

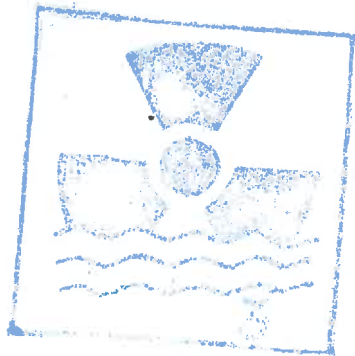
~~SS ACS-TH-141~~
THBD 6

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE DE MONTPELLIER

Diplôme d'Agronomie Approfondie
mention Sciences du Sol et du Bioclimat

ESSAI D'ADAPTATION DU GAMMADENSIMETRE "TROXLER 3411" A LA
MESURE DE LA DENSITE APPARENTE DES SOLS.

Par M. JANY J-P.



Présenté devant le jury d'examen en Septembre 1978

AVANT-PROPOS

Avant de présenter ce mémoire, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à le réaliser, notamment Monsieur le Professeur Servat, directeur de la chaire de Science du Sol, et Monsieur Favrot, Maître de Recherches, qui a dirigé ce travail.

Messieurs Manière et Luc, de la chaire de Machinisme Agricole, m'ont également aidé par leur expérience en matière de méthodes de mesures nucléaires et de protocole expérimental.

La plupart des essais ont été réalisés en compagnie de S. Conventi, technicien à l'I.N.R.A., avec lequel j'ai participé par ailleurs à la réalisation d'un bâti adapté aux mesures en profil pédologique, grâce aussi à l'aimable collaboration de Monsieur Dissane, serrurier aux services généraux de l'I.N.R.A.

Monsieur Legros, chercheur à l'I.N.R.A., m'a aidé dans le traitement des données, et Monsieur Rambal, chercheur au C.E.P.E., m'a conseillé pour l'emploi de la sonde. Messieurs Labau et Mazzella ont réalisé les prises de vue du bâti.

Madame Richard, Madame Salze, Messieurs Mazzella, Couderc et Conventi m'ont aidé pour la réalisation pratique du Manuel d'instructions.

Je remercie également toutes les personnes qui ont pu m'apporter leur concours durant cette année.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction | |
| I. La densimétrie | 1 |
| A. Les méthodes conventionnelles | |
| B. La gammadensimétrie | |
| II. Présentation de la sonde Troxler utilisée par le S.E.S.-I.N.R.A..... | 19 |
| A. Procédés employés | |
| B. Procédés annexes | |
| III. Essais et adaptation de la sonde en Pédologie... | 27 |
| A. Adaptation de la sonde au profil pédologique | |
| B. Précision et fidélité de la sonde | |
| C. Justesse des mesures | |
| D. Possibilités d'emploi en Pédologie | |
| Conclusion | 43 |
| Bibliographie | 45 |
| Annexes | 46 |

INTRODUCTION

La densité apparente est, comme nous le verrons, une caractéristique intéressante du sol. Sa mesure constitue donc un aspect important du domaine pédologique. Plusieurs méthodes permettent d'y parvenir:

- les méthodes traditionnelles, avec prélèvements d'échantillons et mesures au laboratoire,
- les méthodes nouvelles, qui ont recours à la gammamétrie.

C'est précisément pour améliorer la rapidité et la qualité de ces mesures que le S.E.S. de l'I.N.R.A. Montpellier vient d'acquérir une sonde gamma pour la mesure directe des densités apparentes des sols.

L'adaptation à la Pédologie de cet appareil de surface, conçu pour les chantiers des Ponts et Chaussée, m'a été confié et fait l'objet du présent mémoire. Le travail demandé comportait en fait plusieurs aspects:

- la mise au point des modalités pratiques et administratives de l'utilisation de la sonde.
- la réalisation d'un bâti permettant de travailler sur les parois verticales d'un profil pédologique et d'atteindre les couches profondes du sol.
- la vérification expérimentale, sur le terrain, de la fiabilité des mesures avec cet appareil surtout conçu pour les revêtements routiers et les ballasts.

Cela s'est traduit par:

- une recherche bibliographique sur la densimétrie, et particulièrement sur la gammadensimétrie.
- une synthèse des données réglementaires et des protocoles d'utilisation, rédigée sous la forme d'un Manuel d'instructions, destiné aux futurs utilisateurs de l'appareil. Ce document, destiné à avoir une utilisation indépendante du mémoire lui-même, a été imprimé à part et sera joint au mémoire.
- une aide pratique à S. Conventi pour la réalisation matérielle du bâti.

I. LA DENSIMETRIE

Quelle est l'importance de la densité apparente en pédologie ?

La densité d'un corps est le rapport de la masse d'un volume de ce matériau à celle d'un même volume d'eau à 4°C. C'est une grandeur sans unité. Elle est souvent confondue avec sa masse volumique, rapport de sa masse à son propre volume. Cette grandeur s'exprime maintenant en kg/m³, mais on continue souvent à l'exprimer en g/cm³: elle a alors la même valeur absolue que la densité. Les notices Troxler, notamment, utilisent cette terminologie, en exprimant les "densités" en g/cm³. C'est pourquoi nous utiliserons indistinctement, dans la suite du mémoire, les densités sans unités ou exprimées en g/cm³.

Le sol est un milieu complexe, à trois phases:

| | | | | |
|----|------------|----|---|---|
| Ma | atmosphère | Va | } | V |
| Mw | eau | Vw | | |
| Ms | solide | Vs | | |

Il y a donc plusieurs manières de considérer sa densité:

- la densité réelle D_r vaut, numériquement, le rapport de la masse des particules solides (en grammes) au volume qu'elles occupent réellement, V_s (en cm³). Elle est toujours voisine de 2,6 g/cm³.
- la densité apparente sèche, ou densité sèche, D_s , vaut le rapport de la masse des particules solides M_s à leur volume apparent V :

$$D_s = M_s/V$$

Elle est voisine de 0,9 à 1,8 g/cm³, variant de 0,5 g/cm³ pour les andosols à 1,9 ou même plus de 2 g/cm³ pour les sols très compactés.

- Enfin, la densité apparente humide, ou densité humide D_h , intègre la masse de l'eau contenue dans la porosité:

$$D_h = (M_s + M_w) / V$$

Utilisations possibles des mesures:

La densité sèche d'un horizon est intéressante à connaître, car elle est reliée à d'autres caractéristiques physiques:

- + l'humidité volumique H_v : $H_v = H_m \cdot D_s$
avec H_m = humidité massique, aisée à déterminer.
- + la porosité n : le volume apparent V contient le volume réel V_s des particules solides et le volume des vides V_v
 $V_v = V_w + V_a$

$$n = V_v / V = (V - V_s) / V = (D_r - D_s) / D_r$$

La porosité, occupée par l'air ou l'eau, joue un rôle fondamental dans l'alimentation des plantes (échanges gazeux, réserve hydrique, circulation d'eau,...) et dans la sensibilité du sol au gel. Elle a des utilisations en matière de régime hydrique et d'aménagement hydro-agricole.

- Pour le drainage: elle met en évidence la compacité, et donc:
 - indique la profondeur du "plancher imperméable", paramètre de calcul pour les écartements dans les sols à nappes.
 - suggère certaines techniques, comme le sous-solage associé au drainage, quand l'horizon compacté apparaît avant 0,80-0,90 cm.
- Pour l'irrigation, y compris pour l'épandage d'effluents sur sols cultivés: elle est liée à la dose théorique d'arrosage, qui est assimilée à la réserve facilement utilisable RFU. En effet,

$$RFU = \alpha \cdot RFU = \alpha \cdot (H_{cr} - H_{pfp}) \cdot e \cdot D_s$$

où e = épaisseur exploitée par les racines
 H_{cr} = humidité à la capacité de rétention
 H_{pfp} = humidité au point de flétrissement permanent.

Nous allons maintenant rappeler les différentes méthodes

conventionnelles de densimétrie, afin de pouvoir comparer leurs avantages et leurs inconvénients avec ceux des méthodes gammamétriques que nous verrons ensuite.

A. Les méthodes conventionnelles de densimétrie:

Ces méthodes consistent à mesurer la masse et le volume d'un échantillon de matériau, afin d'en faire le rapport. Toutes exigent des prises d'échantillons, mais il existe cependant plusieurs démarches.

1. Les premières méthodes consistent à prélever une masse de terre, dont le poids est déterminé plus tard au laboratoire. Son volume est déterminé in situ en remplissant le trou d'eau ou de sable.

L'eau peut être retenue par de la paraffine ou un voile plastique (cas des grands trous pratiqués en sols caillouteux) ou encore par une membrane en caoutchouc, dans le cas du "densitomètre à membrane". Cet appareil, qui affine la méthode, sera comparé lors des essais à la sonde Troxler du S.E.S. Son fonctionnement est décrit dans l'annexe 1*

Le sable sec peut être utilisé sans problème en sol caillouteux, c'est pourquoi nous avons essayé de comparer les résultats avec ceux de la sonde Troxler. La mise en oeuvre de cette méthode, peu utilisée au S.E.S., implique toutefois certaines précautions. Le principal problème provient du tassement du sable. Pour que cette méthode soit utilisable, il faut, en effet, un sable à granulométrie homogène, pour qu'il ne se tasse pas, et il faut le laisser tomber d'une hauteur constante. Ces conclusions proviennent en partie de divers essais, entrepris au laboratoire et in situ, en attendant la livraison de la sonde Troxler, et dont les résultats détaillés sont reportés dans l'annexe 2.

*Tiré du mémoire de D.E.A. de Warembourg.

a. Essais en laboratoire. Influence du tamisage et de la hauteur de chute:

Un sable tombe dans une boîte de volume constant. On arrose la surface puis on pèse. On constate alors:

- que, pour un sable non tamisé, la masse restante pouvait varier de 4,18% par une même hauteur de chute.
- que cette masse pouvait varier de 12% pour deux hauteurs de chute différentes de 10 cm.
- que, pour ce sable, tamisé entre 250μ et 710μ , ces proportions baissaient respectivement à 1,8% et 5,6%, ce qui reste appréciable.

Le tamisage du sable augmente donc la précision de la méthode, mais tamiser plus strictement aurait demandé, pour en recueillir un volume donné, d'utiliser beaucoup plus de sable.

b. Essais in situ:

Ces essais font apparaître le problème du remplissage du trou au niveau d'origine de la terre et de l'appréciation du volume de sable utilisé.

- Le premier apparaît dans la mesure d'un même volume avec et sans tarage du zéro (tableau 4 de l'annexe): elle peut varier de 10% !

Nous avons essayé un tarage du zéro grâce au montage suivant que nous avons mis au point:

Fig. 1:

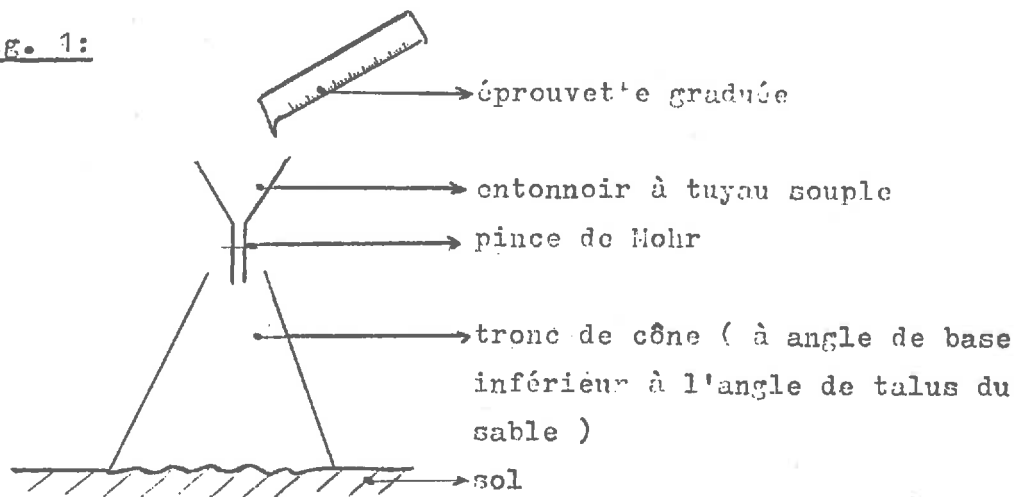
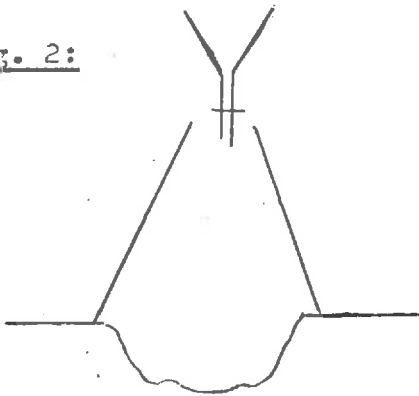


Fig. 2:



Ainsi on peut: + remplir le tronc de cône avec une erreur faible, car son extrémité supérieure présente une section faible.

+ le remplir avant, puis après, avoir prélevé l'échantillon, ce qui permet un tarage du zéro.

- Mais des erreurs subsistent dans l'appréciation du volume de sable utilisé:

- le sable restant à la surface du sol après le tarage du zéro, qu'on ne peut entièrement éliminer.
- le tassement du sable résiduel dans l'éprouvette, sable qui sert à déterminer par différence le volume versé.
- la difficulté de remettre exactement en place le cône après le creusement, faute d'une embase fixe.
- l'entraînement du sable par le vent pendant les manipulations.

Nous voyons donc que cette méthode, sans un matériel approprié, présente un manque de précision dans l'appréciation du volume de l'échantillon. Ceci nous a fait finalement renoncer à l'utiliser pour le comparer avec la sonde Troxler.

2. La méthode du cylindre:*

C'est la méthode utilisée normalement au S.E.S. avant l'acquisition de la sonde gamma. Elle consiste à prélever un

*Tiré du mémoire de D.E.A. de D.Ranc.

volume de terre bien défini en enfonçant dans le sol un cylindre de dimension connue; on arrose alors les deux faces. On pèse ensuite la terre séchée à 105°C. Les erreurs viennent de la compression possible de l'échantillon, limitée cependant par le choix de cylindres à paroi peu épaisse et à bord taillé en biseau extérieur, et de l'appréciation de la valeur réelle de la section. On prélève en règle générale 2 à 3 cylindres par horizon.

3. Le cube Vergière*

Cette méthode consiste à prélever un échantillon non perturbé dont on déterminera au laboratoire la masse et le volume. Pour cela, on taille un cube de terre qu'on protège en l'entourant de zinc et de paraffine. Cela permet de calculer son volume, augmenté de celui du zinc et de la paraffine, grâce à un pycnomètre à eau. On pèse la terre séchée à l'étuve et préalablement débarassée du zinc et de la paraffine, dont on calcule par ailleurs le volume d'après leur masse et leur densité .

Ici, de nombreuses erreurs s'ajoutent les unes aux autres: terre restant collée à la paraffine, densité de la paraffine augmentée par des impuretés (notamment de la terre, si on utilise de la paraffine ayant déjà servi)...

