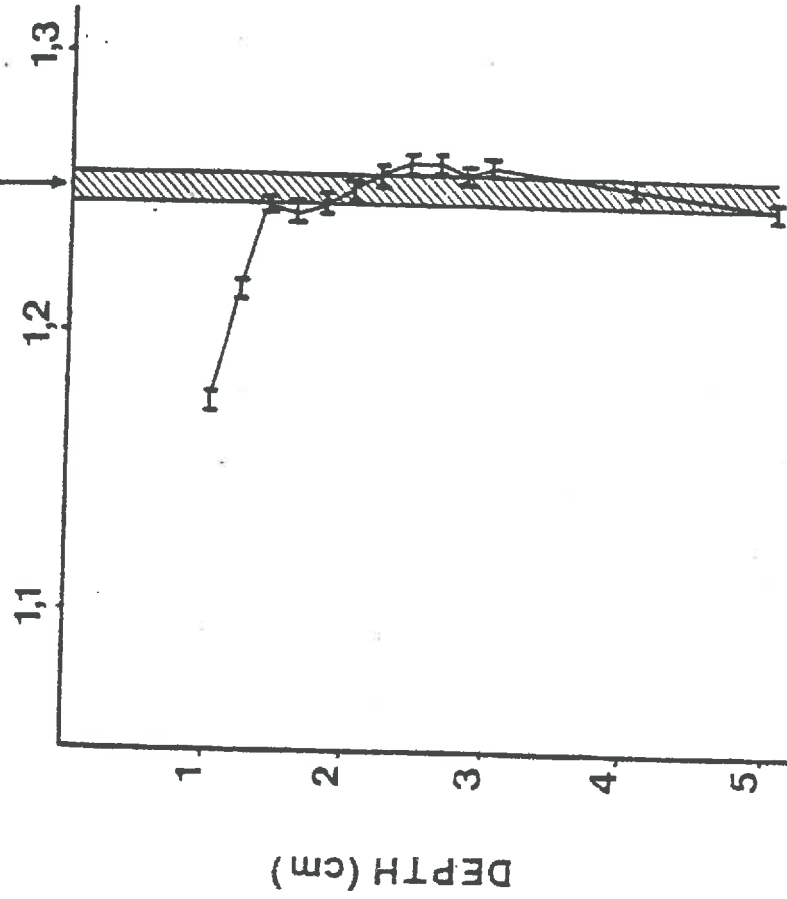
- coefficient d'absorption massique
- volume (soit par analyse chimique, soit par atténuation γ)
- poids

D'autre part, ces blocs doivent présenter une grande homogénéité, les pré-trous doivent être percés avec précision. Enfin, ils devront présenter une épaisseur suffisante pour que la mesure à mi-hauteur dans le bloc ne soit affectée ni de l'influence de l'air, ni de l'influence de la proximité d'un matériau de densité différente (15 cm pour la sonde présentée).

EFFECT OF AIR. MATERIAL INTERFACE

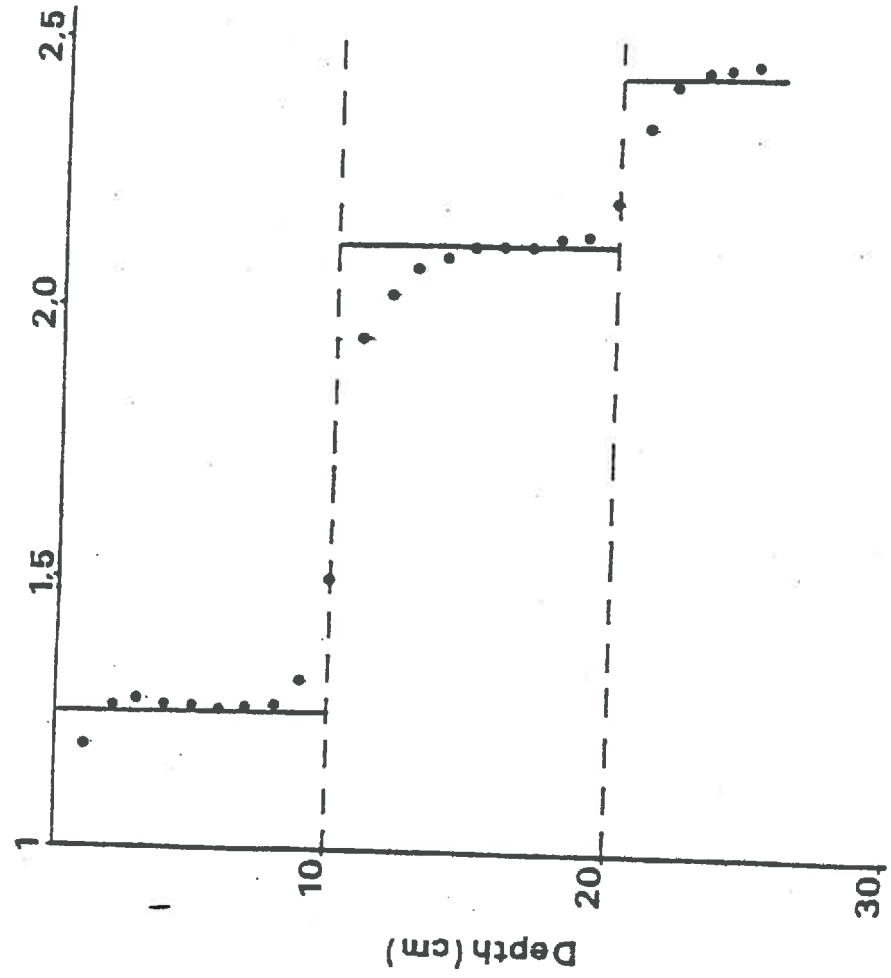
Bulk density (g/cm³)

Density of the material



RESOLUTION

Bulk density g/cm³



D'autre part, la présence de cailloux soulève les mêmes problèmes d'interprétation des résultats (calculs de la porosité) qu'avec toute autre technique de mesure. Il peut être nécessaire alors d'évaluer la densité de la terre fine, dans le volume concerné par la mesure, en mesurant la teneur en cailloux et leur densité.

