

CEA-R 3298

COUCHAT P. -  
La Méthode neutronique de mesure de l'humidité des  
sols.-  
Commissariat à l'énergie atomique, Centre d'études  
nucléaires de Cadarache (Bouches-du-Rhône), 1967.-  
27 cm, 29 p., fig.

CEA-R 3298 - COUCHAT Philippe

### LA METHODE NEUTRONIQUE DE MESURE DE L'HUMIDITE DES SOLS

Sommaire. - La théorie à trois groupes étant choisie comme le moyen le plus adéquat pour déterminer la réponse de l'humidimètre, une mise en forme d'un modèle mathématique est effectuée grâce à un programme de calcul numérique écrit en code Fortran IV. Cette représentation est adaptée à l'expérience par l'étude de l'influence de paramètres du système de mesure : tubage, source, détecteur, et du comportement du sol vis-à-vis des neutrons : présence d'absorbants, liaison chimique des éléments.

La validité du modèle est testée par ajustement d'une droite aux points images des couples de valeurs expérimentales et théoriques, ceci pour sept milieux distincts définis

CEA-R 3298 - COUCHAT Philippe

### THE NEUTRONIC METHOD FOR MEASURING SOIL MOISTURE

Summary. - The three group diffusion theory being chosen as the most adequate method for determining the response of the neutron soil moisture probe, a mathematical model is worked out using a numerical calculation programme with Fortran IV coding. This model is fitted to the experimental conditions by determining the effect of different parameters of the measuring device : channel, fast neutron source, detector, as also the soil behaviour under neutron irradiation : absorbers, chemical binding of elements.

The adequacy of the model is tested by fitting a line through the image points corresponding to the couples of experimental and theoretical values, for seven media having

par leur composition chimique : sable, alumine, calcaire, dolomie, kaolin, limon sableux, argile calcaire.

Le modèle prévoit bien l'influence de la densité sèche et permet de calculer pour un sol donné les constantes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$  intervenant dans la formule qui donne la vitesse de comptage de l'humidimètre soit :  $N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$ .

1967

31 p.

Commissariat à l'Énergie Atomique - France

different chemical composition : sand, alumina, lime stone, dolomite, kaolin, sandy loam, calcareous clay. The model chosen gives a good expression of the dry density influence and allows  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  and  $\delta$  constants to be calculated for a definite soil according to the following relation which gives the count rate of the soil moisture probe :  $N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$ .

1967

31 p.

Commissariat à l'Énergie Atomique - France

**LA METHODE NEUTRONIQUE DE MESURE  
DE L'HUMIDITE DES SOLS**

par

Philippe COUCHAT

**Rapport CEA - R 3298**

**1967**

**Ca**

**CENTRE D'ETUDES  
NUCLEAIRES DE CADARACHE**

- Rapport CEA-R 3298 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache  
Département de Biologie  
Service de Radioagronomie

LA METHODE NEUTRONIQUE DE MESURE  
DE L'HUMIDITE DES SOLS

par

Philippe COUCHAT

*Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

*The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

- Juillet 1967 -

## I. INTRODUCTION

L'agronome et l'hydrogéologue appelés à mesurer avec précision la teneur en eau du sol en vue d'établir le bilan des réserves disponibles se tournent de plus en plus vers la méthode neutronique dont ils commencent à apprécier, par comparaison avec les techniques traditionnelles, le caractère non destructif et la rapidité. Ils deviennent par là même exigeants sur les performances de l'humidimètre tant au point de vue de la reproductibilité que de la précision. Une étude expérimentale ou bien empirique de l'appareil se montre vite insuffisante et doit se doubler d'une recherche théorique.

Cette nécessité apparaît tout particulièrement dans le problème de l'étalonnage. Etablir au champ ou au laboratoire une courbe expérimentale pour un sol donné est une opération longue et délicate. Les résultats obtenus sont extrêmement divers (1) et les quelques relations empiriques que l'on peut en déduire (2,3 et 4) ne restent valables en tout état de cause que pour les sols étudiés et pour les conditions précises de l'expérimentation.

L'approche théorique supprime cette limitation dans la mesure où elle permet d'expliquer puis de prévoir le phénomène observé. La méthode employée peut paraître complexe puisqu'elle revient à définir un faisceau de courbes d'étalonnage pour chaque type de sol à partir de critères physicochimiques définis à l'avance. En fait, une fois mise au point, elle fournit justement les relations exactes à partir desquelles il sera possible d'attribuer un seul faisceau de courbes à un ensemble de sols possédant les mêmes critères d'étalonnage.

Il y a dans cette étude deux étapes successives : la première revient à construire un modèle mathématique pour rendre compte de la réponse de l'appareil, la deuxième à appliquer ce modèle aux mesures fournies par les utilisateurs en vue de déterminer un critère simple d'étalonnage qui pourrait être éventuellement une analyse chimique partielle.

Le présent travail représente en gros le premier temps de cette démarche. Une étude bibliographique est à l'origine du choix du modèle mathématique retenu comme offrant le plus de possibilités. Ce modèle a été ensuite adapté par la mise au point d'un programme de calcul numérique et la confrontation avec certaines expérimentations. Les quelques résultats présentés se rapportent essentiellement à l'influence de la densité sèche.

## II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Un certain nombre de modèles théoriques plus ou moins simplifiés ont été proposés, afin de rendre compte par le calcul de la relation qui existe entre l'humidité volumique et la vitesse de comptage obtenue avec l'humidimètre.

A partir de la théorie de l'âge HOLMES (5) détermine en 1955 la densité de neutrons lents en fonction des paramètres suivants :

- distance  $r$  à la source
- temps de vie moyen des neutrons lents  $T = \frac{1}{\Sigma_a \cdot \bar{v}}$  ( $\Sigma_a$  section macroscopique d'absorption,  $\bar{v}$  vitesse moyenne des neutrons)
- longueur de ralentissement  $L_1$
- longueur de diffusion  $L$  des neutrons lents. Les constituants du sol sont négligés en comparaison avec l'eau quant à leurs effets sur la densité des neutrons. On obtient alors une courbe d'étalonnage unique.

Reprenant ces données en 1963, SEMMLER (6) fait intervenir le type de sol défini par le pourcentage de ses éléments dans une formule approchée qui donne le rapport de la vitesse de comptage dans le milieu à la vitesse de comptage dans l'eau :

$$R = \left[ \frac{\Sigma_a \cdot r^{\frac{1}{2}}}{\frac{2}{3} - \frac{L^2 + a^2}{r}} \right]_{EAU} \times \left[ \frac{\frac{2}{3} - \frac{L^2 + a^2}{r}}{\Sigma_a \cdot r^{\frac{1}{2}}} \right]_{SOL}$$

$r$  représente l'âge thermique des neutrons et sa valeur est calculée par la formule approchée de DEUTCH et PODHOREX (7); la constante  $a$ , déterminée expérimentalement permet de prendre en compte le vide créé par le tubage. Des formules de passage d'un type de sol à l'autre en fonction de la composition chimique sont établies sans toutefois être exploitées. Ce mode d'approche repris la même année par IJIMA (8) a le mérite d'être simple; toutefois il ne permet pas d'aborder l'étude de la distribution du flux de neutrons thermiques dans l'espace.

Il convient de signaler le travail plus récent de MAYERCZIK et ZUBER (1965) (9); ces auteurs utilisent la formule proposée par Holmes et, moyennant certaines hypothèses simplificatrices (assimilation des sols à des mélanges  $SiO_2 - CO_2Ca$ ), montrent que l'influence de la densité sèche sur la vitesse de comptage est la même quel que soit le type de sol tandis que l'influence des éléments de forte section efficace de capture dépend du taux d'humidité. Ils remarquent, en conclusion, que les droites d'étalonnage peuvent avoir des pentes et des ordonnées à l'origine variables.

De son côté LORCH (10) avait abordé en 1963 le problème de la déformation des courbes en fonction de la distance source-détecteur par la formule du flux tirée de l'équation de diffusion

$$\phi = \frac{q_0}{4\pi D r} \cdot e^{-\frac{r}{L}}$$

avec  $q_0$  taux d'émission de la source,  $D$  coefficient de diffusion.

Enfin deux solutions originales utilisant une méthode semi-empirique ont été récemment proposées pour étalonner l'humidimètre :

- en 1965, BALARD et GARDNER (11) comparent les phénomènes de ralentissement et d'absorption aux effets Compton et photoélectriques et proposent une relation semi-empirique de la forme :

$$\log R = a \log P_1 - b P_1 - c P_2 + d$$

dans laquelle  $P_1$  est la probabilité de choc ralentisseur et  $P_2$  la probabilité d'absorption par les neutrons thermiques pour le sol considéré,

- en 1966 WATER (12) prend en considération la variation des sections efficaces totales des éléments aux énergies élevées (supérieures à 100 keV) pour définir une réponse théorique de l'humidimètre.

Toutes ces études aboutissent à une représentation de la courbe d'étalonnage mais elles semblent se heurter à la difficulté de mettre en jeu tous les paramètres intervenant dans la mesure neutronique. Ceci est une conséquence de l'inadaptation à la définition du flux thermique dans l'espace de la variable  $r$  servant de base de calcul dans la théorie de l'âge et dont l'utilisation devient vite très complexe. C'est pour pallier ce défaut qu'a été proposée une formulation du processus de ralentissement connue sous le nom de théorie multigroupe.

TITTLE (13) donne en 1962 un exemple d'application de la théorie à trois groupes pour l'étude des milieux hydrogénés; en 1965 ØLGAARD (14) adapte cette théorie à la recherche des courbes d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons. L'intérêt des résultats fournis par ces deux auteurs nous a conduit à choisir la théorie multigroupe comme base de travail en nous limitant comme eux à trois groupes de neutrons, soit deux groupes rapides et un groupe thermique. Le milieu étudié est homogène et une symétrie sphérique est utilisée pour le calcul du flux thermique en prenant pour origine le point source.

### III. LA THEORIE A TROIS GROUPES

Dans la théorie multigroupe de la diffusion, on suppose que les neutrons évoluent à l'intérieur de groupes avec une vitesse constante  $v$  et diffusent ensuite dans le groupe suivant ceci jusqu'au niveau de l'énergie thermique. Dans notre cas, où l'on ne considère que trois groupes, le flux correspondant à chacun d'eux est tiré de la solution du système des trois équations

$$\begin{cases} D_1 \nabla^2 \phi_1 - \Sigma_1 \phi_1 = 0 & \Sigma_1 = \frac{D_1}{L_1^2} \\ D_2 \nabla^2 \phi_2 - \Sigma_2 \phi_2 + \Sigma_1 \phi_1 = 0 & \Sigma_2 = \frac{D_2}{L_2^2} \\ D_3 \nabla^2 \phi_3 - \Sigma_3 \phi_3 + \Sigma_2 \phi_2 = 0 & \Sigma_3 = \frac{D_3}{L_3^2} \end{cases} \quad [1]$$

Pour la première équation on se place en tout point sauf au point source. Les conditions aux limites expriment que le flux s'annule à l'infini et que le courant neutronique au voisinage de la surface infiniment petite entourant la source est tel que l'on retrouve le taux d'émission  $q$  de celle-ci.

