

TH ^{N° 15} ~~110~~ These - N° 15
Avec mon maître de thèse
HAS
Londres



Ph. Couchat

T H E S E

présentée

A L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur es-sciences

par

Philippe COUCHAT

MESURE NEUTRONIQUE DE L'HUMIDITE DES SOLS

Soutenue le 1^{er} février 1974 devant la Commission d'Examen

- | | | |
|------------------------------|---|-------------------|
| M. BLANC | } | Président |
| MM. DENIELOU | | Examineurs |
| GUERIN de MONTGAREUIL | | |
| THIRRIOT | | |
| TRUCHASSON | | |

UNIVERSITE PAUL SABATIER

Président : M. LARENG
1er Vice-Président : M. MATHIS
2ème Vice-Président : M. MARTIN

U.E.R. Scientifiques

Honorariat

M. BLAIZOT	Doyen honoraire
M. CAPDECOMME	Doyen honoraire, Recteur honoraire Correspondant de l'Institut
M. DUPOUY	Membre de l'Institut, Doyen honoraire, Directeur Général honoraire du CNRS, Professeur honoraire
M. DURAND Emile	Doyen honoraire
M. GAUSSEN	Professeur honoraire, correspondant de l'Institut
M. JACQUES	Professeur honoraire
M. MASDUPUY	Professeur honoraire
M. MATHIS	Doyen honoraire
M. MIGNONAC	Professeur honoraire
M. MORQUER	Professeur honoraire, correspondant de l'Institut
M. SECONDAT	Professeur honoraire
M. TEISSIE-SOLIER	Professeur honoraire
M. VANDEL	Professeur honoraire, membre de l'Institut

Professeurs

M. CASTERAS	Géologie, correspondant de l'Institut
M. CAPDECOMME	Minéralogie, correspondant de l'Institut
M. NOUVEL	Biologie générale
M. GALLAIS	Chimie, correspondant de l'Institut
M. DURAND Emile	Physique
M. FERT	Physique
M. LESBRE	Chimie organique
M. BRUNEL	Physiologie végétale

M. HURON	Mathématiques appliquées
M. MARGULIS	Pédologie
M. TRICHE	Chimie analytique et spectrographie
M. LEDOUX	Zoologie appliquée
M. RIVALS	Agriculture
M. PERRIER	Physique
M. MATHIS	Chimie
M. ORLIAC	Géochimie et minéralogie
M. LAFOURCADE	Physique
M. ANGELIER	Zoologie
Melle de FERRE	Botanique
M. FARRAN	Minéralogie et géotechnique
M. LAUDET	Physique théorique et calcul numérique
M. SERFATY	Biologie animale
M. LAGASSE	Electrotechnique
M. BLANC	Physique nucléaire
M. LEREDDE	Botanique
M. LELUBRE	Géologie
M. TROCHAIN	Botanique
M. LALAGUE	Mathématiques générales
M. BOUIGUE	Astronomie
M. COUCHET	Physique
M. LASCOMBES	Botanique
M. ASSELINEAU	Chimie biologique
M. MAÛRET	Chimie systématique
M. AGID	Physiologie
M. MONTANT	Cryptogamie
M. GAUTIER	Physique
M. CRUMEYROLLE	Mathématiques
M. GOURINARD	Géologie
M. PULOU	Minéralogie
M. CAMBOU	Physique spatiale
M. MIQUEL	Chimie
M. LACOSTE	Electrotechnique
M. THIBAUT	Mécanique rationnelle et appliquée
M. MASCART	Mathématiques
M. MEDIONI	Psychophysiologie
M. RAYNAUD Pierre	Physiologie animale
M. ZALTA	Chimie biologique
M. SEVELY	Electrotechnique
M. POMMIEZ	Mathématiques
M. REY Paul	Biologie végétale
M. COULOMB	Physique
M. TRINQUIER	Physique
M. MARONI	Chimie
M. BEETSCHEN	Biologie générale
M. DERACHE	Physiologie animale
M. SATGE	Chimie organique
M. LATTES	Chimie

M. VEDRENNE
M. DURAND-DELGA
M. CARRARA

Géophysique
Géologie
Physique

Professeurs associés

M. BUCY

Professeurs sans chaire

Mme BRUNEL	Physiologie végétale
M. PICCA	Physique
M. MERIC	Mathématiques appliquées
Mme LEGAL	Zoologie
M. MIROUSE	Géologie
M. PILOD	Physique
M. LARROQUE	Physique
M. BARRANS	Chimie
Mme LAFON	Mathématiques
Melle LAPEYRE	Mathématiques - Informatique
M. JEANNIN	Chimie minérale
M. BERTRAND	Chimie
M. DESQ	Mathématiques
M. MAHENC	Chimie
M. ROCARD	Electronique
M. DEGEILH	Physique
M. POILBLANC	Chimie
M. TOUZE	Physiologie végétale
M. FRASNAY	Mathématiques
M. CASSAGNAU	Zoologie
M. GUERIN	Mathématiques
M. PESCIA	Physique
M. SOUQUET	Géologie
M. SCHNEIDER	Biologie cellulaire
M. SICARD	Biologie génétique
M. de LOTH	Chimie physique
M. MARTIN J.C.	Génie électrique
M. BITSCH	Zoologie
M. SAPORIE	Physique
M. PERRENNOU	Informatique
M. THENOZ	Génie civil
M. REY Gérard	Electronique, électrotechnique, automatique

Maîtres de conférences

M. FONTAN	Physique nucléaire
M. CUASSINUS	Mathématiques appliquées
M. BAUDRAS	Chimie biologique
M. DURAND Philippe	Physique
M. ATTEIA	Mathématiques
M. CALVET	Mécanique des fluides
M. PAGANI	Physique

M. CUPPENS	Mathématiques
M. CASTAN	Informatique
Mlle BARBANCE	Mathématiques
M. VERDIER	Physique
M. GILLY	Génie mécanique
M. BEAUFILS	Informatique
M. COTTU	Génie mécanique
M. ROUTIE	Génie chimique
M. REME	Mesures physiques
M. MARAL	Physique
M. BERTHELEMY	Zoologie
M. HURAU	Physique
M. LEGRAND	Génie civil
M. ABATUT	Electronique, électrotechnique, automatique
M. SOTIROPOULOS	Chimie organique
Mme GERVAIS	Chimie inorganique
M. BONEL	Chimie
M. MAUSS	Mécanique
M. TERJANIAN	Mathématiques

Chargés d'enseignement

M. PRADINES	Mathématiques
M. NGUYEN THANH VAN	Mathématiques
M. BANCEL	Mathématiques
M. BETOURNE	Informatique
M. CAMPAN	Psychophysiologie
M. CLERC	Mathématiques
M. GRIFONE	Mathématiques

Institut National Polytechnique de Toulouse

Professeurs

M. NOUGARO	Hydraulique générale et appliquée
M. GARDY	Génie chimique
M. BIREBENT	Electronique appliquée
M. VOIGT	Chimie minérale
M. MONTEL	Chimie physique et électrochimie
M. THIRRIOT	Hydrodynamique (E.N.S.E.E.I.H.T.)
M. GRUAT	Mécanique des fluides (hydraulique)
M. BUGAREL	Génie chimique

Professeurs sans chaire

M. HAMANT	Botanique
Mlle BERDUCOU	Physiologie végétale
M. DAT	Mécanique des fluides
M. FALLOT	Biologie végétale (viticulture et arboriculture)
M. TRUCHASSON	Mécanique
M. HOFFMANN	Electronique
M. ENJALBERT	Chimie

Maîtres de conférences

M. MARTY	Physique industrielle
M. LEFEUVRE	Electronique (E.N.S.E.E.I.H.T.)
M. ANGELINO	Génie chimique
M. DABOST	E.N.S.C.T.
M. MATHIEU	Chimie analytique
M. TRANNOY	Physique (E.N.S.E.E.I.H.T.)
M. CASTAGNETTO	Mathématiques (E.N.S.E.E.I.H.T.)
M. GILOT	Génie chimique (Institut du génie chimique)
M. CALMON	Techniques agricoles
M. MATHEAU	Electronique

Institut National des Sciences appliquées de Toulouse

Professeurs

M. ROQUES	Chimie industrielle
M. GRATELOUP	Génie électrique
M. MASO	Génie civil
M. MIRA	Génie électrique

à Mireille

*à tous ceux qui m'ont permis
de persévérer*

L'élaboration d'une thèse est avant tout une expérience de recherche ; c'est aussi une aventure humaine, et il m'est agréable de pouvoir la situer au sein du Service de Radioagronomie du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, où s'est déroulé l'ensemble de ce travail.

Avant de développer le thème de cette étude, je tiens à exprimer ma reconnaissance aux personnes sans la patience desquelles cette contribution n'aurait certainement pas vu le jour : après avoir discerné et orienté, à son point de départ, le sujet de ce travail, Monsieur le Professeur BLANC a bien voulu accepter la présidence du jury. Je dois également à Monsieur DENIELOU tout le soutien de sa compétence en neutronique. Monsieur GUERIN de MONTGAREUIL m'a dès l'origine soutenu d'une confiance souvent mise à l'épreuve mais toujours intacte ; il a porté un jugement clarifiant, et par là dynamique, sur mon entreprise. Monsieur le Professeur THIRRIOT, par ses remarques et ses impulsions efficaces, a redonné l'élan nécessaire à un long trajet sur la fin duquel Monsieur le Professeur TRUCHASSON a eu l'amabilité de porter un regard neuf.

Je ne veux pas, non plus, oublier de citer Monsieur MARCESSE qui m'a confié ce travail et l'a suivi malgré les changements de directions souvent imprévus qui ont été opérés. Monsieur MOUTONNET, par sa rigueur expérimentale, et, par ses intuitions, Monsieur BUSCARLET, ont apporté un guide à une recherche qui pouvait si facilement dévier. La partie relative aux neutrons rapides doit beaucoup aux conseils de Monsieur LERIDON ; enfin il me paraît indispensable d'associer Monsieur CZUBECK à la genèse de cette application des interactions neutron-noyau.

Il est coutumier d'adresser des remerciements à la personne qui assume la tâche matérielle de réaliser un tel document, mais la patience dont a fait preuve Madame GARNAUD devant le manuscrit, souvent renouvelé, ne relève pas de la seule coutume.

Une partie des études objets de ce présent travail a été publiée dans les articles mentionnés ci-après ; les raisonnements et résultats en ont été rappelés dans la mesure où ils étaient nécessaires à la compréhension du texte.

- MARCESSE J., COUCHAT P., JOSSOUD M.,
Mesure nucléaire de l'humidité des grains : application aux problèmes de stockage
Radioisotopes instruments in industry and geophysics, Symposium AIEA, Varsovie 1966

- COUCHAT P.
Détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons à partir de l'analyse chimique des sols
Isotope and radiation technique in soil physics and irrigation studies
Symposium AIEA, Istambul 1967

- COUCHAT P.
La méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols
Rapport CEA R 3298, 1967

- COUCHAT P.
Etude en géométrie cylindrique de quelques problèmes posés par la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols
Symposium AIEA, Brno 1969

- COUCHAT P.
Une méthode neutronique indépendante de la densité sèche
Note CRAS Paris T. 271, p.1264-1267, 1970

- COUCHAT P.
Les récents développements de la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols et ses perspectives
Colloque S.P.E.P.E., Guelph, 1970
Colloque AIEA, Vienne, 1970

- CAMERON J.C., COUCHAT P. and all
Neutron moisture gauges
Technical report n°112, AIEA, Vienne 1970

- OLGAARD P.L., COUCHAT P. and all
Commercial portable gauges for radiometric determination of the
density and moisture content of building material
AIEA technical report series n°130, 1970

- COUCHAT P., CAROSI J.C., CHANU D.
Ensemble de mesure des sols
Brevet n°7123887, 30 juin 1971

- COUCHAT P., MOUTONNET P.
L'incidence de l'absorption par les sols des neutrons thermiques sur
la mesure neutronique de l'humidité volumique
Terre Malgache spécial n°12, 1972

- COUCHAT P., RAMODIHARILAFY J.
La mesure neutronique de l'humidité des sols caillouteux
I.J.A.R.I., 1972, vol. 23, p.229-235

- COUCHAT P.
Les techniques nucléaires appliquées au cycle de l'eau en agronomie :
bilan et perspectives
Conférence de Genève, AIEA, 1972.

SOMMAIRE

Définition	1
Introduction	2
LES ELEMENTS DE LA METHODE NEUTRONIQUE	
A. Le comportement neutronique des sols	
1. Interaction neutron-sol	8
a) Le neutron - b) La densité sèche des sols	
c) La composition chimique des sols	
2. Constantes neutroniques des sols	15
a) Ralentissement - b) Thermalisation	
c) Diffusion thermique	
3. Conclusion	
B. La représentation de l'humidimètre à détection de neutrons thermiques	
1. Choix du modèle physique	21
2. Paramètres du modèle	23
a) Source énergie - b) Source géométrie -	
c) Détecteur énergie - d) Détecteur géométrie -	
e) Tube - f) Milieux - g) Dimension -	
h) Diffusion thermique - i) Liaison chimique -	
j) Ralentissement	
3. Formulation mathématique	38
a) Modèle à deux dimensions - b) Modèle à une dimension	
LES HUMIDIMETRES A NEUTRONS	
A. Les appareils	
1. Technologie des appareils	48
a) Source de neutrons - b) Détecteur de neutrons	
c) Electronique - d) Position source-détecteur	
2. Types d'appareils	51
a) Capteur d'humidité - b) Mesure en profondeur	
c) Mesure en surface - d) Mesure au laboratoire sur colonnes de sols - e) Humidimètre standard	

B. La courbe d'étalonnage	
1. Définition	54
2. Méthodes d'étalonnage	55
a) Etalonnage expérimental - b) Etalonnage empirique	
c) Etalonnage théorique - d) Analyse des courbes d'étalonnage	
3. Méthode proposée	64
a) Relation entre courbes d'étalonnage et constantes neutroniques des sols - b) Etalonnage des humidimètres à détection de neutrons thermiques	
4. Résumé	68

C. Le volume de mesure	
1. Volume intéressé par la mesure	70
2. Hétérogénéité horizontale du sol humide	71
a) Sphère d'importance - b) Influence sur le comptage d'une répartition hétérogène de l'eau et du sol dans un plan radial	
3. Hétérogénéité de répartition verticale de l'eau et du sol	76
4. Mesure de l'humidité en surface	81
5. Conclusion	86

PROPOSITIONS

A. Neutrons épithermiques	
1. Réponse d'un humidimètre à détection de neutrons épithermiques	87
2. Utilisation du double comptage thermique-épithermique	89
a) Mesure de l'humidité indépendamment de la densité sèche - b) La détermination in situ de la pente des droites d'étalonnage de l'humidimètre à détection de neutrons thermiques	
B. Neutrons rapides	
1. Etude spectrométrique	93
a) Mesure en profondeur - b) Mesure en surface	
2. Mesure des neutrons rapides transmis dans un sol humide	98
a) Mesure de l'humidité des grands volumes de sol	
b) Mesure de l'humidité par transmission de neutrons rapides - c) Utilisation d'un programme Monte Carlo pour l'étude théorique des spectres de neutrons rapides dans un sol humide	

C. Paramètres neutroniques des sols	
1. Mesure directe des constantes thermiques des sols	105
2. Etude neutronique des sols	107
CONCLUSION	111
INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES	116

1770

Les données des sols sont
 les constantes de diffusion
 et les constantes de capture
 des neutrons thermiques
 dans les sols (en grammes/cm³)
 par un g² au point de
 mesure.

La constante de diffusion
 est la constante de diffusion
 des neutrons thermiques
 dans les sols (en grammes/cm³)
 par un g² au point de
 mesure.

DEFINITION

La méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols est basée sur l'interaction des neutrons émis par une source artificielle de neutrons rapides et des noyaux des éléments présents dans un sol humide, spécialement l'hydrogène de l'eau. Son objet est la mesure de l'humidité volumique H_v (en grammes/cm³) définie comme le produit de l'humidité pondérale H_p (en g d'eau/g de sol) par la densité apparente sèche (en g/cm³), et exprimée en pourcentage.

INTRODUCTION

C'est un lieu commun de dire que le déficit en eau a une incidence sur la croissance des plantes et les expériences ne manquent pas, qui traitent des changements morphologiques et métaboliques liés à la carence en eau. Si l'on est bien documenté sur la nature et les causes du manque d'eau, un travail important reste à accomplir en ce qui concerne l'absorption de l'eau par le système racinaire.

Dans le complexe plante-sol-air, l'eau s'écoule à travers le sol vers les racines, puis des racines vers les feuilles pour enfin être transpirée ; dans ce trajet, le flux d'eau rencontre un certain nombre de résistances que doivent vaincre les forces de déplacement. D'un point de vue global, les flux traduisent une consommation par la plante de l'eau et des substances nutritives qui transitent avec elle ; ils sont le reflet d'un déséquilibre du bilan hydrique au profit du végétal. On peut représenter à tout instant le bilan résultant par l'équation générale de conservation de l'eau :

$$P + I - R = E + T + D - R_c + \Delta Q$$

avec P pluviométrie, I irrigation, R ruissellement, E évaporation, T transpiration, D drainage, R_c remontées capillaires et ΔQ variation du stock en eau du sol. Le terme $E + T$ est l'évapotranspiration ; on néglige la part d'eau conservée par le végétal qui ne représente que 1% de celle qui transite.

Dans un sol convenablement irrigué, l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.) est, en première approximation, indépendante de l'espèce considérée mais déterminée par les conditions climatiques. La bioclimatologie, dont l'objet est l'analyse des interactions climat-croissance de la plante, nous apprend que la valeur optimum d'E.T.P. ne coïncide pas nécessairement avec son maximum. La comparaison de l'E.T.P., de l'évapotranspiration réelle et du stock en eau permet, au moins empiriquement, de définir à quel degré et à quel moment une intervention par irrigation apportera à la plante le complément nécessaire à la régulation stomatique responsable en partie du rendement des cultures. Les mesures climatiques sont indispensables et, convenablement utilisées, elles ont pour conséquence d'amener l'agronome à étudier, pour le maîtriser, le comportement de l'eau dans le sol en présence de racines.

Prenons par exemple un sol cultivé où l'on ne craint ni ruissellement (terrain plat et normalement filtrant, intensité modérée des pluies et des irrigations) ni remontées capillaires (nappe profonde). Au cours de la période culturale, l'évolution du stock en eau du sol suit des cycles réguliers comprenant : un mouvement descendant à courte période (48 heures) consécutif à une irrigation, un mouvement ascendant, à l'intérieur du sol et dans la plante, durant la phase de dessèchement provoquée par l'évaporation et la transpiration des plantes. Un apport d'eau en surface se traduit par l'humectation du sol puis son ressuyage ; ces deux processus ont des cinétiques différentes. L'objectif de l'agronome est d'apporter suffisamment d'eau pour reconstituer les réserves du sol épuisées par la culture tout en veillant à ne pas perdre d'eau par infiltration en profondeur au delà de la zone explorée par les racines.

L'équation de diffusion, solution du système équation de continuité - équation de Darcy généralisée, décrit bien ces phénomènes. Ainsi, connaissant la conductivité hydraulique K et la diffusivité D , un modèle physique comme celui mis au point à Cadarache sur calculateur hybride (DIFSOL) permet d'étudier l'influence sur l'infiltration, du profil initial de teneur en eau. Cependant l'expérience montre généralement que les résultats calculés à partir des valeurs de D et de K déterminées au laboratoire ne sont pas représentatifs à cause du remaniement inévitable du sol. Il faut donc procéder à des essais in situ pour obtenir, par comparaison avec le modèle physique, les paramètres hydrodynamiques qui serviront à régler la dose et l'intensité d'irrigation. Puisqu'il faut suivre des évolutions rapides des profils hydriques au moment même des apports d'eau,

la mesure s'effectuera à l'aide d'humidimètres permettant une prise d'information automatique ; le nombre élevé d'informations ainsi recueillies s'accommodera très bien d'un traitement par ordinateur.

L'eau retenue dans le sol (capacité au champ) va être puisée par les racines suivant une cinétique de désorption liée à la plante elle-même et qui peut être décrite en ajoutant à l'équation de la diffusion un terme source négatif. La recherche de l'agronome porte sur l'explicitation des paramètres du terme source, liés au sol (diffusivité, gradient de potentiel,...) et à la plante (transpiration, géométrie et perméabilité des racines, influence des éléments nutritifs sur le comportement hydrique de la plante). Ceci requiert des mesures en place de l'évolution lente des profils hydriques en de nombreux sites.

Parvenus à ce point, nous devons faire un rapide tour d'horizon des diverses techniques utilisées pour mesurer la teneur en eau des sols : une méthode apte à résoudre notre problème doit être transposable "in situ" et ceci va exclure a priori la résonance nucléaire magnétique basée sur la réorientation des noyaux d'hydrogène dans un champ magnétique, même si elle présente l'intérêt de distinguer le type d'eau par la liaison chimique de l'hydrogène. Il ne faut pas s'attarder sur les méthodes gravimétriques dont les prélèvements introduisent un artificiel coefficient d'hétérogénéité dans les résultats. On ne retient pas davantage les méthodes où la prise d'information détruit le phénomène mesuré ou le perturbe (le gradient de température imposé par la mesure de conductivité thermique se traduit par un flux d'eau). Si la relation entre l'humidité et la grandeur physique mesurée présente une hystérésis, la méthode est d'un intérêt limité (sonde hygrométrique, Boyoucos, tensiomètres). L'analyse de la mesure de la résistivité du sol humide se heurte d'emblée à l'influence très forte de la température et surtout des sels dissous. Les caractéristiques capacitives offrent plus d'intérêt : entre 10 et 100 Mhz on a bien une réponse qui est fonction de la teneur en eau ; toutefois la densité sèche intervient de manière importante, l'eau adsorbée a une action différente de l'eau libre et il existe une relation étroite entre la granulométrie et la capacité, d'où une courbe d'étalonnage spécifique de chaque sol, obtenue par comparaison avec la gravimétrie sur le terrain ; le dispositif doit être placé à poste fixe dans le sol et en étroit contact avec lui.