On prélève là aussi de 2 à 3 cubes par horizons.

4. Limites des méthodes conventionnelles:

. Limites du domaine d'utilisation.

- sols non caillouteux, avec peu ou pas de racines: toutes peuvent être utilisées.
- sols caillouteux, à éléments de taille inférieure à 5 cm: on ne peut plus utiliser le cube et le cylindre où l'on doit découper des volumes.
- sols caillouteux à gros éléments: le volume restreint retiré pour la bouteille à sable ou le densitomètre à membrane n'est plus représentatif de la moyenne du terrain. On doit procéder par la méthode du trou paraffiné rempli

* Tiré du mémoire de D.E.A. de Warenbourg.

d'eau ou par la méthode du pelletage, qui traite les densités partielles de la terre fine et des cailloux sur des échantillons importants.

• Limites de précision.

Elles dépendent beaucoup du soin apporté aux mesures. Malgré tout, le volume retiré pour la plupart des méthodes est restreint et donc peu représentatif de l'horizon étudié. Pour le cube et le cylindre, on doit par exemple faire 3 mesures par horizon et par profil.

• Nécessité de prélèvement et de transport.

Ces méthodes exigent de ramener au laboratoire une masse de terre à peser, ce qui pose des inconvénients pratiques et ne permet pas une lecture directe sur le terrain. Ces méthodes, moins précises, sont surtout physiquement pénibles.

• Enfin, ces diverses méthodes, basées sur des mesures de masse et de volume, sont destructives, ce qui empêche d'étudier plusieurs fois le même échantillon. Cet inconvénient est peu gênant, il est vrai, en pédologie.

Les Ponts et Chaussées, très sensibles à tous ces inconvénients pour l'étude des revêtements de route, ont développé une méthode de mesure "in situ": la gammadensimétrie, que nous allons voir maintenant. La sonde Troxler du S.E.S., initialement conçue pour les Ponts et Chaussées, utilise en effet cette méthode.

B. La gammadensimétrie:*

Contrairement aux méthodes précédentes, la gammadensimétrie n'utilise pas les mesures de masse et de volume pour déterminer la densité d'un matériau. Elle utilise les interactions des rayons gammas avec la matière pour atteindre sa densité électronique, et approcher ainsi indirectement sa densité humide. En effet, la densité d'un corps simple est liée à sa densité électronique N_e (nombre d'électrons par unité de volume):

*Ces informations sont presque entièrement tirées de "Radioisotopes I"

$$D = \frac{N_e \cdot A \cdot 1}{Z \cdot N_A} = \frac{N_e \cdot 1}{N_A \cdot Z/A}$$

avec: $\left\{ \begin{array}{l} A = \text{masse atomique de l'élément} \\ Z = \text{nombre d'électrons par atome de l'élément} \\ N_A = \text{nombre d'Avogadro} \end{array} \right.$

Cependant, pour un corps composé, la mesure de la densité électronique devrait être suivie d'une analyse chimique de l'échantillon pour déterminer les proportions des différents atomes et calculer ainsi un Z/A global, ce qui deviendrait très long. Mais, pratiquement, on peut simplifier: Z/A est en effet très voisin pour presque tous les atomes:

| C | N | O | Na | Al | Ca | Fe |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,478 | 0,482 | 0,499 | 0,466 |

On peut donc déterminer un Z/A moyen qui ne sera jamais trop éloigné des Z/A réels des échantillons. Il reste le cas de l'atome H pour lequel Z/A vaut 0,992. Dans le sol, qui contient eau et matière organique, Z/A est donc supérieur à 0,5 et sa valeur varie selon l'humidité. On voit déjà un inconvénient de la méthode: il sera nécessaire de connaître la teneur en hydrogène de l'échantillon pour atteindre la densité humide à partir de Ne...

Nous allons maintenant donner la base et les principes de cette méthode. Ces éléments sont nécessaires pour permettre de comprendre l'intérêt des différentes composantes de la sonde Troxler, les différentes phases des opérations et les limites de la gammamétrie.

1. Rappel théorique: les interactions des gammas avec la matière et leur détection.

Les photons γ forment un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, λ : $10^{-8} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-6} \mu\text{m}$. Leur énergie est donc très grande; en effet $E = h\nu = h \cdot c/\lambda$

avec $\left\{ \begin{array}{l} h = \text{constante de Planck} \\ c = \text{vitesse de la lumière} \end{array} \right.$

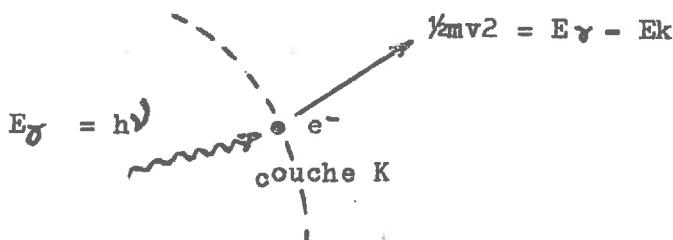
Les plus "mous" des rayons gamma correspondent à des rayons X très durs.

Ces photons sont émis avec une certaine énergie, toujours la même pour un radioisotope donné: 0,662 MeV pour le ^{137}Cs et avec un certain débit, l'activité: ici, 8 mCurie pour le ^{137}Cs et 40 mCurie pour le ^{241}Am ($1\text{mCi} = 3,7 \cdot 10^4$ fois/sec.)

a. Les gamma émis par les radioisotopes des sources de l'appareil peuvent avoir deux types d'interactions avec les électrons de la matière.

- L'effet photoélectrique: un des électrons d'un atome est éjecté de son orbite sous le choc d'un gamma, qui est alors totalement absorbé par l'électron:

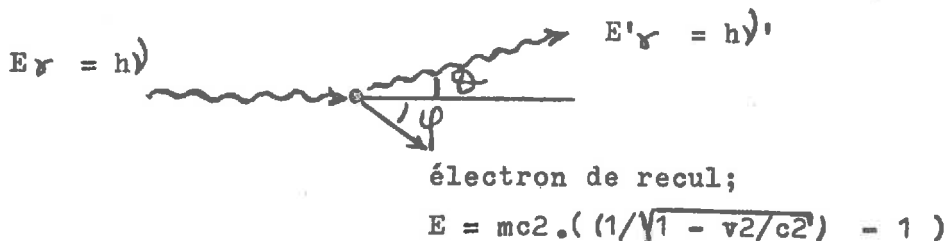
Fig. 3



Ce phénomène exige que l'énergie du photon soit au moins égale à l'énergie de liaison de l'électron, celle-ci variant bien sûr selon la couche (K,L,M,...) où se trouve l'électron. Le reste de l'énergie du photon est alors transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique ($E_c = \frac{1}{2}mv^2$).

- L'effet Compton (ou diffusion Compton): un électron, libre ou lié à un atome, est propulsé sous le choc d'un photon γ . Celui-ci communique une partie de son énergie à l'électron, sous forme d'énergie cinétique et donne naissance à un photon diffusé d'énergie plus faible. L'énergie du photon diffusé ne dépend que de l'angle de diffusion Θ . Elle est maximale à 0° .

Fig. 4



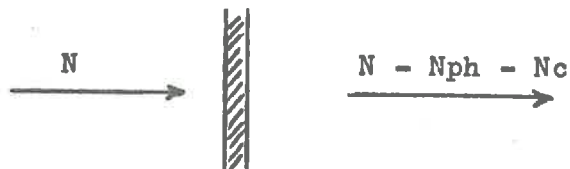
Cet effet apparaît pour des énergies initiales de l'ordre du MeV. Quand l'énergie croît et se rapproche du MeV, l'effet Compton devient prépondérant sur l'effet photoélectrique, dont la probabilité décroît au contraire à partir des énergies dépassant les énergies de liaison des électrons (ordre du KeV).

b. Les sections efficaces des interactions:

Quand un faisceau de photons, parallèle, monoénergétique et de section unité pénètre dans un milieu, les nombres d'effets photoélectriques et d'effets Compton par secondes (soit N_{ph} et N_c) seront proportionnels:

- à N , nombre de photons arrivant chaque seconde dans ce milieu
- au nombre d'électrons contenus dans ce milieu, soit $N_e V$. Comme ce milieu est de section unité, le volume V égale l'épaisseur x .

Fig 5



Ceci est valable si x est très faible, de façon à ce qu'aucun électron n'en cache un autre. Nous avons donc:

$$N_{ph} = \sigma_{ph}^e \cdot N_e \cdot x \cdot N$$

et

$$N_c = \sigma_c^e \cdot N_e \cdot x \cdot N$$

Les coefficients de proportionnalité, qui ont la dimension d'une surface, sont par définition les sections efficaces par électron des effets photoélectriques et Compton.

Elles caractérisent la probabilité de l'une ou l'autre interaction, qui varie selon l'énergie des photons comme nous l'avons déjà vu. Mais pour des photons d'énergie donnée, comme ceux émis par la sonde, les deux effets ne sont pas équivalents: l'effet Compton a sa section efficace par électron pratiquement indépendante du type d'atome, tandis que l'effet photoélectrique voit sa section efficace croître en fonction du numéro atomique Z (σ_{ph} par atome croît approximativement comme Z^5), ce qui est gênant pour déterminer

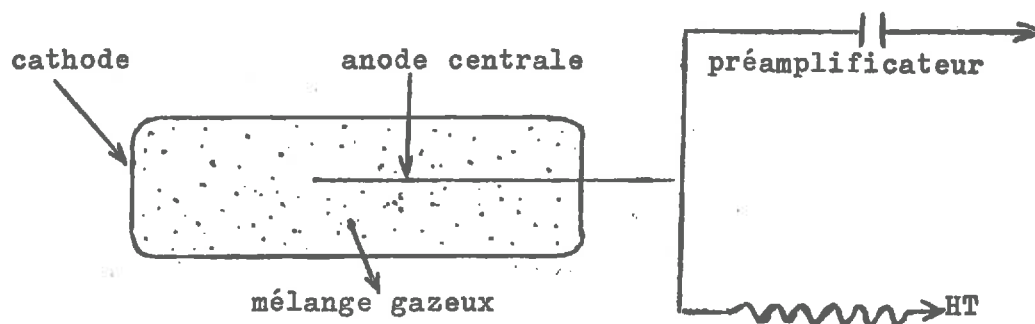
la densité électronique d'un corps composé.

c. La détection:

Ce sont ces deux interactions qui servent lors de la détection des rayons gammas. En effet les rayons sont des ondes. Pour les détecter, il est nécessaire de passer à une particule chargée pour créer une excitation ou une ionisation décelable. On crée donc des électrons Compton et photoélectrique par interaction dans sa paroi, pour un détecteur à mélange gazeux, ou dans un cristal, pour un détecteur à scintillations.

- Dans le premier type, les électrons créent des ionisations dans le gaz, en plus ou moins grand nombre selon l'énergie que lui a communiqué le photon gamma.

Fig. 6 : Détecteur à mélange gazeux



Les nouveaux électrons créés peuvent remonter l'anode centrale et sont accélérés par une D.D.P., ce qui permet de nouvelles ionisations secondaires, recueillies sous forme d'impulsions électriques.

Avec une très forte D.D.P. (1380 à 1480 Volts), toutes les impulsions recueillies auront la même hauteur, quel que soit l'énergie de l'électron incident: le nombre d'ions secondaires est en effet très grand, même si l'électron incident avait reçu une faible énergie. C'est le principe du détecteur Geiger-Müller, qui est donc très sensible et que la sonde Troxler utilise pour la détection des rayons gammas.

Avec une D.D.P. moins forte, l'impulsion recueillie est proportionnelle au nombre d'ions primaires, donc à l'énergie

de l'électron incident. C'est le détecteur proportionnel, tel le détecteur à Hélium 3, utilisé par la sonde Troxler pour le comptage des neutrons, comme nous le verrons plus loin.

- Dans le deuxième type, les électrons perdent leur énergie par émission de photons lumineux dans le cristal où ils se sont formés. Un photomultiplicateur transforme les scintillations, qu'il "voit", en impulsions électriques, chaque photon lumineux donnant 10^5 à 10^6 électrons selon les types de photomultiplicateurs. Les impulsions sont donc de hauteur proportionnelle à l'énergie reçue, puis abandonnée, par l'électron dans le cristal. Ceci permet, en l'associant à un discriminateur d'amplitude, de distinguer et compter les différentes impulsions reçues. On peut ainsi éliminer le "bruit de fond" du détecteur ou supprimer les photoélectrons, d'énergie faible, qui sont gênants pour les mesures. Mais ces détecteurs sont beaucoup moins robustes, moins stables (notamment à la chaleur) que les Geiger-Müller, qui conviennent mieux aux mesures de terrain.

Le nombre d'impulsions recueillies par unité de temps par ces divers détecteurs s'appelle le taux de comptage.

2. Mesure de densité par gammamétrie.

Il existe deux méthodes différentes: la mesure par absorption du rayonnement direct et celle par absorption du rayonnement diffusé.

a. Absorption du rayonnement direct:

Cette méthode consiste à dénombrer, pour atteindre la densité électronique, les photons gammas qui ont traversé le matériau chaque unité de temps sans avoir subi d'interactions, en sachant combien y sont entrés. En effet, nous l'avons vu, le nombre de photons qui a réagi vaut $\sigma^e \cdot N_e \cdot x \cdot N$

La variation du nombre de photons après traversée de dx vaut donc: $dN = -\sigma^e \cdot N_e \cdot N \cdot dx$

d'où on tire: $N = N_0 \cdot e^{-\sigma^e \cdot N_e \cdot x}$

avec N_0 nombre de photons initial et N le nombre de photons n'ayant pas eu d'interactions.

On peut alors déterminer N_e si σ^e est connu. C'est le cas pour σ_{ph}^e , section efficace de l'effet Compton, mais σ_{ph}^e varie selon les

atomes rencontrés. Il faut donc essayer de s'affranchir de cet effet photoélectrique. Les sources utilisées en gammamétrie auront donc des énergies ($E \geq 0,662 \text{ MeV}$) grandes devant les énergies de liaison des électrons. Ainsi l'effet photoélectrique n'existe pas pour $Z < 20$, et est négligeable devant l'effet Compton pour $Z < 26$. Il reste les éléments lourds du sol (Fe, Cu, Mg, ...). Ceux-ci sont en faible proportion. En les négligeant, ce qui conduit évidemment à une erreur, on peut prendre $\sigma_e = \sigma_c^e = \text{constante}$, pour notre flux de photons. Connaissant N_e , on peut alors passer à la densité D :

$$N = N_0 \cdot e^{-\int_0^x \frac{Z}{A} \cdot \sigma_c^e \cdot D_x} = N_0 \cdot e^{-\mu' D_x}$$

avec le coefficient d'absorption massique $\mu' = \frac{Z}{A} \cdot \sigma_c^e$

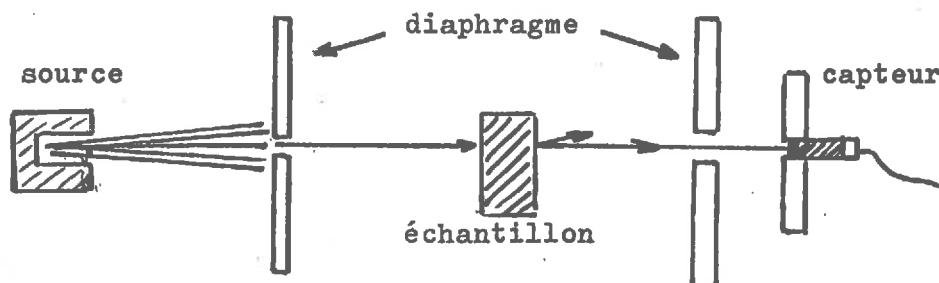
On a donc $D = \frac{1}{\mu' x} \text{Log} \frac{N_0}{N}$

Pour un rayonnement d'énergie donnée, et dans le cas où seul l'effet Compton intervient, σ_c^e est constant. Si le matériau est sans hydrogène, Z/A est aussi constant, donc μ' est constant, ce qui permet un calcul rapide. L'eau pure a un coefficient μ' différent qu'il faut faire intervenir dans les calculs de densité humide.

