

L'incidence de l'absorption par les sols des neutrons thermiques sur la mesure neutronique de l'humidité volumique

P. COUCHAT - P. MOUTONNET

Parce qu'il intervient directement sur le flux thermique détecté dans les humidimètres de type classique, le paramètre Σ_a d'absorption des neutrons thermiques par les sols a une grande influence sur la courbe d'étalonnage.

Après avoir brièvement rappelé les principes qui commandent ce phénomène, on montre que l'analyse chimique permet à la fois de définir l'ordre de grandeur des variations de Σ_a et de mettre en évidence les limites de cette même analyse.

Une méthode de mesure expérimentale directe de Σ_a est proposée; une application faite à Madagascar est mentionnée et l'on suggère des possibilités de mesures "in situ".

Enfin certains exemples sont donnés où l'absorption n'est pas considérée comme un élément perturbateur, mais comme objet de mesure : tel est le cas des sols salés.

L'influence sur la réponse des humidimètres à neutrons du pouvoir absorbant des sols vis-à-vis des neutrons thermiques est un sujet qui a déjà fait l'objet de nombreuses études. On sait (1, 2) que ce phénomène est une des causes principales de l'existence du faisceau des courbes d'étalonnage reliant le taux d'humidité au comptage fourni par les détecteurs de neutrons thermiques. Jusqu'à présent, les recherches ont souvent mis en évidence les variations obtenues lorsque, pour un sol donné, on ajoutait un élément absorbant, par exemple le bore (3) ou le chlore (4). Certains auteurs comme KASHI (5) ont aussi montré que les traces influaient fortement sur le pouvoir absorbant des sols. Dans tous les cas, on avait une vue seulement partielle du problème, car le phénomène n'était pas mesuré mais observé dans ses conséquences et devenait alors difficilement séparable des autres paramètres de la mesure neutronique comme le ralentissement et la diffusion.

En nous appuyant sur une technique mise au point pour la mesure de sections efficaces thermiques d'absorption, nous avons effectué (*) des mesures directes du pouvoir absorbant des sols par la méthode d'oscillations (6). Les résultats obtenus nous permettent de proposer une ligne de conduite dans l'appréciation et la prise en compte de l'influence de l'absorption des neutrons thermiques sur l'étalonnage des humidimètres à neutrons.

Après avoir brièvement rappelé les notions d'absorption des neutrons thermiques et son rôle sur le flux thermique issu d'une source de neutrons rapides plongée dans un sol humide, on explicite la méthode de mesure de l'absorption des sols et les résultats obtenus. Un exemple simple d'application sur un montage de laboratoire est présenté qui permet de proposer une méthode rapide de mesure. On montre enfin que le comptage épithermique n'apporte pas une solution satisfaisante au problème de l'absorption. Mais dans certains cas, cette absorption peut être considérée comme un intéressant paramètre à mesurer.

1 - INFLUENCE DE LA SECTION EFFICACE THERMIQUE DE CAPTURE Σ_a DANS LES SOLS SUR LA REPOSE DE L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

On sait que la mesure neutronique de l'humidité repose sur le principe de la détection du flux thermique créé par une source de neutrons rapides plongée dans le sol. Ce flux thermique est la résultante du ralentissement des neutrons puis de leur diffusion et de leur absorption par le sol et l'eau au stade neutrons thermiques. L'équation ci-dessous rassemble ces phénomènes lorsque l'on considère trois groupes de neutrons soit deux rapides et un thermique (1)

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

Dans cette équation qui donne le flux thermique en fonction de la distance r à la source les différents termes ont la signification suivante :

r : distance à la source

L_1, L_2, L_3 : longueurs de ralentissement de diffusion pour les trois groupes

D : coefficient de diffusion du troisième groupe

q_0 : force de la source

le terme L_3 contient le paramètre Σ_a et s'exprime par :

$$L_3 = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}}$$

On voit alors que le premier facteur de ϕ_{th} sera inversement proportionnel à Σ_a . Dans la suite, nous nous intéressons à ce terme qui représente la surface macroscopique d'absorption des sols et est donné par la formule

$\Sigma_a = a H_V + b \rho_s$ où a et b sont respectivement les constantes d'absorption du sol et de l'eau, H_V et ρ_s l'humidité et la densité sèche.

(*) Mesures faites au SEPP de Fontenay aux Roses grâce à MM. VIDAL et CARRE.

Pour un sol donné, lorsque la teneur en eau augmente, l'absorption du sol humide augmente, mais parallèlement aussi la diffusion et le ralentissement et ces derniers facteurs l'emportent. Le comptage est fonction croissante de l'humidité. Par ailleurs, lorsque l'humidité H_V est fixe si b augmente, ce qui se produit pour un sol de plus en plus absorbant, il n'y a pas une évolution importante du ralentissement et de la diffusion et le facteur Σ_a l'emporte : le comptage est une fonction décroissante de l'absorption des sols.