Ce rapide tour d'horizon des méthodes de mesure qui intéressent l'agronome montre qu'en ce domaine l'imagination du chercheur s'est donnée libre cours sans que pour autant une quelconque philosophie se soit vraiment imposée au praticien. Il se trouve que la méthode du sondage neutronique résout les problèmes posés car elle permet une détermination rapide, non destructive et reproductible, des profils hydriques par des appareils manuels ou automatiques.



En conséquence des progrès technologiques récents ou prévisibles, le dessalement de l'eau de mer à des fins industrielles et agricoles au moyen de réacteurs nucléaires a pris une importance potentielle pour maintes régions du monde. Bien loin, dans l'échelle des grandeurs, de l'usine géante de dessalement on trouve la simple sonde à neutrons qu'un homme peut tenir dans sa main et enfoncer dans le sol. Elle n'en représente pas moins un bienfait pratique des techniques nucléaires pour le cultivateur qui exploite des terres irriguées. Elle fournit un moyen de mesurer rapidement sur place la teneur en eau du sol. Dans un monde où les pratiques défectueuses, aussi bien pour la culture que pour l'irrigation, peuvent gaspiller une quantité d'eau presque égale à celle qui est utilisée, ce dispositif semble destiné à prendre un intérêt économique immense.

(Etude de base n°22, FAO, 1970).

Dans ces lignes d'une récente publication de l'organisation internationale, on peut mesurer tout le chemin parcouru depuis l'époque où, en 1945, Brumer et Mardock et plus tard Pieper puis Belcher apportèrent la première contribution à la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols. Une réunion internationale regroupant à BRNO, vers la fin de l'année 1969, les industriels sur le thème "appareils de mesure de l'humidité et de la densité", met en évidence le besoin ainsi que les possibilités techniques et technologiques en matière de mesure neutronique.

Presque paradoxalement, on constate un phénomène de recul allant jusqu'à remettre en cause le bien-fondé scientifique puis économique de cette méthode : un décalage s'est produit entre la mise en application rapide des humidimètres à neutrons thermiques de type classique et l'étude expérimentale et théorique de leur principe. Parallèlement on observe une nette carence dans l'étude de la méthode neutronique dans son ensemble, étude qui seule peut donner naissance à une technologie renouvelée.

Au point où nous a porté notre recherche, il semble que nous puissions donner plusieurs explications à cet état de fait. Les phénomènes en jeu dans l'interaction neutron-noyau sont relativement complexes et leur représentation mathématique, même avec le secours des calculateurs, est assez lourde. D'autre part les techniques de mesure des flux neutroniques, si elles sont assez aisées dans le cas des neutrons thermiques, se compliquent très vite pour les neutrons rapides. Enfin le milieu mesuré, à savoir le sol humide, est loin de présenter l'homogénéité et surtout l'exacte définition des milieux de réacteurs plus couramment étudiés. Ces conditions placent le chercheur devant la double nécessité de simplifier en vue de leur analyse, les représentations du processus d'interaction neutron-noyau et du sol humide sur lequel il travaille ; aussi a-t-il recours à une expérimentation de technologie parfois lourde donnant des mesures peu précises surtout en matière d'humidité des sols, expérimentation qu'il tente d'expliquer et de prévoir par une théorie à la fois simple et représentative. De cette difficulté témoignent les nombreux procédés et modèles théoriques proposés, encore tout récemment, pour l'étalonnage des humidimètres à détection de neutrons thermiques.



Notre travail commence par un rappel des éléments de la méthode neutronique : l'analyse des phénomènes d'interaction neutron-noyau montre que les paramètres neutroniques des sols humides dépendent de l'eau elle-même, puis de la densité sèche et de la composition chimique totale. On élabore ensuite un modèle physique de représentation de l'humidimètre à neutrons, ce qui nous

conduit à établir une formulation mathématique simple et nouvelle en géométrie à deux dimensions dans l'approximation de la diffusion de la théorie multigroupe.

Après une brève description du principe et de la technologie des humidimètres, deux problèmes essentiels sont abordés: la courbe d'étalonnage pour l'établissement de laquelle nous présentons une méthode rapide et sûre à savoir la mesure directe des constantes neutroniques thermiques des sols, le volume de mesure dont l'approche nécessite l'usage d'un modèle physique à deux dimensions en vue d'explicitier correctement les conditions de géométrie. On traite le problème du pouvoir de résolution vertical et horizontal de la sonde à neutrons, et le cas limite de la mesure en surface.

Notre contribution s'achève sur des propositions concernant les possibilités offertes par la détection des neutrons épithermiques et rapides: l'information épithermique est un progrès intéressant comme complément de la mesure thermique, car elle fournit le principe d'un humidimètre indépendant de la densité sèche et permet la détermination in situ des pentes d'étalonnage des appareils classiques. Nous présentons une étude expérimentale de la répartition spatio-énergétique des neutrons rapides, étendue et précisée par un modèle physique construit sur un code Monte-Carlo; ceci nous donne les bases d'une technique de mesure des teneurs en eau par transmission de neutrons rapides.

Quelques sujets ont été reportés pour des raisons de clarté dans la note annexe sous les rubriques suivantes: anisotropie de la longueur de diffusion en présence de tubage, influence spécifique des cailloux sur la mesure neutronique, microhétérogénéité des sols, modèle représentatif de la mesure en surface des sols hétérogènes, répartition spatio-énergétique des neutrons rapides.



LES ELEMENTS DE LA METHODE NEUTRONIQUE

A - LE COMPORTEMENT NEUTRONIQUE DES SOLS

1. Interaction neutron-sol.

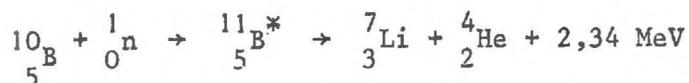
a) Le neutron.

Les sources couramment utilisées émettent des neutrons de plusieurs millions d'électron-volt (MeV) qui, après interaction avec les noyaux présents dans le sol humide occupent tous les niveaux d'énergie : neutrons rapides (au-delà de 1 KeV), intermédiaires (1 KeV à quelques eV), épithermiques (dans la gamme de 1'électron-volt) et thermiques (0,025 eV correspondant à l'agitation thermique des molécules du milieu). En excluant les phénomènes de fission qui n'intéressent pas notre propos, nous retenons pour ces neutrons quatre types d'interaction :

- diffusion élastique : phénomène principal pris en compte dans nos études, il est défini par les lois de la mécanique classique : après interaction sur le noyau, le neutron est réémis dans une direction donnée avec conservation de l'énergie cinétique, de la quantité de mouvement et des masses au repos pour l'ensemble neutron-noyau.

- capture radiative : importante dans un sol humide et principal responsable de l'absorption des neutrons thermiques dans le sol, la capture du neutron s'accompagne de l'émission d'un ou plusieurs photons gamma lorsque le noyau excité revient à son état initial.

- diffusion inélastique : la plus délicate à prendre en compte dans le calcul du ralentissement des neutrons dans un sol. Absorbé par le noyau cible, le neutron est réémis avec accompagnement d'un photon gamma et son énergie est inférieure à celle que fourniraient les lois de la mécanique classique pour des masses invariables,
- capture avec émission de particules chargées : cette interaction préside aux processus de détection des neutrons notamment par les compteurs proportionnels. Ainsi pour les détecteurs à BF_3 utilisés dans les humidimètres, nous avons la réaction :



l'isotope 10 du bore constitue 18,8% du bore naturel, le reste étant du bore 11 qui n'absorbe pratiquement pas les neutrons thermiques : c'est la raison pour laquelle le gaz des capteurs est fortement enrichi en bore 10 (environ 95%).

A chacun de ces phénomènes est liée une probabilité d'interaction σ qui a la dimension d'une surface : la section efficace microscopique liée à l'énergie des neutrons incidents (fig. 1a et 2a). Pour un milieu homogène comportant n noyaux par cm^3 , on définit la section efficace macroscopique par

$$\Sigma = \frac{N_0}{M} \rho \sigma \quad \text{cm}^{-1} \quad \text{No nombre d'Avogadro, M masse du noyau et } \rho \text{ densité.}$$

Σ est inversement proportionnelle à la masse de l'élément ; d'où l'on peut prévoir dans les sols l'influence prépondérante de l'hydrogène, et donc de l'eau sur le ralentissement et la diffusion des neutrons. Par contre la variation des sections efficaces totales en fonction de l'énergie et les valeurs de capture au niveau thermique pour les divers éléments présents nous montrent que l'influence de l'hydrogène passera par un maximum. Un niveau d'énergie élevé pour l'émission des neutrons et faible pour la détection de ces mêmes neutrons risque fort bien de favoriser le sol par rapport à l'eau que l'on veut justement mesurer et donc de ne pas représenter les meilleures conditions d'application de la méthode neutronique.

Dans un sol humide la section efficace macroscopique s'exprime par la formule suivante où l'on sépare l'eau et le sol :

$$\Sigma = \frac{N_0}{M_{H_2O}} (2\sigma_H + \sigma_O) H_v + \left(\sum_{i=1, n} \frac{N_0}{M_i} p_i \sigma_i \right) \rho_s$$

P_i pourcentage pondéral de l'élément i

L'interaction des neutrons avec un sol humide dépend donc de l'humidité volumique H_v et d'autre part du sol lui-même par l'intermédiaire de sa densité sèche ρ_s et de sa composition chimique totale, deux paramètres que nous allons à présent examiner.

b) La densité sèche du sol.

Définie en grammes par cm³ de sol, la densité apparente sèche est mesurée soit par des techniques classiques (densitomètre à membrane par exemple) soit par des techniques nucléaires dont la plus féconde est certainement l'affaiblissement d'un faisceau de photons gamma issu de sources ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co ou ²⁴¹Am ; les résultats obtenus donnent dans tous les cas la densité humide que l'on corrige pour obtenir la densité sèche par une mesure de l'humidité par étuvage, méthode neutronique ou deuxième mesure gamma.

Le tableau ci-après donne deux exemples de répartition dans l'espace de la densité apparente sèche : dans un champ d'expérimentation, l'augmentation continue de ρ_s reflète le travail cultural des couches superficielles ; la répartition dans un bassin versant est plus aléatoire (bien que l'écart n'excède pas 11%). Nous n'avons pas eu connaissance d'études sur l'évolution temporelle de la densité sèche en sols cultivés (50 premiers centimètres par exemple). La figure 1 indique des variations de densité importantes lorsqu'on passe d'un site à l'autre (maximum 45%).

Profondeur	Champ d'expérimentation				Bassin versant				
	1	2	3		4	5	6	7	8
10 cm	1,61	1,59	1,54	40 cm	1,71	1,83	1,77	1,70	1,83
20	1,69	1,64	1,57	80	1,80	1,80	1,77	/	1,95
30	1,69	1,68	1,64	100	1,83	1,75	1,80	/	1,79
40	1,70	1,73	1,71	150	1,73	1,77	1,80	1,69	1,88
50	1,72	1,77	1,71	200	1,84	1,79	1,80	1,65	1,83
60	1,74	1,76	1,72	300	1,73	1,90	1,82	/	1,90
70	1,74	1,75	1,72	350	1,78	1,81	1,88	1,61	1,85
80	1,73	1,74	1,72	400	1,80	1,86	/	/	1,76
90	1,75	1,73	1,72	450	1,90	1,72	/	/	1,82
100	1,76	1,73	1,72	500	/	/	/	/	1,66

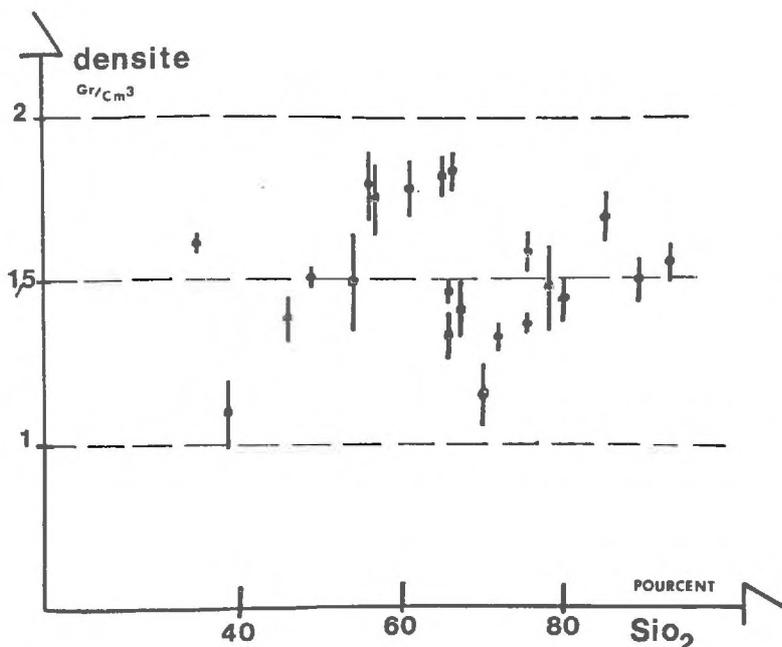


Fig. 1 - Valeurs de la densité apparente sèche en g/cm³ pour divers sols en fonction du pourcentage de silice ; la barrette représente les gammes de variation pour chaque sol.

A la notion de densité est liée celle de porosité. Le pourcentage de vides dépend de la teneur en eau et du poids spécifique des sols (figure 2) par une relation du type :

$$\pi = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} - H_v \quad (\rho_r \text{ poids spécifique})$$

il atteint des valeurs dépassant 40%. C'est une donnée à ne pas négliger car il faudra s'assurer que l'on peut valablement remplacer dans son interaction avec les neutrons, le milieu avec trous par un milieu homogène équivalent.

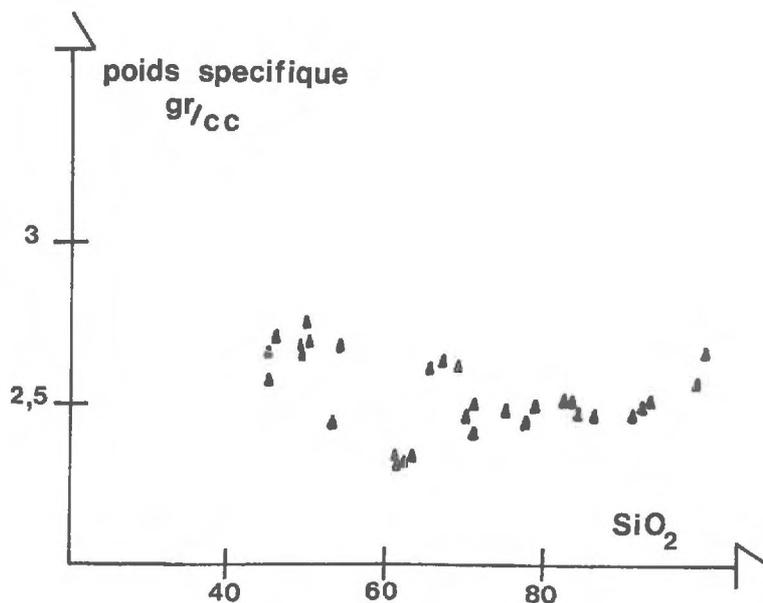


Fig. 2 - Variation du poids spécifique pour divers sols en fonction du pourcentage de SiO₂.

c) La composition chimique du sol.

En laissant de côté les éléments organiques ou humus au sens large qui sont en général minoritaires pour nous intéresser aux éléments minéraux, on trouve dans un sol des éléments non altérés comme le sable et les limons et un complexe d'altération qui constitue la fraction fine; ces colloïdes minéraux d'un diamètre inférieur à 2 microns sont désignés par le terme d'argile. Les carbonates, le calcaire se répartissent dans ces deux fractions. Si les éléments grossiers (sables et limons) sont principalement un support inerte, la fraction colloïdale au contraire joue un rôle important en conférant au sol sa structure dont dépendent ses rapports avec l'air et l'eau. L'analyse granulométrique si importante pour l'agronome, donne une information grossière sur la composition chimique du sol même si l'on sait par exemple que d'une part la silice a pour principale source le quartz, les feldspaths et les micas et que d'autre part les sables et les limons ont ces composés comme principaux constituants.

Eléments majeurs. Outre l'oxygène, les éléments constitutifs fondamentaux du sol sont le silicium, l'aluminium, le fer, le titane, le manganèse et l'hydrogène ; il faut ajouter le calcium et le carbone pour les sols calcaires. On exprime en général les pourcentages de ces éléments dans leurs oxydes respectifs. A partir des analyses chimiques effectuées sur plusieurs sols agronomiques et en prenant SiO_2 comme variable, on a constaté une relation entre SiO_2 et Al_2O_3 puis entre SiO_2 et Fe_2O_3 . L'oxyde de titane, assez répandu dans les sols, se trouve dans les argiles ou certains types de minéraux, sa relation avec SiO_2 est assez lâche ; même remarque pour le manganèse. Le calcium n'a pas été étudié systématiquement, il présente généralement une bonne répartition dans un sol neutre et sa teneur augmente avec la profondeur dans un sol acide ; on le trouve dans des proportions allant jusqu'à 25%. Ces constituants ne suivent pas de lois bien définies (fig.8a à 11a).

Hydrogène : Il est présent sous forme d'eau : celle des couches unil-
lulaires des minéraux dans le cas par exemple de la montmorillonite et de la
vermiculite (elle est la cause du gonflement des argiles et par voie de

conséquence de l'évolution de la densité apparente sèche lorsque varie la teneur en eau) ; celle des canaux des unités cellulaires allongées dans le cas de l'attapulgite par exemple. Il est aussi présent dans les ions hydroxyles dûs aux composés d'Al et de Fe. Par une calcination qui doit se poursuivre jusqu'à 1000°C, le sol fournit une quantité d'eau équivalente d'autant plus importante qu'il est plus argileux ; ceci est bien mis en évidence sur la figure 3 et la relation qui existe entre SiO_2 et H_2O doit être un facteur de simplification dans le comportement neutronique des sols.

L'humidimètre va donc "lire" dans un même temps l'hydrogène de l'eau libre des sols humides et l'hydrogène du sol. Ainsi, par convention, on distingue l'eau dite libre qui est obtenue par un séchage à 105°C à l'étuve pendant 24h et définit l'humidité volumique mesurée par l'humidimètre, et l'eau équivalente recueillie lors d'une calcination entre 105°C et 1000°C qu'on appelle eau de constitution ; sa présence dans le sol perturbe la mesure de l'eau libre.

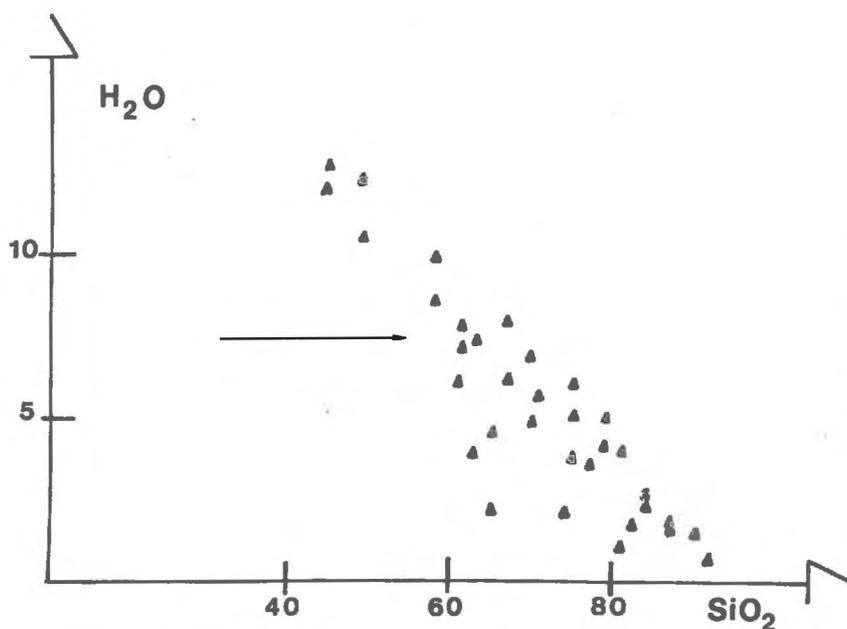


Fig. 3 - Valeurs des pourcentages d'eau obtenue par séchage à 1000° sur des sols préalablement étuvés à 105°C. La méthode de mesure utilisée distingue cette eau du CO₂ dégagé pendant le séchage.

Eléments traces. Ils ont une importance dans la mesure où ils présentent une forte section efficace de capture ; ce cas intéresse le bore, le lithium et certaines terres rares comme le samarium, le gadolinium, l'euporium.

Pour le bore, élément le plus répandu, la variation de sa teneur d'un sol à l'autre est très grande (figure 4.) : 50 à 150 ppm ; il importera de la mesurer pour chaque type de sol et l'on peut s'étonner de trouver peu d'informations à son sujet dans les publications traitant des humidimètres à neutrons. Le lithium dont on sait qu'il existe deux isotopes stables ^6Li (7,52%) et ^7Li (92,48%) accompagne notamment les concrétions d'oxyde de fer et de manganèse ; on le trouve en quantité variant en moyenne entre 30 et 60 ppm, bien que des teneurs de 200 ppm soient possibles.

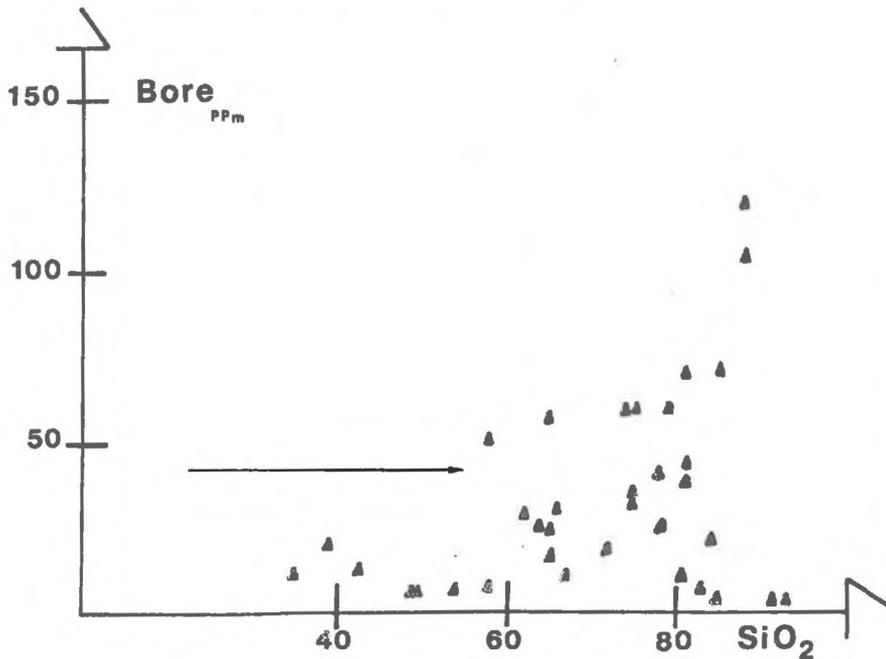


Fig. 4 - Variations des quantités de bore en ppm pour divers sols en fonction du pourcentage de SiO_2 ; la flèche indique la limite supérieure des valeurs couramment obtenues.