- Mais cette méthode a d'autres limites: la formule qui nous donne D n'est théoriquement valable que dans le cas où les photons dénombrés n'ont subi aucune interaction: c'est l'hypothétique "absorption du rayonnement direct en bonne géométrie". Deux moyens permettent d'approcher cette condition:

- + l'interposition de diaphragmes entre la source et le détecteur, définissant un étroit pinceau de photons parallèles. Cependant des photons diffusés sous des angles très faibles, ou diffusés plusieurs fois, peuvent parvenir au capteur:

Fig. 7 : Banc d'essai



+ l'utilisation de détecteurs à scintillation. La discrimination d'amplitude élimine les photons d'énergie inférieure à l'énergie initiale. Là encore ceux diffusés sous un angle très faible, ayant perdu très peu d'énergie, interviennent dans la mesure. Les photons parasites étant cependant en très faible proportion, l'absorption suit encore une loi exponentielle:

$$N = N_0 \cdot e^{-k D x}$$

où k , déterminé expérimentalement, est très voisin de μ' (écart maximum de 0,5%).

Mais cette méthode ne peut être employée qu'en laboratoire, le détecteur à scintillations étant notamment trop fragile et l'ensemble de collimation trop important. L'emploi en est limité à l'étude d'échantillons (blocs, éprouvettes ...). C'est le banc d'essais, rigoureusement non destructeur.

- Il existe toutefois des possibilités d'effectuer sur un chantier des mesures de densité basées sur le principe de l'absorption du rayonnement gamma.

+ les appareils à pointe: un des éléments, source ou détecteur, est introduit dans le matériau à ausculter. C'est généralement la source, et le capteur est alors placé en surface avec l'appareillage électronique. C'est le cas de notre sonde Troxler (voir aussi l'appareil de Wendt, fig. 8). La géométrie en est très variable: tige porte-source plus ou moins longue, ou encore à profondeur variable (cas du Troxler). Les capteurs peuvent avoir diverses formes, il peut y en avoir 2,3,4, en position symétrique, ce qui augmente le volume exploré.

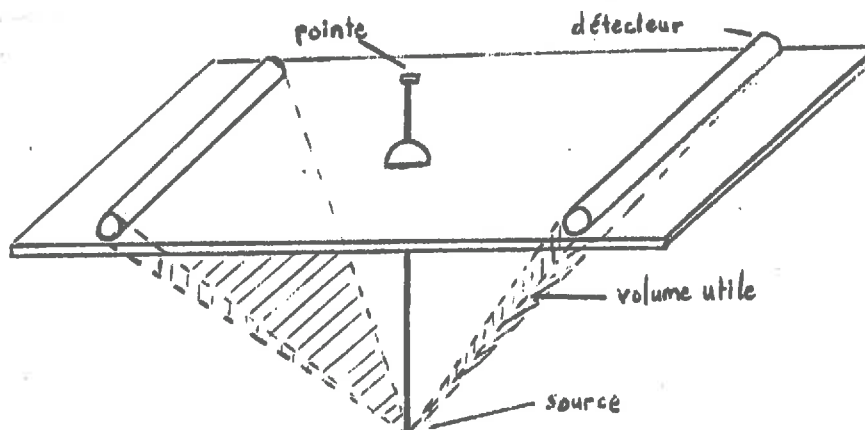
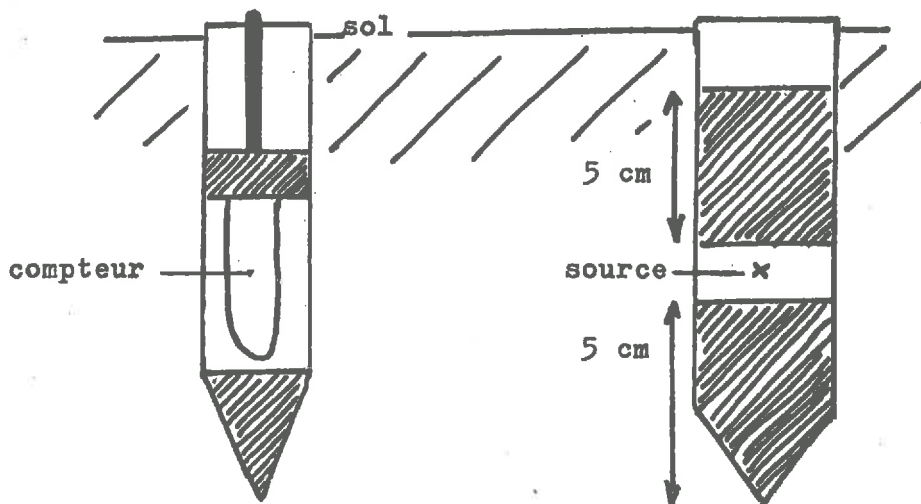


Fig. 8 : Appareil de Wendt

+ les doubles sondes: la source et le détecteur sont introduits dans le matériau (voir fig. 9). Cette géométrie permet des mesures de densité dans des couches horizontales, même étroites. Ces appareils peuvent aussi explorer très profondément, contrairement aux précédents, dont la profondeur ne peut excéder un mètre.

Fig. 9 : Double sonde



Notons que ces deux méthodes ne sont pas rigoureusement non destructives. Elles provoquent de plus de légères perturbations du sol dans un rayon double du diamètre des tiges, ce qui pousse à écarter les détecteurs des sources.

On peut se rapprocher des conditions idéales de l'absorption pure en éliminant la plus grande partie des photons de faible énergie par la pose près des détecteurs de petits diaphragmes, si on travaille avec un angle constant, et des filtres en plomb ou tungstène, qui absorbent surtout les photons d'énergie $E < 0,5$ MeV. Mais sans de gros ensembles de collimations, les détecteurs reçoivent toujours une proportion non négligeable de photons ayant subi une ou plusieurs diffusions. Or les détecteurs, du type Geiger-Müller pour des raisons de robustesse, de stabilité et de volume utile, ne permettent pas la sélection et la discrimination d'amplitude: les lois de l'absorption pure ne sont plus respectées. De plus ces photons d'énergie plus faible,

de l'ordre du KeV, peuvent être absorbés par effet photoélectrique, c'est-à-dire différentiellement selon la nature chimique des éléments. Pour les atomes de grosse masse, cet effet devient même prépondérant sur l'effet Compton:

$$\text{O (Z = 8) : } \sigma_{\text{ph}}^e > \sigma_c^e \quad \text{pour } E \leq 30 \text{ KeV}$$

$$\text{Ca (Z = 20) : } \sigma_{\text{ph}}^e > \sigma_c^e \quad \text{pour } E \leq 80 \text{ KeV}$$

Dans cette méthode "en mauvaise géométrie", le phénomène est donc plus complexe et la relation "taux de comptage-densité électronique" est moins bonne. On a pour chaque élément:

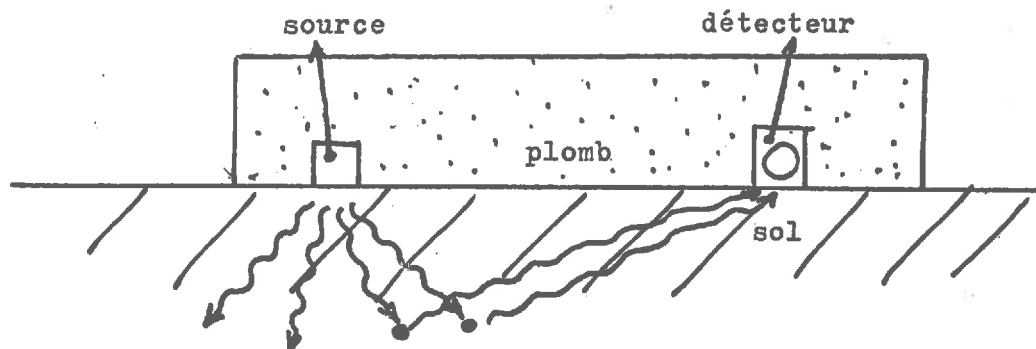
$$N/N_0 = a \cdot e^{-b \cdot D} - c$$

où b contient $\mu'x$ et a et c dépendent de la source, des détecteurs et de leur rendement. On doit passer par un étalonnage.

b. Absorption du rayonnement diffusé ou rétrodiffusion:

Cette méthode, utilisée aussi par la sonde Troxler, permet une utilisation en chantier absolument non destructive. Dans ce cas, le détecteur et la source se trouvent du même côté du matériau. Les photons émis par la source, diffusés dans toutes les directions, peuvent subir ou plusieurs diffusions et, pour une partie, parvenir au détecteur:

Fig. 10 : Sonde à rétrodiffusion

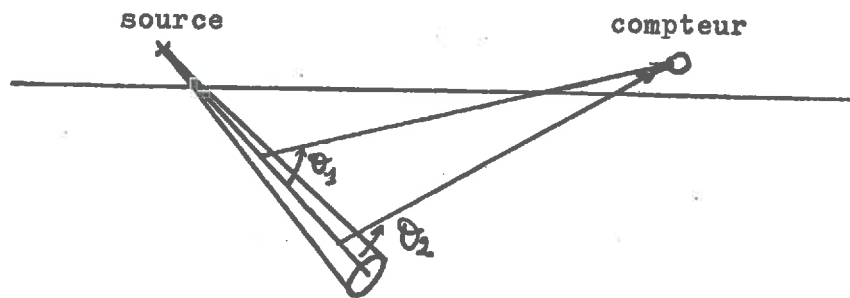


Mais cette méthode a plusieurs inconvénients:

- Si la position et la répartition des premières diffusions est indépendante de la nature chimique, étant donné l'énergie des photons (ordre du MeV), il n'en va plus de même pour l'arrivée au compteur des photons diffusés: leurs angles de diffusion θ

devant être grand pour arriver au compteur, ils sont d'énergie faible (cf. plus haut).

Fig. 11 : Schéma de la rétrodiffusion



L'absorption photoélectrique est alors importante: cette méthode n'est donc pas indépendante non plus de la composition chimique du matériau.

- Autre inconvénient: le nombre de photons décroît exponentiellement avec la profondeur atteinte. De plus, l'énergie de ceux qui peuvent arriver au compteur décroît avec cette profondeur, puisqu'ils sont diffusés sous des angles de plus en plus grands. En outre la distance à traverser augmente: les photons revenant des couches profondes seront ainsi peu nombreux, donc ces couches auront très peu d'influence sur la mesure: la profondeur de mesure est faible. Autre conséquence: ce sont les volumes élémentaires situés juste sous les compteurs qui joueront le plus grand rôle. Il y a donc une grande sensibilité aux hétérogénéités. On s'en prévient parfois par l'utilisation d'un "sabot roulant" mobile qui explore une grande surface.

- La relation taux de comptage-densité est particulièrement complexe. Elle dépend:

+ du nombre de photons diffusés en direction du détecteur, qui est fonction croissante de la densité humide.

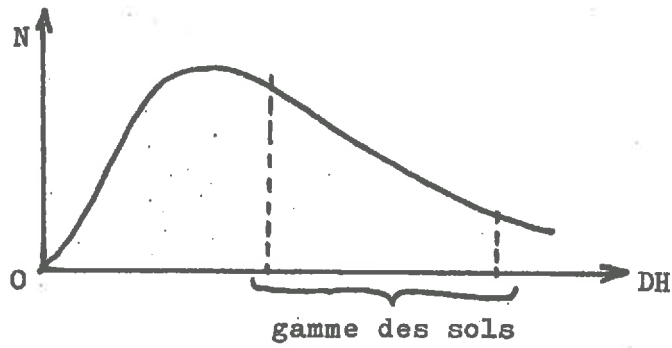
+ du nombre de photons non absorbés par les atomes, qui est au contraire fonction décroissante de la densité humide.

Il n'y a donc pas de relation bi-univoque entre la densité humide et le taux de comptage.

On travaille en pédologie dans la partie décroissante de la

courbe. Sa pente augmente avec l'écart source-compteur.