A partir du système précédent on déduit l'équation qui fournit le flux thermique  $\phi_{th}(r)$  en fonction de la distance à la source. La formule ainsi calculée fait intervenir les trois groupes de manière homogène :

$$\phi_{th}(r) = \frac{q_0 L_3^2}{4\pi D r} \left[ \frac{L_1^2 \cdot e^{-\frac{r}{L_1}}}{(L_1^2 - L_2^2)(L_2^2 - L_3^2)} + \frac{L_2^2 \cdot e^{-\frac{r}{L_2}}}{(L_2^2 - L_1^2)(L_2^2 - L_3^2)} + \frac{L_3^2 \cdot e^{-\frac{r}{L_3}}}{(L_3^2 - L_1^2)(L_3^2 - L_2^2)} \right]$$

lorsque  $r$  tend vers zéro,  $\phi_{th}(r)$  devient :

$$\phi_{th}(0) = \frac{q_0 L_3^2}{4\pi D} \left[ \frac{L_1}{(L_1^2 - L_2^2)(L_2^2 - L_3^2)} + \frac{L_2}{(L_2^2 - L_1^2)(L_2^2 - L_3^2)} + \frac{L_3}{(L_3^2 - L_1^2)(L_3^2 - L_2^2)} \right]$$

Dans ces deux équations  $L_3$  et  $D$  sont les constantes du groupe thermique,  $L_1$  et  $L_2$  celles des groupes rapides.

#### A. Traitement des deux groupes rapides.

Les constantes  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  du système [1] représentent les sections efficaces de passage des neutrons au groupe inférieur, déterminées pour l'énergie la plus basse de groupe étudié. Les quantités  $L_1$  et  $L_2$  sont liées l'une et l'autre à la moyenne du carré de la distance de diffusion des neutrons par les formules :

$$L_1^2 = 6 \bar{r}_1^2 \quad L_2^2 = 6 \bar{r}_2^2$$

Ces longueurs de diffusion ne seront autres que les longueurs de ralentissement classiques que l'on déterminera par la formule générale du calcul de l'âge, soit :

$$L_1^2 = \int_0^\infty \frac{d\mu}{3\beta\Sigma_1 \cdot \Sigma_2} \quad \mu \text{ léthargie} \quad [2]$$

$\beta\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  représentent respectivement le pouvoir de ralentissement et la section efficace macroscopique de transport du milieu. Leurs valeurs sont données par les formules :

$$\begin{cases} \beta\Sigma_1 = \sum_i^j \nu_i \beta_i \sigma_{t,i} \\ \Sigma_2 = \sum_i^j \nu_i \sigma_{t,i} \end{cases}$$

en appelant  $\nu_i$  le nombre d'atomes par centimètre cube de l'élément  $i$  d'un milieu à  $j$  éléments, et  $\beta_i \sigma_{t,i}$ ,  $\sigma_{t,i}$ , les sections efficaces microscopiques de l'élément  $i$ .

Le calcul de la longueur  $L_1$  nécessite la connaissance de la variation des sections efficaces microscopiques des éléments en fonction de l'énergie. Pour déterminer l'intégrale [2] sur l'intervalle d'énergie des groupes rapides, on est amené à découper ces groupes en sous-groupes d'énergie où les sections efficaces sont considérées comme constantes.

Parmi les tableaux qui fournissent les jeux de sections efficaces des éléments suivant des groupes d'intervalles d'énergie donnée, notre choix s'est porté sur les constantes multigroupes des neutrons rapides et intermédiaires de BONDARENKO (15). Nous avons travaillé sur les 25 groupes d'énergie proposés d'après le tableau ci-dessous.

Gammaes d'énergie	accroissement de léthargie pour le sous-groupe
E initiale - 2,5 MeV	0,48
2,5 MeV - 0,8 MeV	0,57
0,8 MeV - 0,1 MeV	0,69
0,1 MeV - 0,215 eV	0,77
0,215 eV - E <sub>therm</sub>	/

A l'aide du jeu de constantes ainsi choisi, on détermine  $\beta_i \sigma_{t,i}$  et  $\sigma_{t,i}$ . Pour  $\sigma_{t,i}$ , nous avons utilisé la formule proposée par SALMON (16).

$$\sigma_{t,i} = \sigma_e (1 - \mu) + \sigma_{in} + \sigma_c$$

avec  $\sigma_e$  section efficace de diffusion élastique  
 $\sigma_{in}$  section efficace de diffusion inélastique  
 $\sigma_c$  section efficace de capture  
 $\mu$  cosinus moyen de l'angle de diffusion.

Dans la détermination de  $\beta_i \sigma_{t,i}$ , la diffusion inélastique n'est pas prise en compte.

Les longueurs de ralentissement  $L_1$  et  $L_2$  des deux groupes rapides sont alors calculées par la formule générale fournissant  $L_1$ . L'énergie initiale d'émission des neutrons pour la source Ra-Be est moyennée à 4,5 MeV. Le premier groupe est limité inférieurement à 2,5 MeV, le second groupe s'étend jusqu'à l'énergie thermique.

La valeur obtenue pour l'âge total ( $L_1^2 + L_2^2$ ) dans le cas de l'eau est de 37 cm<sup>2</sup> à partir des données précédentes. On constate une divergence avec les résultats expérimentaux fournis par l'ANL 5800 (17) et dont la moyenne se situe vers 50 cm<sup>2</sup>. Cette divergence s'explique par la variation importante de la section efficace de l'hydrogène aux énergies élevées (au-dessus de 1 MeV).

Le premier choc des neutrons sur les noyaux d'hydrogène a une importance capitale dans le processus de ralentissement par les mélanges hydrogénés. Le libre parcours moyen étant important, il s'ensuit une valeur élevée de la moyenne du carré de la distance de diffusion, valeur qui n'est pas fournie de manière précise par la théorie de l'âge. On a donc introduit dans le calcul de  $L_1$  une correction de premier choc conformément à la prescription de Wigner. De manière analogue une correction de dernier choc est introduite dans la détermination de  $L_2$ ; par suite  $L_1$  et  $L_2$  sont fournies par les équations :

$$L_1^2 = \frac{1}{3\Sigma_{T, E_0}} + \int_{E_0}^{E_1} \frac{dE}{3\Sigma_a \cdot \Sigma_{T, E}} \quad E_0 \text{ énergie initiale}$$

$$L_2^2 = \frac{1}{3\Sigma_{T, E_f}} + \int_{E_f}^{E_1} \frac{dE}{3\Sigma_a \cdot \Sigma_{T, E}} \quad E_f \text{ énergie finale}$$

La nouvelle valeur de l'âge dans l'eau pure est alors de 50,8 cm<sup>2</sup>, ce qui est cohérent avec les valeurs expérimentales.

Remarque : les tables de constantes de Bondarenko donnent aussi les valeurs du paramètre de ralentissement  $\xi$  et la moyenne du cosinus de l'angle de diffusion élastique  $\bar{\mu}$ .

### B. Etude du groupe thermique

A l'intérieur de ce groupe les neutrons en équilibre thermique avec les molécules du milieu possèdent une distribution maxwellienne des vitesses à la température  $T$  du modérateur. Leur énergie cinétique moyenne est  $E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$  et l'énergie la plus probable est  $E_p = k T$  ( $k$  constante de Boltzmann). La distribution des neutrons ne dépend que de la température ambiante du milieu diffusant et pour une température de 20°C,  $E_p = 0,025$  eV ce qui correspond à une vitesse la plus probable de  $v = 2.200$  m/s. Les constantes nucléaires relatives aux éléments sont fournies pour cette vitesse.

Cependant, pour un milieu absorbant, la limite théorique atteinte par les neutrons ne sera pas définie par l'énergie cinétique moyenne la plus faible correspondant à la température du milieu. On définira alors une température  $T_m$  des neutrons (supérieure à  $T$ ) qui dépendra des propriétés diffusantes et absorbantes du milieu. Dans la description de COHEN (18) que nous adoptons, les neutrons ont une distribution maxwellienne correspondant à une température  $T_m$  donnée par

$$T_m = T(1 + cA) \quad , \quad \text{avec} \quad A = \frac{2A \cdot \bar{\sigma}_a (kT)}{\sigma_A}$$

pour  $c$ , nous prenons la valeur proposée par WIGNER (19) soit 0,46.

Il importe de souligner que cette formule n'est rigoureusement valable que pour  $A \leq 25$  et  $\bar{\sigma}_a / \sigma_A < 0,5$ . L'approximation reste valide en considérant que l'eau est l'élément prépondérant.

La connaissance de  $T_m$  permet le calcul des sections efficaces d'absorption au stade thermique par application de la loi en  $1/v$  soit :

$$\Sigma_a = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Sigma_a^{2200} \sqrt{\frac{T_0}{T_m}} \quad T_0 = 293^\circ K$$

En considérant que les sections efficaces de transport suivent approximativement une loi en  $1/v$ , on peut déterminer la section efficace de transport de l'eau à l'aide de la formule proposée par KALNAES (20)

$$\Sigma_A (1-\mu)_{180} = \sigma_{t, H_2O} (0,047 + 0,953 \sqrt{\frac{T_0}{T_m}}) \cdot d$$

$d$  densité de l'eau à la température  $T$ .