L'analyse des terres rares est délicate et nous présentons des résultats publiés qui donnent des indications sur le Sm, le Gd et l'Eu d'où il ressort qu'on peut trouver jusqu'à 5 ppm de Gd.

Teneur de terres rares de quelques sols (d'après Haskin)
valeurs en ppm

Sol	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Sm	0,64	0,58	1,20	5,60	5,0	1,6	2,3	1,05	0,95	5,6	2,50
Eu	0,14	0,10	0,18	1,1	0,9	0,55	0,38	0,3	0,24	1,1	0,43
Gd	0,79	0,43	0,93	4,3	4,6	1,5	1,5	0,77	0,81	4,3	3,2

2. Constantes neutroniques des sols.

a) Ralentissement.

En prenant l'hypothèse de chocs élastiques, cette phase est entièrement décrite à l'aide du pouvoir ralentisseur $\xi\Sigma_s$ et de la section efficace de transport Σ_{tr} ; les valeurs sont données en mm²/g si on les rapporte à une densité sèche unité. Le calcul est conduit pour un sol séché à 105°C, en utilisant un jeu de sections efficaces moyennées sur la gamme d'énergie 5 MeV - 1,44 eV, jeu présenté par Deutch pour le cas de milieux hydrogénés où la répartition énergétique du flux est assimilée à celle obtenue pour le cas de l'hydrogène seul. Les résultats sont donnés d'une part pour chaque composant (fig. 5) et d'autre part pour l'ensemble du sol (fig. 6 et 7) en prenant alors l'eau de constitution comme variable.

On constate que l'eau domine le ralentissement, suivie de SiO₂, les autres composants majeurs intervenant peu. Par contre le transport est défini par SiO₂ et l'eau de constitution ne joue pas un rôle particulier. On sait que dans le cas de l'eau, le pouvoir de ralentissement est défini par l'hydrogène mais que le pouvoir diffusant de l'oxygène rend efficace l'hydrogène en maintenant les neutrons rapides près de la source. A un degré moindre, on retrouve cet effet pour le sol : le ralentissement est défini par l'eau de constitution mais les autres composants ont un effet de synergie qui explique la dispersion des valeurs de Σ_{tr} et l'ordonnée à l'origine de la droite $\xi\Sigma_s = f(H_2O)$; leur connaissance est nécessaire pour calculer le transport. Notons enfin que c'est la relation SiO₂ et H₂O qui nous a permis de prendre H₂O comme variable dans $\xi\Sigma_s$ et Σ_{tr} .

b) Thermalisation.

Dans cette phase commence à intervenir les forces de liaisons chimiques ; deux aspects la caractérisent :

- Au niveau du pouvoir de ralentissement $\xi\Sigma_s$, l'augmentation de la section efficace Σ_s de diffusion se double d'une diminution du paramètre ξ . La prise

Fig. 5 - Valeurs des pourcentages d'influence des divers composants du sol sur les phénomènes de ralentissement ($\xi\Sigma_s$) et de transport (Σt_x) ; les valeurs pour CO_2 et CaO sont représentatives d'un sol calcaire.

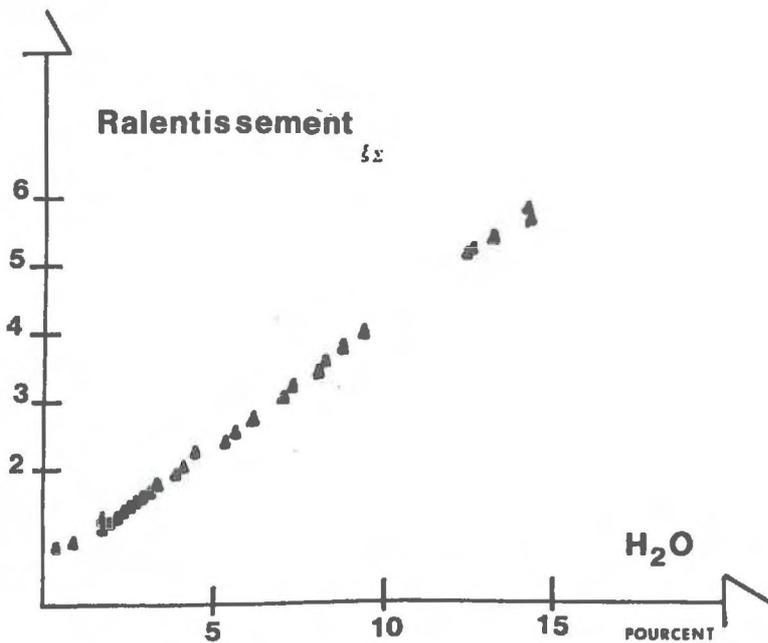
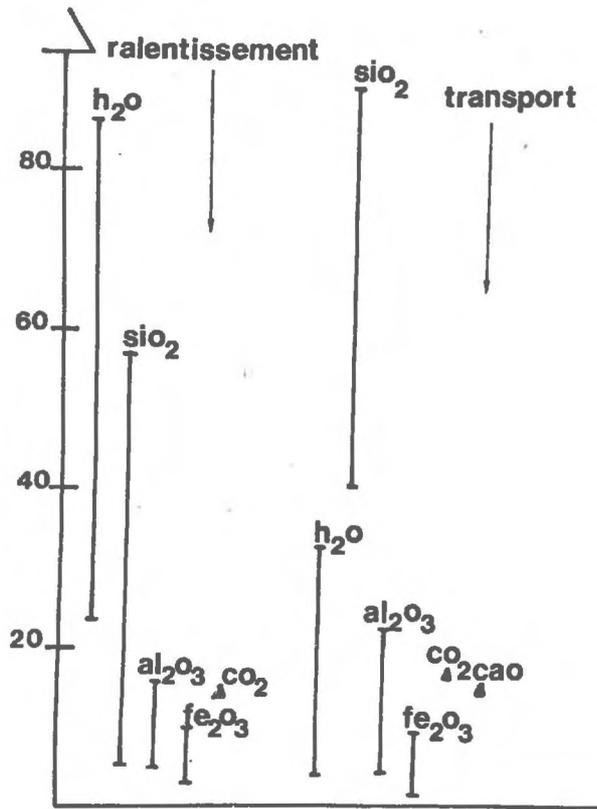
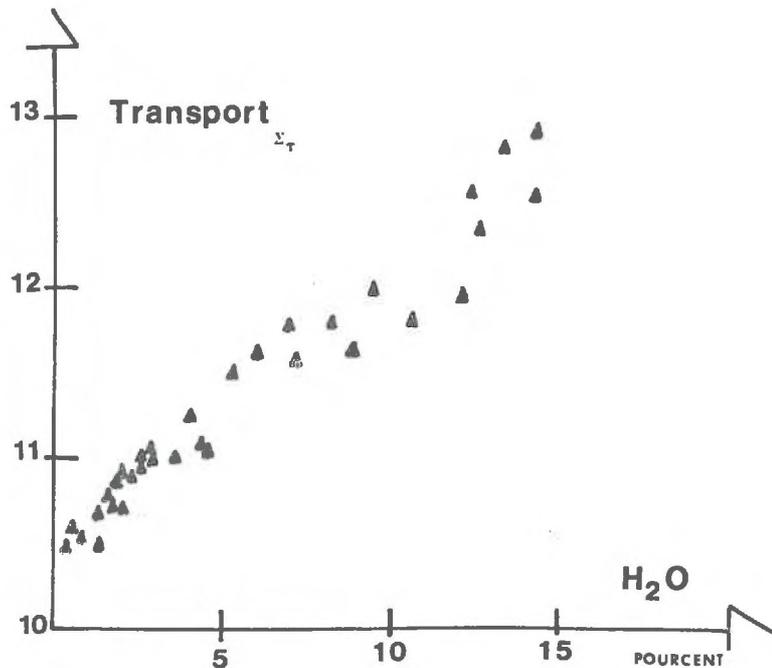


Fig. 6 - Evolution du ralentissement ($\xi\Sigma_s / \rho_s$), ρ_s densité sèche du sol.

Fig. 7 - Evolution du transport ($\Sigma_{t/\rho}$) en fonction de la teneur en eau de constitution.



en compte de la masse effective modifiée le ξ selon une formule assez complexe d'où l'on retient que la valeur de ξ pour l'hydrogène lié est de l'ordre du dixième de celle de l'hydrogène libre et que pour les éléments de masse grande devant 1 on peut utiliser une formule simplifiée du type

$$\xi = \xi_0 \left(1 - \frac{2 k T_0}{E} \right)$$

les deux effets ont par suite tendance à s'annuler.

- Quant à l'absorption, négligée dans la première phase du ralentissement, elle ne peut plus être complètement ignorée car certains éléments comme l'argent et l'indium ou le bore et les terres rares peuvent présenter des pics aigus de résonance dans la zone épithermique.

En fait nous verrons que la liaison chimique des éléments peut être ignorée pour les éléments lourds $A > 1$ et que l'eau liée peut être assimilée dans ce domaine à l'eau libre ; l'absorption épithermique est malgré tout négligeable devant l'absorption thermique (rappelons que l'In qui présente la plus forte résonance ne se trouve présent qu'à une teneur moyenne de 0,1 ppm dans les sols). Enfin l'étroitesse de la bande énergétique entre 1 eV et le pic maxwellien autorise à admettre que les neutrons ralentis passeront directement dans la zone thermique. La thermalisation contribue de manière négligeable au ralentissement et sera négligée tout au long de notre étude.

c) Diffusion thermique.

Les neutrons thermiques présentent une distribution maxwellienne des vitesses à laquelle correspond une énergie la plus probable $E_p = kT_n$ ($k = 1,386 \cdot 10^{-6}$ erg/d°, T_n température des neutrons). On doit tenir compte, dans le calcul des grandeurs thermiques, de cette température des neutrons qui est modifiée par la présence d'absorbeurs dans le sol. Nous avons dans une première approximation déterminé les valeurs des paramètres de diffusion et d'absorption pour l'énergie 0,025 eV en considérant les sections microscopiques données par l'ANL 5800. L'eau de constitution est traitée comme l'eau libre en ce qui concerne l'hydrogène.

La figure 8 donne pour un échantillonnage de sols les pourcentages d'influence des divers composants (oxydes des principaux éléments) sur les valeurs de sections efficaces de transport et d'absorption des sols. L'eau de constitution puis la silice sont les principaux agents de diffusion thermique et on peut noter l'importance du carbone dans les sols calcaires. Tous les composants moyens y compris le titane et le manganèse se répartissent par ailleurs le pouvoir absorbant des sols ; on remarque l'influence dominante du bore et celle plus limitée du calcium des sols calcaires.

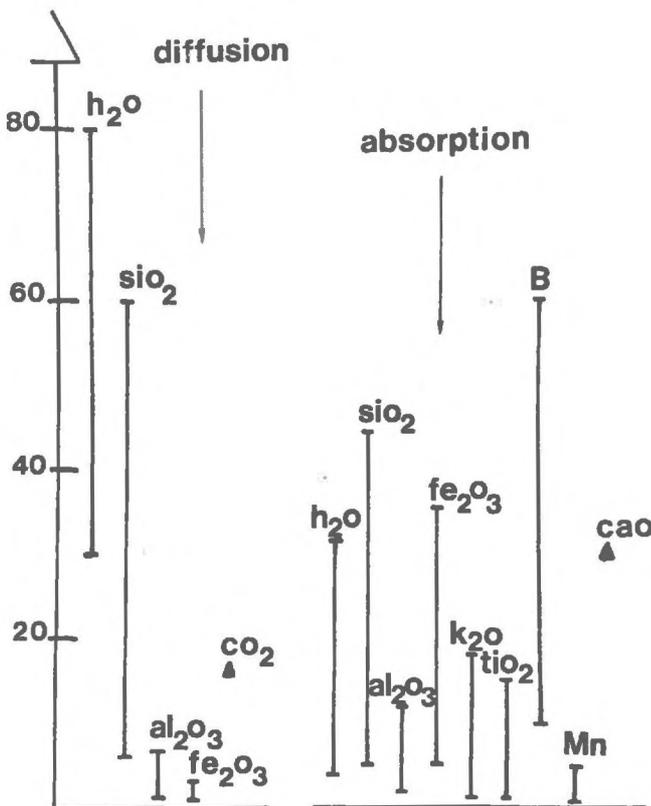
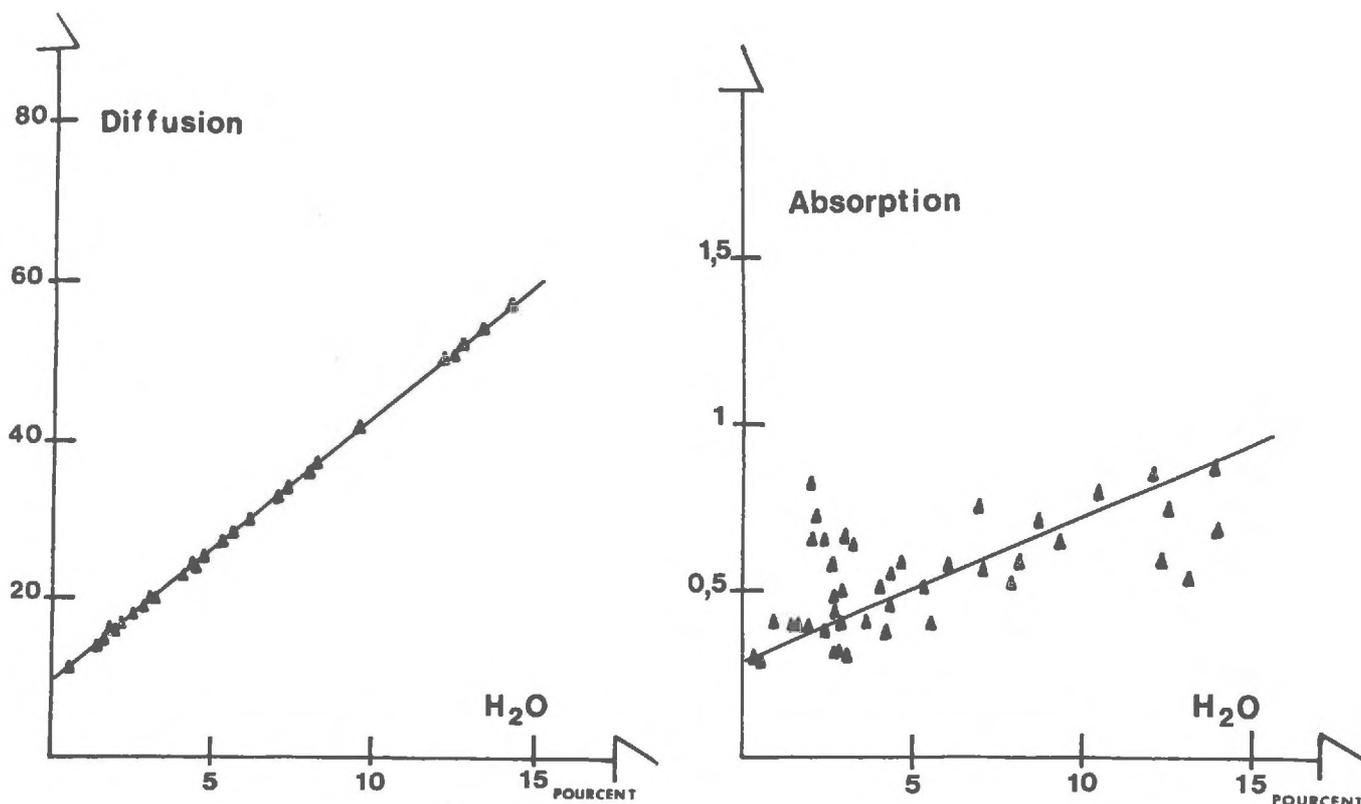


Fig. 8 - Pourcentage d'influence des divers composants du sol sur la diffusion thermique (Σ_s) et l'absorption (Σ_a) ; les valeurs pour CO₂ et CaO sont représentatives d'un sol calcaire.

Ces considérations éclairent les figures 9 et 10 où sont portées les valeurs de diffusion et d'absorption des sols secs en fonction de la teneur en eau de constitution. Malgré un bruit de fond sensible principalement dû à la silice, la diffusion thermique est régie par la teneur en eau liée ; cette dernière, nous l'avons vu, est en relation avec le pourcentage de silice, ce qui signifie qu'un sol sera d'autant plus diffusant qu'il sera argileux. Il n'y a par contre pas de relation entre l'absorption du sol et la teneur en eau liée et donc pas de phénomène de rattrapage de l'influence de l'eau de constitution par une absorption correspondante contrairement à ce que propose Mayerczick. Un sol argileux pourra être très diffusant et peu absorbant et inversement pour un sol sableux. Une analyse chimique des majeurs et des éléments traces reste nécessaire pour définir l'absorption des sols alors que la seule teneur en eau de constitution fixe la diffusion.



Figures 9 et 10 - Evolution de la diffusion totale (Σ_s/ρ) et de l'absorption totale (Σ_a/ρ_s) d'un sol, exprimées en mm²/g, en fonction de la teneur en eau de constitution.

3. Conclusion

Le comportement neutronique des sols humides est défini par l'eau libre (H_v) et le sol lui-même par l'intermédiaire de sa densité sèche (ρ_s) et de sa composition chimique ; les grandeurs représentatives sont les sections efficaces dans la formulation desquelles apparaissent explicitement H_v et ρ_s :

$$\Sigma = aH_v + b\rho_s$$

Le premier terme montre qu'à une variation d'humidité (profil hydrique par exemple) correspond une variation des propriétés neutroniques du milieu (profil neutronique) ; le second terme est caractéristique de l'influence propre du sol.

On distingue trois classes de composants : l'eau de constitution dont la teneur pouvant atteindre 15%, définit entièrement le pouvoir de ralentissement et de diffusion thermique du sol ; les composants majeurs, notamment la silice, dont la mesure est nécessaire à la définition du transport des neutrons rapides ; les éléments traces, bore en particulier, mais aussi terres rares comme le Gadolinium, dont la présence joue un rôle déterminant sur l'absorption thermique. Les deux derniers effets sont antagonistes car les éléments majeurs augmentent le pouvoir de ralentissement du sol alors que les éléments traces diminuent la diffusion thermique. La densité sèche est le facteur multiplicatif commun puisqu'elle fixe la teneur volumique de tous les éléments présents dans le sol.

Pratiquement dans un sol à vocation culturale, la restitution du profil hydrique à partir de la mesure du comportement neutronique du sol humide nécessite la connaissance de tous les éléments présents dans le sol en qualité (analyse chimique totale) et en quantité (densité apparente sèche), le sol devant être considéré par horizons différenciés.

B - LA REPRESENTATION DE L'HUMIDIMETRE A DETECTION DE NEUTRONS THERMIQUES

1. Choix du modèle physique.

La réponse d'un humidimètre à neutrons dépend de nombreux paramètres : teneur en eau, densité apparente sèche du sol, composition chimique, répartition spatiale de l'eau et du sol lui-même (couches), géométrie de mesure, nature du tube et des parois de la sonde, source et détecteur, etc.. Comme tout problème à paramètres multiples et plus spécialement dans ce cas où l'expérimentation est délicate, la seule étude expérimentale est inapte à expliquer puis à prévoir la réponse de l'humidimètre. Aussi a-t-on recours à un modèle de représentation susceptible après ajustement, d'être utilisé en simulation.

Le modèle physique recherché ne doit pas fournir des valeurs absolues de flux rapides et thermiques dans des conditions fixées une fois pour toutes tant pour la géométrie de mesure que pour le sol lui-même, mais des valeurs relatives à un milieu de référence (eau par exemple) et pour des conditions essentiellement variables des divers paramètres. Nous rejetons d'emblée les solutions complexes des codes neutroniques existant pour les réacteurs, qui supposent une définition précise des milieux, impossible à réaliser dans notre cas ; ils ne fournissent qu'une seule cartographie de flux à chaque passage après un calcul souvent fort long.

Le tableau ci-après résume les solutions proposées par divers auteurs en précisant les approximations retenues ainsi que les formulations analytiques utilisées :

- Tous les modèles existants ont pour objectif le calcul du flux thermique en fonction de la distance à la source considérée comme ponctuelle (on peut s'étonner qu'au cours de la mise en oeuvre de modèles complexes, type Monte Carlo par exemple, l'idée ne soit pas venue au chercheur de traiter de la répartition spatio-énergétique des neutrons rapides).

- Le comptage calculé est celui d'un détecteur linéaire ou ponctuel sans auto-absorption et dont le rendement suit généralement une loi en $1/v$.
- On ne trouve qu'une approche des conditions particulières de mesure créées par la présence d'un tube dans les mesures de profondeur.
- Le milieu considéré est homogène et infini, exception faite toutefois pour la mesure en surface (milieu semi-infini).
- Aucune approche des gradients de teneur en eau, de composition chimique et de densité sèche des sols n'est présentée.
- La diffusion thermique est toujours considérée à l'intérieur d'un groupe de diffusion et les différences apparaissent dans le mode de traitement du ralentissement.

Les modèles les plus sophistiqués ont été appliqués aux mesures de surface et généralement utilisés pour quelques problèmes expérimentaux particuliers ; la source y est le plus souvent définie par son spectre (divisé par exemple en 30 groupes chez Lippold) ; le ralentissement est traité en théorie multigroupe (18 chez Gemmel) ou par une méthode Monte Carlo, la diffusion inélastique étant selon le cas prise en compte ou ignorée. Ces codes très élaborés ne se justifient absolument pas pour l'étude de l'humidimètre à neutrons thermiques comme le soulignent d'ailleurs bien certains auteurs en indiquant le temps prohibitif nécessité par l'obtention d'un seul cas de mesure (à titre d'exemple 1 heure d'IBM 7094 pour Kirkegaard avec un code Monte Carlo).