2/ Volume de mesure.

Si l'on fait l'hypothèse d'un volume de mesure cylindrique de rayon compris entre 2,5 et 3 cm, le volume scruté est compris entre : 600 et 850 cm³ pour l = 30 cm ; 400 et 550 cm³ pour l = 20 cm.

Aucune valeur significative de ρ_d pourra être obtenue dans un échantillon de volume inférieur au volume de mesure.

Près de la surface, on ne pourra obtenir une mesure qu'à partir de 2,5 à 3 cm de profondeur.

De même, il ne sera pas possible d'obtenir la valeur de densité d'une couche dont l'épaisseur est inférieure à 5 à 6 cm.

3/ Durée de la mesure.

La durée de mise en place est variable selon l'objectif de la mesure et l'état du milieu.

La productivité est accrue lorsque les mesures sont réalisées par deux personnes dont l'une prépare les trous de mise en place et l'autre réalise les comptages. Dans ces conditions, lors de l'implantation de tubes de 50 cm de long avec prise d'échantillons pour dosage de l'humidité, la durée de mise en place peut varier de 20 à 30 mn.

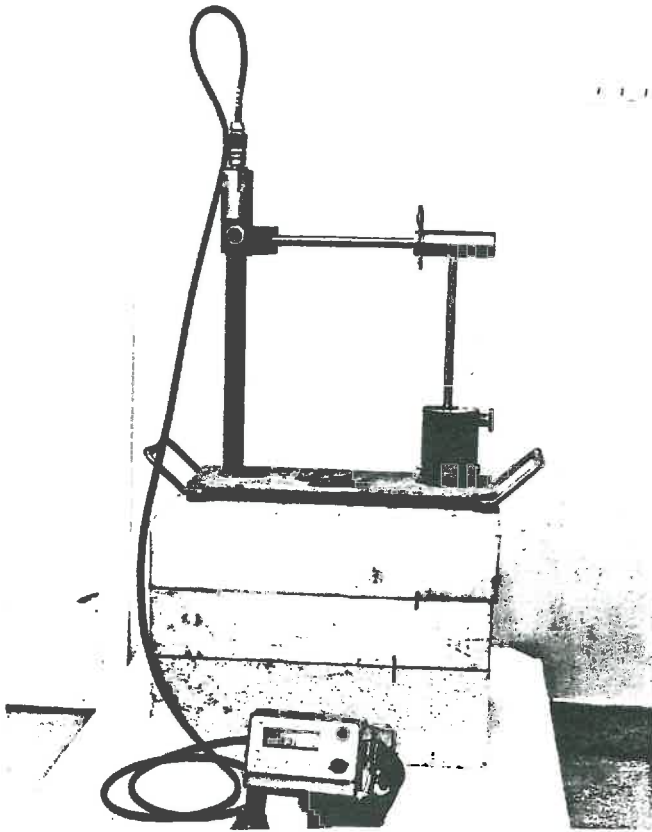
Les temps de comptages sont très courts, de l'ordre de 1 mn par niveau scruté.

IV. SOURCES D'ERREUR.

- Erreur liée au caractère aléatoire de l'émission γ . Celle-ci est un processus poissonnien. Si N est le nombre de photons émis, en un temps donné, l'écart-type σ_N est :

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad \text{pour } P = 95 \% \quad N \pm 2 \sqrt{N}$$