On effectue le calcul des sections efficaces macroscopiques du milieu  $\Sigma_A (1-\mu)$  et  $\Sigma_a$  en utilisant les sections microscopiques de Bondarenko (exception faite pour l'hydrogène et l'eau). Le coefficient de diffusion  $D$  et la longueur de diffusion sont donnés par les formules

$$D = \frac{1}{3\Sigma_A(1-\mu) + \Sigma_a} \quad L_3 = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}}$$

Afin de tenir compte de la présence d'absorbant, on a préféré à l'usage une formulation différente pour  $D$  soit

$$D = \frac{\Sigma_A}{3\Sigma_T \cdot \Sigma_{Tm}} \quad \text{avec} \quad \Sigma_T = \Sigma_A + \Sigma_a \quad \text{et} \quad \Sigma_{Tm} = \Sigma_T - \bar{\mu}\Sigma_A$$

### C. Application au sol humide.

Pour un milieu défini par sa composition chimique élémentaire, la théorie à trois groupes permet de calculer le flux thermique en fonction de la distance à la source. Les constantes  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  et  $D$  qui interviennent dans l'expression de ce flux sont des fonctions des sections efficaces macroscopiques  $\Sigma$  correspondant aux diverses interactions neutron-noyau et à leur comportement suivant l'énergie incidente des neutrons. La valeur de  $\Sigma$  est donnée par la formule générale

$$\Sigma = \sum \alpha_i \sigma_i \quad \text{avec} \quad \alpha_i \text{ nombre d'atomes par cm}^3 \text{ de l'élément}$$

$$\sigma_i \text{ section microscopique efficace pour l'interaction considérée.}$$

La vitesse de comptage fournie par un humidimètre à neutrons dans un sol humide est liée directement au flux thermique et dépend donc de la nature et de la teneur de tous les éléments présents. Pour le calcul de  $\Sigma$  il est intéressant de distinguer les éléments relatifs à l'eau et ceux relatifs au sol, en écrivant

$$\Sigma = \Sigma \alpha_i \sigma_i = (a H_v + b \rho_s) \quad [3]$$

$H_v$  représente la teneur en eau volumique du sol en grammes d'eau par centimètre cube de sol humide ou en pourcentage d'eau pure,  
 $\rho_s$  est la valeur de la densité sèche exprimée en grammes de sol sec par centimètre cube de sol humide.  
 $a$  et  $b$  sont des constantes d'influence qui dépendent de la probabilité d'interaction des neutrons avec les noyaux des éléments ainsi que du pourcentage de ces derniers.

En règle générale  $a H_v$  est grand devant  $b \rho_s$ , ce qui exprime que l'eau est le facteur prépondérant dans la réponse de l'humidimètre et autorise l'emploi de courbes d'étalonnage du type  $N = f(H_v)$ . Par contre  $b \rho_s$  n'est pas négligeable devant  $a H_v$  et il existera théoriquement une famille de courbes d'étalonnage paramétrées en  $\rho_s$  pour chaque type de sol.

#### IV. PROGRAMME DE CALCUL

La résolution des équations exprimant le flux thermique  $\Phi_{th}(z)$  en fonction des données du milieu étudié (sol + eau) et du système de mesure est effectuée à l'aide d'un programme de calcul numérique écrit en code Fortran IV et traité sur machine IBM 360; un sous-programme de lecture des données lui est adjoint (21).

L'objectif du programme est d'orienter les recherches expérimentales et d'agir sur le modèle théorique en vue de l'adapter à l'expérience. Il n'est pas limité au cas de l'humidimètre de profondeur classique et peut s'appliquer aux mesures à différentes distances source-détecteur ou à plusieurs niveaux d'énergie d'émission et de détection des neutrons. Après avoir montré comment sont définis le milieu étudié et le système de mesure, on indique la structure du programme.

##### A. Milieu étudié.

Dans les études neutroniques le milieu est en principe représenté par sa composition élémentaire, notion qui n'est pas d'un usage courant en agronomie et en hydrogéologie. Or nous avons vu qu'il est possible de séparer dans les calculs les termes relatifs à l'eau et au sol. On définit tout d'abord le sol sec à partir du pourcentage pondéral de ses divers constituants ( $SiO_2$ ,  $CO_3Ca$ ,  $Al_2O_3$ ...); cette donnée est fournie par une analyse chimique totale des sols effectuée à 1% près. Dans les exemples traités nous nous sommes limités à 10 constituants (tableau 1).

Composants (*)	Alumine	Calcaire	Dolomie	kaolin	limon (***)	argile calcaire
H <sub>2</sub> O (**)	0,25	0,62	0	0	1,13	0,29
SiO <sub>2</sub>	0,20	3,03	0,89	44,18	49,43	42,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98,02	1,21	0,25	33,09	7,48	12,81
CO <sub>2</sub>	0,10	41,83	45,97	0,51	16,06	17,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,17	0,03	17,80	3,38	4,07
CaO	0,13	52,90	35,53	0,34	18,44	17,46
MgO	0	0,30	17,58	0,21	1,45	2,23
K <sub>2</sub> O	0,02	0,08	0,09	0,12	0,90	1,76
Na <sub>2</sub> O	0,52	0,04	0,09	0,32	0,57	0,49
TiO <sub>2</sub>	0,31	0,32	0	3,42	0,61	0,79

Tableau 1 : Compositions chimiques des sols utilisés

\* teneur en pourcentage

\*\* eau de constitution

\*\*\* terre de Cadarache

Les éléments présents sous forme de trace sont négligés, ce qui représente une approximation valable, même pour le Bore (14). Le facteur densité apparente sèche  $\rho_a$  étant donné, on pourra déterminer le facteur  $b\rho_a$  d'influence du sol intervenant dans le calcul des sections efficaces macroscopiques  $\Sigma$  (équation 3). Enfin la valeur de l'humidité volumique  $H_v$  suffit pour définir la quantité d'eau présente dans le sol humide et calculer le terme  $aH_v$ .

Les constantes nucléaires relatives au milieu sont considérées séparément pour le sol et l'eau. Les sections efficaces microscopiques thermiques sont celles de la molécule d'eau pour l'eau libre et celles des éléments pour le sol lui-même y compris l'eau de constitution.

Au critère de composition chimique se rattache donc un faisceau de courbes d'étalonnage  $N=f(H_v)$  paramétrées en  $\rho_a$  et défini de manière unique et complète. Le facteur de granulométrie est négligé et les sols sont traités comme des mélanges homogènes (22).

##### B. Système de mesure.

La géométrie de mesure utilisée est une source ponctuelle de neutrons mono-énergétiques de 4,5 MeV placée au milieu d'un compteur assimilé à une droite de 12 cm de longueur et détectant les neutrons thermiques suivant la loi de variation de la section efficace d'absorption  $\Sigma_a$  du Bore. Cette géométrie simule l'appareil CGEIL-LEPAUTE (MHP 110) équipé d'une source Ra-Be et d'un compteur au BF<sub>3</sub>.

L'intensité et le spectre moyen d'émission des neutrons de la source sont des paramètres d'entrée; le nombre de sous-groupes d'énergie ainsi que leur découpage sont adaptés à l'énergie initiale. Différents cas de position et longueur du compteur peuvent être traités en agissant sur les bornes d'intégration du flux thermique. Le troisième groupe de neutrons peut être exploité au niveau d'énergie épithermique lorsque l'on veut déterminer l'influence sur la réponse de l'humidimètre du niveau de détection des neutrons. Enfin les données relatives au rendement nucléaire du compteur sont explicitées; d'où une possibilité d'adaptation aux compteurs de type Helium 3 par exemple.

##### C. Structure du programme.

Dans un premier temps, la totalité des données est lue par la machine, puis les différentes constantes intervenant dans l'expression de  $\Phi_{th}(z)$  sont calculées par un ensemble de sous-programmes appelés par le programme principal qui est divisé en 3 options :

- l'option A donne le flux thermique en fonction de la distance  $z$  à la source, les courbes représentatives étant paramétrées en humidité volumique ou en densité sèche. Une sous option traite le faisceau des courbes relatives au mélange binaire sol-eau,

- l'option B calcule les vitesses de comptage  $N$  correspondant à un ensemble de valeurs de  $H_v$  et de  $\rho_a$  variant par pas : les courbes représentatives de  $N$  sont les courbes d'étalonnage de l'humidimètre relatives au sol donné. Pour prévoir l'influence de l'un des constituants sur la répartition de flux et la courbe d'étalonnage, chacune des deux options peut être traitée intégralement en faisant varier la valeur du pourcentage d'un constituant,

- l'option C permet d'apprécier la validité du modèle : à partir des paramètres de mesures (type de sol, humidité volumique, densité sèche) ayant fourni un comptage expérimental  $NE$ , le programme détermine le comptage théorique  $NT$  et présente le résultat sur carte perforée. Par un sous programme on effectue l'ajustement d'une droite aux points définis par les couples  $NE$ ,  $NT$  et l'on calcule l'erreur type d'estimation portant sur  $NT$ .

On a prévu l'extension du programme aux mesures proches de la surface du sol ainsi qu'aux humidimètres de surface du type à pointe. Cette variante applique le principe de la théorie du miroir (19) pour calculer la répartition de flux lorsque le milieu est semi-infini. Chacune des options A, B et C peut être traitée pour un ensemble de valeurs de la distance  $\mu$  de la source à la surface de séparation.

Lorsque le programme est adapté à l'ensemble des paramètres relatifs à un humidimètre déterminé, la seule donnée des pourcentages de constituants suffit pour obtenir par le calcul le faisceau théorique des courbes d'étalonnage relatives au sol donné.

**D. Résultat.**

En utilisant l'option B on a déterminé pour l'humidimètre CGEI les courbes d'étalonnage théoriques relatives aux milieux étudiés expérimentalement en laboratoire. La comparaison courbes-points expérimentaux fait apparaître une divergence nette entre la théorie et l'expérience (fig.1); le défaut majeur du modèle de calcul est de ne pas fournir des droites d'étalonnage dans la zone d'utilisation agronomiques (1,3,4) mais des courbes à concavité tournée vers le haut.