Les modèles simplifiés se ramènent souvent à une formule analytique issue du premier terme d'un développement en série (cas de Semmler pour l'approximation de la théorie de l'âge) ; ils permettent le calcul de nombreux cas de mesure si on se limite aux variations de composition chimique des sols, mais paradoxalement ils ont peu été utilisés dans ce sens. Ils se révèlent, par contre, inaptes à l'étude des conditions géométriques de mesure (tube, hétérogénéité de teneur en eau,...). Toutefois on trouve chez Semmler une approche empirique de la prise en compte du tubage et Ølgaard a introduit, après Tittle, la théorie à trois groupes dans le cadre des modèles simplifiés.

Le modèle qui nous apparaît le mieux adapté doit s'appuyer sur l'approximation de la diffusion en théorie multigroupe. Cette application peut sembler abusive eu égard aux conditions de géométrie (source dans un tube vide ou à la surface du sol, mesure du flux thermique près de la source) qui relèveraient de la théorie plus évoluée du transport ; nous pensons cependant que le degré de simplification retenu doit être dicté plutôt par les résultats des simulations du modèle. La composante transitoire du flux perd de son importance dans une détermination relative de celui-ci. Nous reprenons point par point les différentes caractéristiques de ce modèle.

2. Paramètres du modèle

a) Source. Energie.

On trouvera en annexe une présentation des diverses sources utilisées pour les mesures de teneurs en eau des sols (annexe p.12). Les humidimètres à détection de neutrons thermiques, comportent un mélange d'AmBe (de moins en moins RaBe) dont la plage d'émission s'étend de 1 MeV à 11 MeV avec une moyenne à 5 MeV₅; mais il existe aussi à 300 KeV un pic fournissant 15% de neutrons.

Peut-on considérer une telle source comme monoénergétique ? En valeur absolue évidemment non. Mais puisque nous recherchons des valeurs relatives, il importe seulement de connaître l'influence du spectre source en fonction de la teneur en eau et du sol. La comparaison des comptages obtenus sur différents sols avec les sources AmBe et RaBe montre (fig.11) que cette influence est nulle ; on passe d'une source à l'autre en opérant simplement l'ajustement des flux thermiques pour l'eau pure (et non l'ajustement des taux d'émission) ; ce résultat s'étend au cas de la source de SbBe (cf. p.36), il précise les quelques données présentées par Goldberg et se trouve confirmé par le calcul montrant qu'il n'y a pas d'influence relative des pics secondaires des sources AmBe et RaBe. Notons que la relation serrée entre l'eau de constitution et le pouvoir de ralentissement des sols pouvait laisser prévoir ce résultat. En conséquence le modèle en milieu homogène considère une source monoénergétique de 4,5 MeV ; il faudra envisager à nouveau le problème dans le cas des sols hétérogènes même si la différence ne joue que sur les 15% de neutrons du pic secondaire ; on pourra alors prendre une source à deux niveaux d'énergie en appliquant la loi d'additivité des flux.

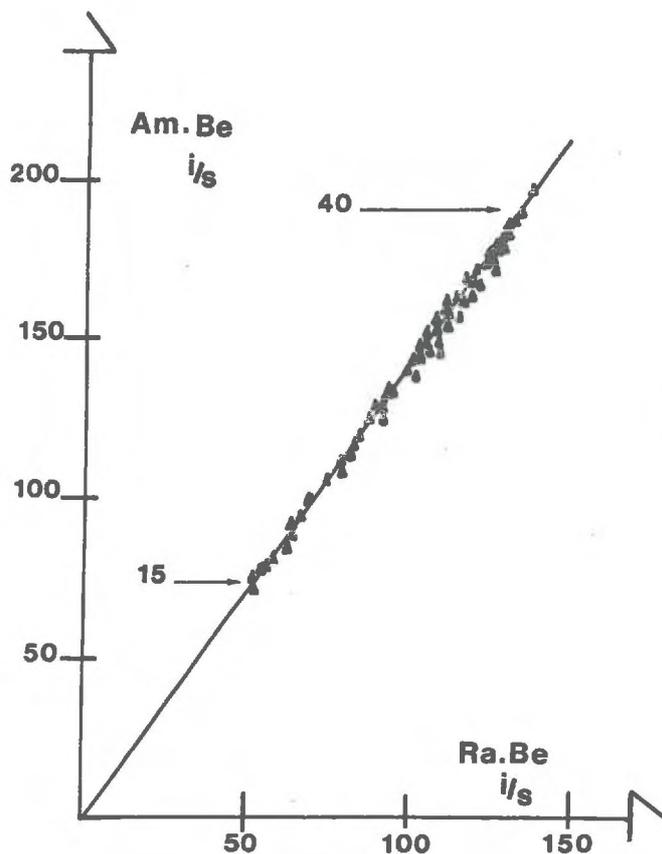


Fig. 11 - Comparaison des comptages obtenus sur différents sols avec les sources AmBe et RaBe ; les points sont alignés sur la droite des comptages origine-eau pure. Les valeurs 15 et 40 donnent la gamme des taux d'humidité.

b) Source. Géométrie.

Les sources classiques sont de deux types : source bâtonnet (dimensions : \varnothing 7 mm, L = 15 mm) et source annulaire (dimensions : H = 12 mm \varnothing ext. = 33 mm, \varnothing int. = 28 mm). Des mesures comparatives montrent que le passage d'un type de source à l'autre se fait par simple ajustement des valeurs dans l'eau. Pour nos calculs nous avons pris soit une source ponctuelle située au centre du tube, ce qui représente grossièrement le premier cas (la source peut en effet se trouver contre le détecteur en son centre et donc pas dans l'axe du tube) en diminuant considérablement les calculs par rapport à ceux présentés par Kobilyanski, soit une source circulaire, ce qui est aussi une importante simplification (voir par exemple p.40).

c) Détecteur. Energie.

Le type usuel de compteur contient un gaz enrichi en BF_3 ; sa réponse suit une loi en $1/v$ et la réponse de l'humidimètre est de la forme :

$$N = \int \eta(r) \phi_{th}(E, r) \sum_a(E) dE dr \quad \text{avec } \eta \text{ rendement électronique du compteur}$$

en considérant un spectre de Maxwell défini pour une température T_n des neutrons, on a, pour un rendement que nos mesures autorisent à considérer comme constant sur tout la longueur active l du compteur :

$$N = 2\eta \sum_a \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \int_0^l \phi_{th}(r) dr$$

Remarque : Le comptage effectivement obtenu avec un détecteur au bore introduit dans un sol humide contient une composante thermique et une autre épithermique. Si la distribution des neutrons thermique s'étend jusqu'à $5 kT_n$, le comptage réel fourni par l'humidimètre est donné par la formule :

$$N = k \int_0^l \phi_{th}(r) \sqrt{\frac{293}{T_n}} dr + 2k' \int_0^l \phi_{epi}(r) \sqrt{\frac{293}{5T_n}} dr$$

Afin de vérifier le bon ordre de grandeur de nos calculs, nous avons étudié la variation du rapport des comptages avec et sans blindage de cadmium dans un sol porté à différents taux d'humidité ; la figure 12 montre que le comptage dû au flux épithermique est faible lorsque l'humidité est supérieure à 20% ; néanmoins ce rapport augmente fortement aux faibles taux d'humidité où le flux thermique devient négligeable (nous avons porté les résultats sous la forme $\psi_{epi/th} = f(\varphi_{th})$ ce qui a pour intérêt de diminuer considérablement l'influence de la densité sèche puisque Ψ et φ sont tous les deux fonctions croissantes de ρ_s).

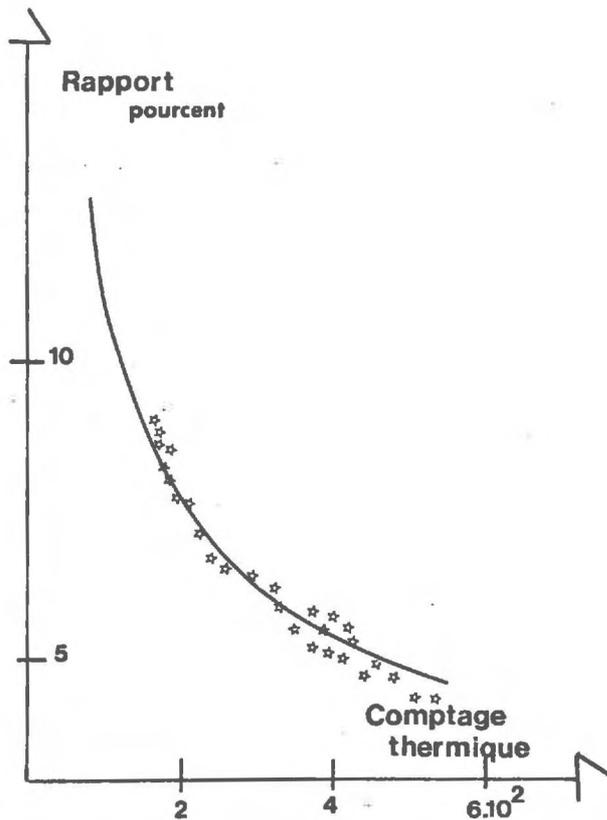


Fig. 12 - Rapport du comptage épithermique au comptage thermique pour un détecteur au BF_3 , en fonction du comptage thermique. La valeur $4 \cdot 10^2$ correspond à une humidité supérieure à 20%. ☆ points expérimentaux.

A partir de ces données, on a déterminé les comptages pour un sol en fonction de l'humidité en utilisant soit la formule complète, soit le premier terme. Si les résultats sont, comme il est normal, rapportés à une même valeur pour l'eau pure, on constate que l'incidence du flux thermique se traduit par un décalage de l'ensemble des comptages qui correspond à un point volumique environ. En toute rigueur c'est la formule complète qui doit être utilisée, cependant pour les sols agronomiques, un coefficient unique de corrélation pour tous les sols permet de ne considérer que le flux thermique. Cette remarque prend tout son sens avec les compteurs à ^3He pour lesquels le rapport épithermique sur thermique est plus important et qui nécessitent une étude expérimentale complémentaire. On trouvera en annexe (p. 60) les formules proposées pour chaque type de compteur.

d) Détecteur. Géométrie.

Le compteur est supposé occuper tout l'espace disponible dans le tube et le flux utile est celui qui se développe sur les parois du tube et sur la longueur active du compteur.

e) Tube.

Ce point important est esquivé dans la plupart des modèles : le raisonnement consiste à admettre que l'influence du tubage, faible, ne dépend ni de la teneur en eau ni du sol lui-même.

Nous avons étudié cette influence en mesurant successivement dans des tubes de \varnothing 15 mm et 45 mm, le flux thermique en fonction de la distance à une source d'AmBe, grâce à un détecteur BF_3 de faibles dimensions (\varnothing 1 cm, longueur 3 cm). Comme le signale Tittle pour les mesures géophysiques, on observe un étalement du flux thermique dans l'axe du tube, lié à un effet dépressif qui se traduit par une diminution de sensibilité (fig. 13 et 14). Le libre parcours moyen des neutrons est augmenté et les composantes radiales et axiales des longueurs de ralentissement et de diffusion se différencient. Le point commun des courbes de répartition de flux indique la distance où l'influence du tube est nulle : cette distance est évidemment fonction de l'âge thermique des neutrons donc de l'énergie d'émission des sources, de la teneur en eau et du sol lui-même.

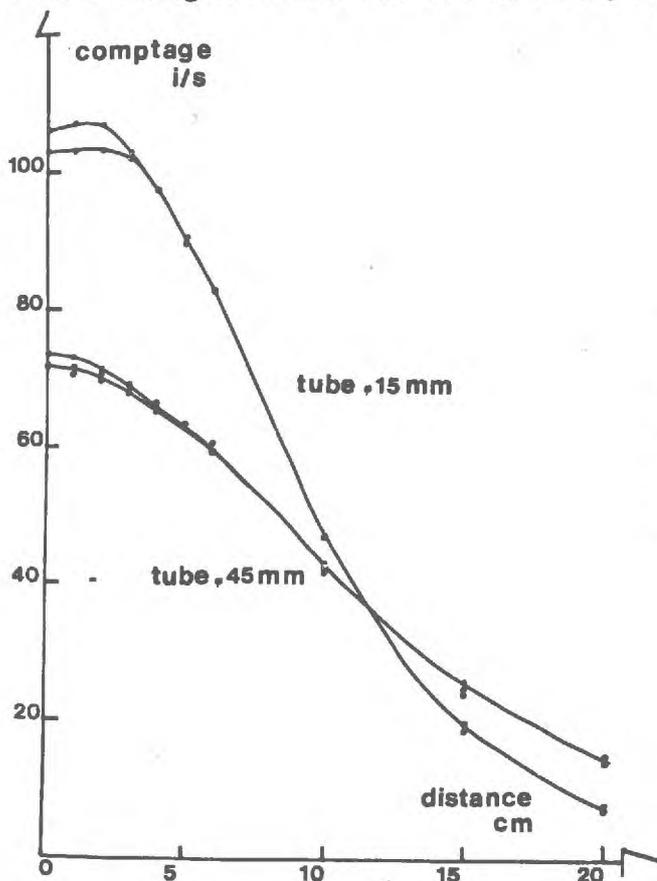


Fig. 13 - Répartition des neutrons thermiques dans l'eau en présence de tubages de 15 mm et 45 mm de diamètre ; on remarque que les courbes se coupent à environ 10 cm.

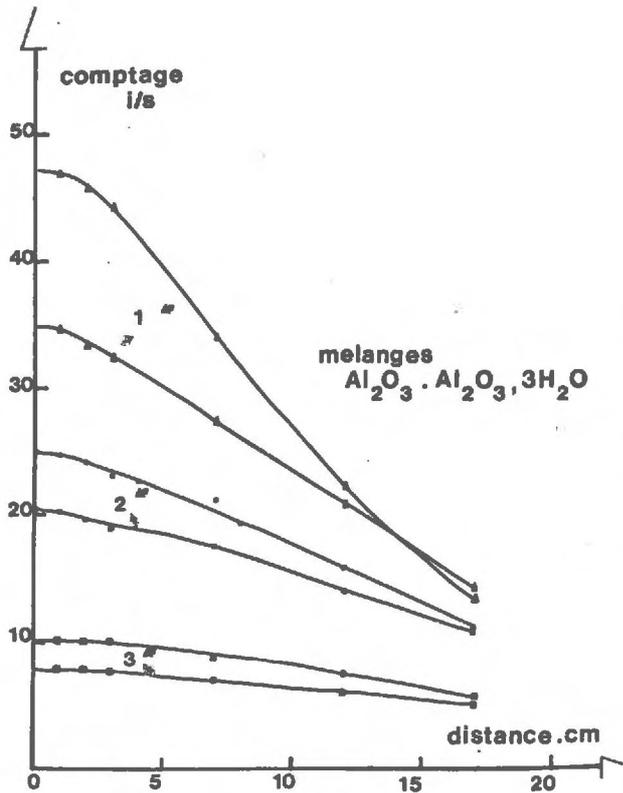


Fig. 14 - Répartition des neutrons thermiques pour des mélanges $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ représentatifs de différents taux d'humidité ; on peut voir que le point commun des courbes se déplace lorsque la teneur en eau diminue. Les tubes utilisés sont de diamètres 15 mm et 45 mm, les teneurs en eau sont de : 1, 45% ; 2, 25% ; 3, 10%.

On a confirmé ces observations en comparant la réponse d'un humidimètre introduit à l'aide d'un tube de 45 mm dans un sol porté à diverses teneurs en eau, avec un calcul à trois groupes dans l'approximation de la diffusion et à une dimension (le tube n'étant pas pris en compte) ; après un recalage des valeurs correspondant au sol saturé, le résultat calculé présente vis à vis de la mesure un écart allant jusqu'à 3% d'humidité absolue.

Pour résoudre ce problème deux approches sont possibles : la première remplace l'ensemble sol plus tube par un milieu homogène équivalent en considérant des valeurs fictives de longueurs de ralentissement et de diffusion thermique. Pour cela Semmler introduit dans sa formule analytique un terme correctif a sur la longueur de diffusion, ajusté à partir des mesures. En analysant les expériences d'Etamad et de Tittle nous proposons de remplacer les valeurs de ralentissement et de diffusion par :

$$L_i^2 = L_{i_0}^2 + a_i^2$$

Pour L_s , cette intervention consiste à dire que le vide créé par le tube augmente l'effet de la diminution de la section efficace de l'hydrogène aux énergies élevées ; la modification de L doit, quant à elle, préserver les rapports L/D et L^2/D pour ne pas changer l'expression analytique du flux thermique. Aussi écrivons-nous :

$$D' = \frac{1}{3 \Sigma_{t_2}} + c_t^2 \Sigma_a \qquad L'_s = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} = \sqrt{L_s^2 + c_t^2}$$

Ces corrections rendent compte de la dépression du flux ; on simule l'étalement par une transformation linéaire sur la distance r à la source. L'ajustement des constantes amène à proposer une valeur commune de 2,6 cm dans le cas d'un tube de 45 mm et on remarque chemin faisant que nous ne sommes pas loin des propositions de Kruzik qui suggère une augmentation de l'âge dans l'axe du tube telle que τ devient $\tau + R^2$. On utilise alors pour représenter la mesure en profondeur, un modèle à une dimension corrigé, le flux thermique étant relatif à l'axe du tube. Les coefficients portant sur les grandeurs physiques utilisées, on décrit bien les phénomènes entraînés par la présence du tubage.

La deuxième approche consiste à prendre en compte réellement le vide créé par le tube : Semmler utilise en théorie à deux groupes à une dimension une sphère creuse, transparente, semi-transparente ou absorbante vis à vis des neutrons thermiques : l'influence de la cavité de rayon R passe par les rapports R/L et R/L_s , c'est-à-dire dépend de la teneur en eau et du sol lui-même, ce qui confirme notre précédente étude.

Il est préférable pour d'évidentes raisons de géométrie de traiter le problème dans un modèle à deux dimensions (R, z). Ce cas n'a pas été abordé dans la littérature aussi nous proposons une solution donnant le flux thermique en fonction de r et de z et nous l'analysons plus loin.

f) Milieux.

Les modèles présentés ne traitent que le cas d'un seul milieu ; d'autres plus sophistiqués, de type Monte Carlo, peuvent aisément prendre en compte plusieurs milieux. Nous proposons ici une approche relativement simple

du traitement des milieux à n couches en séparant le cas des interfaces cylindriques (volume cylindrique pris en compte par l'humidimètre autour du tube) et celui des interfaces planes (traduction en profil neutroniques des profils hydriques).

g) Dimension.

Nous avons pris le parti de proposer et d'utiliser deux modèles : le premier à deux dimensions, non formulé de manière analytique, traite les conditions géométriques de mesure ; influence du tube d'accès, mesure en volume limité, volume de mesure de l'humidimètre, traduction des profils hydriques (indirectement il permet l'étude des neutrons épithermiques pour lesquels la prise en compte réelle du tube est très importante). Pour les problèmes liés essentiellement aux variations physico-chimiques des sols, qui sont peu ou pas abordés, un modèle simplifié à une dimension avec formulation analytique, éventuellement corrigé pour la prise en compte du tubage, est satisfaisant.

h) Diffusion thermique.

Les neutrons thermiques sont traités dans un groupe de neutrons d'énergie moyenne $E = k T_n$, T_n température des neutrons pour laquelle nous avons adopté la prescription de Cohen

$$T_n = T (1 + c \Delta) \quad \Delta = \frac{2A \sigma_a (k T_0)}{\sigma_d}$$

avec $c = 0,46$ comme donné par Wigner.

Dans le calcul du transport thermique, l'eau est traitée à part suivant la formule donnée par Kalnaes :

$$\sum_{t_2, H_2O} = \sigma_{t_2, H_2O} \left(0,047 + 0,053 \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \right) \rho_{H_2O}$$

Le coefficient de diffusion est calculé par la formule de Wigner qui permet de tenir compte de la capture

$$D = \frac{\Sigma_A}{3 \Sigma_T \Sigma_{tA}} \quad \Sigma_{tA} = \Sigma_T - \rho \Sigma_A \quad \Sigma_T = \Sigma_a + \Sigma_A$$

1.i) Liaison chimique.

Le transport thermique est influencé par la liaison chimique des éléments présents dans le sol ; ceci nous a déjà conduit à considérer pour l'eau une formule particulière de Σ_{tr} . Il n'existe cependant pas d'étude similaire relative au sol, mis à part une expérience de Fisher sur une poudre de SO_4Ca en cours de cristallisation et les remarques de Churaev et Yemel-Yanov qui les a d'ailleurs amenés à conclure en sens opposé. Le problème revient en quelque sorte à savoir si les éléments du sol verront leur section de diffusion augmenter fortement à cause de leur liaison dans le sol, et si l'hydrogène de constitution devra être considéré ou non comme l'hydrogène de l'eau. En fait une dérive de ces sections efficaces par rapport à celles attendues ne sera sensible sur la mesure neutronique que si elle se traduit par une variation significative du flux thermique. Or en étudiant la réponse en flux thermique dans un sol en fonction de la valeur de la section efficace de diffusion de l'hydrogène de constitution, on constate que pour 13% d'eau de constitution, une variation de 20 barns (30 à 50 barns) se traduit par une erreur de mesure de 3 points volumique, la sensibilité n'étant pas modifiée. On peut donc en conclure que l'influence de la liaison chimique au niveau du flux thermique a toute chance d'être faible.

Pour étayer cette hypothèse, nous avons réalisé une expérience consistant à comparer à une valeur théorique, calculée sans tenir compte de la liaison chimique des éléments autres que l'hydrogène et en assimilant l'hydrogène du sol à celui de l'eau libre, le comptage obtenu d'une part sur un sol normal et d'autre part sur un sol reconstitué à partir des composants donné par l'analyse chimique du premier sol. Les deux "sols" ainsi analysés ne diffèrent que par la nature des liaisons chimiques entre constituants et l'écart avec les valeurs calculées est significatif de l'influence de la différence de nature des liaisons sur le flux thermique. On trouvera en annexe p.15 quelques détails sur l'expérience.