Une formulation analytique de l'influence de Σ_a sur le flux thermique ou sur la variation de ce flux pour un ΔH_V donné serait longue, compte tenu de l'équation précédente pour $N_{th}(r)$ et de peu d'intérêt. Mais nous savons par ailleurs que l'on peut exprimer le comptage d'un humidimètre classique par la formule :

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

où α β γ et δ sont des constantes du sol. Cette équation explicite que pour une densité donnée, nous aurons à mesurer l'intervention de l'absorption des sols sur la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage. La figure 1 donne une représentation de ce que l'on obtient par le calcul pour un type de sol lorsqu'on ajoute un absorbant, en l'occurrence du gadolinium. On observe une diminution de pente et de comptage pour un taux H_V d'humidité donné lorsque Σ_a croît. La variation est de 10% sur la pente lorsque Σ_a augmente de 47% et de un point volumique pour une variation de Σ_a de l'ordre de 12%.

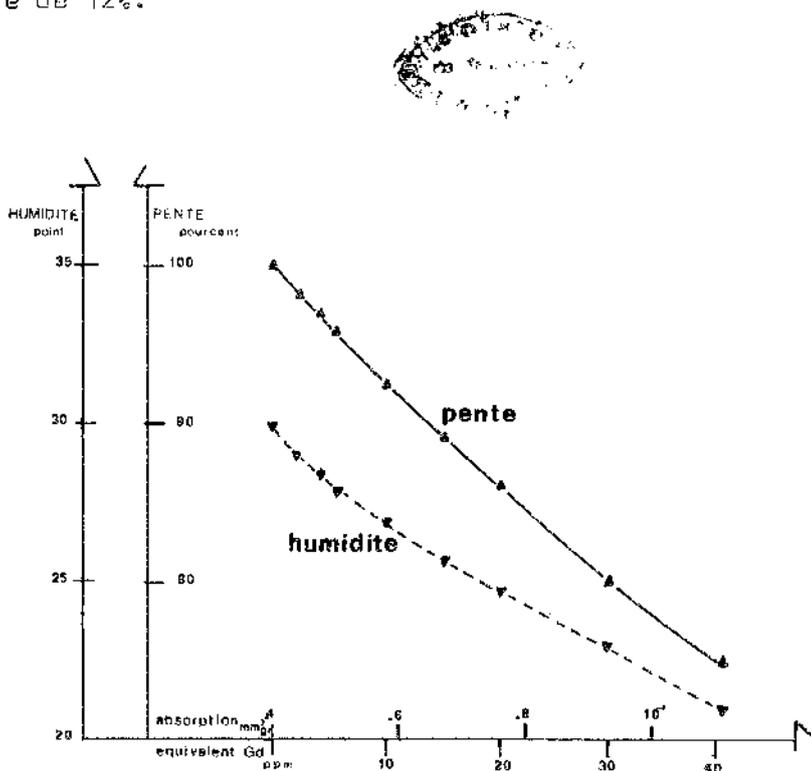


Figure 1

Influence sur la pente et l'humidité de l'adjonction dans un sol donné (ici sol du Mangoro à Madagascar) d'un absorbant.

De son côté, la figure 2 donne la variation de pente en fonction de Σ_a pour divers types de sols. On note une corrélation entre la pente et Σ_a mais celle-ci est pondérée par l'effet, sensible d'après la figure, du pouvoir ralentisseur et diffuseur des sols.

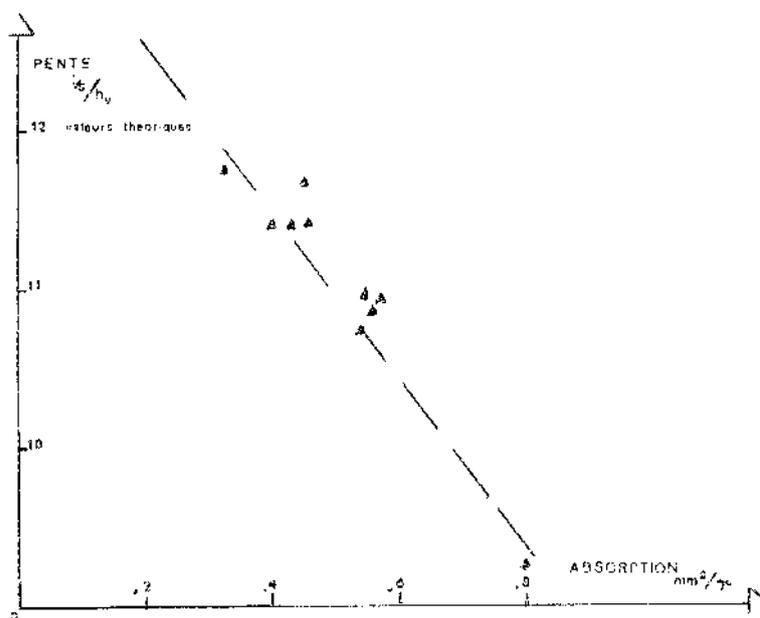


Figure 2

Variation de la pente de la droite d'étalonnage pour divers sols en fonction de l'absorption macroscopique Σ_a mm^2/g

On peut donc dès à présent conclure sur la nécessité de prendre en compte dans l'étalonnage des humidimètres à neutrons le pouvoir absorbant des sols.