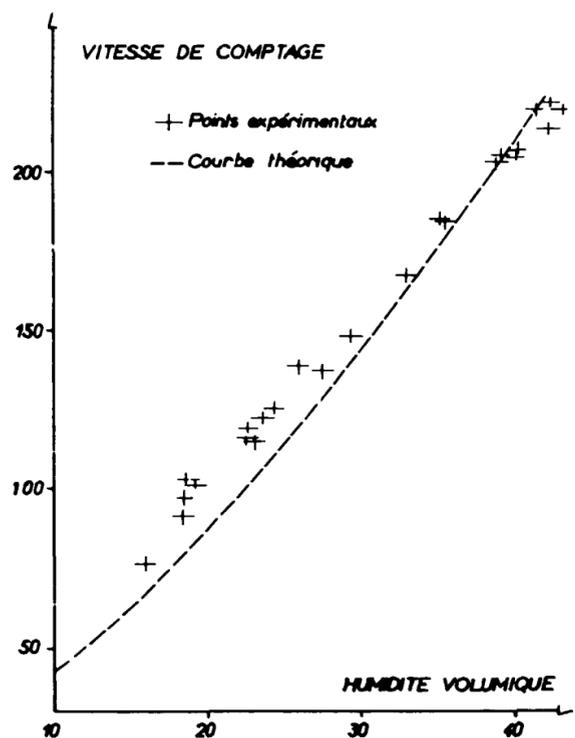


Figure 1 : Courbe d'étalonnage théorique pour le sol de Cadarache (limon) à densité 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

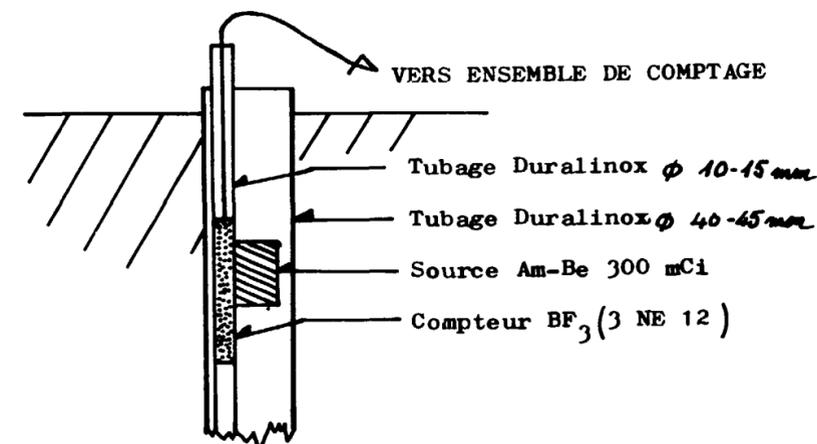
Les diverses simplifications apportées dans la représentation du système de mesure et imposées par les limitations de la théorie à trois groupes ne sont pas acceptables. Une théorie plus complète comme celle du transport serait nécessaire pour prendre en compte tous les paramètres mais son exploitation est longue à mettre en oeuvre. Afin d'adapter le modèle aux données expérimentales nous avons choisi d'utiliser une méthode semi-empirique en apportant notamment des termes correctifs à l'expression du flux thermique  $\phi_{th}(\mu)$  précédemment calculée.

**V. ADAPTATION DU MODELE MATHEMATIQUE**

L'étude relative à la mise en forme du calcul théorique a porté sur le système de mesure : tubage, nature de la source, rendement du compteur, et sur le sol humide lui-même : influence des absorbants et liaison chimique des éléments entre eux. A chaque fois des expériences ont été menées conjointement avec les interventions effectuées sur le programme de calcul.

**A. Influence du tubage.**

A l'aide du montage schématisé ci-dessous on a mesuré la répartition du flux thermique pour un milieu porté à plusieurs taux d'humidité, en utilisant des tubages en duralinox de diamètres respectifs 10 et 40 millimètres intérieur. La même opération a été répétée avec de l'eau pure.



Les figures 2 et 3 montrent que le vide créé par le tubage introduit une dépression du flux au voisinage de la source et son étalement le long de l'axe quelle que soit la teneur en eau volumique du milieu.

L'étude faite en 1963 par ETEMAD (23) sur la pénétration des neutrons thermiques dans des canaux cylindriques vides traversant l'eau pure montre la complexité du problème si l'on recherche des résultats théoriques précis. Aussi nous avons adopté une méthode semi-empirique de résolution en nous appuyant sur l'important travail de TITTLE (24) concernant les répartitions de flux dans les sondages pétroliers. La compilation des résultats de ses observations sur tubages de 10 et 20 cm de diamètre fait ressortir des effets dépressifs analogues à ceux que nous avons observés. Le libre parcours moyen des neutrons est augmenté dans le canal du tube de même que la longueur de ralentissement  $L_A$ , liée à la moyenne du carré de la distance de diffusion.

Sur la figure 4 on a reporté les variations de la longueur  $L_A$  en fonction du diamètre du tube pour un sable d'humidités volumiques 20, 40 et 100%. On constate que  $L_A$  est une fonction croissante du diamètre du tubage. La figure 5 représente la variation  $\Delta L_A$  de  $L_A$  lorsque l'humidité varie, le diamètre du tube étant fixé; pour un diamètre voisin de 4 cm, la variation  $\Delta L_A$  est sensiblement constante.

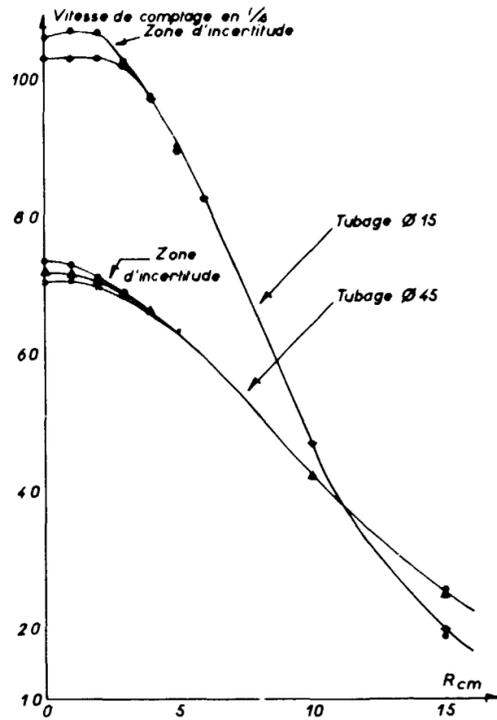


Figure 2 : Répartition du flux thermique dans l'eau pure.

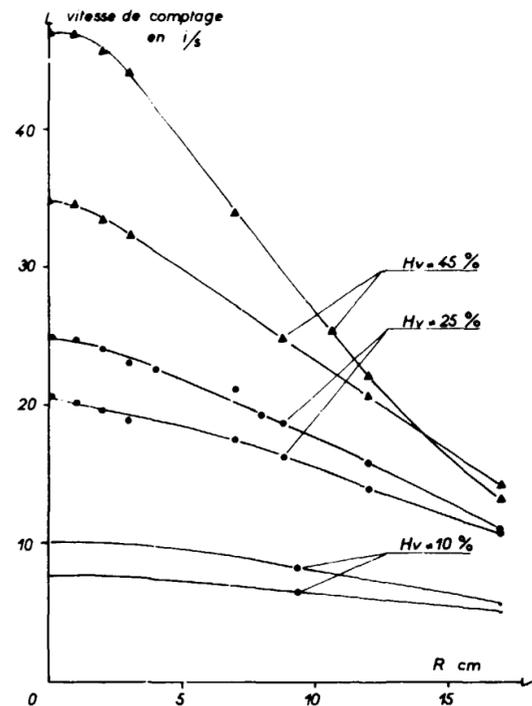


Figure 3 : Répartition du flux thermique dans l'hydrargillite pour différents taux d'humidité équivalente.

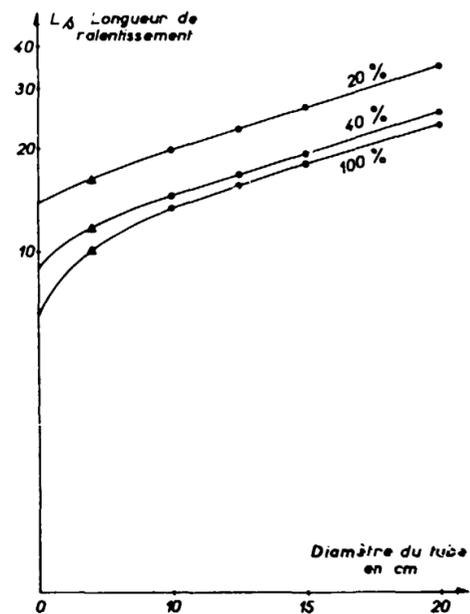


Figure 4 : Variation de  $L_s$  en fonction du diamètre du tube.

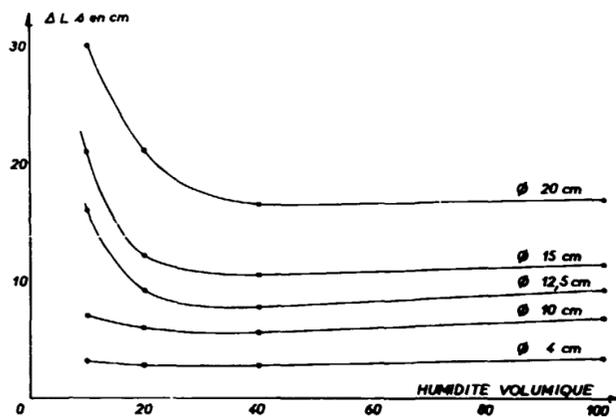


Figure 5 : Variation de  $\Delta L_s$  en fonction de l'humidité.

On peut donc rendre compte de la géométrie de mesure en remplaçant dans l'expression de  $\Phi_{H_2}(r)$  les constantes  $L_1$  et  $L_2$  des groupes rapides et la constante  $L$  par leurs quantités corrigées. Afin de nous rapprocher des expressions de SEMMLER (5) et KRZUK (25) nous posons

$$\begin{cases} L_1' = L_1^2 + a_L^2 \\ L_2' = L_2^2 + b_L^2 \\ L_3' = L_3^2 + c_L^2 \end{cases}$$

Dans le cas de  $L_1$ , la correction apportée s'ajoute à la correction de premier choc, le vide créé par le tubage augmentant l'effet de la diminution de section efficace de l'hydrogène aux énergies élevées. On obtient des effets correctifs analogues en considérant chaque groupe à part et en faisant porter la constante sur  $L_1$  et  $L_2$  au lieu de  $L_1^2$ ,  $L_2^2$  et  $L_3^2$ . La modification de  $L_3$  doit préserver les rapports  $L_3/D$  et  $L_3^2/D^2$  si l'on ne veut pas modifier la nature de l'expression de  $\Phi_{H_2}(r)$ . La correction de  $c_L$  est appliquée de manière suivante :

$$D' = \frac{1}{3 \sum L_i} + c_L^2 \cdot \Sigma_e \quad L_3' = \sqrt{\frac{D'}{\Sigma_e}} = \sqrt{L_3^2 + c_L^2}$$

La transformation apportée par l'utilisation de  $L_1'$ ,  $L_2'$  et  $L_3'$  rend compte de la dépression de flux mise en évidence expérimentalement; l'effet des constantes  $a_L$ ,  $b_L$ ,  $c_L$  est analogue et par suite nous avons pris  $a_L = b_L = c_L$  pour conserver l'homogénéité de la formule.