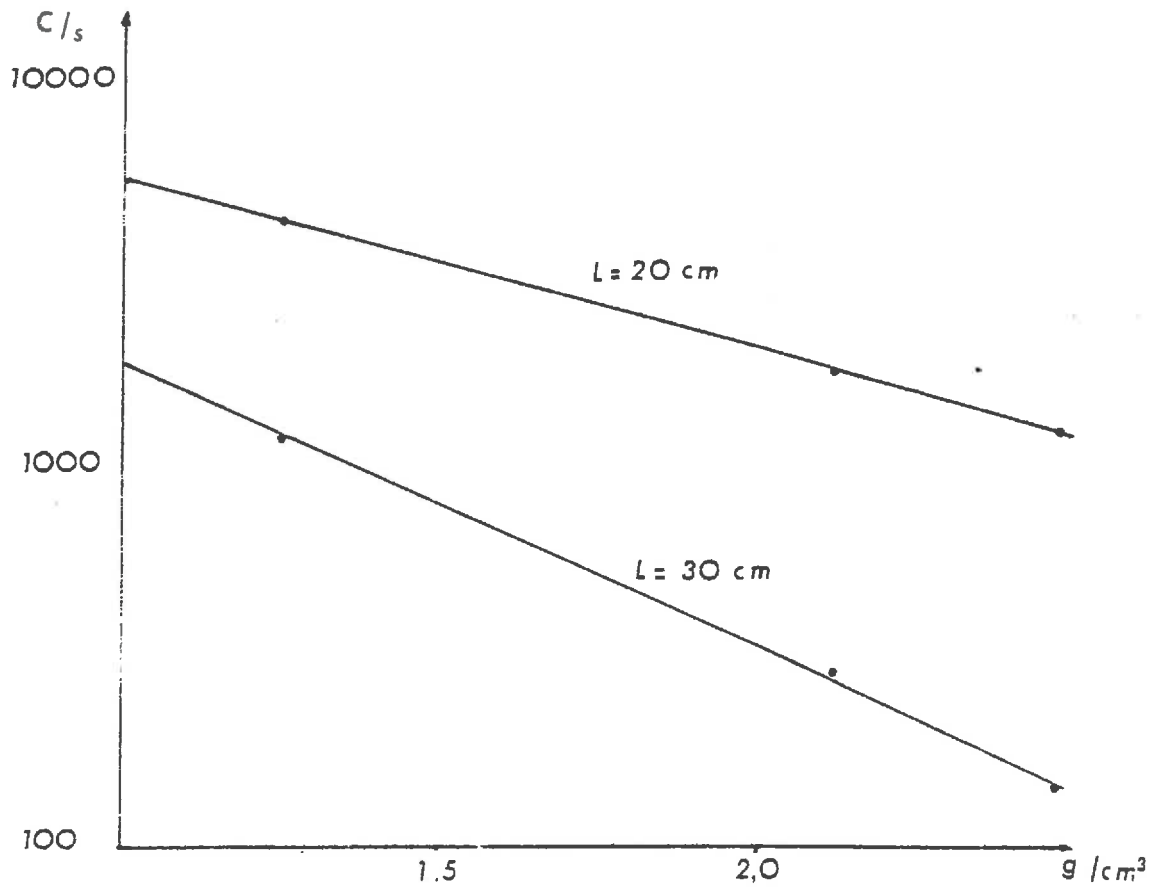
ETALONNAGE



Technyl $\rho_c = 1,249 \text{ g/cm}^3$

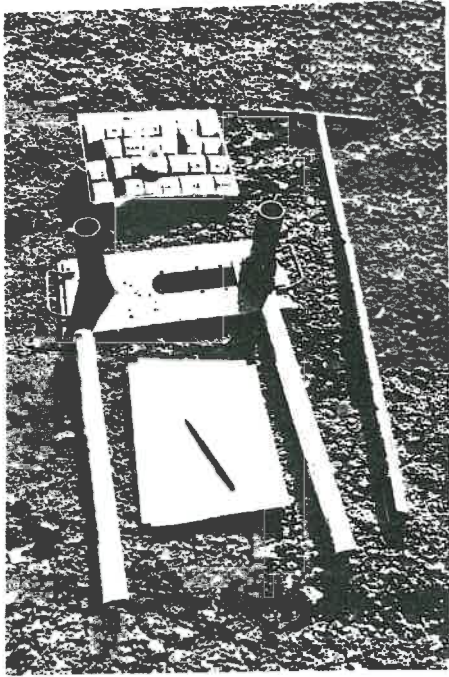
Roche calcaire $\rho_c = 2,121 \text{ g/cm}^3$

Roche calcaire $\rho_c = 2,485 \text{ g/cm}^3$

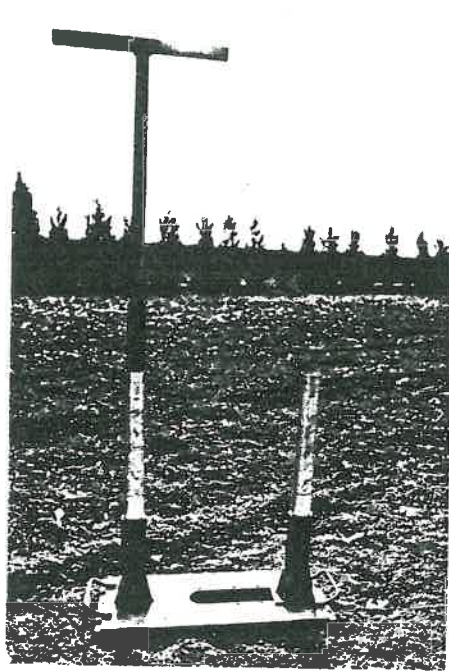


Droites d'étalonnage

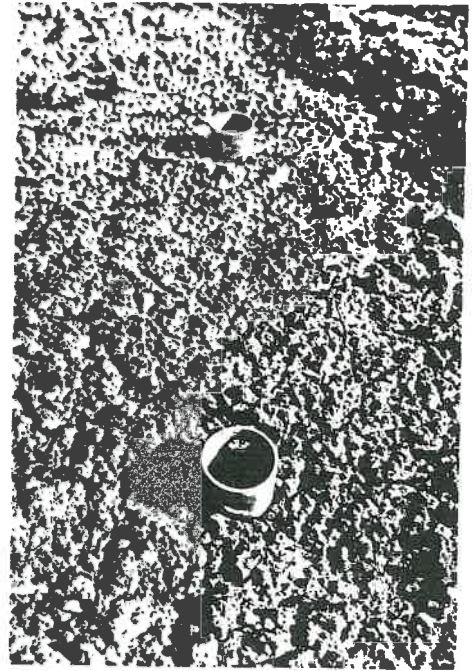
MISE EN PLACE EN MILIEU AGREGÉ



matériel de perçage
des avant-trous



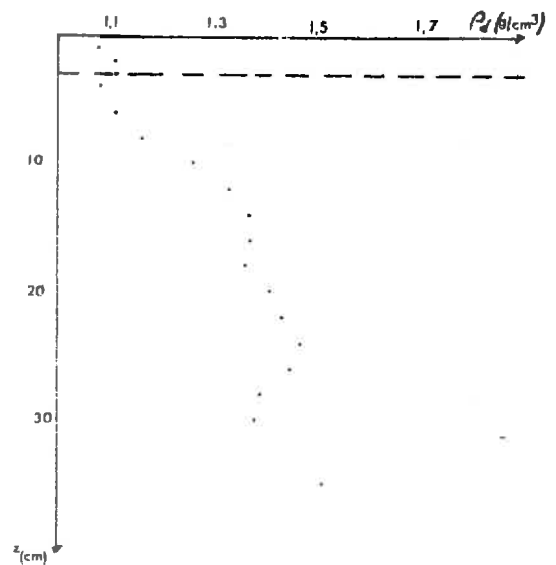
le tube est enfoncé en même
temps que la tarière pour
éviter les éboulements



les tubes sont mis en
place, le milieu scruté
n'est pas perturbé



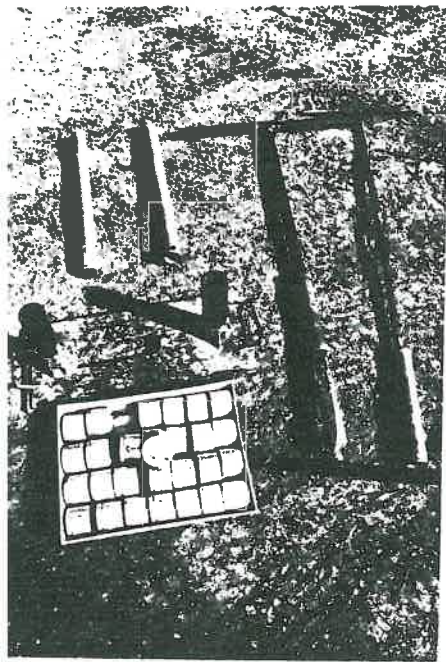
le prélèvement est réalisé à partir d'une
paroi verticale entre les tubes.