Fig. 12 : Courbe d'étalonnage en rétrodiffusion



II. PRESENTATION DE LA SONDE TROXLER UTILISEE PAR LE S.E.S.-I.N.R.A.

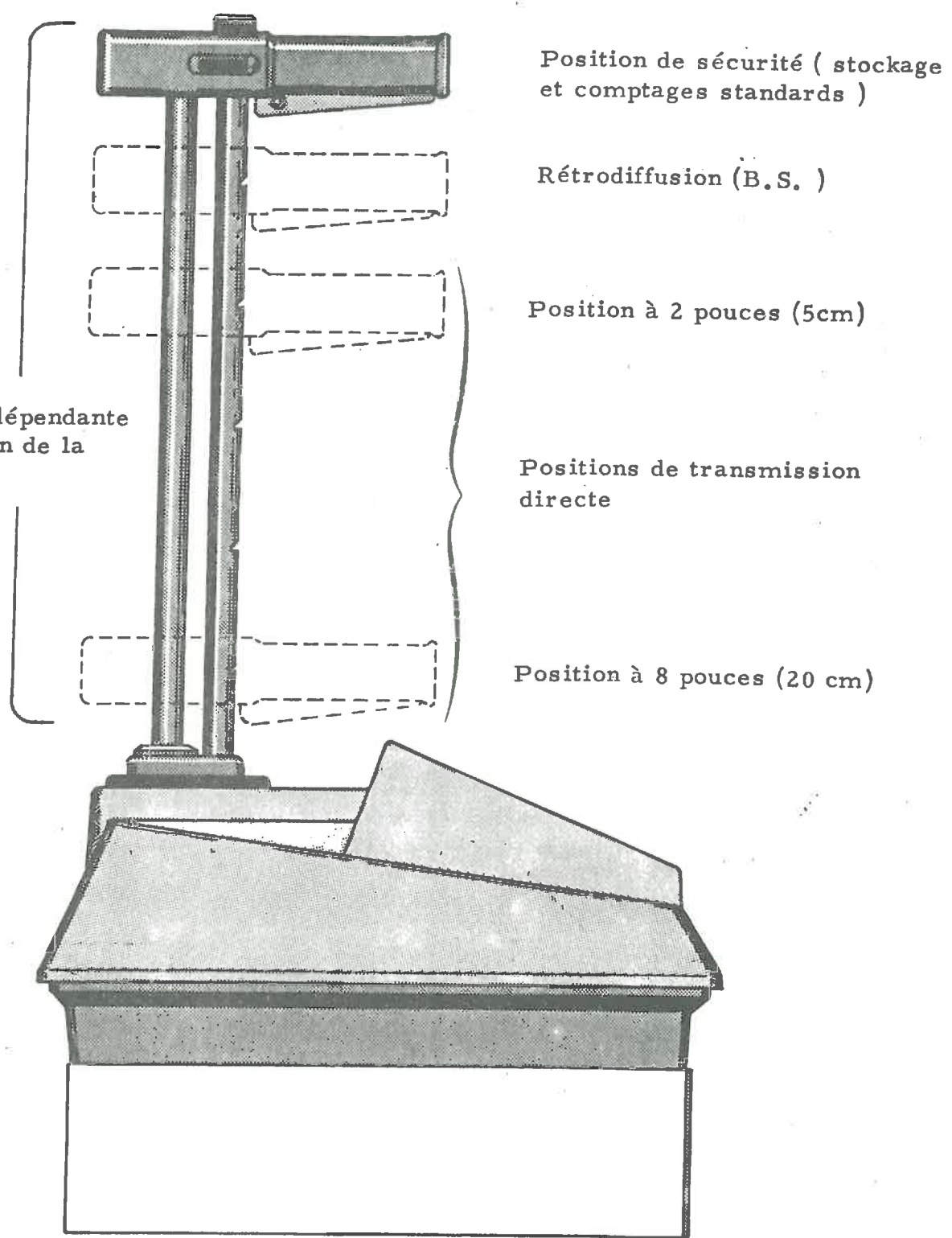
C'est un appareil monobloc et portatif, que nous ne décrirons pas en détail ici, toutes les spécifications radiologiques, mécaniques, électriques, d'étalonnage, de précision et de volume utile étant données dans le "Manuel d'Instructions" qui est joint au mémoire. Nous allons simplement le situer parmi les différents types de gammadensimètres et voir les avantages et inconvénients qui en découlent directement, sans entrer dans l'étude de ses limites et de ses possibilités en étude des sols, qui sera l'un des objets du chapitre suivant. Les renseignements sont issus des documents fournis par Troxler pour ce qui concerne la description de la sonde et de "Radioisotopes I" pour ce qui concerne les problèmes rencontrés en gammamétrie.

A. Procédés employés:

• Cet appareil peut utiliser la rétrodiffusion ou la transmission directe. C'est en effet un appareil à pointe, dont on enfonce la source dans le sol, et cela à 6 profondeurs différentes (5,10,20,25, et 30 cm). Cela permet, en la laissant juste à la surface, de travailler en rétrodiffusion.

• Il comprend deux compteurs Geiger-Müller recouverts de platine, qui sont, rappelons-le, robustes, sensibles et stables. Ceux-ci ont de plus été vieillis, et ne devraient plus présenter d'évolution. Pour des raisons de moindre encombrement, ils sont placés du même côté de la source, leur nombre ne doublant alors pas le volume utile. Il comprend aussi un compteur proportionnel à Hélium 3, sensible aux neutrons lents, mais insensible aux photons de moins de 1 MeV produits par la source ¹³⁷Césium. Il sert à mesurer l'hydrogène, comme nous le verrons plus loin.

• Il comprend de plus un calculateur électronique à deux mémoires séparées (une pour le comptage neutron, une pour le comptage gamma), qui évite de nombreux calculs à l'opérateur comme nous allons le voir aussi, et surtout permet une lecture directe de la densité



Position de sécurité (stockage et comptages standards)

Rétrodiffusion (B.S.)

Position à 2 pouces (5cm)

Positions de transmission directe

Position à 8 pouces (20 cm)

Humidité indépendante de la position de la poignée

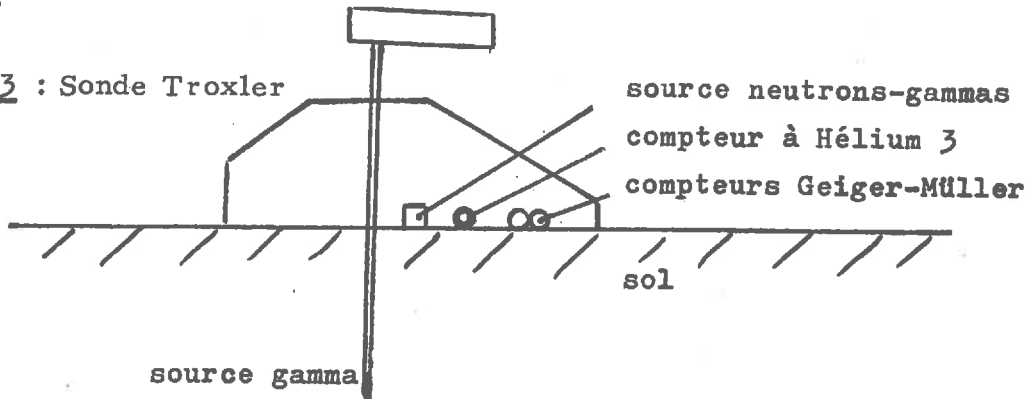
Positions de la poignée

d'après notice Troxler

TROXLER

humide.

Fig. 13 : Sonde Troxler



B. Procédés annexes:

Nous avons vu que les problèmes d'application pratique des différentes méthodes gammamétriques sont nombreux. Pour devenir opérationnels, et qui plus est, opérationnels en chantier, les appareils devaient employer des procédés annexes et développer leur appareillage électronique.

1. Etalonnage et bloc de référence:

Le taux de comptage N donné par les détecteurs intègre le mouvement propre de l'appareil, N' , c'est-à-dire les rayons cosmiques, la radioactivité ambiante du milieu, et le "bruit de fond" du détecteur lui-même (radioactivité de ses parois). D'autre part les taux de comptage ne correspondent qu'à une partie des photons traversant le matériau sans avoir subi d'interactions, ou revenant à la surface après diffusion. Or les opérateurs, pour tenir compte de ceux qui y sont entrés, ne disposent que de l'activité de la source.

Tout cela implique la nécessité d'une correction pour pouvoir se servir de la donnée des taux de comptage bruts, et d'un étalonnage pour utiliser le taux de comptage vrai ($N - N'$) obtenu. On calcule $N - N'$ pour différents matériaux de densité connue. C'est seulement en reportant à cette courbe les taux de comptage vrais trouvés dans les différents sols, qu'on peut en déterminer la densité humide. Il faut bien sûr une courbe par profondeur d'enfoncement et une autre pour la rétrodiffusion.

Pratiquement, avec le Troxler 3411, on prend une mesure,

source rentrée, sur un bloc-étalon (ou bloc standard). Le taux de comptage obtenu, N_s , est différent de N' mais contient N' . Le calculateur le garde en mémoire, de même que les 7 courbes d'étalonnage N/N_s en fonction de la densité humide.

Quand on lui affiche la profondeur à laquelle on travaille ce calculateur peut après chaque mesure de taux de comptage, indiquer tout de suite les densités humides: ce calculateur permet une lecture directe.

Nota: pour d'autres renseignements sur l'étalonnage de cet appareil, voir le "3400 Séries Instruction Manual".

2. La décroissance de l'activité de la source et l'instabilité électronique:

Nous avons vu que tous les comptages sont rapportés à l'activité de la source, or celle-ci diminue avec le temps. Cette "dérive" peut influencer sur les calculs. C'est pourquoi l'on prend comme source du $^{137}\text{Césium}$, à longue période de vie (33 ans).

Autre dérive possible: celle de l'électronique. Cette dérive peut se produire même pour un Geiger-Müller. L'imprécision statistique sur les taux de comptage N et N_s peut alors devenir importante.

Pour pallier à ces deux défauts, le Troxler 3411 fait chaque jour le comptage standard N_s , qui intègre l'activité de la source. Au cours d'une journée, les dérives sont négligeables, si bien qu'on élimine en même temps les effets de ces deux dérives sur les mesures.

3. Correction de l'hydrogène:

La première difficulté rencontrée était due à la présence d'hydrogène dans le sol. Son Z/A , double de celui des autres éléments, qui entraîne un coefficient d'absorption massique plus élevé, oblige à connaître sa teneur pour connaître précisément la densité humide.

Comme la majeure partie est contenue dans l'eau, on se contente souvent de faire une mesure d'humidité, par diverses méthodes: physiques (séchage au four), chimique (carbure de Ca^{2+}), électriques (conductibilité, capacité)...

Le Troxler 3411 utilise un moyen plus élégant, qui ne néglige pas l'hydrogène non contenu dans l'eau: la sonde à neutrons. Nous ne donnerons pas de détails sur cette méthode radioactive, largement décrite, notamment dans le DEA-DAA Science du Sol de J.P.Luc (1971) et le dossier "Radioisotopes I".

Disons simplement qu'elle repose sur le ralentissement des neutrons rapides par les noyaux atomiques, sachant que le noyau d'hydrogène a un coefficient de ralentissement de 6 à 7 fois plus élevé que celui des autres éléments contenus dans le sol. Les neutrons ralentis peuvent être capturés, avec émission de noyaux d'Hélium déce- lable, par certains atomes (ex.: le bore, le lithium...) ce qui permet de les compter. Pour sa part, le Troxler 3411 utilise un compteur proportionnel à Hélium 3, qui permet de ne pas tenir compte des impulsions plus faibles provoqués par les gammas.

Ce taux de comptage correspondra donc à un certain ralentissement des neutrons rapides, donc à une teneur en hydrogène totale bien déterminée.

Notons que des erreurs peuvent provenir d'une forte pro- portion de Cl, Fe ou K dans le sol, qui ont des sections de capture des neutrons thermiques très fortes, ce qui diminue donc le taux de comptage par rapport à la moyenne des sols. Mais de toutes façons, tous les éléments participent un peu à la diffusion et la capture des neutrons lents, d'autant plus que la teneur en eau est faible: le ralentissement des neutrons dépend donc de la densité. Cette sonde donne donc la teneur en H totale connaissant DH.

Dans notre cas, la sonde à neutrons est couplée avec la sonde gamma. A partir des deux valeurs erronées de DH et teneur en hydrogène, un algorithme permet, en les ajustant tour-à-tour grâce à des abaques, d'atteindre les deux valeurs exactes. Dans le 3411, c'est le calculateur qui se charge de cette opération. Il permet la lecture directe de la valeur exacte de densité humide (la valeur de la teneur en hydrogène n'est pas affichée).

En pratique, ce procédé n'est pas aussi parfait. On a vu qu'on pouvait mesurer la densité à différentes profondeurs. Or, comme la source de neutrons ne s'enfonce pas dans le sol, elle mesure l'humidité dans un seul volume de sol, qui ne correspond pas toujours à celui où on a mesuré la densité, d'autant plus que la

profondeur de mesure de l'humidité varie avec la teneur en eau:

$$P (\text{ cm }) = 28 (\text{ cm }) - 27 H_v (\text{ g/cm}^3)$$

Ainsi on a 20 cm à 0,320 g/cm³, et 24 cm à 0,160 g/cm³.

De plus la sonde à neutrons est plus sensible à l'hydrogène situé près du plan source-détecteur. Ainsi donc elle n'étudie qu'approximativement le même volume que celui étudié par la sonde gamma. Or l'humidité des sols peut beaucoup varier en fonction de la profondeur (notamment, il y a des discontinuités dans les semelles de labours). Par conséquent il y a des erreurs dans la détermination de la teneur en hydrogène et donc de la densité humide.

4. Détermination de la densité sèche:

Plus qu'un procédé correctif, ceci est une possibilité supplémentaire apportée par la sonde à neutrons.

On peut en effet se servir de la donnée de la teneur en hydrogène pour calculer la teneur en eau. La plus grosse part de l'hydrogène du sol est en effet contenue dans l'eau. Le calculateur dont le programme suppose que tout l'hydrogène est dans l'eau, donne alors une valeur approchée de la teneur en eau volumique. Dans un matériau comme le sol, qui contient de l'hydrogène dans la matière organique et l'eau de constitution des minéraux, cette valeur est entachée d'erreur. Avec ce type d'appareil, on retrouve en plus les erreurs dues aux différences entre les volumes de mesures neutron et gamma et les erreurs de composition chimique provenant des différences entre les atomes (dans les sondes à neutrons perfectionnées, on fait en effet un étalonnage par type de sol). Toutes ces erreurs se retrouvent dans la densité sèche, que le calculateur atteint par différence ($DH - H_v$), et dans le pourcentage d'eau H_v/Ds . D'après le constructeur, l'erreur maximale est de 0,024 g/cm³ sur l'humidité et la densité sèche.

Si l'on veut, dans notre cas, une détermination plus précise de la densité sèche, il faut donc procéder à des mesures de teneur en eau par les méthodes décrites précédemment et soustraire les valeurs trouvées à DH . Pratiquement, le calculateur permet d'introduire un facteur correctif déterminé une fois pour toutes par type de sol (pour plus de précision, voir Manuel d'Instructions,

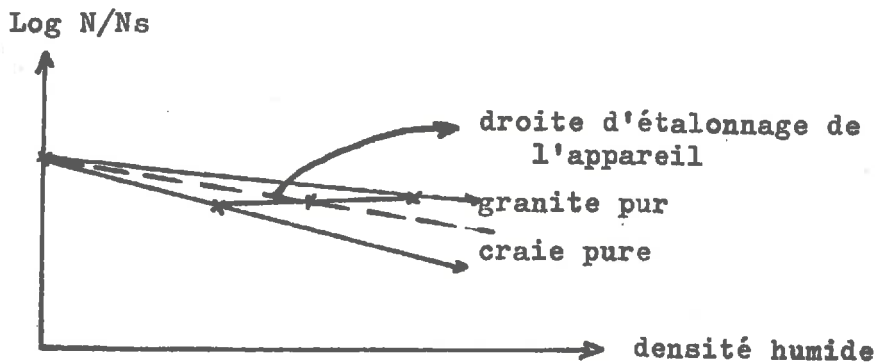
II-C-4). Mais il faut dire que l'erreur, proportionnellement importante sur H_v , l'est beaucoup moins sur la densité sèche.

5. Compensation de l'erreur de composition chimique:

L'hydrogène n'est pas le seul élément perturbateur. Les autres éléments n'ont pas exactement le même rapport Z/A ; celui de l'aluminium par exemple est sensiblement différent de 0,5, et cela peut intervenir dans certains sols. Mais c'est surtout l'intervention pour des énergies < 600 KeV, de l'absorption photoélectrique, différente selon les atomes, qui perturbe les mesures. Ainsi le Ca^{2+} absorbe beaucoup les électrons: il provoque une baisse systématique des taux de comptage (l'écart peut être de 5% entre 2 extrêmes: silice pure et calcaire pur, pour la rétrodiffusion, très sensible à l'absorption photoélectrique).