Cependant le modèle théorique ne rend encore pas compte de l'étalement du flux. En effet, l'influence de  $a_L$ ,  $b_L$ ,  $c_L$  sur l'expression du flux thermique  $\Phi_{H_2}(r)$  est conservée en sens quel que soit  $r$ . Il importe d'agir sur ce dernier paramètre pour représenter l'étalement du flux et nous avons choisi la transformation la plus simple, du type  $r' = \alpha r + \beta$ . La comparaison des résultats théoriques et expérimentaux (fig. 6 et 7) montre que le phénomène est bien représenté pour l'eau et l'hydrargillite avec  $\alpha = 0,8$  et  $\beta = -1$  cm si on prend  $a_L = b_L = c_L = 2,6$  cm. L'expression du flux thermique est alors :

$$\Phi_{H_2}(r) = \frac{q_0 L_3^2}{4\pi D} \cdot \frac{1}{\alpha r + \beta} \left[ \frac{L_1^2 \cdot e^{-\frac{\alpha r + \beta}{L_1}}}{(L_1^2 - L_2^2)(L_1^2 - L_3^2)} + \frac{L_2^2 \cdot e^{-\frac{\alpha r + \beta}{L_2}}}{(L_2^2 - L_1^2)(L_2^2 - L_3^2)} + \frac{L_3^2 \cdot e^{-\frac{\alpha r + \beta}{L_3}}}{(L_3^2 - L_1^2)(L_3^2 - L_2^2)} \right] \quad [4]$$

Le programme de calcul permet de voir que l'incidence de  $a_L$ ,  $b_L$ ,  $c_L$  se fait principalement sentir sur les valeurs de comptage dans l'eau et se traduit par un changement du sens de la concavité de la courbe d'étalonnage pour 2,6 cm (fig. 8). L'ensemble des valeurs  $a_L$ ,  $b_L$ ,  $c_L$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  ainsi que leur mode d'application seront définis par corrélation entre les résultats théoriques et expérimentaux grâce à l'option C du programme et au sous-programme d'ajustement.

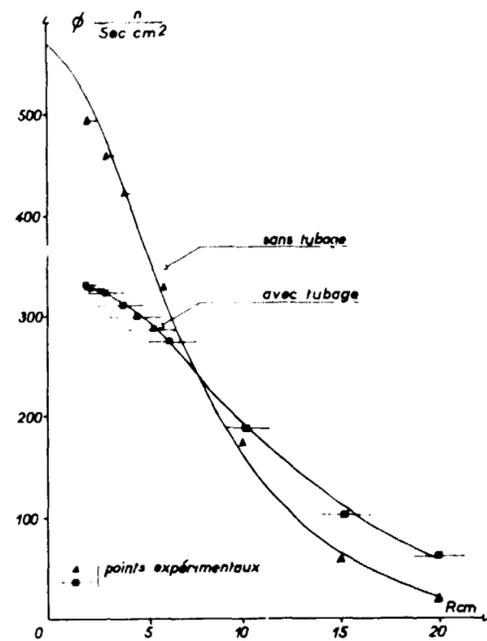


Figure 6 : Répartition théorique du flux thermique dans l'eau pure.

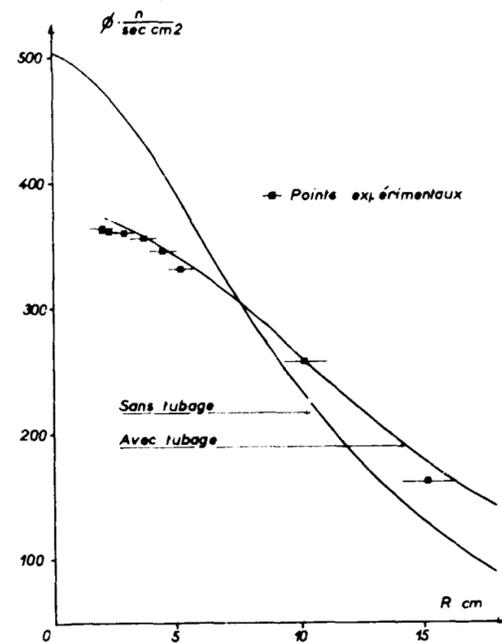


Figure 7 : Répartition théorique du flux thermique dans l'hydrargillite pure.

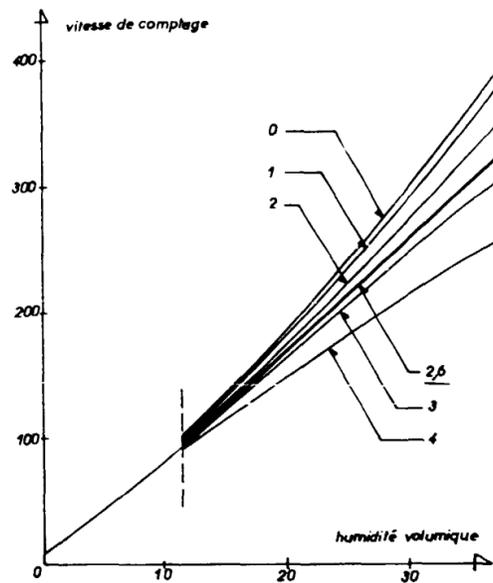


Figure 8 : Courbes d'étalonnage du sable pur à densité 1,6 g/cm<sup>3</sup> pour différentes valeurs de  $\alpha_t$ .

B. Nature de la source.

Les études expérimentales de répartition du flux en milieux hydrogénés ont été effectuées à l'aide de sources Américium-Beryllium choisies en raison de leur faible rayonnement gamma. Par ailleurs les humidimètres utilisés pour établir les courbes d'étalonnage étaient jusqu'ici équipés de source Radium-Beryllium. Il n'était donc pas sans intérêt de connaître l'influence de la nature de la source sur la réponse de l'appareil.

La différence entre les deux sources porte sur la répartition spectrale de l'énergie des neutrons émis. Une étude spectrométrique simple à l'aide d'un ensemble compteur à He<sub>3</sub> (10 atmosphères) et sélecteur 400 canaux n'ayant pas fourni d'informations suffisantes, nous avons adopté les résultats tirés de données bibliographiques (17, 22, 26) et porté sur la figure 9 les spectres les plus vraisemblables de ces sources. La répartition énergétique des neutrons s'étend de 2 à 10 MeV et pour chaque source il existe un pic secondaire que l'on peut attribuer aux photoneutrons.

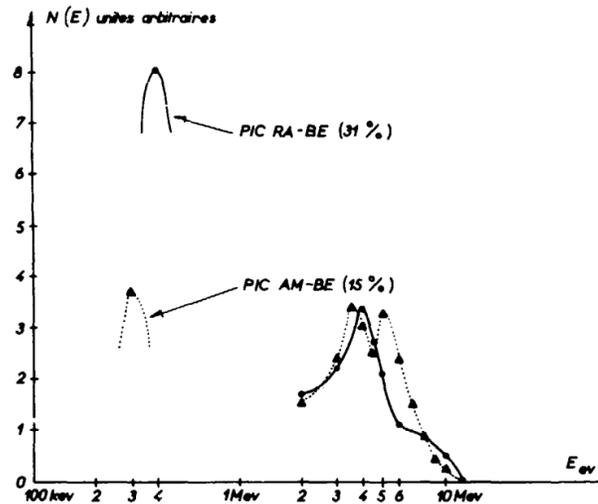


Figure 9 : Hypothèse concernant les spectres d'émission des sources Ra-Be et Am-Be.

Dans le tableau 2 on rassemble les deux hypothèses de travail retenues.

SOURCE	Première hypothèse		Deuxième hypothèse	
	ENERGIE	POURCENTAGE DES NEUTRONS	ENERGIE	POURCENTAGE DES NEUTRONS
Ra-Be	4,5 MeV	100%	5 MeV 400 keV	61% 39%
Am-Be	5,5 MeV	100%	5,5 MeV 300 keV	85% 15%

Tableau 2

Expérimentalement, on a comparé pour différents milieux les comptages de l'humidimètre obtenus avec les deux types de source (fig.10); il se trouve que la relation entre les comptages ne dépend pas du type de sol, la seconde hypothèse représentant mieux la réalité. Pratiquement on peut donc passer du radium à l'américium par le simple rapport des valeurs EAU.

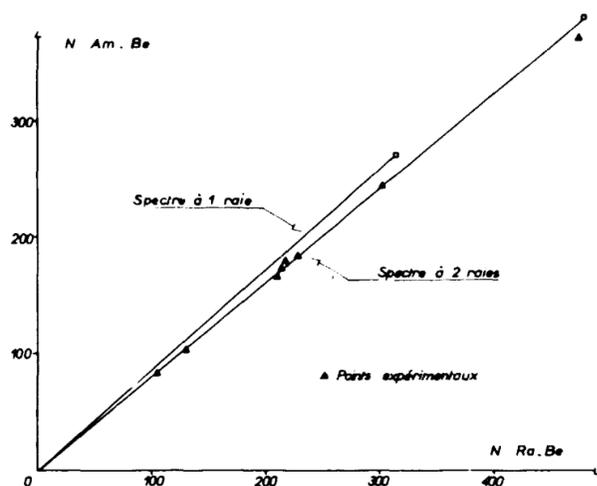


Figure 10 : Relation des comptages obtenus avec source Ra-Be et source Am-Be pour différents milieux.

La répartition du flux thermique dans l'eau pure (fig.11) montre que

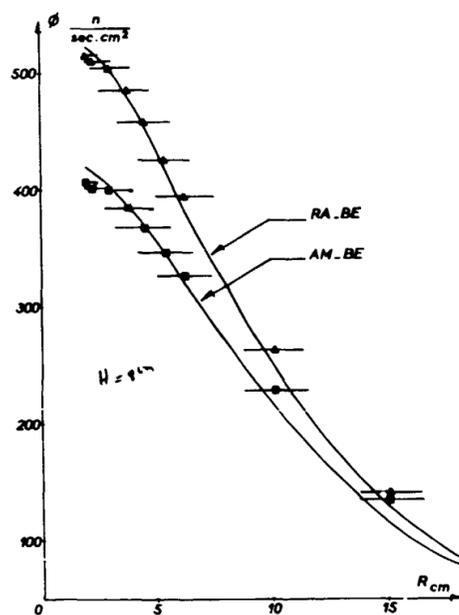


Figure 11 : Répartition du flux dans l'eau pure pour les sources Ra-Be et Am-Be.

l'efficacité de la source Ra-Be est plus grande. Cette différence traduit une variation de la moyenne du carré de la distance de diffusion des neutrons en cours de ralentissement lorsque l'on passe d'une source à l'autre. La seconde hypothèse indique en effet que l'énergie moyenne des neutrons émis par l'Am-Be est plus forte et que son pic secondaire, pour lequel la correction de premier choc est négligeable, intéresse un plus faible pourcentage des neutrons. L'existence de ce dernier pic est importante car elle entraîne une augmentation très sensible de la focalisation des mesures; la figure 12 met en évidence ce phénomène pour une source de neutrons mono-énergétiques de 26 keV (Sb-Be).