Eléments autres que l'hydrogène.

On a comparé une dolomie réelle et artificiellement reconstituée à partir de ses deux composants, soit CO_3Ca et CO_3Mg . De même nous avons procédé à une comparaison pour des sols contenant très peu d'eau de constitution : un sol calcaire à 2,8% d'eau et un sol non calcaire à 2% d'eau ; ces derniers ont été reconstitués à partir de la teneur en composants majeurs, soit SiO_2 , Al_2O_3 et TiO_2 .

L'influence de la liaison chimique des éléments autres que l'eau est négligeable à l'échelle des phénomènes observés, ce que signifie la concordance des relations d'ajustement représentées par les points images des comptages expérimentaux et calculés dans les deux cas (fig. 15).

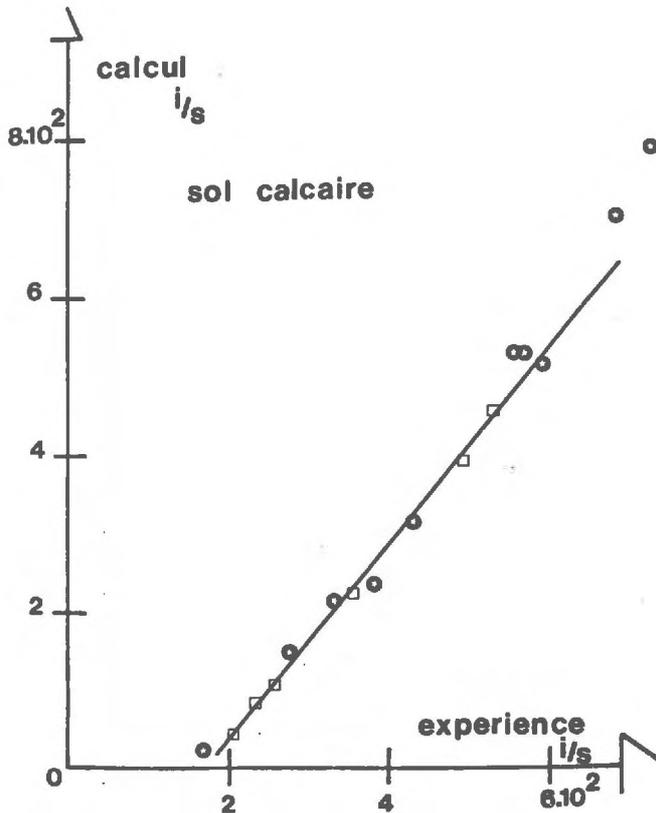


Fig. - Comparaison des résultats calculés et expérimentaux pour un sol calcaire : \odot sol réel \square sol reconstitué.

Hydrogène de constitution

Nous avons considéré la liaison du type kaolinite en tant que représentative d'un type d'argile, en comparant le flux thermique en fonction de l'humidité totale pour un kaolin technique et deux mélanges le reconstituant quant à la nature et au nombre d'atomes par gramme, mais ne comportant évidemment pas les liaisons chimiques du minéral (tableau).

Tableau

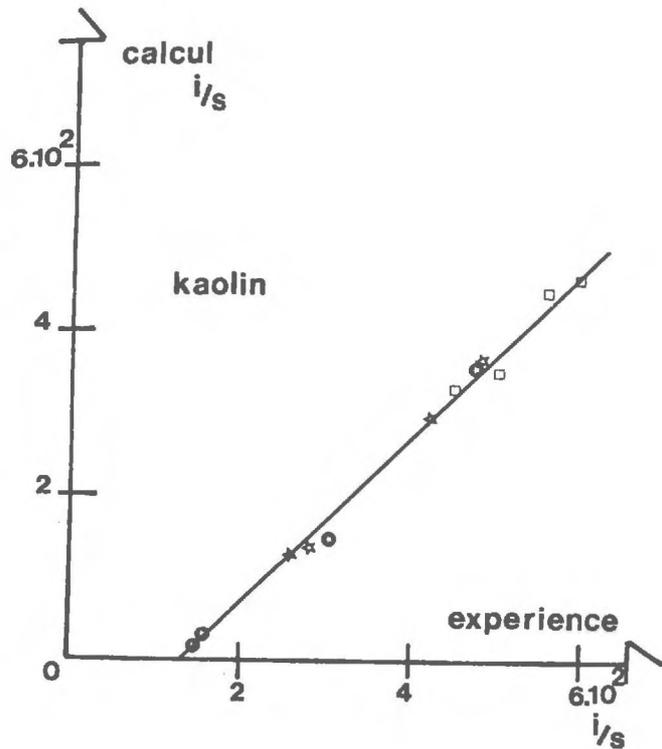
Milieu	Formule
Kaolin	$2 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{H}_2\text{O} + \text{eau}$
sable + alumine + hydrargillite	$2 \text{SiO}_2 + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O} + \text{eau}$
sable + alumine	$2 \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{eau}$

La comparaison entre le calcul qui rappelons-le identifie hydrogène de l'eau libre et hydrogène du sol, et l'expérience confirme l'hypothèse retenue (fig. 16) : l'eau de constitution des sols a un comportement identique à l'eau libre.

Pratiquement ce résultat signifie que pour un sol de densité sèche ρ_s ayant une teneur pondérale h_p d'eau de constitution, si son humidité volumique est H_v , la valeur "lue" par l'humidimètre sera $H_v + \rho_s \cdot h_p$ sans que ce dernier soit à même de distinguer entre les deux types d'eau.

Ce résultat simplifie dans un sens l'étalonnage des humidimètres ; en contre partie aucune méthode neutronique en simple ou double comptage thermique ou rapide ne permettra de distinguer les deux eaux présentes dans le sol. Signalons toutefois que l'analyse du temps de vie des neutrons permet d'après Mills de distinguer les liaisons chimiques de l'hydrogène et qu'il serait intéressant de connaître la section efficace effective de diffusion de l'hydrogène du sol que notre trop grossière méthode de comparaison nous fait assimiler à celle de l'hydrogène de l'eau.

Fig. 16- Comparaison des résultats calculés et expérimentaux pour un kaolin réel \odot , reconstitué avec sable et alumine \star , reconstitué avec sable, alumine et hydrargillite (\square).



j) Ralentissement.

Le mode de traitement du ralentissement est lié de manière étroite à la teneur en eau du milieu, puisque l'on pourra passer d'un schéma où les neutrons sont ralentis par petits bonds discrets (sol sec) à celui où ils peuvent par un seul choc perdre toute leur énergie (cas de l'eau). Afin d'éviter un modèle complexe type Monte Carlo, nous avons admis que le modèle doit rendre compte de manière exacte des phénomènes pour la gamme d'humidité rencontrée dans les sols agronomiques (entre 15% et 40% environ) ; la réponse sur les sols secs pourra être imprécise, mais puisque l'eau est le facteur ralentisseur (y compris sous la forme d'eau de constitution) nous recalons les flux thermiques obtenus sur le flux thermique expérimental de l'eau. Il eut été plus précis de prendre pour référence le flux thermique dans un sol saturé bien connu ; malheureusement ces données manquent totalement dans la littérature (on ne trouve de valeurs que dans l'ANL pour le sable saturé et chez Tittle pour le calcaire, mais les renseignements sur la composition chimique totale des milieux utilisés ne sont pas donnés) ; quant à nos expériences sur sols

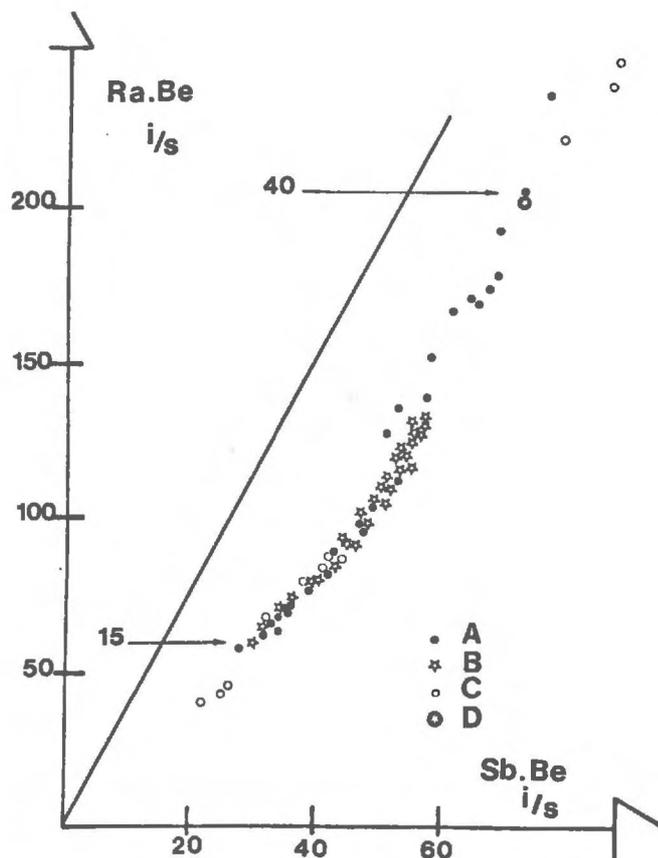
saturés, il leur a manqué nos mesures récentes des constantes thermiques pour pouvoir être exploitées dans ce sens. Prenant donc comme objectif un sol peu humide, nous proposons un traitement du ralentissement par l'approximation de la diffusion de la théorie multigroupe. Nous admettons que le flux rapide peut être représenté par séparation des variables et que les longueurs de ralentissement de chaque groupe peuvent être calculées par la formule de l'âge en posant :

$$L_1^2 = L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_n^2$$

Cette hypothèse de calcul suppose que la part de la diffusion inélastique dans le ralentissement peut être négligée, ce que nous allons vérifier. En effet il y a bien diffusion inélastique dans les sols humides compte tenu de l'énergie élevée des neutrons des sources d'AmBe (annexe p.12) ; dans un travail tout récent Krejz propose un formalisme simplifié permettant un calcul du ralentissement en théorie multigroupe tenant compte de cette diffusion inélastique. Il ne semblait pas nécessaire d'entreprendre un travail aussi important pour l'humidimètre à neutrons et nous nous sommes contenté, par une expérience simple, de vérifier l'influence différentielle de cette phase du ralentissement sur le flux thermique.

On a comparé pour un même milieu les flux thermiques résultant du ralentissement des neutrons issus de deux sources artificielles : RaBe, avec des neutrons jusqu'à 11 MeV, SbBe, avec un pic à 26 KeV. L'expérience, répétée pour différentes humidités et densités sèches et présentée sur la figure 17, met en évidence l'existence d'une relation unique entre les deux types de ralentissement (avec et sans diffusion inélastique). Les résultats du calcul de Krejz confirme notre expérience pour les éléments comme Al, Ca, Mg et Si. Il serait par ailleurs intéressant de faire un calcul et une expérience avec le fer puisque l'on trouve dans les sols jusqu'à 15% d'oxyde de fer (sols ferrallitiques) et que ce dernier a une importante section efficace de diffusion inélastique.

Fig. 17 - Comparaison des comptages obtenus sur différents milieux (A, alumine ; B, sols limoneux ; C, dolomie ; D, sable) ; l'écart des points vis à vis de la droite origine-eau pure s'explique par la géométrie de mesure imposée par la source Sb-Be.



Une courte étude reproduite en annexe (p.22) a permis de fixer le nombre de groupes : dans le cas de l'humidimètre à détection de neutrons thermiques et pour la gamme d'humidité agronomique, on ne constate aucune augmentation de précision relative quand le nombre de groupes dépasse trois (deux rapides et un thermique). La théorie à trois groupes donne même une meilleure concordance avec la répartition expérimentale du flux thermique : lorsque le nombre de groupes est plus élevé, on rejoint la description par la théorie de l'âge et l'erreur due au ralentissement par l'hydrogène augmente. Nous avons adopté un schéma de ralentissement à deux groupes rapides qui permet en outre le traitement des neutrons épithermiques en deux groupes. Toutefois pour des raisons de simplicité, nous avons décrit, et cela est suffisant, le ralentissement en un seul groupe dans le traitement des problèmes de géométrie de mesure.

Le calcul des longueurs de ralentissement pour chaque groupe est déduit de la formule de l'âge ; pour l'eau, on obtient une valeur de 37 cm² en utilisant les tables de sections efficaces d'Abagyan ; l'énergie d'émission est de 4,5 MeV, le premier groupe est limité à 2,5 MeV et le second s'étend jusqu'à 5 k Tn. Comparé aux valeurs expérimentales connues, ce résultat est trop faible ; il s'explique par le fait que la théorie de l'âge qui suppose un ralentissement continu n'est pas adéquat dans ce cas. Pour pallier ce défaut nous pouvons apporter une correction à la valeur donnée par la formule de l'âge ; à celle proposée par Ølgaard qui modifie les sections efficaces de ralentissement pour l'hydrogène en particulier, nous avons préféré le formalisme de Wigner : le premier choc des neutrons sur les noyaux d'hydrogène se traduit par un libre parcours moyen important qui donne une valeur élevée de la moyenne du carré de la distance de ralentissement qui est mal prise en compte par l'âge ; on introduit dans le calcul de L_s une correction de premier choc ainsi qu'une correction de dernier choc qui conduit aux formules suivantes : (L₁ premier groupe rapide, L₂ second groupe)

$$\left\{ \begin{aligned} L_1^2 &= \frac{1}{3 \Sigma_{T, E_0}} + \int_{E_A}^{E_0} \frac{dE}{3 \int \Sigma_A \cdot \Sigma_{E_A} \cdot E} \\ L_2^2 &= \frac{1}{3 \Sigma_{T, E_f}} + \int_{E_f}^{E_A} \frac{dE}{3 \int \Sigma_A \cdot \Sigma_{E_A} \cdot E} \end{aligned} \right. \quad \Sigma_{TE} \text{ section efficace du sol humide à l'énergie E}$$

La nouvelle valeur de la longueur de ralentissement dans l'eau est alors de 50,8 cm² ce qui est conforme aux résultats expérimentaux fournis par l'ANL 5800 (valeur moyenne 50 cm²). On note au passage les résultats de Krejz (49,56 cm²) et d'Ølgaard (53,5 cm²). Deutch et Semmler ont présenté d'autres corrections de premier choc et d'autres jeux de sections efficaces. Nous avons comparé ces différents formalismes dans le calcul de la réponse de l'humidimètre en fonction de la teneur en eau : l'écart est inférieur à 5% pour les valeurs absolues et à 2,5% pour les variations de flux thermique relatives à une même variation d'humidité, les modèles étant ajustés sur la réponse dans l'eau. Nous avons donc conservé notre modèle pour la valeur plus exacte qu'il donne de l'âge dans l'eau. Nous donnons en annexe (p.28) quelques résultats pour divers milieux à divers taux d'humidité et certaines valeurs de la littérature.

3. Formulation mathématique.

a) Modèle à deux dimensions. A partir des travaux de Glauber et Taliansky, nous proposons une formulation pour deux groupes de neutrons en intégrales de Fourier ; celle-ci permet l'application, par le principe des sources fictives, des conditions imposées au flux neutronique sur les interfaces limites.

Le modèle représente le milieu sol-tube par un ensemble de deux milieux séparés par une interface cylindrique (d'où le choix des coordonnées) : le milieu tube considéré comme non diffusant et non absorbant vis à vis à la fois des neutrons thermiques et des neutrons rapides (si l'on veut traiter le cas de tubes en fer, absorbant de neutrons thermiques, ou en polyéthylène, diffusant de neutrons rapides, ceux-ci sont considérés comme un milieu supplémentaire entre tube vide et sol), le milieu sol ayant ses propriétés propres de diffusion et de ralentissement. Les équations de diffusion sont appliquées au milieu sol, l'interface tube-sol servant à fixer les conditions aux limites pour les flux neutroniques rapides et thermiques.

L'approximation de la diffusion pour deux groupes conduit à résoudre le système suivant dans le milieu sol :

$$\begin{cases} -D_1 \nabla^2 \phi_1 + \Sigma_1 \phi_1 = \rho_1 \\ -D_2 \nabla^2 \phi_2 + \Sigma_2 \phi_2 = \Sigma_{1 \rightarrow 2} \phi_1 \end{cases}$$

où ρ_1 représente le terme source rapide.

En coordonnées cylindriques, la solution de ϕ_1 sera

$$\phi_1(r, z) = -4\pi L^{-2} \rho_1(r, z)$$

$$\text{avec } L = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - k_1^2 \quad k_1^2 = \frac{1}{L_1^2}$$

On explicite ρ_1 comme une distribution de sources fictives sur l'interface tube-sol et l'on peut écrire :

$$\rho_1 = \frac{Q}{4\pi D_1} \cdot \frac{\delta(r-R)}{2\pi R} \cdot g(z)$$

source réelle, atteignent les parois du tube ; elle est donc donnée par l'angle solide sous lequel on voit un élément de tube dz depuis l'origine. En exprimant cette fonction en intégrale de Fourier, on montre en écrivant l'égalité source-courant (détail des calculs en annexe p.30) que le flux rapide s'exprime par la formule :

$$\Phi_1 = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\eta R K_1(\eta R)}{\xi_1 R K_1(\xi_1 R)} K_0(\xi_1, z) e^{-i\eta z} d\eta$$

Cependant la diminution de la section efficace de l'hydrogène aux énergies élevées a pour conséquence une augmentation du libre parcours moyen des neutrons à l'occasion du premier choc. Les sources fictives issues des neutrons rapides émis par la source réelle ne sont pas isotropes ; l'égalité du courant sur l'interface tube-sol dans le plan z constant doit se faire avec la composante radiale des sources distribuées. On calcule alors l'intégrale des sources fictives sur l'interface afin de l'ajuster au taux d'émission de la source réelle. La formule de Φ_1 après calcul de $f(\eta)$ est :

$$\Phi_1 = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\eta R} (1 + \eta R)}{\xi_1 R K_1(\xi_1 R)} K_0(\xi_1, z) e^{-i\eta z} d\eta$$

Pour la source annulaire, nous considérons une distribution de sources isotropes sur l'interface au niveau $z = 0$; la formule se simplifie et l'on obtient pour Φ_1 l'expression :

$$\Phi_1 = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\xi_1 R K_1(\xi_1 R)} K_0(\xi_1, z) e^{-i\eta z} d\eta$$

Il s'agit dans ce dernier cas d'une approximation puisque nous ne tenons aucun compte des neutrons émis par la source annulaire et qui commencent par traverser le tube avant de pénétrer dans le sol ; mais il faut être vigilant et ne pas retomber dans le défaut de modèles très sophistiqués construits sur des milieux connus de manière très approchée, ce qui est le cas de l'ensemble source-tube-sonde.

Une remarque simple permet de montrer le lien entre ces trois formulations ; en effet la formule de ϕ_1 met en évidence le produit de deux transformées de Fourier dont l'une représente la distribution des sources élémentaires $q(z)$ sur le tubage et l'autre le flux élémentaire $\varphi(r, z)$ fourni par l'une quelconque de ces sources ; le flux rapide est la résultante du produit de convolution de ces deux fonctions :

$$\phi_1(r, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(r, z) q(z - z') dz'$$

Dans l'incidence du tube sur la répartition des neutrons thermiques, on distinguera donc :

- un effet de dispersion des sources rapides qui ne dépend que de la géométrie de mesure puisque $q(z)$ a par exemple pour transformée de Fourier

$$\frac{q}{4\pi^2 R} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\eta R} (1 + \eta R) e^{-i\eta z} d\eta \quad (\text{dans le cas de sources anisotropes})$$

- un effet dû à la présence de la cavité sur la diffusion des neutrons qui se traduit par la présence de termes en $\frac{1}{L_1} R$ dans l'expression $\phi_1(r, z)$ (notons au passage que ce n'est pas rendre compte de l'anisotropie due au tube sur la diffusion). Le tubage intervient dans la perturbation du comptage par rapport au milieu homogène par son rayon R et ceci compte tenu des paramètres de ralentissement et de diffusion des neutrons puisque

$$\frac{1}{L_1} = \sqrt{\eta^2 + \frac{1}{L_1^2}}$$

Par suite une différence dans le formalisme utilisé pour tenir compte de la distribution des sources sur le tubage se traduira par une différence dans l'étalement du flux mais n'a pas de répercussion sur les valeurs relatives calculées pour la réponse de l'humidimètre ; ce que l'on vérifie en comparant les divers formalismes.

En fait le défaut majeur du présent formalisme est que l'anisotropie de diffusion créée par le vide du tube n'est pas prise en compte. Aussi proposons nous en annexe (p.33) une formulation nouvelle du flux thermique obtenue en

remplaçant l'ensemble sol-tube par deux milieux dont l'un, milieu tube, est supposé posséder les mêmes caractéristiques radiales que le sol lui-même et des caractéristiques axiales qui supposent une anisotropie des longueurs de ralentissement^{et} de diffusion, définie à partir des propositions de Rumiantzev; l'autre milieu est tout simplement le sol lui-même où l'on considère une isotropie de diffusion et de ralentissement.

Pratiquement l'humidimètre à neutrons utilise un tubage de faible diamètre (souvent 40 mm), le flux thermique est mesuré près de la source et l'on ne s'intéresse qu'à des valeurs relatives à un milieu de référence ; par suite, dans les études faisant intervenir un sol homogène ou pouvant être représenté par n milieux à interfaces cylindriques, la formulation la plus simple (celle de la source annulaire) peut convenir. Pour rendre compte de l'influence de strates horizontales, il faudrait faire intervenir l'étalement et l'anisotropie des sources fictives ou, mieux, introduire une anisotropie de longueur de ralentissement et de diffusion. Nous verrons qu'il est déjà possible d'obtenir de bons résultats avec la formule simplifiée qui, de plus, recouvre le cas des sources annulaires. Notons cependant que nos calculs ont été construits avec la formule relative aux sources fictives anisotropes pour le cas des interfaces cylindriques.