Éléments absorbants

Quels sont les éléments qui dans un sol vont participer à l'absorption des neutrons thermiques? On peut les classer en deux types : les composants majeurs et les traces.

Le tableau I ci-dessous résume sur trois types de sols les valeurs de Σ_a pour les composants majeurs et les traces facilement dosables. Cette valeur Σ_a est donnée par la formule :

$$\Sigma_a = n \sigma_a = \frac{A_0}{A} \sigma_{ox} \rho_x \quad \text{où}$$

A_0 est le nombre d'Avogadro, A la masse atomique, σ_{ox} la section efficace microscopique; ρ_x la densité apparente du sol :

Tableau I

Composants		Sol n° 1	Sol n° 2	Sol n° 3
	Σ_a	Σ_{a1}	Σ_{a2}	Σ_{a3}
H ₂ O	2,237	0,0407	0,044	0,185
SiO ₂	0,16	0,0680	0,148	0,098
Al ₂ O ₃	0,283	0,012	0,009	0,0452
Fe ₂ O ₃	1,907	0,061	0,024	0,157
CO ₂	0	0	0	0
CaO	0,472	0,121	0,0005	0,004
MgO	0,103	0	0,001	0,001
K ₂ O	2,645	0,020	0	0,007
Na ₂ O	1,02	0,002	0	0
TiO ₂	4,367	0,010	0,012	0,046
B	4,202	0,055	0	0,025
Mn	14,467	0,012	0,002	0,016
	Σ_a total mm ² /g	0,420	0,240	0,584

Il ressort de l'étude de ce tableau que parmi les composants majeurs : la silice, le fer, le potassium et le titane sont importants. L'eau de constitution joue un rôle déterminant, mais son fort pouvoir ralentisseur tend à modifier les résultats au niveau de l'influence de Σ_a sur $\phi_{th}(r)$. Les éléments traces, le bore et le manganèse ont aussi un rôle essentiel. L'analyse menée par spectrographie d'émission sur certains sols malgaches permet d'observer sur un histogramme des concentrations des zones pour lesquelles le tableau II résume les valeurs de Σ_a correspondantes.

Par ailleurs, l'analyse des terres rares telle qu'elle ressort des tableaux présentés par certains auteurs (7) montre que l'on peut s'attendre à des variations de l'ordre de 0,1 mm²/g par le seul fait des terres rares; le gadolinium est en général le corps le plus absorbant avec une moyenne de 5 ppm dans les sols. On doit noter à ce titre les résultats de KASHI (5) qui sans tirer de conclusions pratiques notait déjà l'importance du phénomène.

Tableau II

Elément	Concentration	Σ_a mm ² /g
B	10 - 40 ppm	0,042 - 0,168
B	100 ppm	0,420
B	800 ppm	3,36
Ti	0 - 0,5 %	0,036
Ti	1,5 - 2 %	0,109 - 0,146
Ti	5 - 6 %	0,364 - 0,437

Cette brève étude de l'absorption des sols à partir d'un calcul issu de l'analyse chimique signifie que l'on peut obtenir des variations de Σ_a dans un sol importantes compte tenu de leur influence sur la courbe d'étalonnage (7% d'écart sur la pente et trois points volumiques pour une erreur de 0,1 mm²/g). La prise en compte de l'absorption des sols par un calcul basé sur l'analyse chimique totale nécessite donc une analyse précise et un nombre important de prélèvements. On se heurte là à un problème économique certain. Par ailleurs, une détermination des terres rares avec une précision compatible avec la précision demandée pour l'étalonnage des humidimètres (5 ppm de gadolinium entraîne une erreur d'environ 4 % sur la pente) est chose hasardeuse. Enfin, un calcul de l'absorption ne peut se contrôler de manière sûre par la seule information qu'il fournit au niveau de la correspondance entre le calcul de la réponse de l'humidimètre et la valeur expérimentale (1). Pour l'ensemble de ces raisons, il importait de pouvoir passer du calcul de Σ_a à sa mesure directe. Bien qu'une mesure "in situ" soit possible nous avons opté pour une mesure sur échantillons plus compatible avec les méthodes existantes.