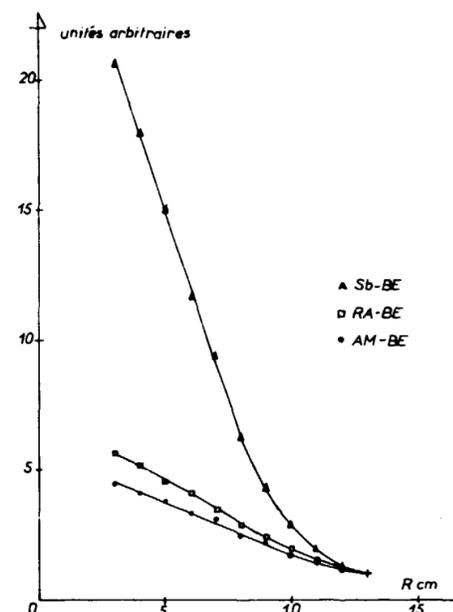


Figure 12 : Répartition expérimentale du flux thermique dans l'eau pure pour les sources Ra-Be, Am-Be et Sb-Be.

### C. Rendement du compteur

La détection des neutrons thermiques dont le flux  $\Phi_{th}(r)$  est donné par l'expression  $\left[ \frac{1}{4} \right]$  corrigée pour la présence du tubage, s'effectue à l'aide de compteurs au trifluorure de Bore ou à l'Hélium 3. Si l'on appelle  $\eta$  le rendement du détecteur à la fois pour le processus électronique (ionisation) et le processus nucléaire (absorption des neutrons), l'indication fournie par un ensemble de comptage relié au détecteur s'exprime par

$$N = \eta \int_V \Phi_{th}(r) dV \quad \text{avec } V \text{ volume actif du compteur}$$

L'intégrale de volume est difficile à calculer étant donnée la géométrie du détecteur, mais, compte tenu de la variation monotone de  $\Phi_{th}(r)$  lorsque  $r$  varie, il est acceptable de considérer une géométrie linéaire assimilée à l'axe du compteur; l'intégrale donnant le flux moyen sera :

$$\mu = \frac{1}{a-a'} \int_{a'}^a \Phi_{th}(r) dr$$

Pour l'humidimètre CGEI, on assimile le compteur à un segment de droite parallèle à l'axe du tubage et située à 2 cm de la source d'où :

$$\mu = \frac{1}{3,6} \int_{-4,2}^{4,2} \frac{\phi(x)}{x} dx \quad \text{et} \quad N = \eta \cdot V \cdot \mu$$

Le rendement  $\eta$  du compteur est d'abord fonction de l'ionisation du gaz par la réaction nucléaire. Le problème mériterait une étude approfondie; mais on peut tirer des informations intéressantes de l'étude expérimentale du spectre des impulsions délivrées par le compteur : pour différents milieux la loi de sa réponse aux neutrons est bien représentée par la loi de variation de la section efficace d'absorption du Bore ou de l'Hélium. Les dimensions du compteur sont telles qu'il n'y a pas modification de la forme du spectre quand on passe d'un milieu à l'autre. Cependant il n'est pas correct d'intégrer sans précaution le flux sur toute la longueur active : le rendement électronique varie suivant la courbe indiquée en figure 13. Un calcul mené à l'aide du programme a montré qu'il existait quel que soit le milieu étudié un même rapport entre les comptages fournis pour un rendement supposé constant et le rendement réel. On peut s'affranchir de cette variation en rapportant les comptages à une même valeur "EAU".

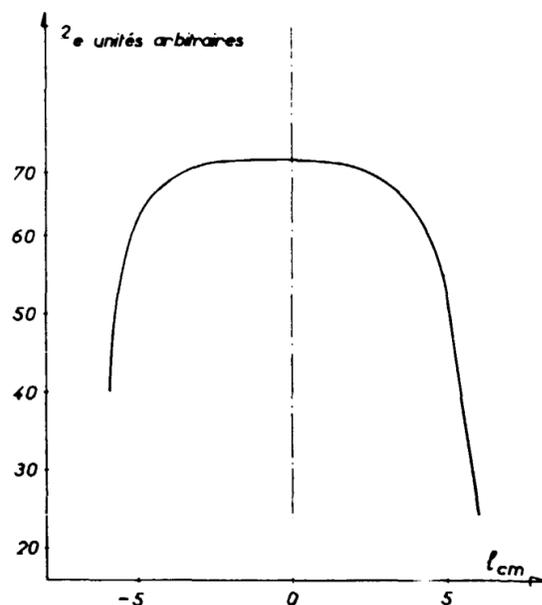


Figure 13 : Variation du rendement électronique du compteur sur la longueur active.

Le rendement  $\eta$  dépend aussi de l'interaction des neutrons sur les noyaux de Bore ou d'Hélium contenus dans le détecteur; la probabilité d'absorption  $\Sigma_a$  de ces éléments est grande vis à vis des neutrons thermiques et suit une loi en  $1/v$  ( $v$  vitesse des neutrons), de telle sorte que pour une distribution à la température  $T_n$  des neutrons, on peut écrire :

$$\Sigma_a = \Sigma_a^{2200} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T_n}}$$

Cependant le compteur détecte non seulement des neutrons thermiques mais aussi des neutrons épithermiques dont l'absorption par le Bore ou l'Hélium n'est pas négligeable. Une étude expérimentale à l'aide d'un volume de mesure de 8 litres environ a montré que le rapport des neutrons "épicadmiques" (énergie supérieure à 0,4 eV) aux neutrons thermiques variait avec le taux d'humidité suivant la courbe de la figure 14. Cette donnée du niveau énergétique des neutrons est à retenir car elle permettra d'expliquer certaines divergences entre la théorie et l'expérience en ce qui concerne l'influence des éléments absorbants dans le milieu étudié.

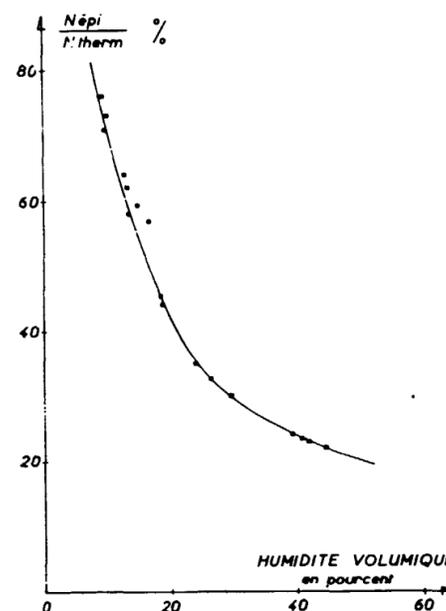


Figure 14 : Variation du rapport des comptages épicadmiques sur thermiques pour un sol donné en fonction de l'humidité volumique.

D. Présence d'éléments absorbants

La présence d'éléments comme le fer, le titane, le potassium qui possèdent une forte section efficace de capture vis à vis des neutrons thermiques se traduit par une dépression du flux thermique  $\phi_{th}(x)$  quel que soit  $x$  et par une diminution du comptage obtenu avec l'humidimètre.

On a étudié un absorbant-type, le chlorure de sodium, et déterminé expérimentalement et théoriquement son influence dans l'eau pure (figure 15) et dans un sol agronomique (limon sableux avec 1% et 2% de sel en poids de matière sèche); dans les deux cas le modèle théorique surestime les baisses de comptages consécutives à l'adjonction de ClNa (14). En effet le modèle fournit la vitesse de comptage relative au flux de neutrons thermiques et nous avons vu que le compteur détecte aussi des neutrons épithermiques. La mesure exacte du flux thermique s'effectuerait donc au moyen de la méthode de la "différence cadmium" (27). Pour rendre compte théoriquement des mesures faites avec l'humidimètre on corrige le modèle en tenant compte du rapport épithermique sur thermique déduit de la figure 14 en admettant les résultats de PRIESS (28) relatifs aux neutrons épithermiques. Les figures 15 et 16 montrent que la correction est acceptable pour l'eau et le sol humide. A signaler enfin que l'influence des absorbants sur la courbe d'étalonnage se traduit par une diminution de pente et d'ordonnée à l'origine ce qui est en accord avec les résultats de BENZ (29).

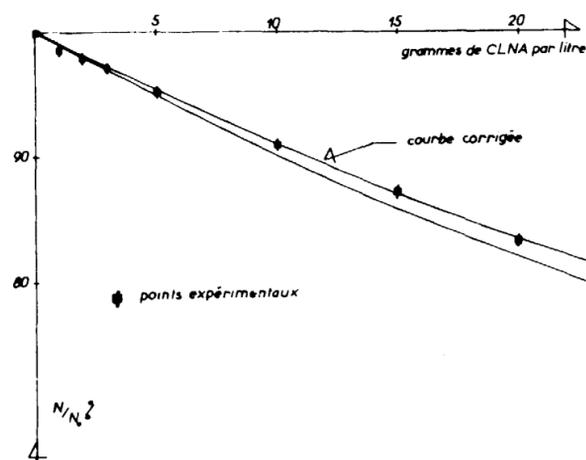


Figure 15 : Influence du chlore sur le comptage dans l'eau pure.

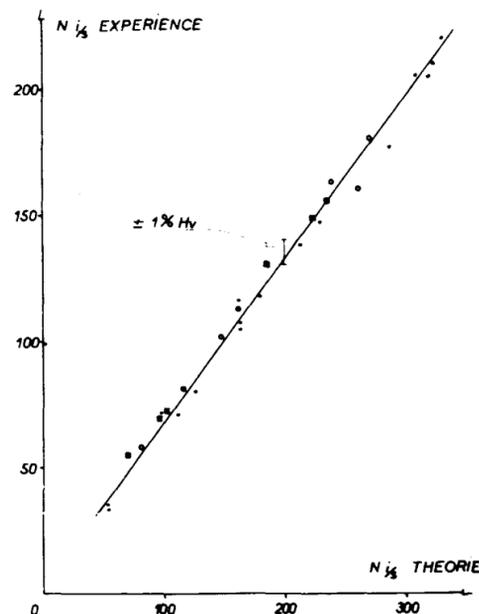


Figure 16 : Relation entre les comptages théoriques corrigés et les comptages expérimentaux obtenus dans un limon humide avec 0% de sel (•), 1% de sel (○), 2% de sel (■).

Il découle de cette étude que le comptage fourni par le détecteur serait plus rigoureusement représenté par la formule  $N = \int \rho(x) \cdot \phi(E, x) \cdot \Sigma_a(E) dE dx$  mais qu'on obtient une bonne approximation du résultat en incluant simplement dans le flux détecté le flux épithermique affecté d'un coefficient qui dépend de la variation de la section efficace d'absorption du détecteur.