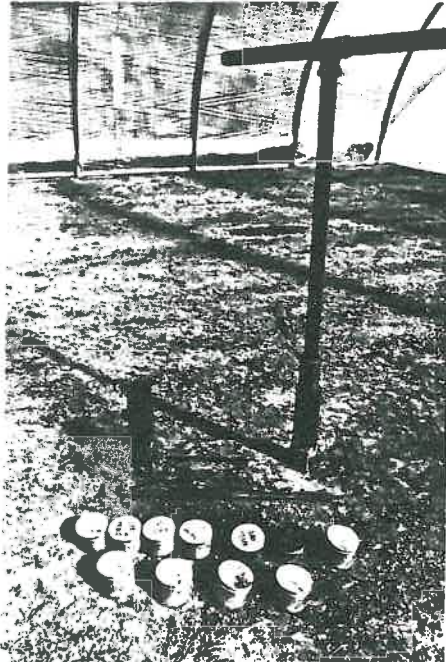
Profil de densité

MISE EN PLACE EN SOL COHERENT

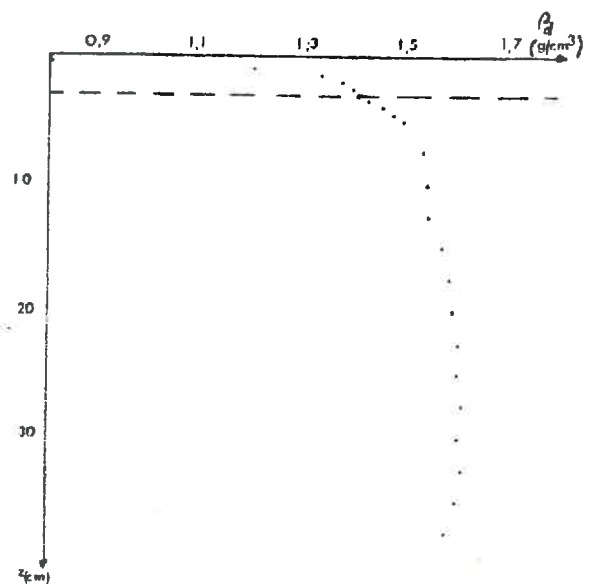
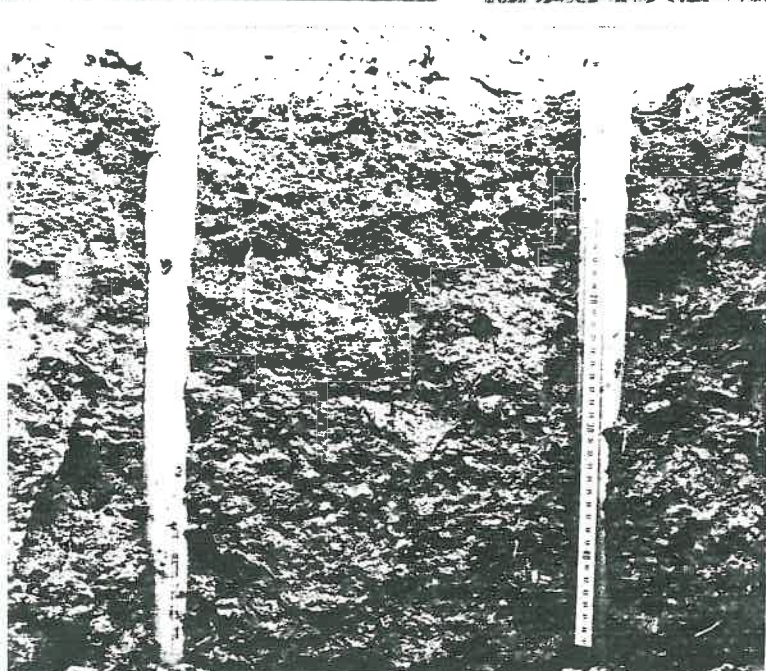
Matériel de forage



forage et prélèvements d'échantillons pour dosage d'humidité.



mise en place tubages



Protection contre le rayonnement

Le rayonnement résiduel est de 2 millirem à 1 mètre de la source lorsque celle-ci est dans son conteneur.

Il est nécessaire d'éviter tout stationnement inutile près de la sonde.

L'utilisateur doit être muni d'un dosimètre lors des manipulations et est soumis à un contrôle médical selon la législation en vigueur.

Annexe 1 - DETERMINATION de la DENSITE PARTIELLE de TERRE FINE

I. PRINCIPE.

En sols caillouteux, même si la teneur en cailloux est faible, 5 à 10 %, elle peut affecter fortement les évaluations de la porosité du fait de sa variabilité dans le volume concerné par la mesure de densité.

Il est donc nécessaire d'évaluer la teneur volumique en cailloux correspondant à chaque mesure de la densité. Pour ce, on sépare les cailloux (éléments > 2 mm) et on mesure leur densité propre.

II. DESCRIPTION.

- Sécher l'échantillon prélevé sur le terrain pour la mesure de densité (densimètre à membrane, méthode "au sable") ou uniquement (transmission γ) pour mesure de la teneur en cailloux. Le séchage se fait à l'air pendant 48 heures ou à l'étuve à 105°C si l'échantillon est utilisé également pour mesure de la teneur en eau.