2 - LA MESURE DIRECTE DE L'ABSORPTION DES SOLS

Principe de la mesure

Pour mesurer la section efficace d'un absorbeur dans un réacteur une des méthodes consiste à introduire un échantillon absorbant dans une pile en équilibre. On lui imprime un mouvement périodique et la modulation du flux neutronique propagée dans tout le réacteur est recueillie en un point sur une chambre d'ionisation. Le fondamental du signal est proportionnel à la capture de l'échantillon. C'est la méthode d'oscillation d'amplitude.

Quant à la méthode d'oscillation de phase, elle s'appuie sur le fait qu'un échantillon oscillant dans un réacteur produit simultanément une modulation s'étendant à tout le réacteur et une perturbation qui n'est sensible que localement. En plaçant judicieusement la chambre de détection, on montre que le déphasage entre les signaux résultants obtenus avec deux échantillons de capture différente, mais très diffusants est proportionnel à la différence des surfaces d'absorption.

Résultats

On a mesuré par cette méthode les sections efficaces thermiques de plusieurs types de sols. Les échantillons étaient préalablement séchés à 105°C pendant 24 heures. Le tableau III résume les résultats obtenus sur des sols de granulométries différentes. On peut noter la variation importante constatée lorsque l'on passe d'un sol à l'autre, l'écart étant de 1,11 mm²/g aux extrêmes. On rappelle que l'eau a une section efficace de 2,2 mm²/g.

Tableau III

Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées

Sol utilisé	Σ_a expérimental mm ² /g	Σ_a calculé mm ² /g
Sable de Fontainebleau	0,221	0,160
Mangoro surface	0,390	0,414
Terre Château	0,650	0,404
Sol B ¹	0,650	0,400
Ambatolampy	0,750	0,396
Laboratoire	0,850	0,722
Mangoky F 9	0,920	0,512
Majunga	1,02	0,596
Nossi 3	1,13	0,857
Nossi 1	1,19	0,932
Nossi 2	1,21	1,00
Antanimalandy argile	1,33	1,18

Le même tableau III rassemble les résultats obtenus par le calcul qui tient compte de l'analyse chimique. On peut constater une divergence importante entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées, ces dernières étant presque toujours plus fortes que les premières. Un tel écart peut s'expliquer par la présence de traces que l'on ne prend pas en compte par l'analyse chimique et ceci même dans le cas le plus simple du sable de Fontainebleau où l'erreur atteint 30%.

La figure 3 montre la représentation graphique des résultats calculés et expérimentaux. Une corrélation existe entre ces valeurs et permet d'expliquer que les courbes d'étalonnage calculées pouvaient être représentatives de la réalité à une constante près; mais par ailleurs, on observe quelques sols qui divergent de cette relation et il s'ensuit que si l'on veut calculer au mieux les courbes d'étalonnage, une mesure directe de l'absorption est nécessaire. Par la suite, nous proposons de modifier la méthode d'étalonnage théorique des humidimètres à neutrons comme suit : une recherche des composants majeurs est effectuée ainsi qu'une mesure d'eau de constitution puis on procède à une mesure de la section efficace Σ_a .

Le calcul se fait alors avec les données de l'analyse chimique pour le ralentissement et la diffusion et la valeur expérimentale de Σ_a pour l'absorption.

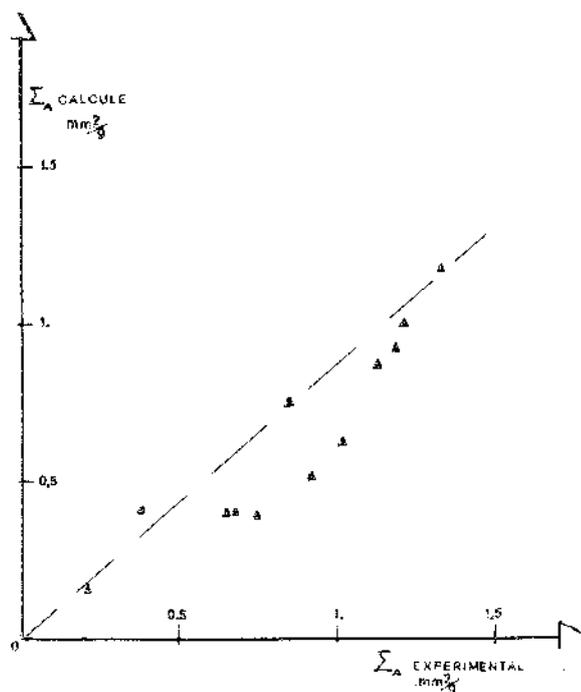


Figure 3

Relation graphique entre l'absorption mesurée par oscillations de phase et l'absorption calculée à partir de l'analyse chimique.