Pour le calcul du flux thermique on conserve la seconde formulation du flux rapide qui permet de résoudre la seconde équation différentielle du système. Le flux thermique est décomposé en deux parties ϕ_2^0 et ϕ_2^* issues des sources de neutrons rapides du premier groupe et de sources fictives distribuées sur les parois du tube ; la seconde équation différentielle est équivalente au système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} -D_2 \nabla^2 \phi_2^0 + \Sigma_2 \phi_2^0 = \Sigma_{1 \rightarrow 2} \phi_1 \\ -D_2 \nabla^2 \phi_2^* + \Sigma_2 \phi_2^* = P_2^* \end{array} \right.$$

Les équations ci-dessus étant linéaires, on peut écrire :

$$\phi_2 = \phi_2^0 + \phi_2^*$$

On calcule ϕ_2 de manière analogue à ϕ_1 d'où

$$\phi_2^0 = \frac{Q}{4\pi^2 D_2} \frac{L_2^2}{(L_1^2 - L_2^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(\eta) K_0(\xi_1, z) e^{-i\eta z} d\eta$$

avec

$$f_1(\eta) = \frac{e^{-\eta R} (1 + \eta R)}{\xi_1 R K_1(\xi_1 R)}$$

et

$$\phi_2^* = \frac{Q}{4\pi^2 D_2} \frac{L_2^2}{(L_1^2 - L_2^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(\eta) K_0(\xi_2, z) I_0(\xi_2, R) e^{-i\eta z} d\eta$$

Il reste à déterminer $f_2(\eta)$ ce que l'on fait en exprimant qu'il n'y a dans le tube ni source ni absorbeur de neutrons et que par suite le courant entrant est égal au courant sortant :

$$- D_2 \left. \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \right|_R = 0$$

On en déduit le flux thermique pour $r > R$

$$\phi_2(r, z) = \frac{Q}{4\pi^2 D_2} \frac{L_2^2}{L_1^2 - L_2^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\eta R} (1 + \eta R) \left[\frac{K_0(\xi_1, z)}{\xi_1 R K_1(\xi_1 R)} - \frac{K_0(\xi_2, z)}{\xi_2 R K_1(\xi_2 R)} \right] e^{-i\eta z} d\eta$$

Remarque : Si l'on veut traiter des milieux à n couches planes, le calcul s'effectue différemment : en effet le terme source de la forme $\frac{\delta(z-R)}{2\pi R} g(z)$ conduit à une intégrale imaginaire si l'on commence l'intégration qui donne ϕ_1 par le terme en η (voir p.39). Ceci est dû à la présence de la fonction de distribution des sources sur les parois du tube et confirme l'impossibilité déjà signalée par Meem de prendre en compte simultanément les deux coordonnées r et z . Il est plus simple de mettre à profit la convolution sur z . Tout le reste du calcul peut alors se faire en considérant des sources

élémentaires situées à une même cote $z = 0$ par exemple (dans le cas de la source annulaire, cette solution rend compte de la réalité). Le terme source est du type

$$p_1 = \frac{\delta(r-a) \delta(z)}{2\pi R}$$

et par un calcul similaire à celui déjà fait en début de chapitre on obtient pour formulation du flux rapide l'expression

$$\varphi_1(r, z) = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \int_0^{+\infty} \frac{e^{-s_1 z}}{s_1} J_0(kr) J_0(kR) k dk$$

Les mêmes conditions aux limites pour le courant thermique nous donnent l'expression du flux thermique

$$\varphi_2(r, z) = \frac{Q}{4\pi^2 D_1} \frac{L_2^2}{L_1^2 - L_2^2} \int_0^{+\infty} \left[\frac{e^{-s_1 z}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 z}}{s_2} \right] J_0(kr) J_0(kR) k dk$$

On tiendra compte de la dispersion des sources sur les parois du tube en appliquant une convolution du type

$$\Phi_2(r, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_2(r, z) \cdot q(z - z') dz'$$

$q(z)$ ayant été défini plus haut.

L'intégration conduite dans le cas où R est nul (absence de tube) fournit l'expression classique du flux en théorie à deux groupes à une dimension.

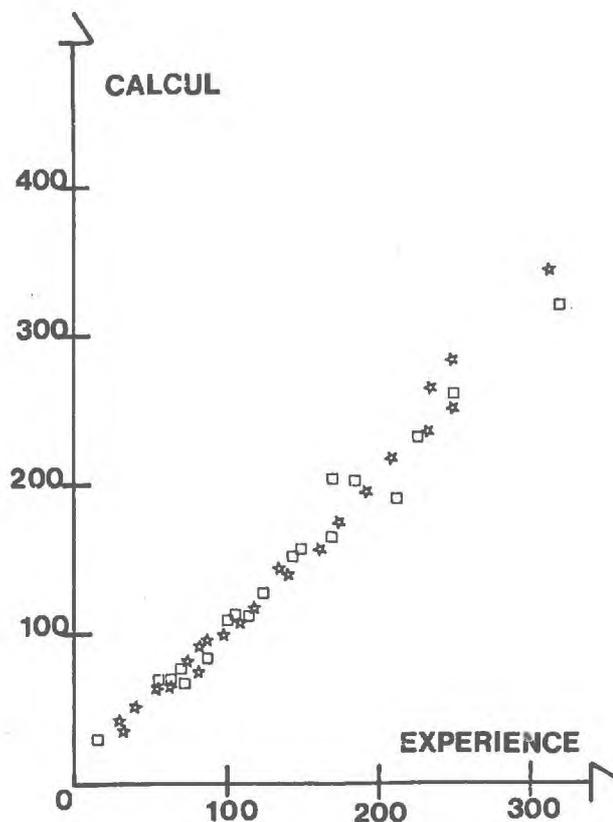
Vérification du modèle. Celui-ci donne une représentation correcte de l'influence du tube comme le montre la figure 18 où sont portés les résultats

calculés et expérimentaux (expérimentation menée par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen) obtenus en sols sableux pour des diamètres extérieurs de tube de 45 mm et de 60 mm ; on a considéré le tubage en aluminium comme non absorbant et non diffusant et pris la valeur du flux sur la paroi du tube comme représentative du comptage de l'appareil, d'où la formule :

$$N = k \frac{e Q}{4\pi^2 D_1} \frac{L_2^2}{L_1^2 - L_2^2} \int f(\eta, \xi, r) \frac{\sin 2e}{2e} d\eta$$

La valeur pour l'eau est obtenue à 8% par défaut.

Figure 18- Points images des résultats expérimentaux et théoriques obtenus sur un sol sableux pour des diamètres extérieurs de tube de 45 mm (☆) et 60 mm (□).



Remarque : Le calcul de N se fait par intégration de la fonction de n suivant la méthode des trapèzes ; le domaine d'intégration est limité à une précision résultante de 0,005 relative et subdivisée à raison de 320 points par période

suivant le principe de Simpson (d'après étude faite par M. Thirriot). Pour les fortes valeurs de z le domaine d'intégration peut devenir tel que les fonctions $I_{0,i}$ soient trop grandes pour être calculées directement bien que le produit $K_{0,i} I_{0,i}$ soit limité ; on devra alors avoir recours à un développement limité de ce produit.

b) Modèle à une dimension. C'est le cas limite obtenu lorsque le rayon du tube tend vers zéro. Puisqu'il s'agit avec cet outil d'étudier l'influence, sur la réponse de l'humidimètre, des variations physicochimiques du sol, une théorie à trois groupes est préférée, d'où la formulation analytique suivante :

$$\Phi_H(z) = \frac{Q L_3^2}{4\pi D_3 z'} \sum_{i=1,3} \frac{L_i^2 e^{-\frac{z'}{L_i}}}{\prod_{\substack{k=1,3 \\ (k \neq i)}} (L_i^2 - L_k^2)}$$

avec $z' = \alpha z + \beta$ $L_i^2 = L_i^2 + a^2$

Vérification du modèle. Celle-ci permet de tester le calcul des paramètres neutroniques des sols ; on n'a trouvé nulle part une telle vérification pour les modèles présentés dans la littérature. Puisque le comptage de l'humidimètre dépend à la fois de l'humidité H_v , de la densité apparente sèche ρ_s et de la composition chimique du sol, toutes choses étant constantes par ailleurs, la méthode qui s'impose est celle de l'ajustement des comptages expérimentaux et calculés par l'intermédiaire des constantes neutroniques des sols à partir des valeurs déterminées expérimentalement de H_v , ρ_s et composition chimique. On a en principe une seule droite d'ajustement sur les points images d'un sol donné et, si le modèle rend compte des variations de composition chimique, pour l'ensemble des sols. Ce mode de présentation a l'inconvénient de répercuter sur le comptage calculé la totalité des erreurs : détermination de l'humidité volumique et de la densité sèche, détermination de la composition chimique du sol sec et enfin aptitude du modèle. On répartit mieux les erreurs en comparant d'une part l'humidité pondérale mesurée et d'autre part l'humidité calculée à partir du comptage expérimental pour la densité sèche et la composition chimique du sol étudié. La figure 19 présente

les résultats obtenus sur les sols définis par leurs analyses chimiques dans le cas d'un humidimètre de profondeur tel que décrit p.54 : le modèle estime l'humidité expérimentale à 12,5%. L'analyse plus fine des résultats dans deux cas précis d'étalonnage en laboratoire montre une tendance à surestimer la participation de la densité sèche sur le comptage ; bien que cette tendance apparaisse de manière plus nette dans les autres modèles présentés, notamment celui d'Ølgaard, elle se situe en ce qui nous concerne dans la limite de précision de 12,5%. On ne peut donc l'étudier valablement par l'intermédiaire des résultats d'étalonnage ci-dessus présentés et nous n'en tenons pas compte à ce stade de notre travail : en conséquence le modèle à une dimension en milieu homogène équivalent et traité par le formalisme de Wigner en théorie à trois groupes est considéré comme représentatif des comptages obtenus avec l'humidimètre à neutrons thermiques.

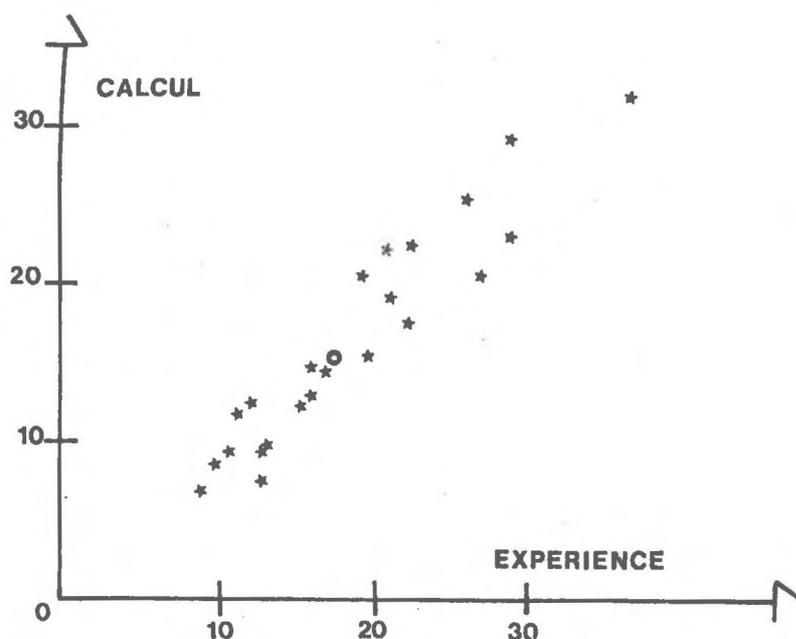


Fig. 19 - Comparaison de la représentation théorique avec l'expérience. Points moyens pour chaque sol.

Valeurs calculées et expérimentales d'humidité pondérale données en pourcent.

LES HUMIDIMETRES A NEUTRONS

A - LES APPAREILS

Des informations détaillées sont données dans les rapports de l'AIEA : Neutron moisture gauges (n°121, 1970) et Commercial Portable Gauges for radiometric determination of the density and moisture content of building materials (n°130, 1971) ; cependant nous rappelons certains éléments essentiels des humidimètres.

1. Technologie des appareils.

Ils sont toujours constitués de trois composants : source de neutrons rapides, détecteur et électronique d'alimentation et de comptage.

a) Source de neutrons.

Le mélange AmBe⁺ sous forme de poudre d'alliage est le plus employé ; un double encapsulage protège, en principe, l'opérateur contre les risques de contamination nucléaire (Am) et chimique (Be). Le rayonnement gamma de l'Am est de faible énergie (60 KeV) et une protection de 5 cm environ de polyéthylène suffit à porter la dose d'irradiation à une valeur inférieure à 50 mR/h au contact et à 2,5 mR/h à un mètre. On étudie actuellement l'emploi d'une source de 10 mCi en vue de réduire très sensiblement les problèmes d'irradiation. Il est probable que les sources de ²⁵²Cf remplaceront un jour les mélanges AmBe dans la mesure où leur prix sera compétitif malgré leur

+ activité 100 mCi

faible période ; en effet ces sources ont un spectre de fission qui les rend plus efficaces et nécessite une plus faible activité.

b) Détecteur de neutrons.

Le compteur classique des humidimètres est à remplissage de gaz BF_3 . Il présente une faible sensibilité et doit être alimenté sous 2000 volts, ce qui est un problème réel pour les appareils de terrain ; il est par contre peu sensible aux gamma. Les appareils français actuels sont équipés du compteur 3 NE 13 TC : 3 coups/neutrons cm^2 , 13 cm de longueur active. Les détecteurs à ^3He présentent une bien meilleure sensibilité mais d'une part le rapport épi-thermique sur thermique est important et d'autre part ils sont sensibles aux rayonnements gamma ; on peut envisager, grâce à eux, l'usage de sources de faible activité. Signalons enfin l'intérêt des scintillateurs (^6Li par exemple) qui permettent la mesure combinée des neutrons thermiques et des rayonnements gamma (densité) ; leur utilisation nécessite l'emploi de photomultiplicateurs peu sensibles aux variations de température rencontrées sur le terrain.

c) Electronique.

Deux techniques de comptage sont employées : échelle de comptage et intégrateur ; la précision de la mesure dépend de la statistique d'émission des neutrons, explicitée par la loi de Poisson :

$$\sigma = \sqrt{N} \quad \text{pour l'échelle de comptage}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{N}{2\theta}} \quad \text{pour l'intégrateur, } \theta \text{ constante de temps}$$

$N \pm 2\sigma$ à 95% des comptages.

Les comptages habituellement mesurés sont de l'ordre de 1000 i/s dans l'eau et varient entre 150 et 400 dans le sol. Pour un comptage de 300 i/s qui correspond à une humidité de l'ordre de 25%, on obtient une précision de 1% en comptant pendant 68 secondes. L'intégrateur donne une précision de 2% si la constante de temps est de 20 secondes (valeur normale).

d) Position source-détecteur.

La position de la source par rapport au détecteur est déterminée à partir de la répartition spatiale du flux thermique. La figure 20 montre l'allure de l'évolution des flux thermiques en fonction de la distance pour diverses teneurs en eau. On distingue trois zones en fonction de la sensibilité : positive entre 0 et 25 cm ; nulle vers 25 cm ; puis négative au-delà. Les pétroliers utilisent la troisième zone qui nécessite des sources de forte activité mais présente l'avantage d'augmenter le volume de mesure. Les agronomes se sont plutôt orientés vers la première qui est compatible avec des appareils de faible encombrement, présentant peu de risques radioactifs. Afin d'obtenir une réponse linéaire en fonction de l'humidité, on préconise le montage d'une source de type annulaire au centre de la partie active d'un détecteur de 10 cm environ de longueur active ; cette configuration centre la mesure au niveau de la source ce qui est important pour l'étude du passage de couches. La position de la source en bout du détecteur, souvent utilisée par les américains est de ce point de vue un inconvénient certain.

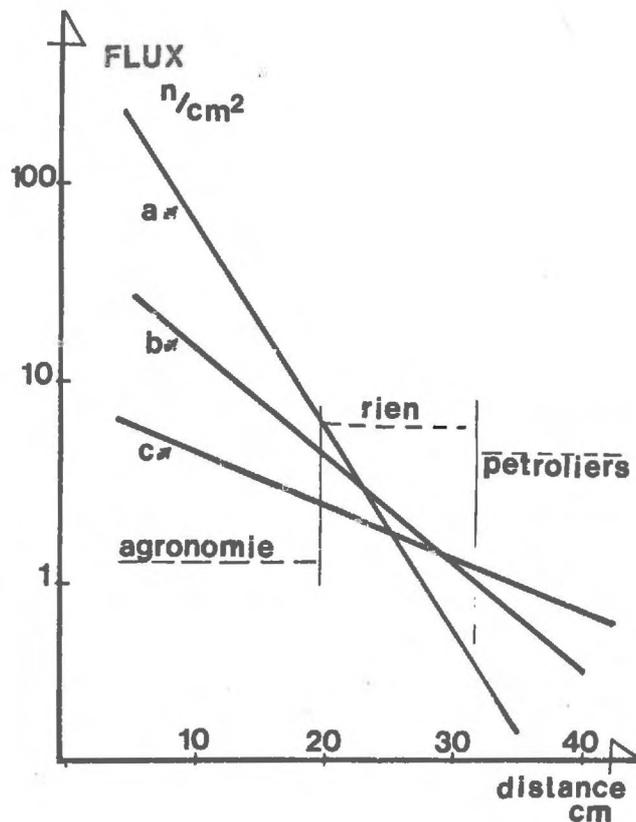


Fig.20-Allure des répartitions du flux thermique pour différents taux d'humidités ($a > b > c$).

Types actuels de sondes à neutrons (étude comparative menée par la RILEM à Brno)

appareil	source	activité (mCi)	émission	détecteur	position source
A	Ra-Be	10	$1,5 \cdot 10^5$	BF_3	en bout
B	Am-Be	100	$2,5 \cdot 10^5$	BF_3	milieu
C	Ra-Be	10	$1,5 \cdot 10^5$	BF_3	"
D	Am-Be	30	$0,8 \cdot 10^5$	LiI (cristal)	en bout
E	Am-Be	30	"	^6Li (cristal)	"
F	Am-Be	10	$2,5 \cdot 10^4$	^3He	milieu
G	Pu-Be	-	10^5	Gm + Gd	"

2. Types d'appareils.

Ceux-ci devraient dépendre du problème étudié, mais tel ne semble pas avoir été le souci des constructeurs. La version modulaire est la plus adaptée, les trois composants de l'humidimètre devant être traités séparément.

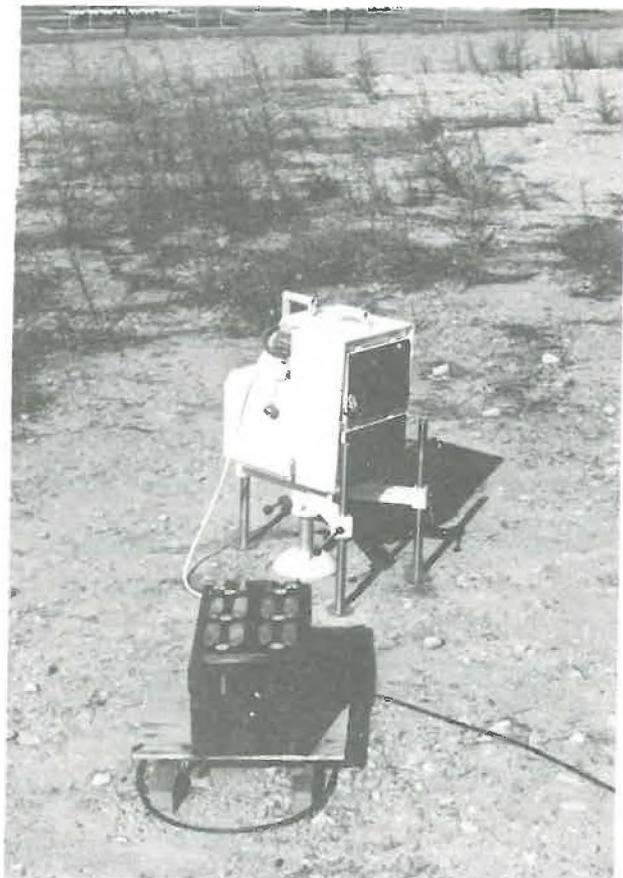
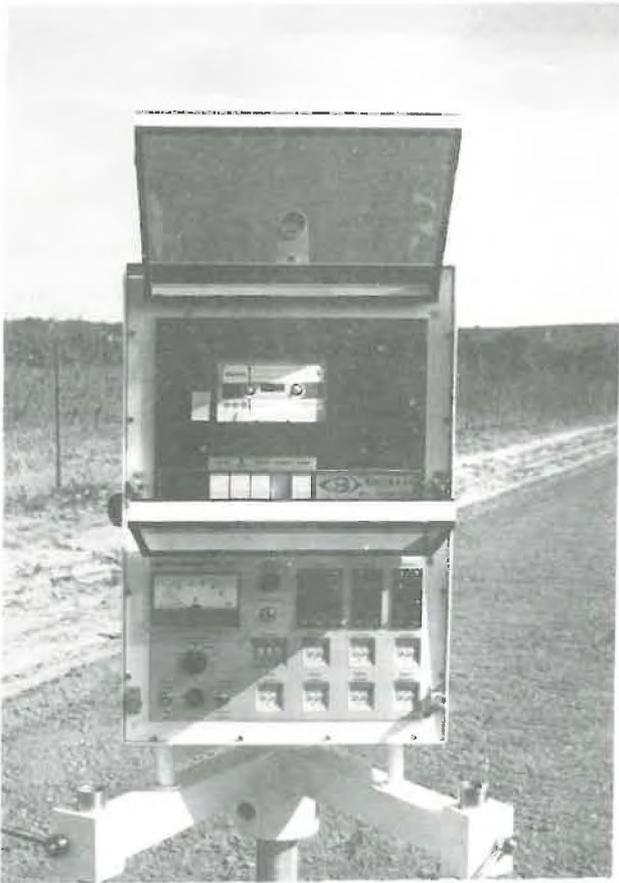
a) Capteur d'humidité

Cet appareil est aujourd'hui pratiquement inexistant en agronomie. Il consisterait en un ensemble source, détecteur et électronique simplifiée, fournissant un signal électrique par l'intermédiaire d'un intégrateur ; il devrait pouvoir servir d'avertisseur pour le pilotage d'irrigation qui à l'heure actuelle est effectué, dans certains pays, par tensiomètres.

b) Mesure en profondeur;

Si l'agronome veut connaître la répartition du stock en eau de ses cultures à des intervalles de temps assez grands (10 jours environ), il souhaitera posséder un appareil portatif, fiable, peu onéreux, pour faire de nombreuses mesures dans des conditions souvent difficiles (culture de canne à sucre par exemple). Un seul appareil anglais approche ce besoin ; une version d'humidimètre simplifié est par ailleurs en cours d'étude, il comporte une source peu

active (10 mCi), un compteur sensible (^3He) et une électronique à fonctionnement très simplifié ; son prix devrait être faible. Signalons que la difficulté de retrouver le tube de sonde dans une culture de canne à sucre a conduit à la construction d'une sonde pouvant être utilisée dans des trous non tubés⁺. Si l'agronome désire connaître le comportement hydrodynamique de son sol face à l'irrigation ou à la pluie, des mesures à pas de temps court et précis, mais aussi sans interruption de jour comme de nuit et au moment des épisodes de pluies et d'irrigation sont nécessaires : l'appareil doit être automatisé et une seule version française en existe aujourd'hui sous la forme d'un dispositif modulaire : la mesure est programmée et éventuellement déclenchée par un signal extérieur (relais d'un pluviomètre ou signal d'un capteur d'humidité à neutrons) ; les résultats des sondages ou des mesures à postes fixes en profondeur ou en surface sont enregistrés sur une cassette sous forme digitale, puis transférées sur ruban imprimé ou perforé par l'intermédiaire d'un interface de lecture.