- Recueillir dans un sac plastique et peser.
- Tamiser sur une passoire à trous de 2 mm par broyage ménagé.
- Déposer les graviers et cailloux dans un grand récipient et laver abondamment
- Sécher à l'air, puis peser
- Mesurer la densité sur un échantillon de cailloux par pesée hydrostatique dans l'eau, ou mesure directe du volume dans une éprouvette.

III. POINTS DELICATS.

1/ Broyage.

Il faut éviter de concasser les cailloux pendant le broyage nécessaire au tamisage. Ceci peut présenter des difficultés lorsque ces cailloux sont fragiles.

2/ Mesure de la densité des cailloux.

Elle peut présenter des difficultés si les cailloux sont poreux. Les techniques à utiliser sont alors les mêmes que pour des mottes ou des agrégats terreux.

IV. CALCULS

La densité de sol en place ρ_d est connue par le calcul propre à la technique de mesure choisie.

Si t_c est la teneur massique en cailloux :

$$t_c = \frac{m_c}{m_T}$$

m_c : masse des cailloux secs à 105°C

m_T : masse totale après séchage à 105°C

ρ_c : densité des cailloux

Alors ρ_{dF} densité de la terre fine est

$$\rho_{dF} = \frac{(1 - t_c) \rho_d \rho_c}{\rho_c - \rho_d t_c}$$

DETERMINATION de la DENSITE de SOLIDE ρ_s

A. TECHNIQUE du PYCNOMETRE à EAU

I. PRINCIPE.

On détermine le volume d'eau déplacé par la phase solide d'un échantillon de masse connue dans un flacon de volume connu (pycnomètre).

II. DESCRIPTION.

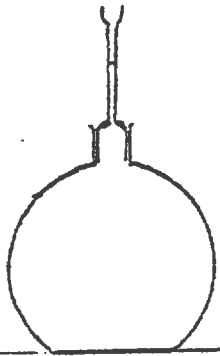
- Sécher à l'air l'échantillon. Broyer et tamiser à travers un tamis de 300 μm
- Peser le pycnomètre vide m_0
- Remplir d'eau permutée dégazée à la température du laboratoire
- Peser m_3
- Vider le pycnomètre
- Introduire l'échantillon
- Compléter aux trois quarts le pycnomètre avec de l'eau dégazée
- Placer plusieurs heures sous vide. Compléter ensuite avec de l'eau dégazée jusqu'au trait repère. Ajuster à l'aide d'une seringue. Essuyer soigneusement le pycnomètre
- Peser m_2
- Enlever l'eau en excès pour éviter les projections par ébullition et sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Peser m_1
- Calculs :

$$\rho_s = \frac{m_1 - m_0}{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)}$$

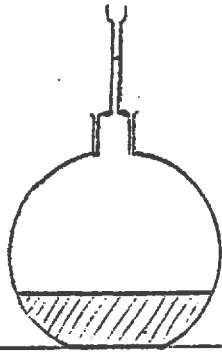
III. POINTS DELICATS.

1/ Saturation de l'échantillon.

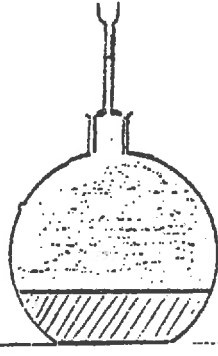
Elle ne peut être assurée que par l'emploi d'eau dégazée et un passage prolongé sous vide. Lorsque la mouillabilité est réduite (échantillons riches en matières organiques), remplacer l'eau par du pétrole. L'ordre des opérations est alors à modifier légèrement. L'échantillon doit être séché à 105°C et la masse m_1 déterminée avant de compléter le volume du pycnomètre avec du pétrole.



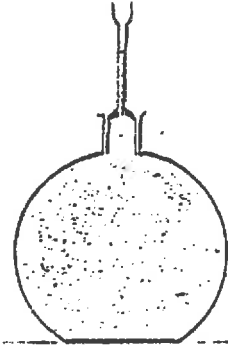
M1



M2



M3



M4

La densité est alors :

$$\rho_s = \rho_p \frac{m_1 - m_0}{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)}$$

ρ_s étant la densité de pétrole à la température de mesure

2/ Température.

Il est nécessaire de réaliser les opérations dans une pièce à température stable pour réduire l'incertitude due à la dilatation, en particulier lorsqu'on utilise du pétrole.

IV. PRECISION.

L'intervalle de confiance des résultats est généralement inférieur à $\pm 0,02$. Compte-tenu de l'importance de cette mesure pour tous les calculs d'indice des vides et de porosité, il faut procéder à plusieurs répétitions (au moins trois).

B. TECHNIQUE du PYCNOMETRE à AIR

Le mode opératoire étant fourni avec l'appareil, nous ne le décrivons pas ici. En raison de problèmes d'hygroscopicité, la technique est à réserver aux matériaux dépourvus d'argile.

Matériel nécessaire pour détermination de la densité de solide

- Pycnomètre à air "BECKMAN"
- Pycnomètre à eau "PROLABO"
- Balance
- Eau permutée dégazée
- Tamis de 315 μm
- Seringue + aiguille

DETERMINATION de la DENSITE TEXTURALE

I. PRINCIPE.

On détermine la densité sur de petits fragments, agrégats ou mottes de quelques cm³ suivant la granulométrie du matériau. Ils sont imprégnés de pétrole et on mesure leur volume par mesure de la poussée hydrostatique dans ce même liquide.

II. DESCRIPTION.

1/ Densité d'agrégats secs.