La mesure directe du facteur Σ_a a permis de clarifier un autre aspect du problème de l'étalonnage. En effet les analyses chimiques par spectrographie d'émission pouvaient nous faire craindre une variation importante de l'absorption des sols en fonction de la profondeur. La figure n° 4 montre que ce n'est nullement le cas.

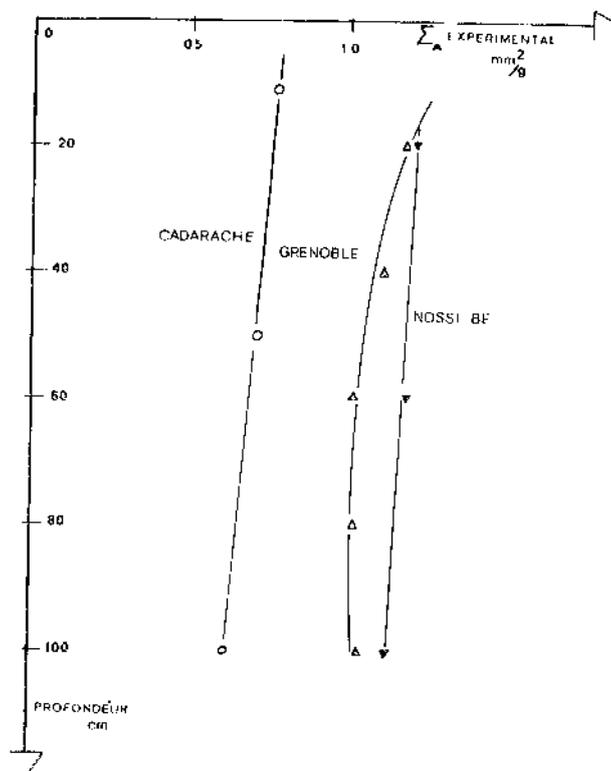


Figure 4

Variation de la section efficace d'absorption des sols en fonction de la profondeur

En effet, si pour trois sols représentés, on observe bien une différence entre les pouvoirs absorbants, par contre la variation de section efficace en fonction de la profondeur est assez faible. On peut voir que l'absorption est en général plus forte à la surface du sol qu'en profondeur, mais la différence est de l'ordre de 10 %, ce qui correspond à une erreur de 3 % environ sur la pente et de un point volumique. Ce résultat confirme la possibilité de limiter les étalonnages pour chaque type de sol à des échantillons moyens sans avoir à craindre une grande hétérogénéité en fonction de la profondeur.

De manière plus générale, nous pouvons considérer cette méthode de mesure comme un moyen de contrôler ou de prévoir l'hétérogénéité des sols quant à leur comportement neutronique. La mesure directe de la section efficace d'absorption des sols fournit un test simple pour décider de l'étalonnage d'un sol. Dans les exemples déjà vus, on peut remarquer qu'un seul étalonnage pour le sol Nossi-Bé suffit pour toutes les profondeurs et qu'à priori les sols B₁ et Cadarache seront assez proches, ce que confirme l'expérience (2 % d'écart sur les pentes), si l'on tient compte évidemment de la quantité d'eau de constitution.

Par la suite, on peut conclure au double intérêt de procéder à des mesures directes de Σ_a : tout d'abord, ces mesures en s'intégrant directement dans un calcul permettent de procéder à un étalonnage théorique simplifié des sols, ensuite la méthode proposée est un test facile de définition de la nécessité d'étalonner ou pas les sols en profondeur. Pour faciliter l'emploi de cette méthode, il est intéressant de voir comment on peut l'appliquer.

3 - APPLICATION DE LA METHODE DE MESURE DIRECTE DE LA SECTION EFFICACE DES SOLS

On peut, de manière empirique, séparer les méthodes en deux classes : celles qui font appel aux prélèvements et la méthode de mesure "in situ".

Méthodes par prélèvement

Elles s'appuient sur le principe de la perturbation du flux thermique créé par une source de neutrons rapides introduite dans un modérateur. Les premiers essais ont été effectués sur un modérateur eau (*). Un ensemble de détecteurs au bore mesure le flux thermique à la surface de 4 cm d'échantillon de sol (prélèvement de 5 kg); l'échantillon est placé sur une des faces du modérateur à 6 cm de la source.

Les premiers résultats (figure 5) montrent qu'il existe entre le comptage obtenu et l'absorption des sols, mesuré par oscillation de pile, une relation. Cette relation est toutefois influencée par le pouvoir diffusant et ralentisseur des sols comme le montre la droite parallèle à la droite représentative des sols et qui est le reflet de l'ensemble sol du laboratoire plus gadolinium et bore. Ce montage de laboratoire ne permet donc pas une mesure absolue directe et précise de la section efficace d'absorption des sols, mais nous donne déjà un premier test des variations à attendre dans l'étalonnage de ces derniers. Comme les résultats obtenus par oscillations de pile, il confirme l'existence d'une variation importante du pouvoir absorbant lorsqu'on passe d'un sol à l'autre.