+ Pal à neutrons mis au point à Madagascar



c) Mesure en surface.

Si l'on ne doit pas perturber le milieu ou bien si l'on désire une mesure intégrée sur une grande surface, un ensemble source-détecteur est posé sur le sol ou déplacé à une distance fixe parallèlement à la surface. L'inconvénient de la méthode est qu'elle est très sensible à la couche d'air sol-appareil ; d'autre part les couches superficielles ont une grande importance sur le comptage, l'humidimètre ne fait pas une mesure moyenne de l'humidité sur la zone explorée par les neutrons. On a montré, mais ceci intéresse les mesures à poste fixe ou susceptibles d'être faites avec destruction du milieu, que l'introduction de la source dans le sol, le détecteur restant en surface, augmente la sensibilité de la méthode en donnant une valeur moyenne des couches de surface jusqu'à 15 cm environ.

d) Mesure au laboratoire sur colonnes de sols.

Très employé, ce type de mesure est effectué par transmission gamma ; mais la variation de la densité sèche est un handicap et la méthode double gamma $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$ est alors préconisée. Nous avons mis en oeuvre un dispositif de mesure par transmission de neutrons thermiques : la source thermique est obtenue par un petit massif de polyéthylène possédant en son centre une source d'AmBe ; la courbe d'étalonnage a une pente négative et le comptage doit être effectué à l'aide d'un

compteur sensible. Ces mesures ne peuvent intéresser que des colonnes de faible diamètre (5 cm maximum) mais ce sont justement celles dont la mesure gamma est la plus délicate ; en effet la méthode double gamma $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$ se présente dans de mauvaises conditions pour le Cs. Un autre dispositif peut être envisagé à partir de l'utilisation des neutrons rapides pour les colonnes de plus grand diamètre.

e) Humidité standard.

L'humidimètre standard dont nous traitons les problèmes d'étalonnage est le plus utilisé à l'heure actuelle : avec des électroniques d'alimentation et de comptage de divers types, il comprend toujours un ensemble source AmBe-détecteur BF_3 . La source est annulaire au centre du détecteur, un 3 NE 13 TC ; l'ensemble est contenu dans une sonde diamètre extérieur 39 mm qui permet son utilisation comme humidimètre de profondeur dans des tubages en alliage d'aluminium de 40/45 mm. Le comptage résulte de l'intégration du flux thermique entre 0 et 5 cm.

B - LA COURBE D'ETALONNAGE

1. Définition.

La réponse d'un humidimètre à détection de neutrons thermiques dépend, pour une géométrie de mesure donnée, de l'humidité, de la densité apparente sèche et de la composition chimique totale du sol par l'intermédiaire de ses paramètres neutroniques. La courbe d'étalonnage est définie par l'ensemble des points de coordonnées H_v , humidité volumique exprimée en pourcent et N, vitesse de comptage en impulsions par seconde ; elle est spécifique d'un type de sol et paramétrée en densité sèche (fig. 21).

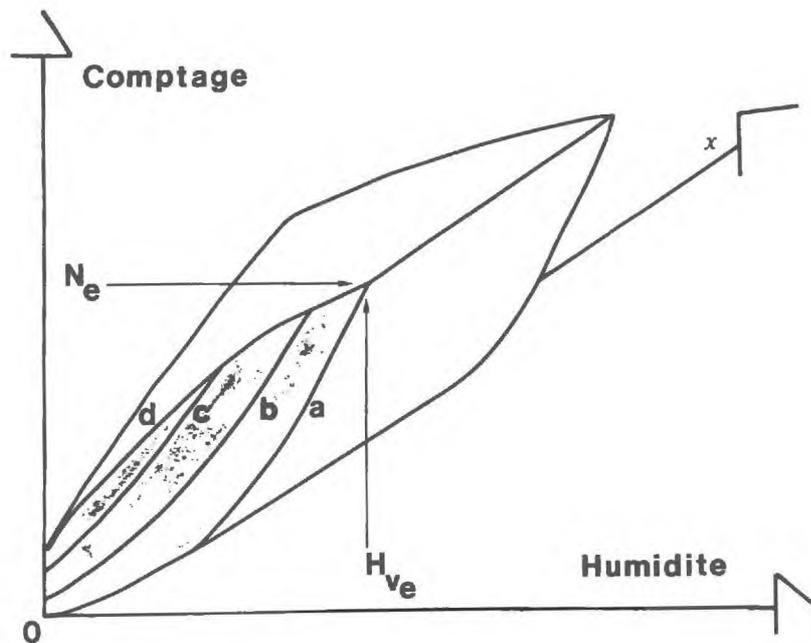


Fig.21 - Représentation du domaine de réponse de l'humidimètre à neutrons thermiques. Chaque plan (χ) est représentatif d'un sol défini par sa composition chimique. N_e et H_{ve} sont les valeurs dans l'eau. a, densité 0 (milieu fictif Eau-air) ; b et c densités limites agronomiques (1,2 à 1,8) ; d, courbe correspondant au sol saturé.

2. Méthodes d'étalonnage.

a) Etalonnage expérimental.

Il consiste à mesurer sur un sol considéré comme homogène et de dimensions infinies, c'est-à-dire supérieures à celle du volume intéressé par la mesure, d'une part l'humidité pondérale et la densité sèche, d'autre part le comptage donné par l'humidimètre.

- Etalonnage au laboratoire. On réalise sur sols remaniés des gammes de teneur en eau ; chaque point mesuré, obtenu après malaxage et compactage soigné d'un échantillon dans un fût de 300 litres, fournit un comptage. Précise, cette méthode est d'autant plus lourde qu'il faut travailler sur des quantités importantes de terre pour simuler le milieu infini (en général 400 kg). Nous avons déterminé les

points d'étalonnage des composants élémentaires : Al_2O_3 , SiO_2 , CO_3Ca et $\text{CO}_3\text{Ca}-\text{CO}_3\text{Mg}$; puis, pour faire intervenir l'eau de constitution, d'un kaolin ($2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{H}_2\text{O}$) et enfin d'un sol limoneux à vocation agricole⁺. La dispersion des points obtenus (fig. 22) confirme nos hypothèses relatives au comportement neutronique des sols. En vue de séparer l'effet dû à l'eau de constitution, on a porté les

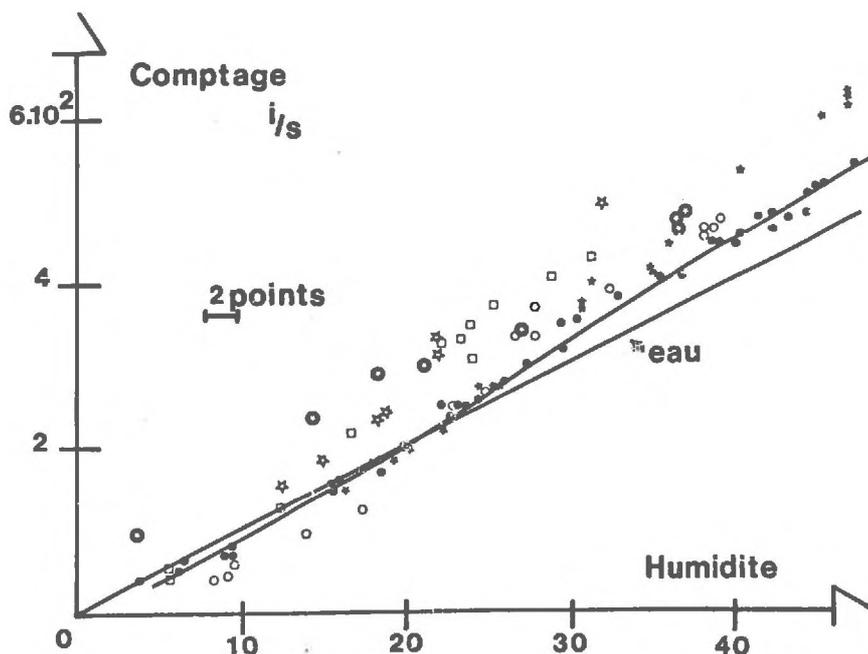


Fig. 22 -Points d'étalonnage obtenus au laboratoire ; chaque sigle correspond à un sol ou un composant spécifique.

points d'étalonnage par rapport à la variable humidité totale (eau libre + eau de constitution) ; la nouvelle dispersion observée (figure 23) est du même ordre de grandeur que la précédente, elle indique l'influence du sol "sec", due aux différences de pouvoir absorbant des constituants et des sols. Le classement des points d'après le critère densité sèche (sans tenir compte de la nature du milieu) met en évidence l'influence de ce paramètre (fig. 24).

Ce mode d'étalonnage fournit des résultats précis sur les valeurs d'humidité volumique ; il présente néanmoins certains défauts trop souvent sous-estimés : puisqu'il faut compacter un échantillon de sol pour chaque taux d'humidité

+ Composition chimique en pourcent : H_2O , 2,89 ; SiO_2 , 42,5 ; Al_2O_3 , 4,3 ; Fe_2O_3 , 4 ; CaO , 25,7 ; MgO , 1,5 ; K_2O , 0,8 ; TiO_2 , 0,2 ; B, 13 ppm ; Mn, 860 ppm.

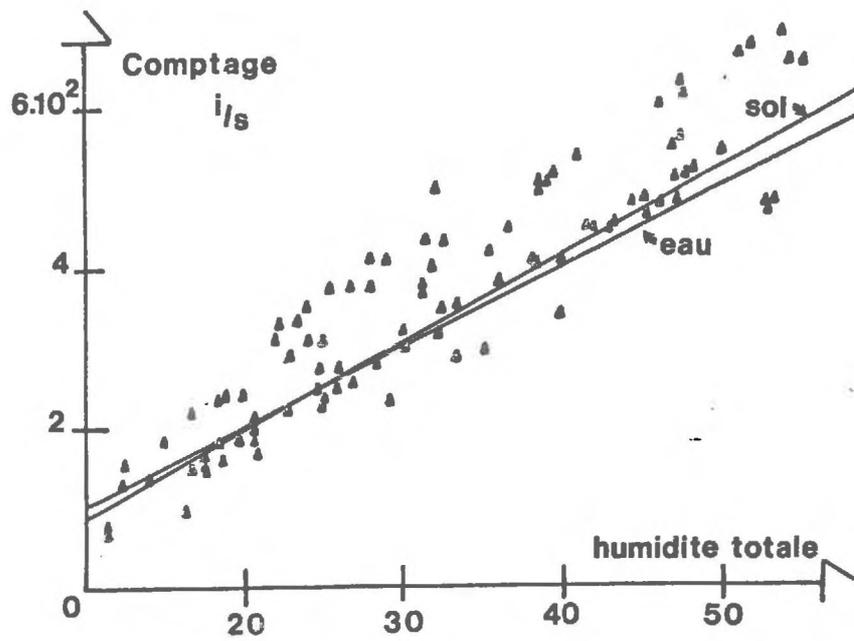


Fig. 23 - Points d'étalonnage portés avec l'humidité totale comme variable (eau libre + eau de constitution)

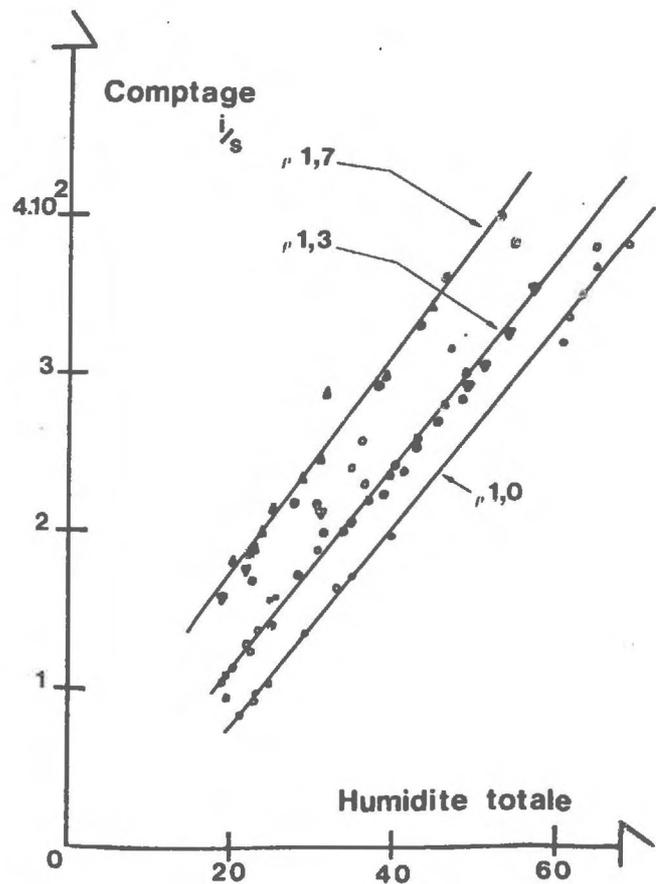


Fig. 24 - Points d'étalonnage, paramétrés en densité sèche pour divers sols et composants.

désiré, la densité sèche correspondante est liée à l'humidité pondérale du sol (Proctor) et la méthode nous donne une courbe d'étalonnage représentative de cette relation $\rho_s (H_v)$ qui traverse le faisceau des courbes d'étalonnage à ρ_s constant. On entrevoit bien là un risque d'erreur. Par ailleurs les densités sèches réalisées en laboratoire sont en général plus faibles que celles existant sur le terrain et cet écart est systématique. Ceci donne tout son poids à la proposition d'Holmes de ne réaliser qu'un échantillon de sol saturé, la densité sèche étant alors la plus proche de celle rencontrée sur le terrain : on mesure à diverses phases du ressuyage le comptage puis la teneur en eau par pesée ; cette méthode astucieuse limite cependant le domaine exploré à la zone des humidités supérieures à la capacité de rétention, et elle doit être employée avec circonspection à cause des risques d'hétérogénéité. Nous présentons en annexe (p. 38) une étude sur les dimensions de l'échantillon, nécessaires pour l'étalonnage en laboratoire ; il en ressort essentiellement qu'on peut envisager d'effectuer sans problèmes des étalonnages sur des volumes pouvant aller au moins jusqu'à 8 litres.

- Etalonnages in situ. Il est rendu plus complexe à cause des difficultés de mesure, sur le terrain, de la densité sèche, en surface et en profondeur, puisque la méthode de référence est la méthode gravimétrique ; les gammes de teneur en eau utiles sont réduites par les mouvements d'eau aux humidités élevées qui entraînent une grande hétérogénéité des mesures d'humidité pondérale. Cela explique la divergence des résultats fournis par la littérature, divergence qui amène chaque utilisateur à proposer ses propres méthodes d'étalonnage : on a pu noter chez Cohen des écarts de 63% entre les pentes et de 18% entre les ordonnées relatives à l'humidité 25% pour ses courbes d'étalonnage assimilées à des droites ; de son côté Bloemen argue de l'existence de gammes spécifiques d'humidité dans chaque sol pour proposer de ramener tous les points d'étalonnage sur une seule courbe représentative de tous les sols (les essais au laboratoire prouvent bien l'inconsistance de cette simplification).

Nous avons analysé les résultats obtenus par deux laboratoires ayant travaillé en relation avec nous⁺ soit un ensemble d'environ 1200 points représentant 35 sols et dont les gammes de densité sèche et de composition chimique ont été données au chapitre I. Si le domaine d'humidité mesuré est suffisant avec des

+ Laboratoire des Radioisotopes de Tananarive, Laboratoire des Ponts et Chaussées à Rouen.

variations peu importantes de densité sèche on observe un bon alignement des points d'étalonnage ; il est donc possible d'assimiler les courbes d'étalonnage à des droites dans l'intervalle des humidités rencontrées in situ (ce qui est en désaccord avec les résultats théoriques d'Ølgaard mais se trouve confirmé par la plupart des résultats expérimentaux présentés dans la littérature). On peut traiter l'ensemble des points d'étalonnage par application d'une corrélation linéaire en calculant pour chaque sol des droites d'estimation par la méthode des moindres carrés. Pour l'utilisation de l'étalonnage relatif à un sol, on pourra, si l'on considère comme très faible l'imprécision sur le comptage, se servir de la droite d'estimation de l'humidité en comptage. Dans la plupart des cas une droite suffit à représenter tout le profil de sol étudié ; mais il arrive que la couche de surface se différencie nettement et que certains horizons présentent des propriétés neutroniques particulières : plusieurs droites seront alors nécessaires pour définir un profil hydrique. Nous avons porté sur les figures 25 et 26 les résultats relatifs aux pentes et aux points moyens des courbes d'étalonnage déterminés in situ. Comme dans le cas des essais de laboratoire, on constate un écart pouvant atteindre 10 points volumiques sur les points moyens ; plus important encore est l'écart constaté sur les pentes qui peut aller jusqu'à 40%. Cependant les différences obtenues entre les droites représentatives des mêmes sols au laboratoire et in situ (barres verticales) montrent que la méthode expérimentale est en défaut dans

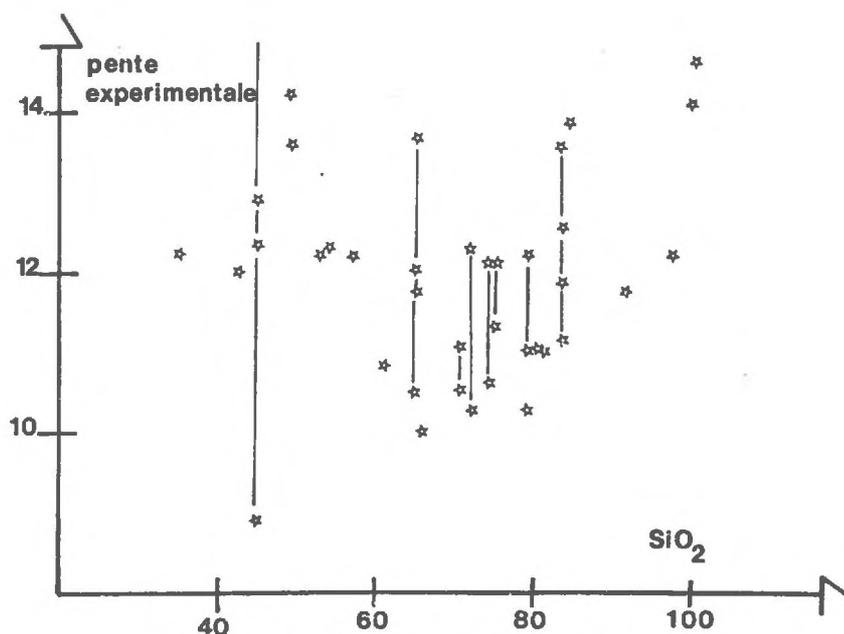
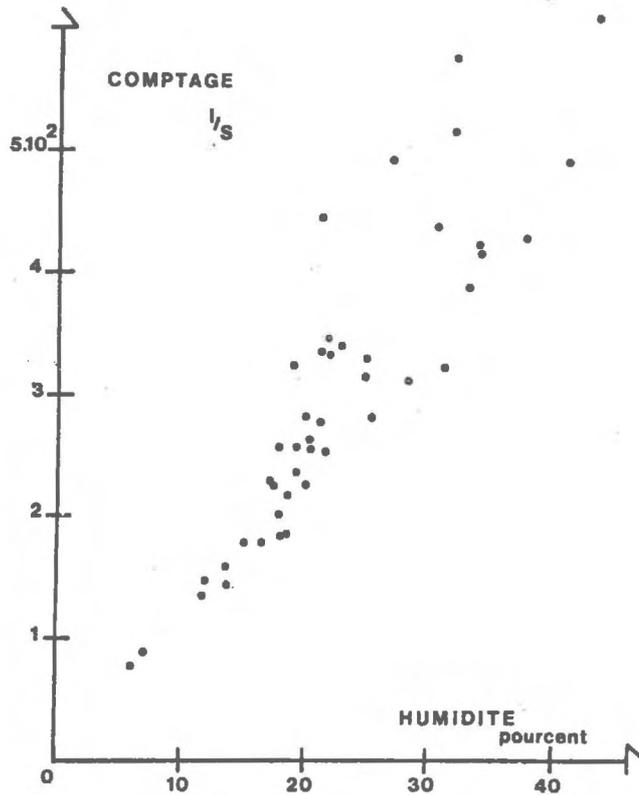


Fig. 25 - Pentes expérimentales des droites d'étalonnage de l'humidimètre - les barres verticales se réfèrent au même sol étalonné par plusieurs méthodes.

Fig. 26- Points moyens d'étalonnage expérimental pour divers sols.



la détermination des pentes, ce qui était à prévoir ; l'analyse des coefficients de corrélation fait en outre apparaître un lien très net entre la gamme d'humidité étudiée et la validité des mesures. L'imprécision des mesures in situ met en évidence le défaut majeur de toute approche uniquement expérimentale du problème de l'étalonnage des méthodes neutroniques ; en aucun cas une courbe statistiquement déterminée au champ ne définit entièrement un sol : elle ne peut que confirmer des résultats fournis par mesure directe de constantes neutroniques ou par un calcul s'appuyant sur la composition chimique totale du sol.

b) Etalonnage empirique.