Le modèle Troxler 3411 essaie de réduire ce phénomène par la disposition de plaques de plomb et tungstène sous l'appareil, qui diminuent la proportion de photons peu énergiques dans le taux de comptage, et par le mode d'étalonnage. En effet, il y a autant de courbes d'étalonnage que de matériaux différents. Dans les sols les deux extrêmes sont celles du granite pur et de la craie pure:

Fig. 14 : Etalonnage de la sonde Troxler



La droite d'étalonnage retenue (pour un enfoncement donné) est celle intermédiaire entre les deux précédentes. Son écart avec celle du sol étudié est donc statistiquement minimisé. En réalité, la bibliographie nous donne comme extrême la silice pure (cf. Radioisotopes I). Le granite est une roche de composition variée, ne contenant pas uniquement de la silice. Or Troxler ne

précise pas de quel granite il s'agit...

6. Les erreurs dues à la géométrie:

a. Influence d'une obliquité de la tige et d'un mauvais enfoncement de la source:

Ces mauvaises manipulations modifient la distance source-compteur: on ne se trouve plus sur la courbe d'étalonnage normale. Expérimentalement, on a constaté que les erreurs provoquées étaient faibles.

Cependant on dispose d'un guide pour la tige de perçage perpendiculaire à la surface du sol. De plus la tige porte-source glisse le long d'une barre fixe, perpendiculaire à la semelle de la sonde, et munie d'un cran d'arrêt correspondant aux différents enfoncements de la source (voir Manuel d'Instructions, Ch.I et II)

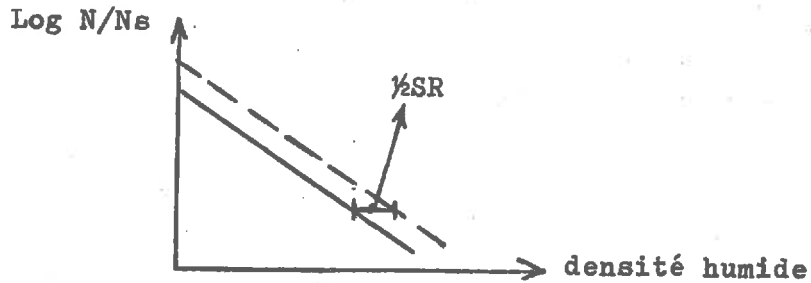
b. Influence d'une lame d'air sous les compteurs:

En chantier, il est très difficile d'assurer un contact parfait entre l'appareil et le sol. Il existe donc une lame d'air, qui interviendra dans la densité. Généralement, cette lame augmente le taux de comptage, par une moindre absorption des photons. Cependant en rétrodiffusion, une forte lame d'air peut limiter le nombre de centres de diffusion des photons et diminuer le taux de comptage.

C'est la cause d'erreur la plus importante: 1 mm d'air apporte sous des appareil à pointe une erreur de l'ordre de 1%, et, en rétrodiffusion, de 1 à 4%. En rétrodiffusion une cavité d'1 cm de profondeur juste sous un détecteur augmente le taux de comptage de 8 à 25% et, sous la source, de 2 à 8%.

Cette erreur est inhérente à l'opérateur, on ne peut donc pas la supprimer. Mais elle a statistiquement une valeur moyenne SR qui est, en supposant une manipulation normale, toujours négative (= uni-directionnelle). Le calculateur dispose en fait de courbes étalons "glissées" de $\frac{1}{2}SR$ (correspondant à 1,25 mm à 100% de vides). Cette erreur est alors statistiquement diminuée, mais elle devient "bi-directionnelle".

Fig. 15 : Correction de la lame d'air par l'étalonnage



Grâce à ces divers perfectionnements, on obtient un gammadensimètre utilisable en chantier et donnant une précision convenable. Les paramètres fournis à ce sujet par la maison Troxler (Manuel d'Instructions, I-B) feront l'objet de vérifications dans le chapitre suivant.

Cependant le protocole à observer est assez lourd, comme on peut le voir en lisant le Manuel d'Instructions, chap. II. Notamment, et c'est la rançon de sa précision, on doit chaque jour le laisser chauffer 10 minutes, faire les comptages standards et le contrôle du calculateur, soit en moyenne attendre 20 minutes avant les premières mesures.

III. ESSAIS ET ADAPTATIONS DE LA SONDE EN PEDOLOGIE

A. Adaptation de la sonde au profil pédologique.

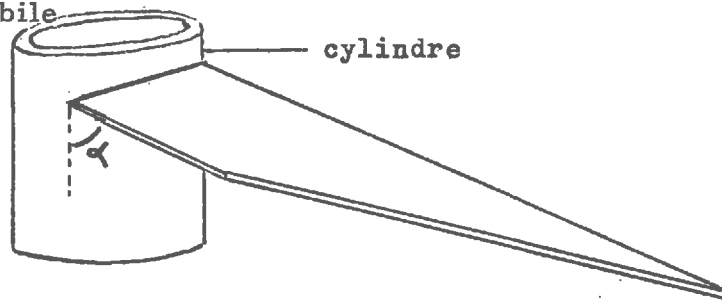
Cet appareil étant conçu pour l'étude "à plat" des revêtements routiers, son utilisation en pédologie, dans les conditions où il nous est fourni, comprendrait le creusement de "marches d'escalier" pour réaliser les mesures sur les horizons successifs des sols: les horizons profonds sont en effet souvent les plus intéressants à étudier (pour la pédogénèse notamment).

Pour éviter un tel travail, long et pénible, il a paru plus astucieux de chercher à exécuter les mesures directement sur une des parois verticales des profils creusés normalement lors de la cartographie des sols.

Pour cela, S.Conventi a été chargé de réaliser un bâti spécial, bâti à l'exécution duquel j'ai également contribué. Cette mise au point technique a d'ailleurs pris une bonne part du temps consacré à ce mémoire (deux semaines de travail effectif étalé sur un mois et demi). Voici la description du bâti tel qu'il était en juillet 1978, des modifications pouvant lui être apporté par la suite.

Le bâti, de forme rectangulaire, est constitué par un assemblage plan de tubes cylindriques s'emboîtant l'un dans l'autre (voir photos). Son poids total, avec les accessoires, est de 10 kg. Il peut être fixé à n'importe quelle hauteur sur une paroi verticale (profil, carrière,...) grâce à un jeu de 4 "chevilles mobiles.

Fig. 16 : Cheville mobile



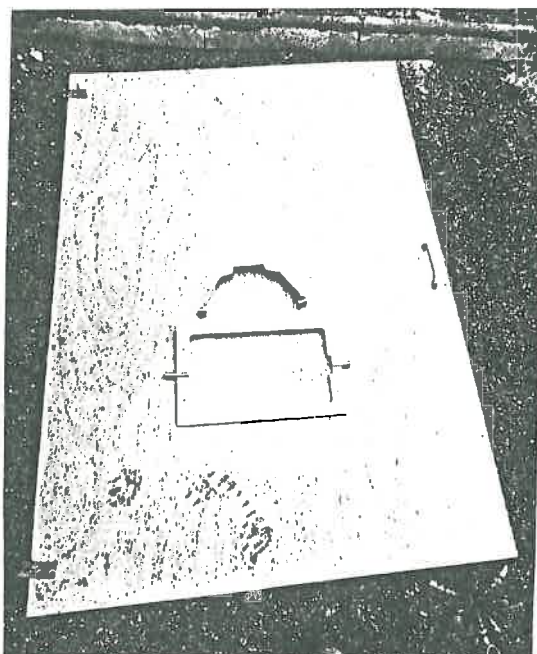
La liaison entre la sonde et le bâti est assuré par le cadre en aluminium, métal choisi parce qu'il est censé perturber le moins les mesures, sur lequel on a percé des trous. Ce cadre est ainsi attaché à deux guides qui se déplacent le long des montants du bâti.

Photographies de la Sonde et du Bâti



- Sonde Troxler 3411

Le cadre et sa sangle en aluminium,
avant montage



Photographies de la Sonde et du Bâti



Le bâti et la sonde avant installation

Le bâti et la sonde installés dans un profil



On remarquera sur les photos que c'est sa longueur, et non sa largeur, qui est mise entravers du bâti. En effet la section du volume utile correspond à peu près à la semelle de la sonde (voir Manuel d'Instructions) et cette disposition permet d'étudier une couche plus fine, équivalente à la largeur de l'appareil (environ 20 cm). Deux tubes creux munis de ressorts permettent de plaquer au mieux la sonde contre la paroi. Un ressort compense le poids de la sonde et maintient la semelle verticale.

Les guides se déplacent fixés chacun à un groupe de trois poulies, dont deux libres sur leur axe. Les poulies fixes sont reliées l'une à l'autre par leur axe, ce qui leur permet de tourner de la même façon des deux côtés et de descendre la sonde régulièrement. Elles sont crantées, de façon à mordre sur le caoutchouc qui gaine les deux montants. Leur axe est relié par quatre ressorts à deux poulies libres situées de l'autre côté du montant. Ainsi les poulies serrent le montant et ne descendent pas d'elles-mêmes, même sous le poids de la sonde. Cela permet à l'opérateur de mettre la sonde au niveau d'un trou fait à l'avance. Un procédé de descente discontinu de l'appareil, plus simple à réaliser, aurait exigé de percer le trou à l'endroit correspondant exactement à la sortie de la source, ce qui est très délicat à repérer.

B. Précision et fidélité de la sonde.

On peut voir dans le Manuel d'Instructions les valeurs des précisions affichées par les constructeurs pour les mesures de densité. Les précisions dépendent de la profondeur et du temps de mesure. L'humidité a une précision encore différente.

Rappelons rapidement que l'erreur totale possible sur la densité humide et sur l'humidité provient de:

- l'installation de la sonde sur le sol. Cette erreur est inhérente à l'opérateur. On a calculé sa valeur statistique SR ("surface roughness") pour une manipulation correcte.
- la composition chimique (valeur statistique CE = "composition error"). Elle dépend du sol.
- l'imprécision statistique, PREC, inhérente à l'appareil. Elle est déterminée statistiquement par l'écart-type de la distribution des valeurs obtenues en mesurant plusieurs fois une même grandeur. Dans 95% des cas, ces valeurs devraient donc être comprises dans une marge de $\pm 1,96$ PREC autour de la moyenne (on prend souvent 2 PREC pour simplifier). Cette imprécision intervient lors des mesures elles-mêmes, mais aussi lors des comptages standards.

Nous avons fait des essais pour voir, dans l'adaptation à la pédologie, le comportement de la sonde, notamment la précision obtenue et l'importance de la lame d'air. Auparavant il était aussi indispensable de vérifier l'influence sur les mesures des masses métalliques constituant le bâti et le cadre de liaison.

1. Influence du bâti sur les mesures:

La proximité de ces masses influent sur les photons et les neutrons lors des mesures. On peut en supprimer l'incidence en les rapportant à des standards mesurés dans les mêmes conditions. Nous avons comparé, pour chiffrer cette influence, les moyennes des mesures standards répétées obtenues dans différents cas:

(1) sans bâti ni cadre en aluminium, en 100mn

$$\overline{Ds} = 2809$$

$$\overline{Ms} = 616$$

(2) sans bâti, avec le cadre, en 20 mn

$$\overline{Ds} = 2804$$

$$\overline{Ms} = 633,8$$

(3) avec bâti et cadre, en 20 mn

$$\overline{Ds} = 2857$$

$$\overline{Ms} = 636,4$$

Ecart sur \overline{Ds} entre (2) et (3): $53/2830,5 = 1,87\%$

$$2,6/635,1 = 0,40\%$$

Le premier écart est supérieur à trois fois la différence admise pour les tests de stabilité (0,5%). Il entraîne donc une influence sur les mesures. Il vaut mieux, si l'on peut, faire les mesures standards avec le bâti.

- Quelle serait l'influence si on ne le faisait pas ?

L'influence est maximale aux fortes densités. La variation minimale du CR ($CR = N/Ns$, voir Manuel d'Instruction III.E) permettant de changer la densité humide de 0,01 se trouve à $DH = 2,73$ (la courbe d'étalonnage fournie par l'usine ne va pas plus haut).

Sur la courbe correspondant à 30 cm d'enfoncement où cette influence est maximale, un ΔCR de 0,001 permet de passer de 2,72 à 2,73. Par exemple un comptage densité de 140, au lieu de donner $DH = 2,72$ comme en mesure à plat, donnera $DH = 2,71$, c'est-à-dire seulement 0,3% d'écart.

Aux densités moyennes, l'influence est encore plus faible. Si on travaille à 25 cm, pour des densités humides de 1,8 à 1,9, il faut un ΔCR de 0,003 pour obtenir un écart de densité de 0,01 g/cm³. Pour des andosols, cet écart diminuerait encore.

- Notons que le standard usine (2774) donné pour les contrôles de dérive ne convient plus avec le bâti. Avec la plaque, la moyenne (2804) semble presque pareille, mais avec le bâti, il faut admettre une marge de plus de 2% autour du standard d'usine, ou mieux, calculer un autre standard moyen.

2. Précision des mesures de terrain:

a. Etudes sans bouger la sonde:

Cette étude visait à mesurer 10 fois la même grandeur en

gardant toujours la même lame d'air et la même composition chimique: ainsi les variations observées proviendront de l'imprécision statistique de l'appareil.

Nous avons fait d'abord 10 mesures répétitives dans un même trou, et cela à diverses profondeurs. Les résultats en g/cm^3 , de la densité humide DH, de la densité sèche DS, de l'humidité volumique H et du rapport de H à DS, %H, sont reportés dans les tableaux suivants avec, en regard, la marge théorique sur la densité humide, 2 PREC. Pour le tableau III, relatif à un profil, seules les valeurs de DS ont été reportées; en effet le creusement du profil a perturbé la répartition de l'eau, et les densités humides ne pouvaient plus être comparées.