- Sécher l'échantillon à l'air (une semaine) ou à l'étuve pendant 48h à 40°C
- Briser les grosses mottes dans un mortier
- Tamiser entre les tamis de 3,15 mm et 2 mm et recueillir une masse suffisante d'agrégats calibrés (une centaine de g)
- Étaler les agrégats dans un plateau et prélever en différents points du plateau des prises de 2 à 3 g d'agrégats
- Déposer ces échantillons dans des peses filtre ou boîtes à tare. Sécher à l'étuve une nuit à 105°C
- Sortir les peses-filtres de l'étuve. Fermer et laisser refroidir
- Peser à la précision du mg m_s
- Déposer les agrégats dans des capsules de verre. Recouvrir de pétrole. Laisser imprégner pendant 24 heures. Agiter à 2 ou 3 reprises pour éliminer les bulles d'air
- Mesurer la température du pétrole dans le récipient utilisé pour la mesure de poussée hydrostatique
- Récupérer le pétrole en excès dans chaque capsule en le versant à travers un papier filtre
- Déposer les agrégats sur quelques feuilles de papier absorbant superposées
- Déplacer les agrégats sur le feuillet de façon à éliminer le pétrole périphérique. S'arrêter lorsque les agrégats initialement brillants sont devenus mats. Récupérer alors les agrégats sur la gouttière permettant de les déverser dans le panier
- Mesurer P_1 sur une balance à la précision du mg

P_1 = masse du récipient + masse de pétrole + poussée hydrostatique sur la nacelle vide (figure 1)

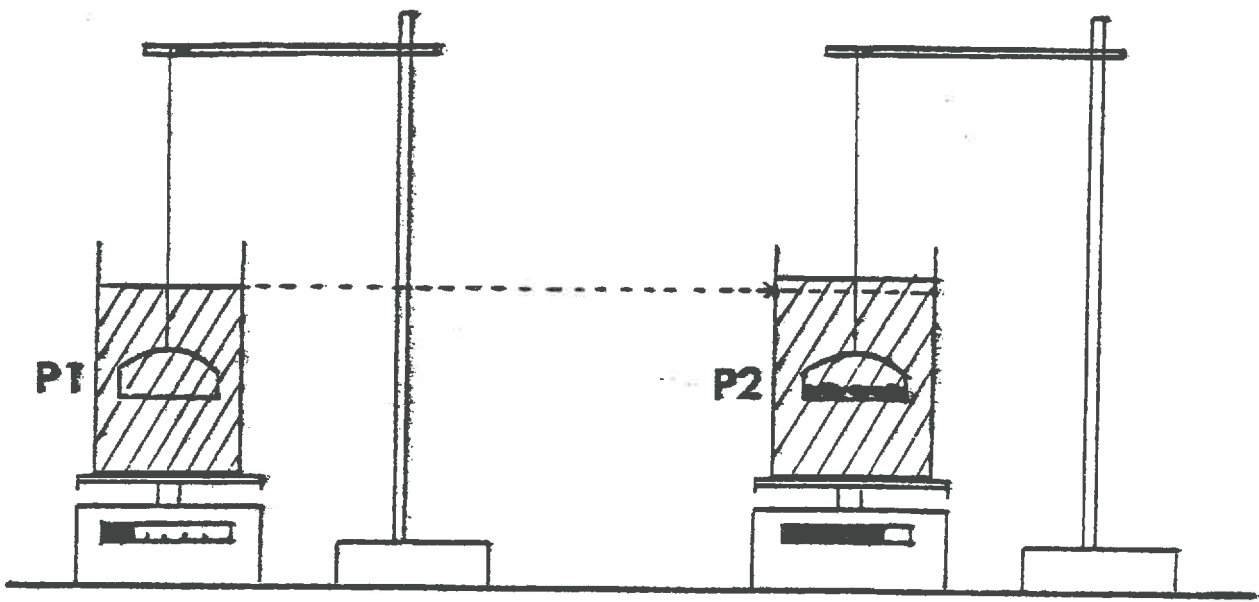


FIG. 1

- Soulever la nacelle. Y déverser les agrégats en les étalant de façon à obtenir une seule couche
- Replonger la nacelle. L'agiter doucement de façon à éliminer les bulles d'air emprisonnées par les mailles ou les agrégats
- Mesurer P_2

$$P_2 = P_1 + \text{poussée hydrostatique sur les agrégats (figure 1)}$$

2/ Densité d'agrégats humides :

- Briser délicatement les mottes humides à la main
 - Tamiser les agrégats ainsi obtenus entre 3,15 mm et 2 mm
 - Déposer ces agrégats dans un pèse-filtre (ou boîte à tare ou capsule tarée)
 - Peser
 - Recouvrir de pétrole une nuit
 - Mesurer la poussée hydrostatique comme précédemment
 - Récupérer les agrégats dans des pèses-filtres ou boîtes à tare
 - Déterminer leur masse après séchage à 105°C pendant 24h (m_s).
- Ventiler l'étuve pendant les premières heures du séchage pour éviter tout risque d'explosion.

3/ Calculs.

Volume des agrégats :

$$V = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p}$$

ρ_p est la densité de pétrole. Elle est en général peu variable pour une qualité donnée de pétrole commercial. Elle doit être cependant vérifiée à chaque livraison. Elle varie avec la température (figure 2).

Densité texturale :