E. Liaison chimique des éléments

La question de l'influence sur la vitesse de comptage de la liaison chimique des éléments du sol, notamment dans le cas de l'eau de constitution, reste controversée. Holmes, en 1955, supposait déjà que l'eau de cristallisation sous forme d'ion oxhydrile jouerait un rôle différent de l'eau libre vis à vis des neutrons thermiques. De même CHURAEV (30) et YEMELIANOV (31) attribuent à l'eau liée des propriétés différentes de l'eau libre. Mais les expériences de FISHER (32) sur la transmission de neutrons thermiques à travers une poudre de  $SO_4Ca$  en cours de cristallisation l'amènent à conclure en sens opposé.

Schématiquement la différence Eau libre - Eau liée peut se définir en exprimant la première sous forme de molécules  $H_2O$  et la seconde sous forme d'ions  $OH^-$ . Ainsi les formules retenues pour la kaolinite et l'hydrargillite sont (33) :  $Si_2Al_5(OH)_4$  et  $Al(OH)_3$ .

Du point de vue neutronique, la différence peut s'interpréter par le fait que les longueurs d'onde de de Broglie associées aux neutrons formant le spectre thermique de Maxwell ont des dimensions comparables aux distances interatomiques soit 1,82 Å, à rapprocher de 0,96 Å et 1,02 Å pour les distances OH dans l'eau et dans l'ion oxhydrile

La traduction de ce phénomène passe par la détermination de la section efficace de transport du sol sec. Cette dernière ne peut pas être calculée à partir de la somme des sections efficaces des éléments considérés comme des atomes libres. La valeur de la section efficace de transport relative à l'eau liée tient compte de la variation de la section efficace de diffusion de l'hydrogène :

$$\Sigma_{t, H_2O} = N_H \cdot \sigma_{t, H} + N_O \cdot \sigma_{t, O} \quad N \text{ nombre d'atomes par cm}^3 \text{ de l'élément, } \sigma_{t, e} \text{ section microscopique de transport}$$

$$\sigma_{t, H} = \sigma_{d, H} (1 - \mu)$$

où  $\mu$ , moyenne du cosinus de l'angle de diffusion est donné par  $\mu = \frac{2}{3 \eta_{off}}$  où  $\eta_{off}$  est la masse effective de l'hydrogène donnée en fonction de  $\sigma_{d, H}$  par

$$\left[ \frac{\eta_{off}}{1 + \eta_{off}} \right]^2 = \frac{\sigma_{d, H}(E)}{80}$$

L'application de ces formules permet de retrouver les résultats connus dans le cas de la molécule d'eau. Pour l'eau de constitution il n'a pas été possible, faute de connaître  $\sigma_{d, H}(E)$ , de définir une valeur théorique exacte de la section de transport.

A l'aide du programme on a calculé les droites d'étalonnage théoriques relatives à un kaolin de densité sèche 1,20 pour différentes valeurs de  $\sigma_{d, H}$ . La figure 17 montre que ces droites sont parallèles, le comptage étant fonction croissante de  $\sigma_{d, H}$ . D'autre part on a relevé les comptages obtenus avec un ensemble de détection utilisant un compteur  $BF_3$  en passant, pour un même taux d'humidité et une même densité, d'un échantillon naturel au même échantillon reconstitué (composition chimique identique); aucune différence sensible n'a été notée sur le kaolin.

Il ressort donc que si la liaison chimique joue un rôle dans le cas de l'eau de constitution sur la répartition de flux thermique, cette influence ne modifie pas la pente de la droite d'étalonnage. Dans la suite des calculs on considère que toute l'eau est sous forme d'eau libre en retenant pour  $\sigma_{A,H}$  la valeur 50 barns (34).

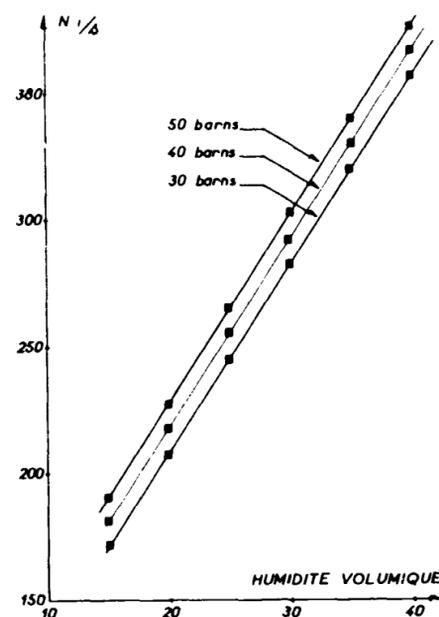


Figure 17 : Variation de la courbe d'étalonnage du kaolin suivant la valeur de la section efficace de diffusion de l'hydrogène.

## VI. RESULTATS OBTENUS

Le modèle mathématique donnant la réponse de l'humidimètre pour différents types de sols utilise un nombre important de paramètres dont la détermination s'effectue par une méthode statistique de comparaison des données théoriques et expérimentales. Après une présentation des résultats obtenus pour les milieux étudiés, on montre comment la théorie prévoit l'influence de la densité sèche du sol sur la vitesse de comptage.

### A. Validité du modèle

L'option C et le sous-programme qui lui est adjoint déterminent l'ajustement d'une droite aux points définis par les couples de valeurs expérimentales (NE) et théoriques (NT). L'erreur commise sur NE provient du caractère aléatoire de l'émission des neutrons par la source mais aussi de l'instabilité de la partie électronique. En se reportant à une mesure de référence, cette erreur ne dépend que de la loi de fluctuation statistique du taux d'émission  $\sigma_0$ . On reporte sur la valeur théorique NT l'erreur de définition de l'humidité volumique et de la densité sèche puis l'erreur due à la non validité du programme.

La figure 18 rassemble les points obtenus pour les différents milieux dont les compositions chimiques sont données par le tableau 1; la comparaison porte sur l'ensemble des points, sous destination, afin de tenir compte de la répartition des mesures. La droite ajustée a pour équation  $NT = 0,9948 NE + 0,9150$ , les valeurs étant données en impulsions par seconde; l'erreur type d'estimation est  $\sigma_{NT} = \pm 10,5$  i/s. Les valeurs expérimentales sont rapportées à un comptage dans l'eau pure de 460 i/s.

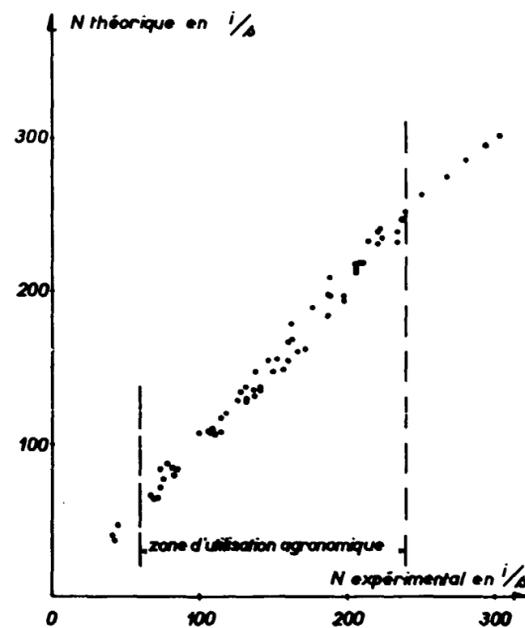


Figure 18 : Points images des comptages expérimentaux et théoriques (sauf pour l'alumine pure).

Cette corrélation ne tient pas compte du cas de l'alumine pure pour laquelle le modèle fournit un comptage trop faible de 10% en valeur relative. A signaler que l'alumine présente un poids spécifique de 3,68 g/cm<sup>3</sup> qui est notablement différent du poids spécifique des constituants et des autres milieux étudiés. Il pourrait y avoir là l'effet d'une micro-hétérogénéité.

Les premiers résultats obtenus sont encourageants; on envisage d'étendre la comparaison à une série de résultats expérimentaux provenant d'étalonnages pratiqués "in situ" par des opérateurs agronomes et hydrogéologues. L'ajustement final définira l'aptitude de la méthode à déterminer une courbe d'étalonnage en champ à partir de la seule analyse chimique du sol étudié.

B. Influence de la densité sèche

L'ensemble des points reportés en figure 19 n'intéresse qu'un type de sol; l'ajustement correspond à une erreur type  $\sigma_{NT} = \pm 5,2$ . Dans ce cas le seul paramètre exprimant la non validité du modèle est la densité sèche qui varie de 1,2 à 1,6 g/cm<sup>3</sup>. La théorie prévoit donc bien l'influence de ce facteur sur le comptage de l'humidimètre que l'on peut expliciter par une fonction du type  $N = f(H_v, \rho_s)$ .

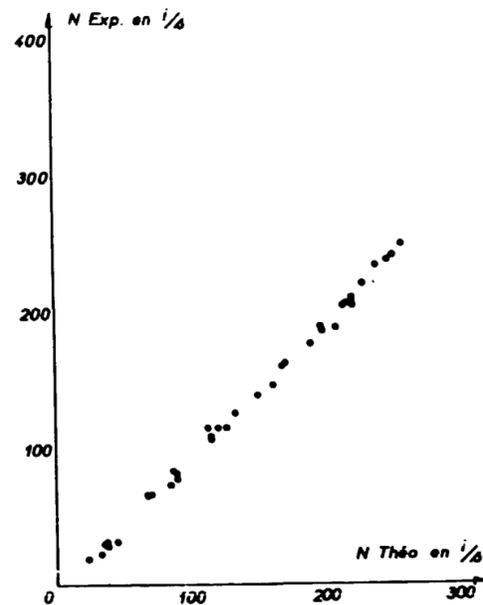


Figure 19 : Points images des comptages expérimentaux et théoriques pour le sol de Cadarache (1,2 à 1,6 g/cm<sup>3</sup>).

On sait que la variation  $\Delta N / \Delta \rho_s$  ne dépend pas de  $\rho_s$  (14); en fait le calcul montre que cette dérivée est assimilable à une fonction linéaire de  $H_v$ , d'où

$$\frac{\partial N}{\partial \rho_s} = \mu' H_v + \nu'$$

D'autre part dans le calcul de N, les quantités  $H_v$  et  $\rho_s$  interviennent de manière analogue (cf. chapitre III); il est logique d'admettre que  $\partial N / \partial H_v$  est indépendant de  $\rho$  et peut être représenté par une fonction linéaire de  $\rho_s$ . La fonction N résultera du système suivant

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial \rho_s} = \mu' H_v + \nu' \\ \frac{\partial N}{\partial H_v} = \mu H_v + \nu \end{cases}$$

et par suite

$$N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$$

Cette relation fournit la représentation générale des courbes d'étalonnage de l'humidimètre de profondeur classique,  $\alpha, \beta, \gamma$  et  $\delta$  étant des constantes caractéristiques du sol : le comptage est une fonction linéaire de l'humidité pour un sol de densité sèche donnée; la densité sèche influe sur la pente et sur l'ordonnée à l'origine de cette droite.