On voit qu'en mesurant plusieurs fois la même grandeur, il existe des variations:

- Cette variation est toujours très faible pour DH (qui est par ailleurs, nous l'avons vu, la grandeur la mieux approchée). Dans le tableau I cette variation est de 0,1% à 25 cm et 15 cm, mais peut atteindre 0,8% dans le tableau II (à 30 cm).
- Par contre la mesure de H varie de façon plus appréciable. La marge d'incertitude est plus grande, affectant presque toujours le deuxième chiffre après la virgule, et proportionnellement, elle peut atteindre 8% dans le tableau I, à 20 cm.
- Cette variation se répercute bien sûr lors des calculs de DS et %H. Mais proportionnellement, elle sera beaucoup plus faible car DS a une valeur 5 à 8 fois plus élevée. La variation sur DS ne dépasse pas ici 1,3% (tableau II, à 30 cm). Donc, il ne faut pas trop s'inquiéter de cela, car ce n'est pas une sonde à mesurer l'humidité (qui aurait sinon de bien mauvaises performances). L'humidité sert seulement à atteindre la densité sèche.
- Entre les différents tableaux, on voit que les variations sont différentes. Ainsi ils sont dans le tableau II, double ou triple que celles du tableau I, en ce qui concerne DH et DS. Pour H, ils sont au contraire du même ordre, sinon plus faibles. Peut-être est-ce dû à ce que dans le deuxième cas, H était plus forte donc l'imprécision pouvait être relativement plus faible.
- Enfin si on compare aux valeurs annoncées, 2 PREC: dans le

Tableau I

Mesures à plat sur le terrain vague proche de la station d'hydrologie de la chaire de Génie Rural.

| | | |
|---------|--------------------------------|---------------|
| A 30 cm | DH = 1,977 + 0,007 soit 0,3% | 2PREC = 0,01 |
| | DS = 1,752 + 0,017 soit 0,9% | |
| | H = 0,225 + 0,012 soit 6% | |
| | %H = 12,870 + 0,897 soit 7% | |
| A 25 cm | DH = 1,961 + 0,005 soit 0,1% | 2PREC = 0,008 |
| | DS = 1,736 + 0,009 soit 0,5% | |
| | H = 0,224 + 0,009 soit 4% | |
| | %H = 12,950 + 0,700 soit 4,8% | |
| A 20 cm | DH = 1,939 + 0,007 soit 0,2% | 2PREC = 0,007 |
| | DS = 1,717 + 0,017 soit 1% | |
| | H = 0,222 + 0,017 soit 8% | |
| | %H = 12,950 + 1,310 soit 10,1% | |
| A 15 cm | DH = 1,896 + 0,002 soit 0,1% | 2PREC = 0,007 |
| | DS = 1,671 + 0,010 soit 0,7% | |
| | H = 0,225 + 0,010 soit 5% | |
| | %H = 13,480 + 0,900 soit 6,7% | |

Tableau II

Mesures verticalement sur un remblai à 45° de pente. (sol caillouteux du bois de Doscares.)

| | | |
|---------|--|---------------|
| A 30 cm | DH = 2,090 + 0,017 soit 0,8% | 2PREC = 0,010 |
| | DS = 1,740 + 0,020 soit 1,3% | |
| | H = 0,345 + 0,017 soit 5% | |
| | %H = 19,800 + 1,230 soit 6,2% | |
| A 25 cm | DH = 2,030 + 0,013 soit 0,57% | 2PREC = 0,008 |
| | DS = 1,670 + 0,021 soit 1,2% | |
| | H = 0,353 + 0,015 soit 4,2% | |
| | %H = 21,000 + 1,100 soit 5,3% | |
| A 20 cm | DH = 2,020 + 0,008 soit 0,11% | 2PREC = 0,007 |
| | DS = 1,670 + 0,010 soit 0,7% | |
| | H = 0,351 + 0,007 soit 1,8% | |
| | %H = 21,000 + 0,550 soit 2,8% | |
| A 15 cm | DH = 2,010 + 0,007 soit 0,34% | 2PREC = 0,007 |
| | DS = 1,670 + 0,015 soit 0,9% | |
| | H = 0,341 + 0,010 soit 3,34% | |
| | %H = 20,500 + 0,810 soit 4% | |

Tableau III

Mesures verticalement sur la paroi d'un profil derrière la Chaire de Science du sol .

| | |
|---------|--|
| A 30 cm | DS = 1,818 + 0,011 soit 0,6% |
| A 25 cm | DS = 1,809 + 0,013 soit 0,7% |
| A 20 cm | DS = 1,802 + 0,011 soit 0,6% |
| A 15 cm | DS = 1,799 + 0,016 soit 0,8% |
| A 10 cm | DS = 1,777 + 0,006 soit 0,3% |
| A 5 cm | DS = 1,740 + 0,013 soit 0,7% |

tableau I, les performances sont meilleures, et dans le tableau II, du même ordre mais aussi parfois plus mauvaises. Pour l'humidité (pour laquelle à 0,245 g/cm³, 2 PREC = 0,01) les performances sont presque systématiquement plus mauvaises. Mais il faut ajouter que le nombre de mesures (10 par trou et par profondeur) ne permet peut-être pas de conclure avec certitude.

Nous avons complété l'étude: par des mesures à plat sur un autre type de sol, par 80 mesures dans un trou à 25 cm, par 100 mesures de standards.

Mesures à plat (sol caillouteux du bois de Doscares, sur cailloutis villafranchien):

| | | |
|-------|----|-------------------------|
| 30 cm | DH | 2,075 ± 0,013 soit 0,7% |
| | DS | 1,820 ± 0,020 soit 1% |
| | H | 0,250 ± 0,010 soit 4,9% |
| | %H | 13,0 ± 0,810 soit 6% |
| 25 cm | DH | 2,070 ± 0,015 soit 0,7% |
| | DS | 1,800 ± 0,027 soit 1,5% |
| | H | 2,660 ± 0,008 soit 3% |
| | %H | 14,7 ± 1,000 soit 6,8% |

Tableau IV

Ces variations sont comparables à celles trouvées sur le terrain non caillouteux (tableau I). En particulier, les ordres des imprécisions entre les différentes grandeurs restent les mêmes, ainsi que les ordres d'imprécision selon la profondeur entre 30 cm et 25 cm (sauf pour DS).

80 mesures à 25 cm (sous-sol non aménagé du bâtiment de Science du sol)

| | | | |
|------------------|----|--------------------------|----------------|
| <u>Tableau V</u> | DH | 2,128 ± 0,012 soit 0,50% | 2 PREC = 0,008 |
| | DS | 1,751 ± 0,031 soit 1,76% | |
| | H | 0,375 ± 0,024 soit 6,4% | 2 PREC = 0,01 |
| | %H | 21,4 ± 1,72 soit 8,2% | |

On s'aperçoit que les marges d'incertitudes sont plus grandes que lors des séries de 10 mesures. La variation sur la densité sèche est de $\pm 0,03$ et touche donc le deuxième chiffre après la virgule. Les marges d'incertitudes obtenues dépassent les marges prévues.

Nous avons fait une courbe des taux de comptage de densités en fonction du temps (annexe 3). On voit qu'il y a une baisse des comptages au cours du temps. Nous avons calculé les moyennes des 40 premières, des 40 dernières et des 80 mesures.

| | | |
|-----------|------|--------------------|
| 1° moitié | DC = | 699,47 \pm 13,98 |
| 2° moitié | DC = | 693,15 \pm 10,35 |
| ensemble | DC = | 698 \pm 25,72 |

Ces deux moyennes sont-elles significativement différentes ?

Il faudrait:

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| > 1,96 \sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}$$

C'est à dire:

$$6,32 > 1,96 \sqrt{\frac{50,8 + 27,87}{40}} = 1,96 \sqrt{1,968}$$

C'est bien le cas, donc nos moyennes sont différentes. Nous n'avons donc pas une loi normale, il y a eu dérive dans les temps. Cela explique en partie les écarts.

100 mesures standards:

Cette étude n'a pas apporté grand chose. Elle montre elle-aussi une dérive dans le temps, avec un écart maximal légèrement supérieur à 1%, qui était pourtant la norme donnée par le constructeur (celui-ci nous a répondu que la marge d'erreur était faible et les résultats utilisables).

Ainsi donc nous voyons qu'il existe des variations dues à l'appareil, mais qui n'affecte au pire que le deuxième chiffre après la virgule, et qui donc ne sont pas gênantes en pédologie, où on ne recherche pas une précision absolue. On sait aussi que cette variation est en partie due à une dérive de l'appareil dans le temps. Nous n'avons pas à faire à une distribution normale.

b. Mesures à un jour d'intervalle dans les mêmes trous:

Dans cet essai, à l'imprécision statistique déjà étudiée, vient s'ajouter la différence de lame d'air, puisqu'on a bougé l'appareil. L'erreur de composition chimique reste la même, puisqu'on étudie le même volume de terre.

Nous avons fait, dans deux trous percés dans une paroi, une mesure par profondeur et par jour. En comparant les densités sèches, qui en principe n'ont pas varié, on obtient:

1° trou

Tableau VI

| | 1° jour | 2° jour | écart |
|-------|---------|---------|-------|
| 25 cm | 1,777 | 1,813 | 0,036 |
| 20 cm | 1,748 | 1,753 | 0,005 |
| 15 cm | 1,764 | 1,852 | 0,088 |
| 10 cm | 1,713 | 1,771 | 0,058 |
| 5 cm | 1,704 | 1,725 | 0,021 |

2° trou

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 25 cm | 1,579 | 1,616 | 0,037 |
| 20 cm | 1,599 | 1,603 | 0,005 |
| 15 cm | 1,623 | 1,636 | 0,013 |
| 10 cm | 1,609 | 1,636 | 0,025 |
| 5 cm | 1,607 | 1,604 | 0,003 |

On constate ici des écarts assez grands, notamment pour le premier trou: ainsi on a 0,088 g/cm³ d'écart à 15 cm (soit 4,88%). La marge d'incertitude statistique calculée au même enfoncement sur la paroi d'en face (tableau III) n'était que de 0,8% autour de la moyenne.

Dans le second trou, les écarts sont plus faibles. Dans ce site, il y avait un bien meilleur contact de la sonde avec le sol (en vertical, il est difficile d'obtenir une surface bien plane et parallèle à la semelle de la sonde). Par conséquent, la lame d'air a moins pu varier entre les deux jours. De plus on peut constater une moins grande hétérogénéité des résultats avec l'enfoncement dans le second trou (ainsi le 2° jour: 0,060, 0,099, 0,081, et 0,046 contre

0,013, 0,033, 0 et 0,032). Ceci peut aussi ne pas venir de la lame d'air, mais d'une hétérogénéité effectivement plus grande au voisinage du 1^o trou.

Ceci montre en tout cas qu'in ne faut pas négliger l'erreur de lame d'air et qu'on a tout intérêt à bien égaliser le sol.

c. Mesures dans 10 trous proches:

Ces essais visent à approcher ce qui se passe en pratique lors des mesures, où toutes les erreurs s'ajoutent aux différences réelles de densité, et à comparer la variabilité de la densité à l'imprécision de la sonde.

- Nous avons réalisé une mesure par enfoncement dans 10 trous proches situés à 40 cm les uns des autres (terrain situé près de la station d'hydrologie de la Chaire de Génie Rural).

Tableau VII

| | |
|-------|-----------------------------|
| 30 cm | DH : 1,921 ± 0,11 soit 5,7% |
| | DS : 1,673 ± 0,09 soit 5,7% |
| | H : 0,248 ± 0,02 soit 8,6% |
| | %H : 14,8 ± 1,14 soit 7,7% |
| 25 cm | DH : 1,900 ± 0,12 soit 6,3% |
| | DS : 1,660 ± 0,11 soit 6,8% |
| | H : 0,250 ± 0,02 soit 9,4% |
| | %H : 15,0 ± 1,14 soit 7,5% |
| 20 cm | DH : 1,905 ± 0,14 soit 7,6% |
| | DS : 1,652 ± 0,13 soit 8% |
| | H : 0,254 ± 0,03 soit 10,8% |
| | %H : 15,3 ± 1,35 soit 9% |
| 15 cm | DS : 1,639 ± 0,18 |
| 10 cm | DS : 1,608 ± 0,15 |
| 5 cm | DS : 1,569 ± 0,16 |

rétrodiffusion DS; 1,563 ± 0,18

- Nous voyons que l'incertitude autour de la moyenne est ici beaucoup plus forte que dans le cas précédent (où le grand maximum pour DS était 4,88%). A chaque profondeur, le deuxième chiffre après la virgule est incertain. C'est que maintenant s'ajoutent des différences réelles de densité (éventuellement augmentées par des erreurs de composition chimique différentes).

- En effet, même si un terrain semble homogène comme celui-ci, une mesure ne signifie pas grand-chose. On essaie d'améliorer la signification des données en faisant plusieurs mesures par parcelle: l'écart-type diminue quand la taille de l'échantillon augmente, car la distribution des densités dans une parcelle suit une loi normale. Cependant il ne faut pas compter descendre en dessous de l'imprécision due à l'appareil (imprécision statistique et imprécision due à la lame d'air), dont on a un exemple dans le tableau VI .

- Le nombre d'essais à pratiquer dépend éminemment de l'hétérogénéité du terrain. On ne peut donc donner de règle générale. Cependant nous avons calculé dans le cas du terrain étudié combien il aurait fallu de trous dans ces quelques mètres carrés pour avoir une précision de 5% sur la densité (en étant conscient que 10 mesures sont insuffisantes pour donner l'écart-type, dans le cas de cette loi normale): la moyenne obtenue sur N trous est encadrée 95 fois sur 100 par la fourchette $S.t/N$ où S est l'écart-type de l'échantillon et t est fonction de N et est à rechercher dans la table de Student (petit nombre).

On veut donc:
$$\frac{S.t}{\sqrt{N}} < \frac{E}{100} \cdot \bar{x} \iff \left(\frac{100 \cdot S.t}{E \cdot \bar{x}} \right)^2 < N$$

Pour DS, S/E.x est plus élevé que pour DH. C'est lui qui imposera le nombre de trous à pratiquer (pour l'humidité on peut prendre E/100 = 20%, puisqu'on ne recherche pas l'humidité avec cette sonde). Ce nombre est de:

| 30 cm | 25 cm | 20 cm | 15 cm | 10 cm | 5 cm | rétrodiffusion |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------------|
| 4 | 4 | 5 | 8 | 6 | 7 | 8 |

On voit que dans les mesures superficielles, la dispersion des mesures

implique un plus grand nombre de trous pour avoir une mesure représentative.

Cet essai ne permet pas de conclure combien il faut réaliser de points de mesures par horizon dans un profil. Il faudrait à l'avenir, maintenant que le bâti est opérationnel, faire de nombreux points de mesure dans un profil (20 ou 30 pour pouvoir approcher σ de manière satisfaisante). De toutes façons, ce nombre dépendra de l'hétérogénéité du terrain. Peut-être pourra-t-on s'aider pour l'apprécier de la variation observée selon l'enfoncement de la source dans un premier trou et déterminer alors le nombre de trous supplémentaires à pratiquer.

C. Justesse de l'appareil.

1. Les mesures d'humidité:

Nous avons vu dans la présentation de l'appareil, que l'humidité est mesurée à la même profondeur, quel que soit le volume étudié pour la densité, ce qui donne une valeur inexacte de l'humidité sans compter l'erreur due à l'hydrogène non contenu dans l'eau. Cela pose le problème de la correction d'humidité.

Mais nous avons vu depuis que la sonde à neutrons est peu précise. Dans un ensemble de 80 mesures de la même grandeur, on observe 6,4% de variations. Cette imprécision amène à se demander si une correction est bien utile.

Pour cela nous avons fait de nombreuses mesures avec des boîtes à humidité. Cette procédure s'est révélée mauvaise. En effet les boîtes, de petit volume, sont très sensibles aux hétérogénéités de teneur en eau. Le volume exploré par les neutrons est plus grand et a toutes les chances d'être plus représentatif du volume étudié par les gammas, même s'il n'y a pas coïncidence entre eux.