$$\rho_d^t = \frac{m_s - \text{tare}}{V}$$

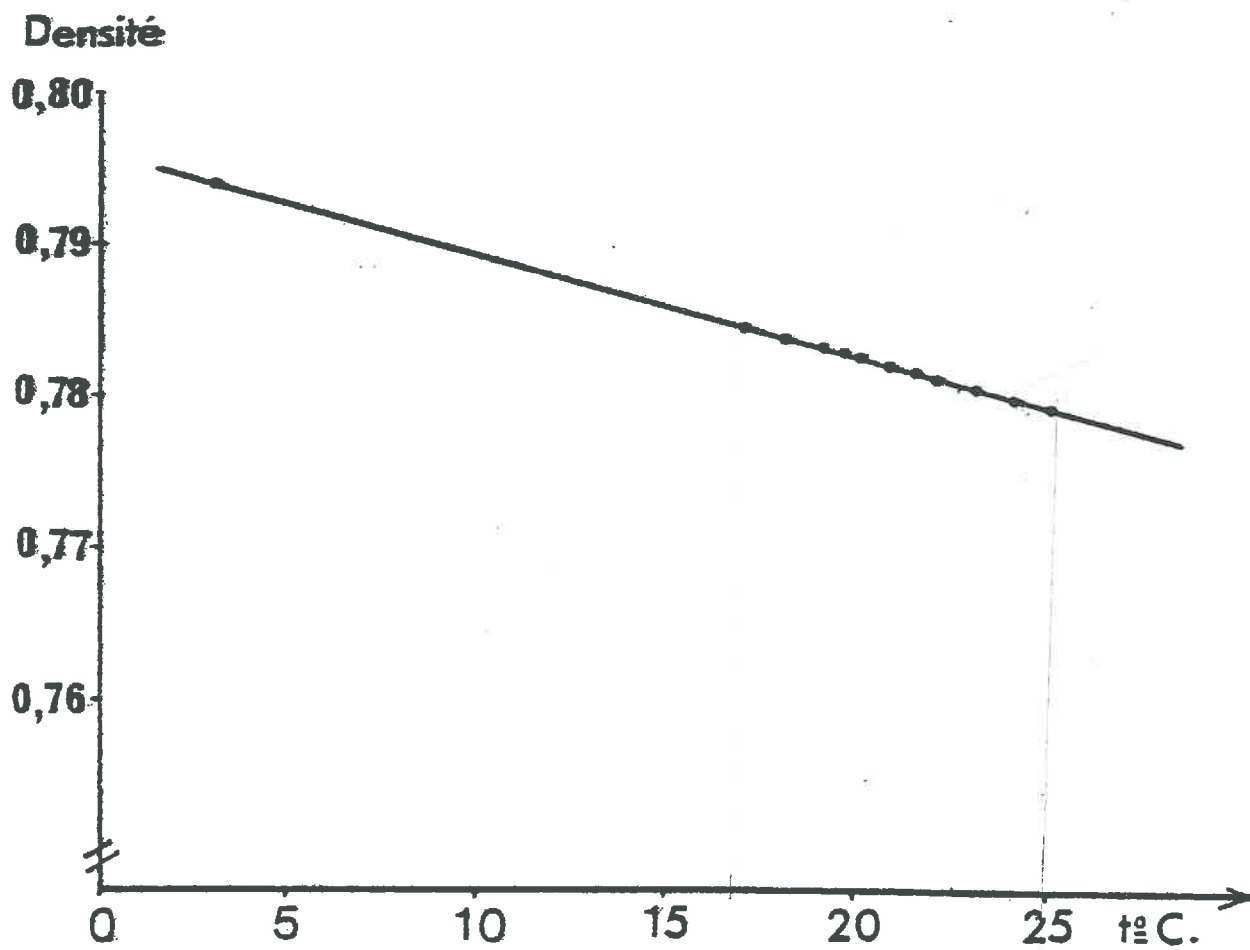


FIG. 2 Variation de la densité du pétrole en fonction de la température

III. POINTS DELICATS.

1/ Tamissage des agrégats.

La préparation des agrégats humides, fragmentation de mottes et tamisage, doit être réalisée avec précaution. Il faut éviter en particulier la fabrication de pseudo-agrégats par pétrissage ou adhésion de particules plus fines que 2 mm. Lorsque l'humidité est excessive, l'opération devient impossible. On peut alors effectuer un pré-séchage à l'air, de durée limitée, jusqu'à obtenir une humidité adéquate. On ne pourra alors évaluer la densité texturale à l'humidité du prélèvement que par extrapolation de la courbe de retrait.

2/ Saturation des agrégats.

L'expérience a montré qu'un trempage prolongé, assurait un taux de saturation suffisant pour qu'il n'y ait pas pénétration de pétrole dans les agrégats pendant la mesure des poussées hydrostatiques. La saturation réalisée sous vide donne des résultats identiques à la technique décrite dans cette note.

3/ Ressuyage des agrégats.

C'est le point le plus critique. Il faut une certaine pratique de l'opérateur pour standardiser son mode opératoire et obtenir des résultats peu dispersés. La limite de la technique est l'existence de pores texturaux suffisamment grossiers pour se vider lors du ressuyage sur papier filtre. Ceci risque de se produire dès que la teneur en sable devient importante. La limite de teneur n'est pas indépendante de l'importance relative des autres fractions granulométriques. Pour une discussion de ce point se référer à FIES et STENGEL (1981). Dans le cas où la mesure sur agrégats s'avère impossible, on utilisera des fragments de plus grand volume (mottes d'environ 15 cm³). On court alors le risque d'inclure dans le volume de mesure des pores structuraux.

4/ Évaporation du pétrole.

Le choix du pétrole comme liquide de saturation et de mesure se justifie en premier lieu par l'absence d'interaction avec le matériau : effet nul sur le gonflement. Il a aussi l'avantage de s'évaporer lentement. L'évaporation est de l'ordre de 1 mg pendant la durée de la mesure, la balance restant fermée, sauf pour l'introduction des agrégats.

IV. CONDITIONS d'UTILISATION - LIMITES.

1/ Limites.

Les principales ont été évoquées précédemment. Il faut ajouter celle qui concerne la définition de l'humidité des agrégats lorsque la porosité structurale est partiellement remplie d'eau, pour de faibles valeurs du pF. La difficulté n'est alors soluble que par la détermination de la limite de gonflement des agrégats et de leur courbe de retrait en relation avec le potentiel de l'eau.

2/ Temps de mesure.

L'échantillonnage sur le terrain est très rapide. La durée dépend uniquement de la profondeur et éventuellement de la résolution souhaitée, un prélèvement très localisé exigeant de plus grandes précautions.

La durée de la mesure en laboratoire dépend de la difficulté de tamisage. On peut obtenir environ 80 résultats élémentaires en deux jours.

V. PRECISIONS.

On peut évaluer le principe de la technique par des mesures sur échantillons remaniés et homogènes. L'écart type, dans ces conditions, est inférieur à $\pm 0,01$. La dispersion obtenue sur agrégats "naturels" est supérieure et bien entendu variable suivant les échantillons. L'écart type est généralement inférieur à $\pm 0,02$.