Actuellement, deux études sont poursuivies. L'une a pour but de préciser la valeur de lost du montage en établissant une corrélation entre le comptage et la pente de la droite d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons : les résultats obtenus sont encourageants. L'autre a pour objectif de définir les conditions optima de géométrie du système ainsi réalisé.

Il sera intéressant de vérifier s'il est possible de diminuer la quantité de sol prélevé qui est un peu trop importante actuellement.

Parallèlement, nous nous sommes préoccupés de concevoir un montage permettant une mesure absolue rapide et précise de la section efficace d'absorption des sols(**). Pour cela, on s'oriente vers la mesure de la perturbation du flux thermique issu d'une source Am-Be de neutrons rapides ralentis

(*) Essais effectués au Laboratoire des Radio-Isotopes de Tananarive.

(**) Montage réalisé grâce au SEPP, M. CARRE, Fontenay aux Roses.

par du graphite. La mesure s'effectue dans l'empilement graphite par des détecteurs au bore. On constate et on peut mesurer que la variation du comptage ΔN obtenu sur un tel empilement est proportionnelle à la différence de capture entre un sol inconnu et un échantillon pris comme référence. En supposant que l'on travaille avec des échantillons de 200 g de terre, on prévoit :

$$\Delta N = - K_1 (S_C - S_{C_t}) \quad S_{C_t} \text{ étant la capture du témoin,}$$

$$k_1 = 90 \text{ C/s/cm}^2 \text{ pour une source de 1,5 Ci}$$

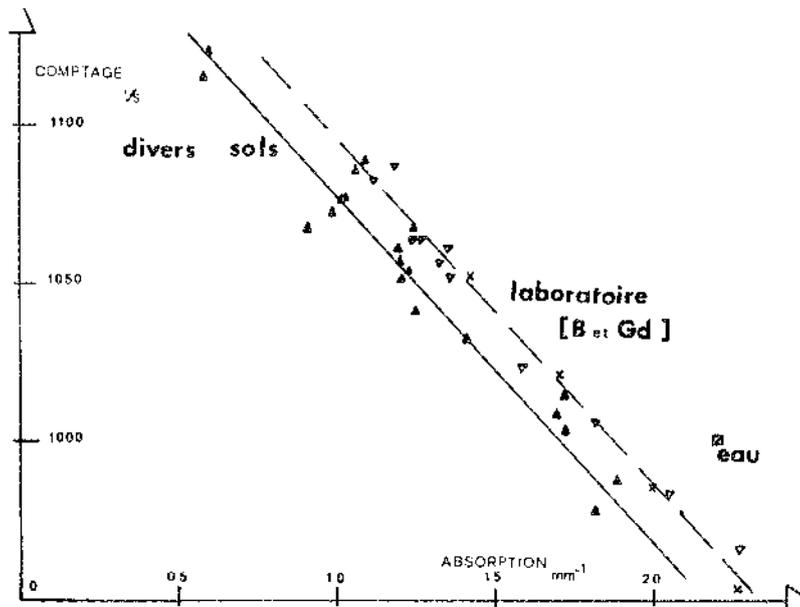


Figure 5

Comptage sur modèle de laboratoire en fonction de l'absorption des sols.

Méthode "in situ"

Dans le cadre des mesures "in situ", le procédé consiste à détecter dans un tube en même temps le flux thermique et épithermique.

Nous savons que le flux épithermique, c'est-à-dire celui obtenu par des neutrons d'énergie supérieure ou égale à 0,8 eV, ne dépend pas de l'absorption des sols laquelle suit en général une loi en $1/V$ ou $\frac{1}{\sqrt{E}}$. Nous ne prenons pas en compte les captures résonantes. On pouvait alors penser éliminer simplement le problème de l'absorption par une détection du flux épithermique. En fait, mis à part le problème technologique posé par la faible sensibilité aux neutrons épithermiques des détecteurs existants (problème en partie résolu par les détecteurs à Hélium 3 récents mais

coûteux) le flux épithermique présente le défaut d'être beaucoup plus sensible que le flux thermique à la densité sèche des sols. C'est ce que montre bien la figure 6 où des étalonnages comparatifs en neutrons thermiques et épithermiques ont été menés pour différentes densités sèches de sols.