Cependant nous donnerons à titre d'exemple les résultats obtenus avec deux échantillons plus importants, retirés pour le densitomètre à membrane.

DH: 1,976 - 1,811

H_{Troxler}: 0,169 - 0,186

H_{four} : 0,144 - 0,133
Ecart: 0,025 - 0,053
Ecart/DS: 1,3% - 3,2%

Enfin des mesures à 50 cm d'intervalle entre une sonde neutron et la sonde Troxler ont donné:

H_{Troxler} : 0,296 g/cm³
 H_{Neutron} : 0,266 g/cm³
Ecart: 0,030 g/cm³

On voit que les écarts sur DS sont peu importants. Il n'y a pas nécessité de corriger ici. Ce serait peut-être différent dans le cas de sols très organiques comme les tourbes.

De toute façon une correction réelle demanderait de prélever plusieurs litres de matériau sous la sonde, et cela en plusieurs endroits. La procédure devient alors longue et pénible, ce qui ôterait beaucoup d'intérêt à la sonde Troxler.

2. Justesse des mesures de densité.

Il est impossible de conclure à la supériorité d'une méthode densimétrique sur l'autre lors des mesures sur le terrain, car on ne connaît pas la densité exacte du matériau étudié. On en est réduit à des suppositions.

Cependant les mesures faites en laboratoire sur des blocs homogènes de densité précisément connue ont permis de tester les gammadensimètres et de voir qu'ils pouvaient approcher à 1% la densité humide. On peut penser que sur le terrain, en manipulant bien on peut rester proche de ces performances, notamment quand le volume utile est grand (source profonde).

a. Nous avons fait cependant une comparaison avec le densitomètre à membrane, avec comme objectif pratique de voir comment se placent les réponses les unes par rapport aux autres, de façon à pouvoir situer les anciens résultats donnés par cette méthode par rapport à ceux de la sonde Troxler.

La sonde était à plat, la source étant enfoncée de 10 cm dans le sol de façon à comparer à peu près les mêmes volumes.

1° site

| | sonde | densitomètre I | densitomètre II | moyenne |
|----|-------|----------------|-----------------|---------|
| DH | 1,976 | 2,074 | 1,646 | 1,860 |
| DS | 1,806 | 1,924 | 1,524 | 1,724 |

2° site

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| DH | 1,811 | 1,690 | 1,883 | 1,786 |
| DS | 1,626 | 1,566 | 1,743 | 1,654 |

Dans les deux sites, les deux valeurs obtenues au densitomètre se placent de part et d'autre de celles données par la sonde. La moyenne est comparable à la mesure gammamétrique dans le deuxième site, beaucoup moins dans l'autre. Mais la grosse différence entre les deux essais au densimètre fait penser à une mauvaise manipulation. - De plus, sur la station d'hydrologie, déjà beaucoup étudiée, nous avons mesuré, près des tubes 4, les valeurs suivantes:

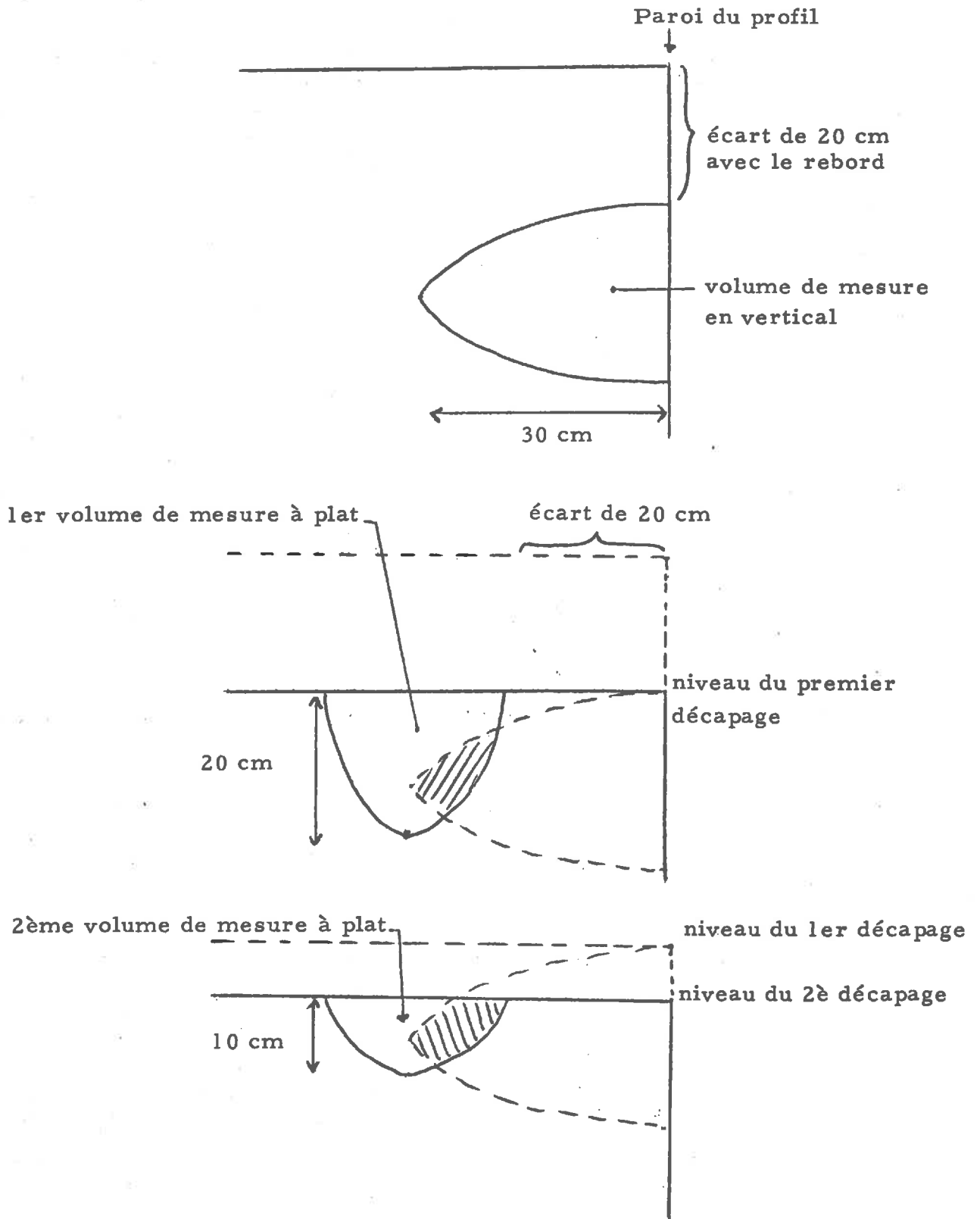
| 30 cm | 25 cm | 20 cm | 10 cm |
|-------|-------|-------|-------|
| 1,691 | 1,650 | 1,619 | 1,538 |

Valeurs obtenues avec un gammadensimètre de profondeur:

| | |
|-------|-------|
| 1,628 | 1,701 |
|-------|-------|

b. Nous avons essayé de faire une comparaison des résultats obtenus à plat et sur une paroi dans un même bloc de terre. La mesure en vertical permet pour de grands enfoncements, d'étudier un volume qui recoupe peu d'horizons différents, avec une contrainte cependant puisqu'on ne doit pas mesurer à moins de 20 cm d'un rebord, pour que les photons ne s'échappent pas dans l'air. Après la mesure "verticale", nous avons décapé la terre au-dessus du volume de mesure, mais le point de mesure à plat devait rester éloigné du rebord.

Fig. 17 : Procédure expérimentale



Ainsi les volumes étudiés se recoupent incomplètement. Voici les densités sèches obtenues:

| | vertical (30 cm) | à plat (20 cm) | à plat (10 cm) |
|---------|--------------------|------------------|------------------|
| 1° site | 1,788 | 1,795 | 1,806 |
| 2° site | 1,614 | 1,624 | 1,626 |

Ces valeurs sont très comparables (écart de l'ordre de grandeur des imprécisions statistiques) comme on s'y attendait. Cela justifie donc parfaitement l'utilisation de la sonde avec son bâti.

c. Comparaison des résultats selon les enfoncements:

Nous avons constaté dans les tableaux de chiffres du paragraphe B.2°. des densités sèches différentes selon l'enfoncement de la source. Pour savoir si ces différences sont significatives, nous avons appliqué aux valeurs de DS le test:

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| > 2,1 \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{10}} \quad ?$$

Dans les mesures à plat, la mesure à 30 cm est plus forte que les autres, et dans le remblai (tableau II) toutes les moyennes sont différentes. Cela peut être du à une réelle variation de densité, venant de différence de tassement selon la profondeur. Mais cela pourrait être du aussi à des réponses différentes de l'appareil selon la géométrie employée (la même lame d'air pourrait intervenir de façon différente pour deux enfoncements différents). Pour tenter de lever ce doute, on a fait des comparaisons de densité sèche sur la paroi d'un profil (tableau III), où on peut s'attendre à une certaine homogénéité puisqu'un seul horizon reste concerné. Là aussi l'application du test donne des moyennes différentes, sauf entre 15 et 25 cm (1,799 et 1,802). Une hétérogénéité réelle dans un même horizon n'est pas à exclure, mais cela peut indiquer un artefact du procédé de mesure: par exemple la lame d'air, constante pendant les mesures dans un même trou, diminue par rapport au volume utile quand on augmente l'enfoncement: ainsi la densité sèche mesurée augmente (ce qui est le cas dans les tableaux de mesures I,II,III). Une autre explication peut être que, l'humidité changeant avec la profondeur, l'erreur systématique qui entache cette donnée change aussi et se répercute sur la densité sèche.

Dans ce cas, il est impossible de déterminer nous-mêmes quelle est la plus juste des réponses selon l'enfoncement. On doit donc s'en remettre aux spécifications données par Troxler (cf. Manuel d'Instructions, chap. I) selon lesquelles l'erreur totale possible est minimale à 25 et 20 cm et maximale en rétrodiffusion. Cela indique que les mesures superficielles, dont le volume utile est plus faible, sont moins performantes. En particulier, il vaut mieux éviter de travailler en rétrodiffusion, malgré sa commodité d'emploi car cette procédure est sensible aux hétérogénéités et aux lames d'air.

D. Possibilités d'emploi de la sonde gamma en pédologie.

1. En cartographie:

Lors des études pédologiques, chaque unité de sol délimité au cours des levées fait ensuite l'objet de descriptions, prélèvements et mesures à partir de profils pédologiques ouverts le plus souvent à la pelle mécanique. Si l'on admet que la caractérisation de la densité apparente sèche réalisée dans ce cadre n'exige pas une précision très stricte (tolérance de l'ordre de 0,05) le recours à la sonde Troxler fixée à son bâti devrait améliorer la rapidité des mesures par rapport aux méthodes traditionnelles.

La répétition des mesures sur un même horizon (qu'il faudra étudier) et sur des profils différents du même type de sol conduit d'ailleurs à une valeur statistique de la densité.

Toutefois en sol caillouteux, l'égalisation du sol étant impossible et l'élimination de la lame d'air étant difficile sur une paroi verticale dans l'état actuel des choses, il est nécessaire de tailler des marches d'escalier afin de faire les mesures à plat sur une surface aplanie avec du sable.

2. En recherche:

Lorsqu'on a besoin de valeurs plus précises, dans le cadre d'une recherche notamment, il vaut mieux travailler à plat, parce que l'erreur de la lame d'air y est plus faible et que l'amélioration de précision vient surtout de l'élimination de cette erreur. Pour

cela on peut aussi tourner l'appareil autour de la tige porte-source (conseil de Mr. Rambal, chercheur au C.E.P.E.): ainsi la valeur la plus forte serait la moins entachée d'erreur de lame d'air, en supposant la densité homogène à cet endroit.

Enfin on peut, profitant de ce que la sonde permet des mesures rapides, augmenter le nombre de mesures par parcelle et donner une moyenne et un écart-type, qui ont plus de signification qu'un deuxième chiffre après la virgule, étant donné la variabilité de la densité sèche.

Notons que la sonde gamma est toute indiquée pour déceler des évolutions de densité, dans l'espace ou dans le temps. En effet les mesures en valeur relative sont excellentes, car elles éliminent les erreurs de composition chimique tant sur l'humidité que sur la densité. On peut ignorer les valeurs exactes tout en décelant une évolution. C'est ainsi que nous avons, avec Mr. Collet, étudié l'évolution de la porosité à travers une tache de chlorose (voir une des courbes obtenues dans l'annexe 4).

CONCLUSION.

Le gammadensimètre de surface Troxler 3411 est un appareil à pointe, à enfoncement variable, permettant de travailler aussi en rétrodiffusion. Il est couplé avec une sonde à neutron, qui possède sa source et son détecteur particuliers, et muni d'un calculateur. La construction d'un bâti en a élargi le champ d'utilisation en pédologie, permettant lors des cartographies un emploi "opérationnel" pour les mesures en profondeur.

Il possède plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles:

Il permet une lecture directe et rapide, peu destructive, ce qui rend possible par exemple une étude dans le temps du même matériau.

Son utilisation est possible sans gros problèmes en sols caillouteux, et est alors moins pénible que les méthodes traditionnelles adéquates.

Il permet une justesse sans doute au moins équivalente aux plus performantes de ces dernières, avec une moindre variabilité des résultats que pour la plupart d'entre elles en raison du plus grand volume de mesure concerné (3 dm³ à 30 cm).

Ces avantages ont compensé les premiers inconvénients dus à son coût et à la rigueur des réglementations concernant l'emploi des éléments radioactifs, dont on peut se convaincre en lisant le chapitre V du Manuel d'Instructions.

D'autres inconvénients viennent du prix des contrôles dosimétriques mensuels obligatoires, qui incite à n'avoir qu'un nombre réduit d'opérateurs (d'où une moindre souplesse d'emploi) et du protocole à observer pour se servir de la sonde, qui devient proportionnellement lourd si l'on ne veut faire qu'une mesure dans la journée.

Enfin les performances ne valent pas celles annoncées par le constructeur, notamment pour l'humidité. Il faut donc savoir que cette sonde ne peut être sérieusement utilisée comme humidimètre. Mais ces défauts se répercutent peu sur la densité sèche, et il ne semble pas qu'une correction soit le plus souvent nécessaire. Il

faudrait sinon recourir à des contrôles de l'humidité pour chaque type de sol, ce qui ferait perdre de ses avantages à la méthode.

En résumé, et bien que notre travail ait surtout consisté à adapter la mise en oeuvre de cette sonde à la pédologie (avec notamment la mise au point d'un bâti opérationnel, en collaboration avec S.Conventi) il apparaît dès à présent que cet appareil convient aux déterminations de densités apparentes propres à la cartographie des sols. Avec éventuellement des dispositions spéciales, il devrait aussi rendre service en recherche, par exemple dans les études d'évolution, les études de la porosité des roches connaissant la densité réelle...