La stabilité des résultats ne permet cependant pas de juger l'absence de biais, dont le ressuyage est la cause principale. Celle-ci doit être établie dans les cas douteux par la comparaison de mesures sur des fragments de volumes variés extraits d'échantillons remaniés et homogènes.

Matériel nécessaire

Mesure de la densité texturale ρ_d^t

- 2 tamis :
 - 1 tamis de 3,15 mm
 - 1 tamis de 2 mm
- Boîte à humidité : Pyrex
- Pétrole du commerce (Kerdane)
- Thermomètre à mercure
- Spatule
- Sacs ou papier
- Entonnoir verre
- Papier Joseph
- Cuillère pour agrégat
- Deux nacelles métalliques
- Dessiccateur
- Bécher à Pétrole
- Balance de précision (mg)

DETERMINATION de la DENSITE de MOTTES

I. PRINCIPE.

Dans le cas où existent des éléments structuraux individualisés, mottes des couches travaillées, peds des couches profondes, il peut être intéressant d'évaluer leur porosité, complémentairement à la mesure de la porosité texturale. Ceci consiste à introduire dans l'analyse un niveau intermédiaire, plus directement relié à la morphologie structurale.

La mesure de volume est réalisée par mesure de la poussée hydrostatique dans l'eau après imperméabilisation des mottes par la paraffine.

II. DESCRIPTION.

1/ Mottes humides.

- Les mottes ayant été prélevées dans des boîtes hermétiquement fermées les placer au réfrigérateur à 4°C pendant 24h minimum.
- Nettoyer chaque motte à la brosse douce pour éliminer des particules (agrégats) peu liés. Couper les racines éventuelles au ras de la surface de la motte.
- Peser les mottes
- Prélever une aliquote pour mesure de la teneur en eau.
- Attacher la motte à un fil.
- Plonger trois fois dans la paraffine maintenue à 60°C (58-65°C)
- Laisser refroidir à l'air les mottes suspendues à leur fil.
- Peser les mottes paraffinées.
- Déterminer le volume par mesure de la poussée hydrostatique dans l'eau.

2/ Mottes sèches.

- Sécher une semaine à l'air libre ou deux journées à l'étuve à 40°C
- Sécher une nuit à 105°C
- Brosser et nettoyer au pinceau
- Attacher la motte à un fil
- Peser
- Placer la motte une nuit à 4°C
- Enrober de paraffine et mesurer le volume comme précédemment. Dans les deux cas, on calcule le volume de la motte en déduisant le volume de paraffine de l'enrobage du volume mesuré par pesée hydrostatique. Il est nécessaire pour cela de connaître la densité de la paraffine.

III. POINTS DELICATS.

1/ Pénétration de la paraffine.

L'évaluation du volume de paraffine d'enrobage à partir des pesées de la motte avant puis après trempage dans la paraffine suppose que toute la paraffine est restée à la périphérie de la motte. Le refroidissement de la motte, et le maintien de la paraffine à la température de fusion suffisent alors la plupart des cas à empêcher la pénétration.

Cela n'est pas vrai lorsqu'il existe des pores très grossiers et ouverts. La technique est alors plus complexe. Il faut :

- remplir ces pores de paraffine
- après mesure de la poussée hydrostatique enlever la paraffine contenue dans les pores grossiers (trempage dans le toluène)
- sécher et peser la motte.

On connaît ainsi la masse de paraffine ayant rempli les pores et on peut calculer la masse de paraffine d'enrobage.

2/ Densité de la paraffine.

L'expérience montre que l'enrobage, du fait de l'imperfection du contact terre-paraffine, et éventuellement entre les couches successives de paraffine, a un volume supérieur au volume théorique calculé à partir de la densité de la paraffine en morceaux.

On peut expérimentalement établir une densité moyenne de cet enrobage pour corriger ce biais, dont l'incidence est faible si le volume de mottes est important (quelques centaines de cm^3).

IV. CONDITIONS D'APPLICATION - LIMITES.

1/ Volume mesuré.

Compte-tenu de cette incertitude sur le volume de l'enrobage on ne peut utiliser cette technique pour des mottes de volume trop faible. ($< 15 \text{ cm}^3$)

2/ Etat physique des mottes.

S'il existe des pores grossiers et abondants, la surface de la motte n'est pas définie objectivement. Cette technique, comme toute technique, comportant une mesure de volume devient alors très approximative.

Les mottes trop fragiles ne peuvent être suspendues à un fil sans risque de rupture.

3/ Avantages.

Par rapport aux techniques d'enrobage par d'autres produits (résines diverses en solution) l'avantage de la technique à la paraffine est d'assurer plus sûrement et plus aisément l'imperméabilisation.

4/ Temps de mesure.

Mis à part le temps d'échantillonnage, on peut au laboratoire réaliser une cinquantaine de mesures par journée de travail.

V. PRECISION.

Elle dépend de la perfection de l'étanchéité du revêtement. Tout défaut apparaît immédiatement par le dégagement de bulles d'air et la mesure est rejetée. L'incertitude ne dépend plus alors que :

- du soin de l'opérateur (et de la consistance des mottes) pour éviter la perte de matériau au cours des manipulations après pesée de la motte.
- de l'incertitude sur le volume de l'enrobage.

A titre d'exemple, sur une population de mottes de volume moyen $\sim 350 \text{ cm}^3$, le volume estimé de l'enrobage est de 50 cm^3 . Une incertitude de 10 % sur cette dernière valeur implique une incertitude de 1,5 % sur la densité.

Matériel nécessaire

- Boîte métallique : conservation à 4°C
- Ruban adhésif
- Spatule
- Brosse douce
- Pinceau
- Fil à coudre
- Paraffine
- Agitateur chauffant : plaque + récipient + agitation magnétique
- Potence
- Thermomètre
- Ciseaux
- Balance de précision
- Toluène
- Couteau