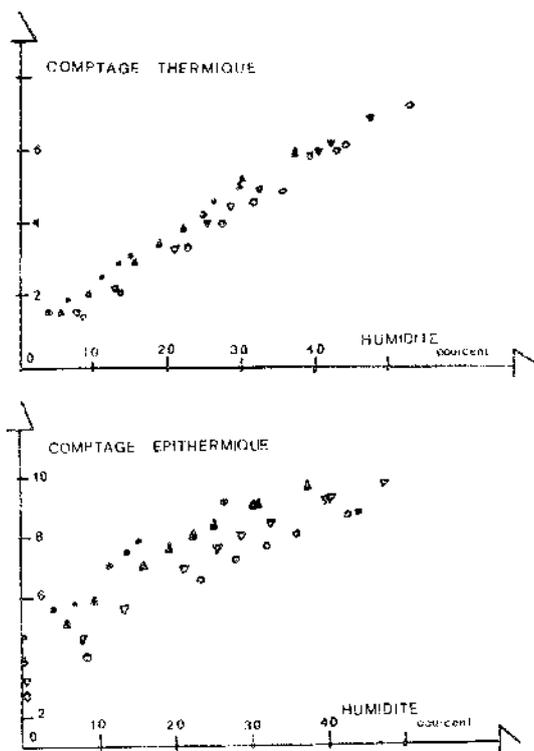


Figure 6

Résultats d'étalonnage en neutrons thermiques et épithermiques sur un modèle de sol fournissant une densité variant de $1/\text{g}/\text{cm}^3$ à $2/\text{g}/\text{cm}^3$.

On voit que si l'on gagne du côté de l'absorption des sols, on perd considérablement sur le facteur densité sèche. Ceci met en évidence l'inadéquation de la mesure du flux épithermique pour obtenir une méthode neutronique simple de mesure de l'humidité des sols. Ces résultats expliquent bien par ailleurs pourquoi une mesure combinée thermique plus épithermique permet de s'affranchir de la densité sèche (8).

Par contre, si l'on admet une influence plus faible de la densité sèche sur la variation de comptage épithermique (pente) comme cela se produit pour le comptage thermique, on peut proposer une application de la méthode du double comptage. En effet, si pour un sol donné, on attend une variation de l'absorption sans variation importante du pouvoir ralentisseur et diffusant et de la densité sèche (ce qui est souvent le cas), alors en passant de l'un à l'autre des deux points d'un sol définis par leur pouvoir absorbant la différence de variation en ces points du comptage épithermique $\Delta N_{\text{épi}} = f(\Delta H_V)$ et du comptage thermique $\Delta N_{\text{thér}} = f(\Delta H_V)$ sera respectivement nulle et différente de zéro. On peut dire d'une autre manière que si

on passe d'un sol x à un sol y plus absorbant, une même variation de l'humidité entraînera une même variation du comptage épithermique et une variation plus faible dans y du comptage thermique. On pourra alors dans un sol porté par infiltration à deux taux d'humidité étudier la relation :

$$\frac{\Delta N_{th}}{\Delta N_{\text{épi}}} = f(\Delta N_{th})$$

où $\rho_{th} = \Phi \left(\frac{\Delta N_{th}}{\Delta N_{\text{épi}}} \right) \rho_{th}$, pente thermique

L'étude graphique de cette relation montre que Φ dépend peu de la densité sèche et que la variation de Φ est un reflet de celle de la pente thermique. Nous avons là un moyen de prévoir "in situ" la variation à attendre sur la pente de la courbe d'étalonnage des humidimètres à neutrons classiques. Il nous suffit de procéder à des relevés de profils donnant $\Delta N_{th}/\Delta N_{\text{épi}}$ en fonction de z et ceci évidemment pour deux taux d'humidité différents.

Qu'il s'agisse de méthodes par prélèvements ou de mesure directe "in situ", nous avons là quelques techniques qui nous permettent de prévoir et de tenir compte du facteur "influence de l'absorption des sols". C'est un paramètre perturbateur qui entraîne l'existence d'un faisceau de courbes d'étalonnage. Il y a par contre des circonstances où la mesure de la section efficace d'absorption des sols peut apporter des informations directes. C'est notamment ce qui se passe lorsque l'on cherche à déterminer les profils en sol ou en bore dans un sol.

Les méthodes que nous avons examinées s'avèrent alors fécondes, car il est possible de relier directement une section efficace d'absorption à une teneur en bore ou en ClNa. Dans ce cas, un montage simplifié utilisant le principe d'une thermalisation dans l'eau peut donner des résultats satisfaisants pour les variations de teneur en chlore sur prélèvements (figure 7).