Pour tester complètement les possibilités de la sonde, il nous semble utile d'étudier encore, à l'avenir:

- l'ordre de grandeur réel de la correction d'humidité (et éventuellement faire le calcul du coefficient de correction pour quelques types de sols).
- les comparaisons avec les méthodes traditionnelles utilisées couramment.
- les dispositions pour diminuer la lame d'air lors des mesures sur les parois, pour rendre ces dernières aussi précises que les mesures à plat.
- et enfin, le nombre de mesures à pratiquer par horizon et par profil, en essayant de voir si les variations rencontrées entre différents enfoncements ne peut constituer un test dans cette détermination...

BIBLIOGRAPHIE

- Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées (1966) : "Radioisotopes I"
- Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées (1970) : "Radioisotopes II"
- J.P.Luc (1971) : "Installation d'une station expérimentale en vue de la comparaison de quatre méthodes de mesures de l'humidité du sol"
DEA-DAA Science du Sol- SES 376
- M.Warembourg (1972) : "Détermination des densités apparentes à l'aide d'un gammadensimètre de profondeur".
DEA-DAA Science du Sol- SES 384
- D.Ranc (1977) : "Problèmes posés par la présence de cailloux dans la détermination des caractéristiques hydrodynamiques du sol"
DEA-DAA Science du Sol- SES 428

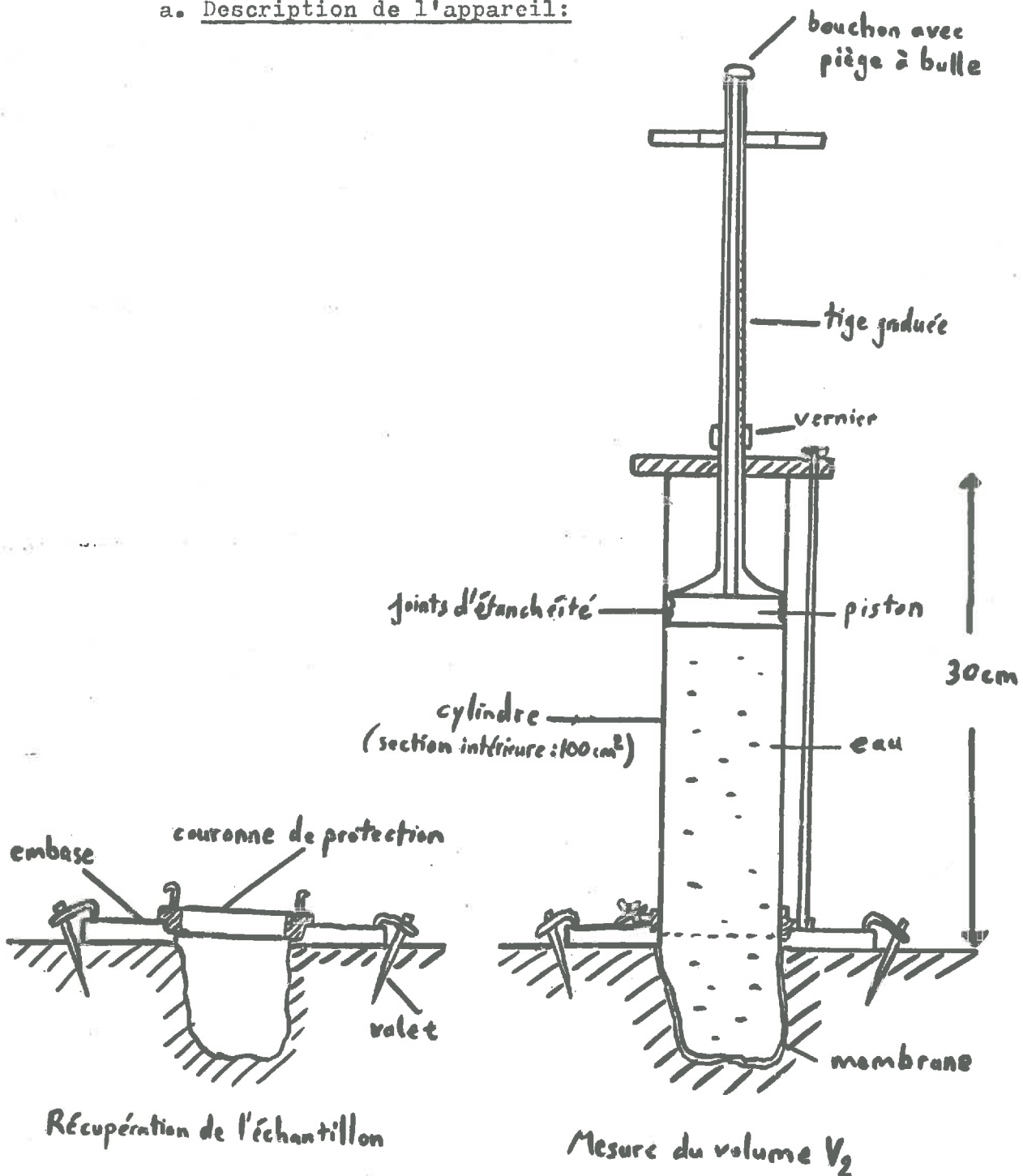
- Documents fournis par la maison Troxler (voir "dossier Troxler") :
 - "3400 Series Instruction Manual" et ses traductions partielles
 - Feuille d'usine de l'appareil
 - Protocole d'utilisation
 - Consignes de sécurité
 - Note à l'attention des utilisateurs de radioisotopes
 - Rappel rapide de la réglementation pour les utilisateurs de radioisotopes.

ANNEXE 1

Utilisation du densitomètre à membrane:

C'est un appareil destiné à la mesure rapide et précise du volume d'un trou de 1 à 3 litres creusé dans un matériau donné. Connaissant le poids de l'échantillon extrait du trou, on détermine la densité du matériau en place.

a. Description de l'appareil:



Le piston permet de refouler l'eau dans la membrane qui, par la pression, s'applique contre les parois du trou. La tige servant à manoeuvrer le piston est creuse et fermée à son sommet par un bouchon muni d'un piège à bulle. De plus cette tige est graduée et comporte un vernier permettant la mesure directe par simple lecture.

L'appareil repose sur une embase carrée percée d'un évidement circulaire de 175 mm de diamètre. Cet évidement peut recevoir une plaque de métal servant à réaliser le zéro de l'appareil après son remplissage.

b. Mode opératoire:

La surface de l'horizon de sol dont on se propose de mesurer la densité est soigneusement aplanie. L'embase carrée est posée puis fixée sur le sol à l'aide de valets enfoncés obliquement. Le densitomètre est fixé sur cette base.

Après avoir réalisé le zéro de l'appareil, on fait descendre le piston pour amener la membrane au contact du sol. Le repérage de ce point se fait de façon assez sensible par le fait de la grande résistance à l'enfoncement que présente la tige à ce moment, consécutivement à l'augmentation de pression dans le cylindre. Soit V_1 la valeur indiquée par l'index.

On tire alors sur les poignées pour remonter le piston à fond, en prenant soin de mettre les pieds sur la base pour éviter qu'elle ne bouge. On retire le densitomètre qui est remplacé par une couronne de protection. On creuse alors un trou d'un litre environ dans la limite de l'évidement central de la base. On récupère la terre dans un sac en plastique que l'on rapportera au laboratoire.

La couronne de protection est enlevée; le densitomètre remis en place. On mesure le volume du trou ainsi creusé, soit V_2 ce volume.

Le volume effectif du trou est: $V = V_2 - V_1$.

Le volume peut être entaché d'erreurs provenant du fait que la base n'est pas posée bien horizontalement sur le sol; s'il existe un espace entre la terre et la base, lors de la mesure de V_1 , la membrane passe dans cet espace et la mesure de V_1 est fautive.

Il en est de même pour la mesure de V_2 . De plus une autre cause d'erreur provient du fait que la membrane peut ne pas s'appliquer de façon parfaite aux bords du trou. Le volume est alors sous-estimé et la densité surestimée. Moyennant une manipulation correcte les erreurs sont faibles et cette méthode de mesure de la densité est précise.

ANNEXE 2

Etude de la méthode du sable:

a. Etude du tassement du sable:

M: masse de sable (en grammes) recueillie dans une boîte de volume constant (ou M1 et M2 dans deux boîtes différentes)

ΔM: variation maximale entre les masses recueillies pour des répétitions de la même procédure.

Procédures: - chute du sable dans la boîte d'une certaine hauteur au dessus de son rebord.

- sable déposé doucement à la main dans la boîte.

Tableau 1: Sable non tamisé.

| | M1 | ΔM1 | M2 | ΔM2 |
|----------------|--------|-------|--------|-------|
| chute de 10 cm | 855,26 | | 824,11 | |
| chute de 5 cm | 789,67 | | 808,13 | |
| chute de 0 cm | 774,13 | 1,74% | 780,63 | 4,18% |
| | 787,75 | | 814,10 | |
| | 780,96 | | 805,78 | |
| à la main | 757,73 | 1,94% | 770,39 | 1,80% |
| | 755,69 | | 758,09 | |
| | 770,47 | | 771,90 | |

Tableau 2: Sable tamisé (250 μ à 710 μ).

| | chute de 10 cm | chute de 5 cm | chute de 0 cm | à la main |
|-----------|----------------|---------------|---------------|-----------|
| | 958,26 | 947,10 | 947,15 | 978,15 |
| | 970,94 | 953,24 | 944,77 | 982,65 |
| | 951,64 | 948,35 | 945,03 | 996,33 |
| | 952,65 | 954,25 | 945,57 | |
| | 954,85 | 949,05 | | |
| | 944,85 | | | |
| | 954,93 | | | |
| | 956,35 | | | |
| \bar{M} | 956,30 | 950,39 | 945,63 | 985,71 |
| ΔM | 3% | 0,7% | 0,2% | 1,8% |

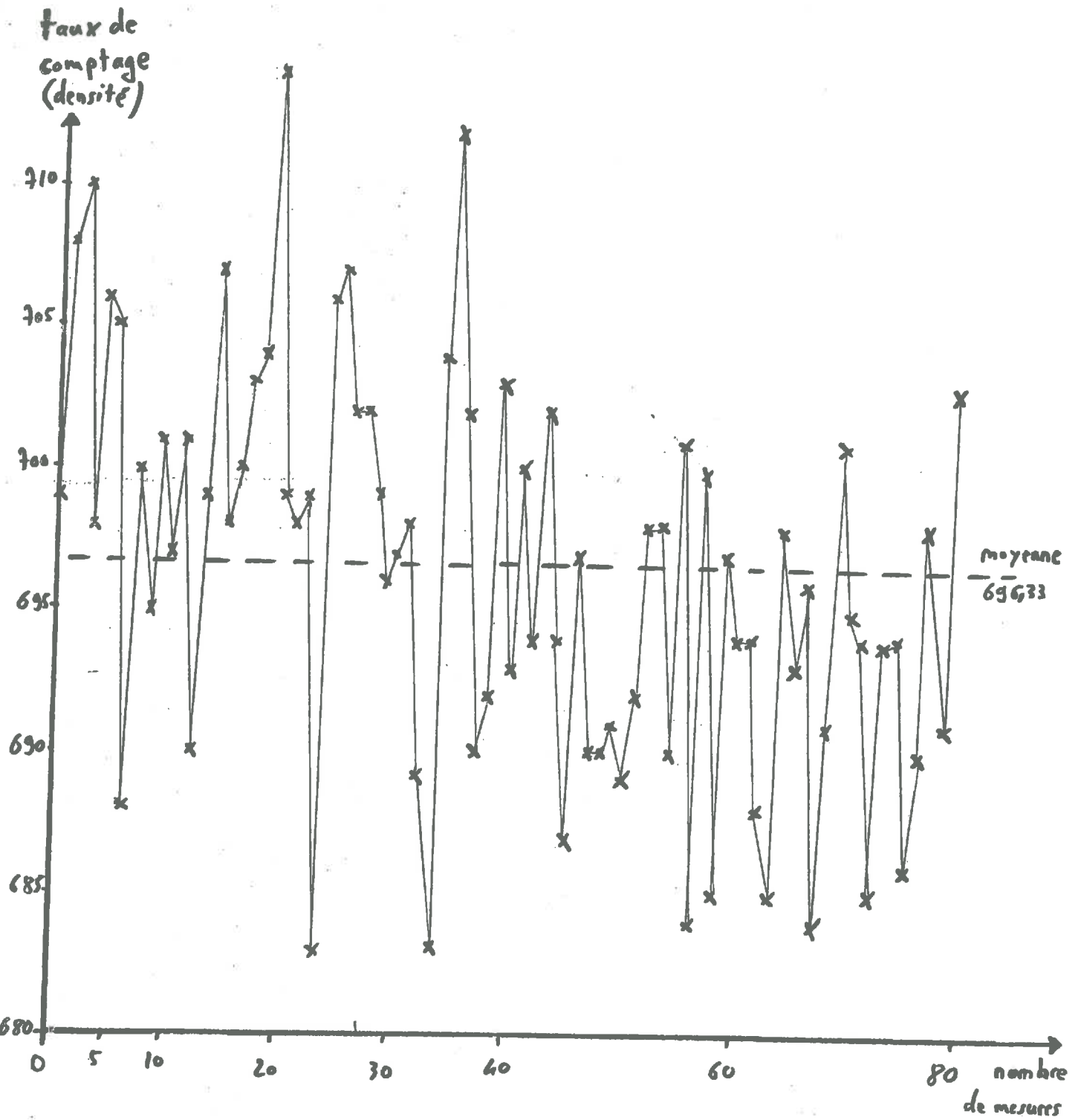
b. Essais sur le terrain:

| | | | |
|---------------------|---|-----------------------|-------------------------|
| sable non tamisé | { | volume du trou | 380 cm ³ |
| | | masse de terre humide | 713,6 g |
| | | masse de terre sèche | 664,55 g |
| | | masse d'eau | 49,05 g |
| | | densité humide | 1,880 g/cm ³ |
| | | densité sèche | 1,750 g/cm ³ |
| | | Humidité volumique | 0,129 g/cm ³ |

| | 1° essai | 2° essai | | |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| sable tamisé | { | volume du trou | 361 cm ³ | 409 cm ³ |
| | | (avec tarage du zéro) | | |
| | | volume du trou | 335 cm ³ | 366 cm ³ |
| | | (sans tarage du zéro) | | |
| | | masse de terre humide | 644,95 g | 654,49 g |
| | | masse de terre sèche | 603,25 g | 611,66 g |
| | | masse d'eau | 41,70 g | 42,83 g |
| | | densité humide | 1,780 g/cm ³ | 1,60 g/cm ³ |
| densité sèche | 1,67 g/cm ³ | 1,49 g/cm ³ | | |
| humidité volumique | 0,115 g/cm ³ | 0,104 g/cm ³ | | |

Annexe 3.

Série de 80 mesures à 25 cm dans le même trou.



Annexe 4 : Evolution de la densité sèche dans une tâche de chlorose.

La zone chlorosante correspond à une zone de plus basse densité apparente.