On a introduit dans le programme de calcul une sous-option additive à l'option B qui permet le lissage des points théoriques en vue de les ajuster à la fonction N. Le calcul des constantes  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  donne pour les milieux étudiés les résultats indiqués dans le tableau 3.

Corps	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$
Calcaire	0,50	4,91	45,55	- 66,15	$N = (0,50 \rho_s + 4,91) H_v + 45,55 \rho_s - 66,15$
Dolomie	0,69	4,94	53,20	- 69,03	$N = (0,69 \rho_s + 4,94) H_v + 53,20 \rho_s - 69,03$
Sable	0,77	4,70	39,99	- 64,47	$N = (0,77 \rho_s + 4,70) H_v + 39,99 \rho_s - 64,47$
Kaolin	0,45	4,74	105,01	- 58,667	$N = (0,45 \rho_s + 4,74) H_v + 105,01 \rho_s - 58,67$
Argile calcaire	0,43	4,82	35,25	- 61,67	$N = (0,43 \rho_s + 4,82) H_v + 35,25 \rho_s - 61,67$
Limon	0,43	4,74	42,52	- 65,27	$N = (0,43 \rho_s + 4,74) H_v + 42,52 \rho_s - 65,27$

Valeur des constantes  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  pour les sols étudiés et formule de N correspondante - Tableau 3.

N.3. Les valeurs des constantes sont données dans le cas d'une humidité exprimée en pourcentage et pour un humidimètre équipé d'une source Ra-Be de taux d'émission  $7,5 \cdot 10^4$  n/s.

Le tableau des constantes relatives aux différents milieux montre que  $\alpha$  est généralement petit devant  $\mu$  et que la valeur de  $\gamma$  ne permet en aucun cas de négliger l'influence sur  $N$  du terme  $\gamma \rho$ . Une variation faible de la densité sèche se traduira donc par un déplacement de la droite d'étalonnage, mais celle-ci restera en gros parallèle à elle-même : par exemple on obtient pour le sol de Cadarache, lorsque  $\rho$  passe de 1,4 à 1,6 g/cm<sup>3</sup>, une variation de vitesse de comptage qui entraîne une erreur de 2 points à une humidité volumique de 20%, alors que la variation de pente n'est que de 1,8%.

L'agronome qui recherche le déficit ou l'apport d'eau dans un sol fait une mesure relative  $\Delta H_v$  et n'utilise de la courbe d'étalonnage que la pente : une information à 10% près sur la densité sèche limitera à 20% l'imprécision apportée par l'étalonnage dans le calcul du bilan hydrique. Par contre l'utilisateur qui voudrait obtenir une mesure absolue de l'humidité volumique à 3% près devrait en pratique déterminer la densité sèche avec une précision du même ordre de grandeur.

Il semble difficile à l'heure actuelle d'espérer une mesure neutronique simultanée de la densité et de l'humidité et nous voyons là une application intéressante du densimètre à photons de profondeur.

## VII. CONCLUSION

L'étude théorique de la méthode neutronique permet d'expliquer et de prévoir le comportement de l'humidimètre dans des sols humides considérés comme homogènes et définis par leur composition chimique. Deux points restent à éclaircir : la valeur de la section efficace de transport de l'hydrogène présent dans l'eau liée et les propriétés de ralentissement et de diffusion de l'alumine pure. Il ressort cependant de cette étude que chaque type de sol possède son propre faisceau de courbes d'étalonnage paramétrées en densité sèche; une détermination approchée de ce dernier facteur est suffisante pour la détermination de bilans hydriques en hydrogéologie et en agronomie.

Le résultat des étalonnages effectués par les utilisateurs sur une vingtaine de sols à vocation agronomique va servir à établir le degré de précision avec lequel le modèle représente la réalité et à dresser une table des courbes d'étalonnage classées par familles de sols.

D'autres problèmes pourront être abordés à partir du programme de calcul explicitant la théorie à trois groupes en milieu homogène. Par exemple le rôle des neutrons épithermiques dans la réponse de l'humidimètre ou bien la possibilité de combiner les mesures de répartition des flux thermique et épithermique.

Par l'application du système d'équations différentielles et des conditions aux limites associées, la théorie à trois groupes est tout à fait apte à calculer la distribution du flux dans l'espace et à résoudre par là le cas des milieux hétérogènes. Il y a d'abord l'hétérogénéité de répartition de l'eau dans un sol chimiquement homogène; ce problème revient à définir le pouvoir de résolution de l'humidimètre et la précision avec laquelle on passe d'un profil hydrique réel au profil neutronique résultant. Il y a ensuite l'hétérogénéité du sol lui-même due à des horizons différents ou à une granulométrie variable avec présence de cailloux; si le premier point ne présente pas de difficultés majeures, le second se heurte à l'obstacle de la définition à un critère valable d'hétérogénéité.

Enfin la possibilité d'une étude en milieu semi-infini évoquée chemin faisant intéresse surtout l'appareil de surface type à pointe et a pour but d'éviter la mise en oeuvre de théories plus complexes.

- BIBLIOGRAPHIE -

- (1) COHEN O.P. 1964, A procedure for calibrating neutron probes in the field, Israël Journal of Agricul. Research, 14 n°4, 169-178.
- (2) BLOEMEN G.W. 1962, L'Etalonnage au champ des sondes à neutrons, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding. Mededeling 30.
- (3) HAAHR Af WAGNER 1963, Radioaktive isotopers anvendelse til jordbundsphysike målinger. Anvendelse af neutronspreddning til måling af jordens vandindhold. Grundförbättring 1963 :4.
- (4) COTECCHIA V. 1964, Misure di densita' e di umidita' nei sondaggi in rocce sciolte col metodo nucleare. Laboratorio per le Applicazioni dei Radioisotopi alla Idrogeologia (Bari) della Divisione Geomineraria del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare.
- (5) HOLMES J.W., Calibration and field use of the neutrons scattering method for measuring soil water content. Aust. Jour. Appl. Sci. 7 (1955) 45-48.
- (6) SEMMLER R.A., Neutron moderation moisture meters, Final Report, COO 712-73 (1963)
- (7) DEUTCH I. and PODHOREX I.A., Calculation of neutron Age in hydrogenous mixtures KAPL-M-RWD-13.
- (8) IJIMA J., MIYASHITA Y., INAMOTO K., Determinazione, mediante neutroni dell'umidità nelle materie prime impiegate per la produzione della Ghisa. Nippon Kokan Gihō 26 (1963) 90-100.
- (9) MAYERCZIK J., ZUBER A., The influence of composition and density of soils on readings of neutron moisture meters. Symposium on radioisotopes instruments in industry and geophysics (1965) SM 68/39.
- (10) LORCH S, 1963. Mesure de la teneur en eau des sols à l'aide d'une sonde à neutrons. Z Geophysic. Dtsch. 29, n°6, 261-308.
- (11) BALLARD L.F. and GARDNER A., 1965, Density and moisture content measurements by nuclear method interim report, National Cooperative Highway Research program, Report 14.
- (12) WATERS E.H., MOSS G.F., Estimation of water content by neutrons scattering; effect of sample density and composition., Nature 15, 209, 287-289.
- (13) TITTLE C.W., How to compute neutron transmission and diffusion. Nuclear Chicago technical Bulletin n°12 (1962).
- (14) ØLGAARD P.L., On the theory of neutronic method for measuring the water content. Riso Report n°27 (1965).
- (15) ABAGYAN L.P., BAZAZIANTIS N.O., BONLARENKO I.I., NICOLAEV M.N., Utilisation des constantes multigroupes des neutrons rapides et intermédiaires pour le calcul des réacteurs atomiques, Moscou (1964).
- (16) SALMON J., Théorie cinétique des neutrons rapides. Bibliothèque des sciences et techniques nucléaires (1961).

- (17) ANL 5800, Second Edition, Reactor physics constants (1963).
- (18) COHEN. Thermal neutron spectrum in harmonically bound hydrogen moderators. ORNL 2739 (1959).
- (19) WEINBERG M., WIGNER P., The physical theory of neutron chain reactors (1958).
- (20) KALNAES O., NELTRUP H., ØLGAARD P.L., A recipe for heavy-water.Lattice calculations. Riso Report n°81, 1964.
- (21) GUILLLOU G., QUILICHINI P., Détermination des courbes d'étalonnage théoriques d'un humidimètre (1966). Rapport SCE n°35.
- (22) TITTLE C.W., The slowing down and diffusion of neutrons in hydrogenous media. Technical report n°21 (1962)
- (23) ETEMAD AKBAR, Etude de la pénétration des neutrons thermiques dans des canaux cylindriques vides traversant un milieu hydrogéné. Thèse, Université de Lausanne.
- (24) TITTLE E.W., FAUL H., GOLDMAN CLARK., Neutron logging of drill holes : the neutron neutron method. Geophysics 16, n°1-4, 626-658.
- (25) KRZUK J., The influence of the bore-hole diameter on the shape of calibration curve of the neutron probe for soil moisture measurements., Proceedings of Nuclear Geophysicists conf., Cracovie 1963.
- (26) GEIGER K.W., HARGROVE C.K., Neutron Spectrum of an Am <sup>241</sup>Be, Nuclear Physics 53 - 204-208.
- (27) AMALDI EDOARDO, The production and slowing down of neutrons, Encyclopedia of physics, 38/2 - 1959.
- (28) PRIESS K., GRANT P.J., The optimisation of a neutron scattering water content gauge for soils or concrete. J. Sci. instr. 14 (1964) 541-551.
- (29) BENZ L.C., Neutron moisture meter calibration for use in saline soils, Agricult. Engin. 1965.
- (30) CHURAEV N.V., RODE L.G., Mesures d'humidité des sols organiques de tourbe à l'aide de la méthode aux neutrons, Pochvovedenié n°1, 1966, 96-100.
- (31) YEMEL, YANOV, Neutron method for measuring soil moisture content and its future. Pochvovedenié n°7, 1963.
- (32) FISHER C.H., Neutron scattering and soil moisture, Thèse, Department of civil engineering.
- (33) HENIN S., Minéralogie des argiles, Masson
- (34) MELKONIAN E., Phys. Rev. 76, 12 (1949) 1750-59.

**FIN**