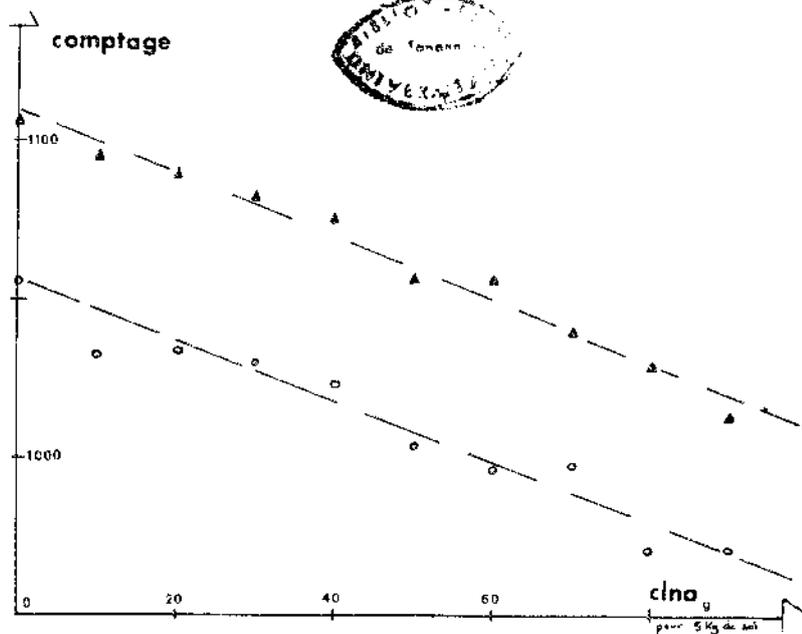


Figure 7

Variation du comptage sur un montage de laboratoire sur différentes teneurs en ClNa et deux sols donnés

Par ailleurs, il importe là aussi de diminuer la quantité du prélèvement. On peut enfin citer le travail de PRIESS (9) qui en utilisant le principe du double comptage thermique et épithermique, propose un appareil de mesure "in situ" du chlore avec une précision de 500 ppm. Le comptage épithermique renseigne sur la teneur en eau, le comptage thermique sur la teneur en chlore.

CONCLUSION

Responsable en partie de la dispersion calculée et mesurée dans les courbes d'étalonnage des humidimètres à neutrons classiques, le pouvoir absorbant des sols a été étudié.

Après avoir montré de quelle manière la section efficace d'absorption intervient sur la pente et l'ordonnée à l'origine des droites d'étalonnage, on a classé les éléments qui participent à cette absorption. Ce travail entraîne la conclusion selon laquelle un calcul de la section efficace d'absorption Σ_a à partir de l'analyse chimique totale est à la fois erroné et aléatoire. Les terres rares présentes sous forme de traces en sont souvent la cause.

On est alors amené à proposer une mesure directe de Σ_a , ce qui a comme première conséquence de mettre en évidence une moins grande dispersion des valeurs Σ_a que celle prévue par l'analyse chimique. Devant l'intérêt de cette mesure, mais aussi à cause de sa complexité, des méthodes simples sont recherchées : on a étudié des techniques par prélèvements sur un montage de laboratoire utilisant la thermalisation dans l'eau puis un montage devant permettre des mesures absolues rapides dans un empilement graphite.

Les méthodes "in situ" s'appuient sur le double comptage thermique plus épithermique qui peut donner rapidement une estimation de la variation de pente de la droite d'étalonnage.

Enfin, il n'est pas interdit de penser qu'une mesure complémentaire de diffusion permettrait de définir la totalité de la courbe d'étalonnage, pente et ordonnée à l'origine. A l'heure actuelle, on propose une définition de cette courbe calculée à partir de l'analyse chimique des majeurs et de la mesure directe de Σ_a .

BIBLIOGRAPHIE

1. P. COUCHAT : *La méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols*, 1967, rapport CEA R 3298.
2. P. COUCHAT : *La détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons à partir de l'analyse chimique des sols* 1967, AIEA Proceedings Istanbul.
3. PL L. DLGAARD : *On the theory of the neutronic method for measuring the water content*, 1965, RISØ Report n° 97.
4. L.C. BENZ and all : *Neutron moisture calibration for use in saline soils*, 1965 Agricultural Engineering, p. 326.
5. S. KASHI : *Influence of rare earths on neutron moisture measuring* 1968, Nuclear Engineering on Design.
6. J. P. CARRE : *Mesure des sections efficaces thermiques d'absorption de l'Al., du Mg, du Fe et du Cu, par la méthode d'oscillation* 1964, Rapport CEA 2485.
7. L. HASKIN and M. A. GEHL : *The rare earth distribution in sediments* 1962. Journal of Geophysical research, Vol. 67, n° 6.
8. P. COUCHAT : *Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols indépendante de la densité sèche*, 1970. Note CRAS T. 271 p., 1264-7.
9. K. PRIESS and A. HACCOUN : *A possibility study of a method for measuring chloride content of water in a barehale by neutron moderation*. Departmental Report n° 109. Negev institute for arid zone research Beer shava Israël.