Il a pour objectif, soit d'utiliser des formulations analytiques simplifiées, soit d'éviter une mesure longue de teneur en eau. En comparant les phénomènes de ralentissement et d'absorption thermique aux effets Compton et

photoélectrique, Balard et Gardner présentent une relation de la forme :

$$\text{Log } R = a \text{ Log } P_s - b P_s - c P_a + d$$

dans laquelle P_s est la probabilité de choc ralentisseur et P_a la probabilité d'absorption par les neutrons thermiques pour le sol considéré. De son côté Water, à partir de la variation des sections efficaces totales des éléments au niveau rapide (fig. 6 a), explique l'influence du sol sur la diffusion des neutrons ; il en conclut que le pouvoir ralentisseur moyen entre 5 MeV et 100 KeV définit le flux thermique qu'il calcule alors avec cette seule donnée. Dans ces deux cas, les constantes neutroniques retenues sont déterminées à partir de la composition chimique du sol. Dernier exemple, Apostol suggère, à partir de l'étude de ses courbes expérimentales, de prendre comme paramètre des courbes d'étalonnage la réponse de l'humidimètre dans le sol sec. Ces approches résolvent des cas particuliers mais ne permettent pas les extrapolations nécessaires à la prévision des phénomènes mesurés.

c) Etalonnage théorique⁺

Préconisé par nombre d'auteurs et utilisé par nous-même pendant longtemps, il consiste à définir la courbe d'étalonnage à partir du modèle de représentation de l'humidimètre en lui fournissant les données de composition chimique totale du sol. Malgré ses défauts, liés à l'impossibilité de mesurer parfaitement les traces, cette méthode permet d'obtenir en une seule fois le faisceau des courbes, puis d'en faire l'analyse et la prévision ; quelques points expérimentaux déterminés sur le sol étudié donne le moyen d'ajuster le calcul. Le modèle a une dimension, corrigé pour la prise en compte du tube, nous fournit les courbes d'étalonnage dans le domaine agronomique ; on vérifie qu'il s'agit bien de droites pour l'humidimètre standard. Sa réponse, $N = f(H_v, \rho_s)$ peut être linéarisée. La dérivée partielle $\partial N / \partial \rho_s$ est indépendante de ρ_s comme il ressort des résultats d'Ølgaard et s'assimile à une fonction linéaire de H_v ; par ailleurs dans le calcul de N , les quantités H_v et ρ_s interviennent de manière symétrique ($\Sigma = aH_v + b\rho_s$). On admet logiquement que $\partial N / \partial H_v$ est indépendante

+ Nous avons repris ce terme, même s'il n'est pas très exact, puisqu'il s'agit en fait de l'étalonnage à partir des modèles physiques de représentation de l'humidimètre car il est employé dans les textes traitant de la mesure neutronique.

de H_v et fonction linéaire de ρ_s . La formulation analytique de N se déduit alors de la résolution du système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N}{\partial H_v} = \alpha \rho_s + \gamma \\ \frac{\partial N}{\partial \rho_s} = \alpha' H_v + \delta \end{array} \right.$$

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

C'est la représentation générale des courbes d'étalonnage de l'humidimètre de profondeur à neutrons thermiques ; le comptage est fonction linéaire de l'humidité pour un sol donné, la densité sèche influe sur la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite ; le passage d'un type de sol à l'autre se fait par l'intermédiaire des constantes α , β , γ et δ . On calcule ces constantes pour les différents sols en ajustant, par lissage, les points théoriques obtenus à la fonction N . Ce procédé, notons-le, est sensible aux gammes et au pas de lissage dans la mesure où la courbe réelle d'étalonnage n'est pas rigoureusement une droite sur toute la gamme de teneur en eau.

d) Analyse des courbes d'étalonnage.

L'étude relative aux constantes nucléaires des sols a montré l'impossibilité de classer les sols d'après un critère simple comme la granulométrie. Il en est de même pour la composition chimique dans la mesure où elle n'est pas connue de façon suffisamment complète pour la détermination précise de α , β , γ et δ . Aussi a-t-on rejeté les méthodes couramment présentées dans la littérature qui analysent les expériences suivant un classement relatif à un ou plusieurs composants du sol comme l'eau de constitution, SiO_2 , Al_2O_3 ou Fe_2O_3 (l'évolution de la courbe d'étalonnage en fonction du pourcentage de fer ne fournit à Burn aucune information généralisable). C'est toute la composition chimique qui évolue en bloc et le graphique 27 qui donne les constantes α et δ pour divers sols classés d'après leur teneur en SiO_2 vient illustrer notre propos. L'allure de répartition des points obtenus indique toutefois que le passage d'un sol sableux à un sol argileux se traduit par une influence plus faible de la densité sèche sur la pente d'étalonnage (on observe des valeurs nulles (pente unique) voire négatives) et par une augmentation de l'influence de cette même densité sur l'ordonnée à l'origine. Ces deux remarques sont à rapprocher de la correspondance entre teneur en SiO_2 et en eau de

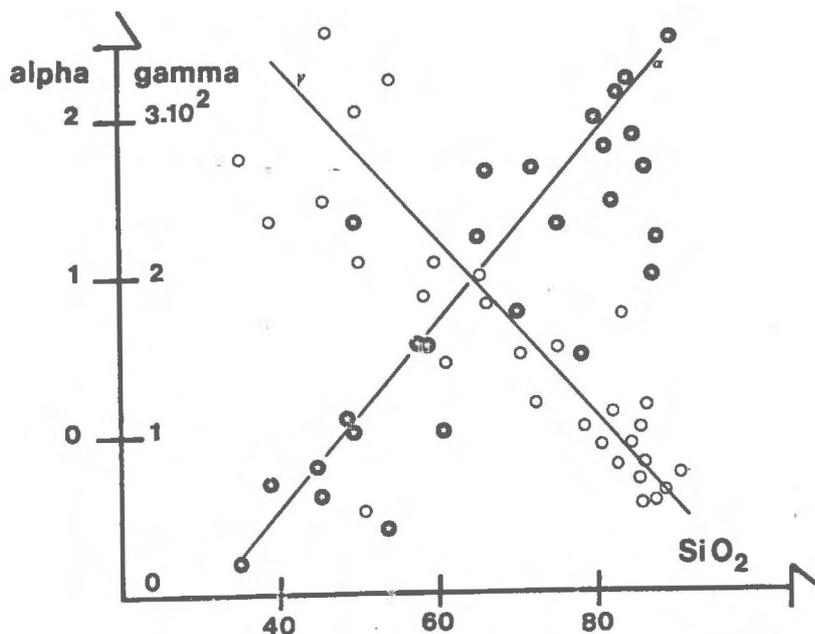


Fig. 27- Evolution des paramètres α et γ en fonction de la teneur en silice pour divers sols agronomiques: ★ α ○ γ .

constitution (à 1000°C) ; elles mettent en évidence les influences respectives de l'eau de constitution et du sol lui-même. Dans un sol à tendance argileuse la courbe d'étalonnage se déplacera en gros parallèlement à elle-même d'une valeur liée étroitement à la densité sèche (fonction grossièrement de la teneur en eau de constitution), dans un sol sableux cette même courbe subira peu de translation mais sa pente sera très sensible à la densité sèche.

En conclusion, si la teneur en eau de constitution des sols fournit une indication sur les droites d'étalonnage, il est NECESSAIRE de procéder à un étalonnage SPECIFIQUE pour chaque sol. Conduit expérimentalement celui-ci aboutit à une information valable mais limitée à une seule utilisation précise, c'est-à-dire dans les conditions strictes où s'effectue l'opération ; obtenu par le calcul il est plus général pour le type de sol considéré. La représentation à une dimension que nous avons décrit permet le calcul des constantes α β γ et δ à partir de la composition chimique ; elle a déjà été souvent utilisée et ses résultats, nous l'avons vu , sont donnés à 12,5% près.

3. Méthode proposée.

a) Relation entre courbes d'étalonnage et constantes neutroniques des sols.

Le flux thermique qui prend naissance autour d'une source de neutrons rapides est entièrement défini par les constantes neutroniques du milieu : ralentissement et transport au stade rapide, diffusion et absorption au niveau thermique. Il est donc naturel d'essayer de mettre en évidence le lien entre ces paramètres et les courbes d'étalonnage de l'humidimètre. On sait déjà que l'absorption régit en partie la pente des droites d'étalonnage ; le second facteur d'évolution peut être la diffusion thermique si l'on s'appuie sur la relation étroite qui existe entre la teneur en eau de constitution et la diffusion thermique d'une part, le ralentissement et, à un degré moindre, le transport rapide d'autre part. Nous avons étudié la variation des paramètres α β γ δ pour des milieux définis à partir d'une matrice de sol sableux par adjonction d'un absorbant type (variation de Σ_a) et d'eau de constitution (variation Σ_d et de Σ_a). En corrigeant dans le cas de l'eau de constitution l'influence due à Σ_a , on a pu obtenir deux relations entre les paramètres α β γ δ d'une part et Σ_a puis Σ_d d'autre part, toutes choses égales par ailleurs. En appliquant ces relations sur l'ensemble des sols (définis par leur composition chimique) que nous possédons, on a vérifié que les variables absorption et diffusion thermique définissent entièrement les courbes d'étalonnage.

Les graphiques 28-31 qui présentent les relations α β γ δ en fonction de Σ_a et Σ_d donnent déjà quelques indications sur le comportement des humidimètres. Dans tous les cas, sauf pour delta, l'absorption entraîne une diminution des paramètres, donc une baisse de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage. L'influence de la densité sèche (α , γ) est elle aussi diminuée et ceci met en évidence un des intérêts à utiliser les neutrons thermiques. Par ailleurs, une augmentation de la diffusion thermique, nécessairement consécutive à une augmentation de la teneur en eau liée, se traduit par une diminution de α compensée par une augmentation de β qui a pour effet d'une part de conserver presque invariante la pente d'étalonnage (d'où une généralisation possible de l'étalonnage depuis une profondeur sur tout le profil si l'absorption ne varie pas trop, ce qui est important) d'autre part de diminuer aussi l'influence de la

densité sèche sur la pente d'étalonnage, ce qui confirme nos premières conclusions issues de la figure 27 . On vérifie enfin que la teneur en eau liée règle de manière serrée l'ordonnée à l'origine.

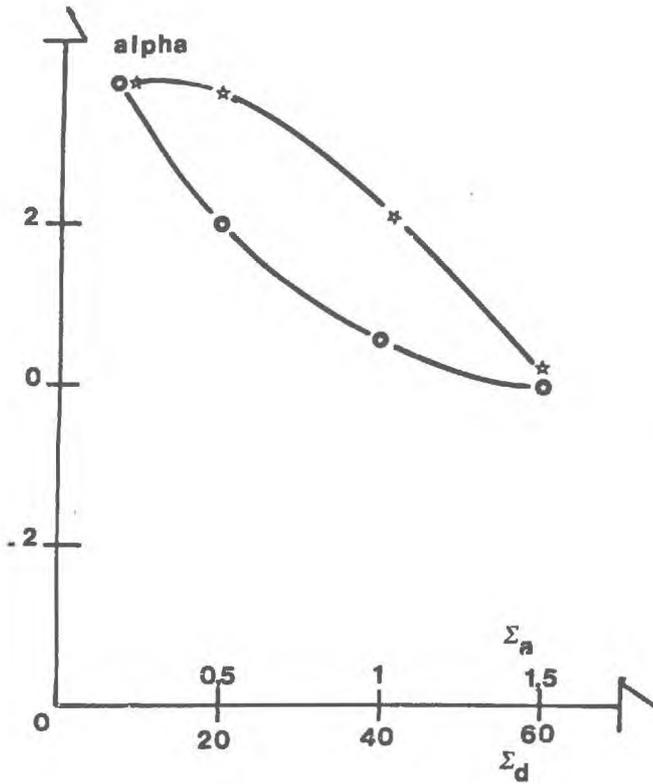
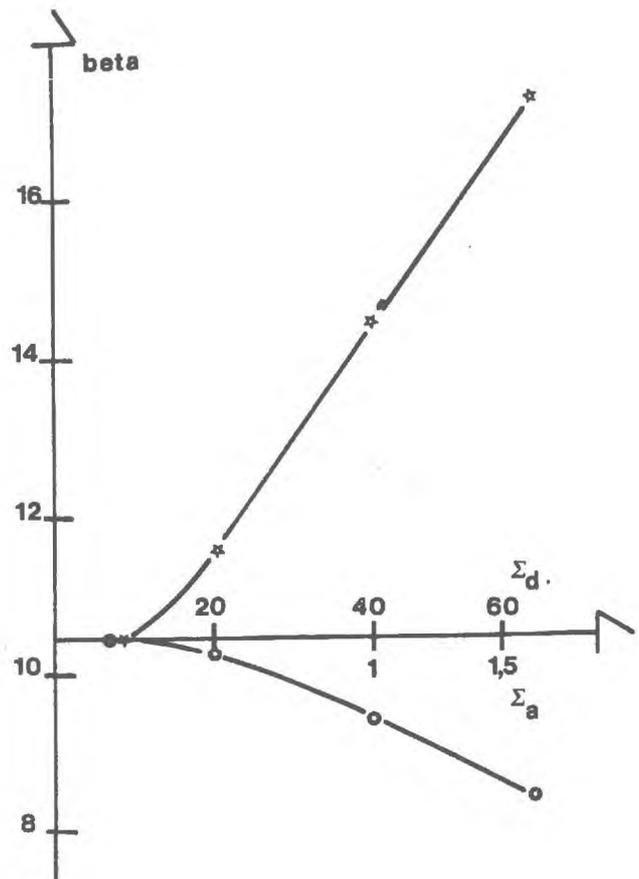


Fig. 28 - Evolution de α en fonction des variations d'absorption et de diffusion exprimée en mm²/g.

⊙ courbe pour l'absorption, ☆ courbe pour la diffusion.

Fig. 29 - Evolution de β en fonction des variations d'absorption et de diffusion exprimée en mm²/g

⊙ courbe pour l'absorption, ☆ courbe pour la diffusion.



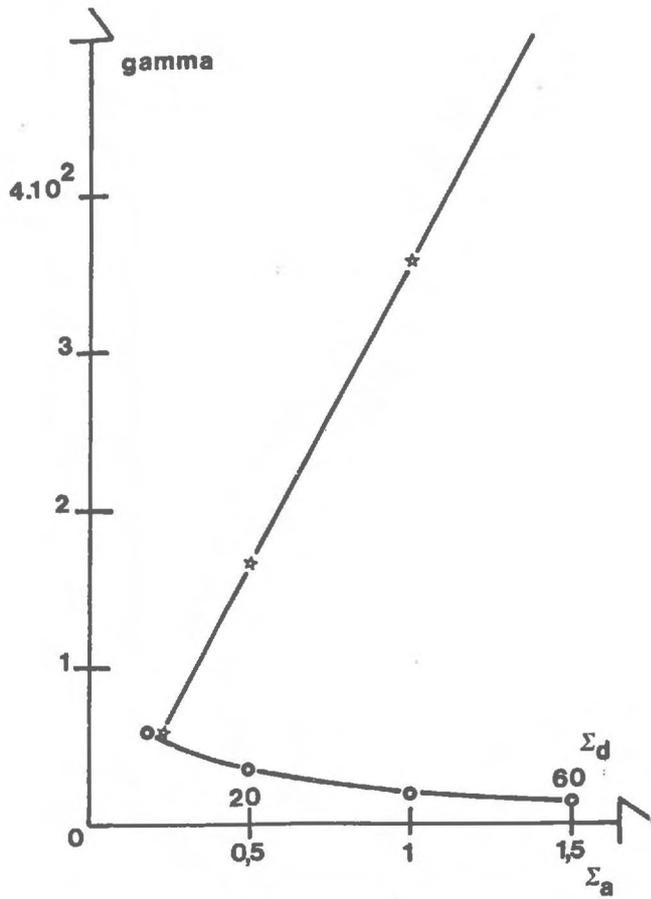


Fig. 30 - Evolution de γ en fonction des variations d'absorption et de diffusion exprimée en mm^2/g
 ⊙ courbe pour l'absorption,
 ☆ courbe pour la diffusion.

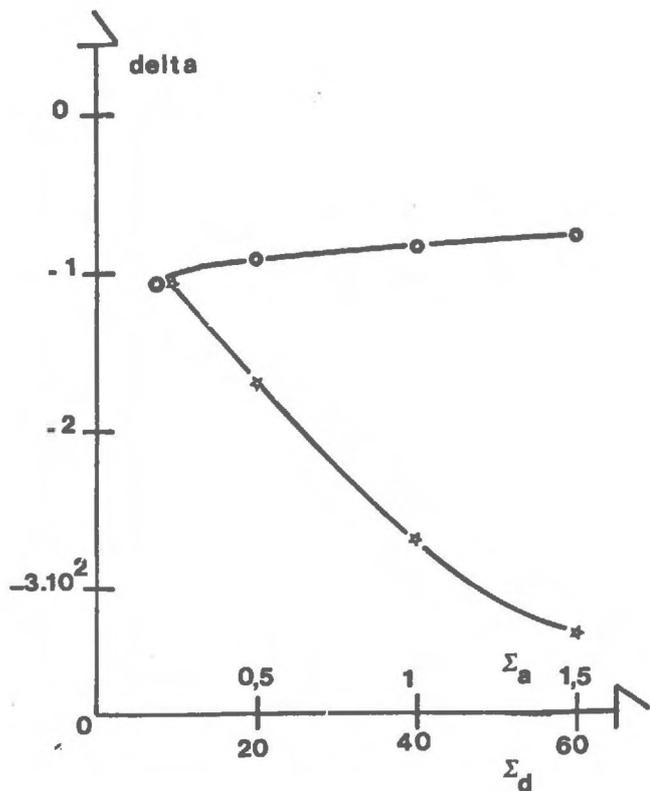
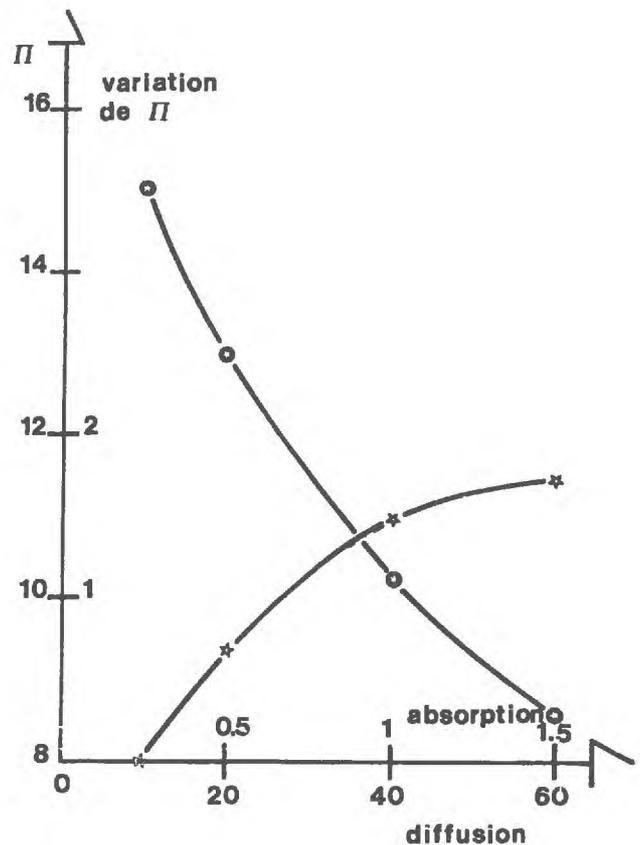


Fig. 31 - Evolution de δ en fonction des variations d'absorption et de diffusion exprimée en mm^2/g
 ⊙ courbe pour l'absorption,
 ☆ courbe pour la diffusion.

b) Etalonnage des humidimètres à détection de neutrons thermiques.

α β γ et δ dépendent donc étroitement de Σ_a et Σ_d ; la figure 32 montre la relation conséquente sur la pente des droites d'étalonnage : celle-ci est définie par la valeur d'absorption et par un terme correcteur, la section efficace de diffusion. L'utilisation des abaques ci-dessus présentées permet un étalonnage direct des sols si on peut déterminer les valeurs Σ_a et Σ_d , et amène à proposer la détermination des courbes d'étalonnage de l'humidimètre à partir de la mesure expérimentale des constantes neutroniques des sols : on mesure l'absorption et la diffusion d'échantillons répartis sur le profil suivant le critère d'analys

Fig. 32 - Relation entre la pente des droites d'étalonnage et l'absorption des sols. La courbe (*) permet d'obtenir le terme correctif à appliquer sur la valeur de Π lorsque la diffusion varie.



pédologique. Le programme en représentation à une dimension fait un calcul des coefficients α β γ et δ de la formule d'étalonnage ; le groupe thermique est défini

par les données mesurées ; le calcul du ralentissement part de la teneur en eau de constitution du sol (donné par la valeur de Σ_d) mais, pour tenir en partie compte de la dispersion des valeurs de transport, on calcule complètement le ralentissement à partir de sols pris comme référence et régulièrement répartis sur la gamme des teneurs en eau de constitution suivant un pas égal à 2%. On traite à part le cas des sols calcaires pour prendre en compte le CaO avec un sol particulier de référence. Il est malgré tout possible d'utiliser simplement les abaques construites à partir de valeurs arbitraires de Σ_a et de Σ_d ; on suppose alors que la teneur en eau de constitution définit entièrement ralentissement et transport rapide.

Cette méthodologie s'étend bien évidemment aux autres types d'humidimètres pour lesquels la courbe d'étalonnage est différente (suivant les conditions géométriques de la mesure). Le principe consiste à remplacer dans le modèle, les données d'analyse chimique par des mesures expérimentales de Σ_a et de Σ_d qui sont un reflet exact des caractéristiques neutroniques du sol.

4. Résumé : Influence des paramètres de mesure sur la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à détection de neutrons thermiques.

Composition chimique : son influence est définie par les constantes Σ_d et Σ_a de diffusion et d'absorption des sols au niveau thermique.

Densité sèche : elle agit à la fois sur la pente et l'ordonnée à l'origine des courbes (sensibilité et précision) ; plus un sol sera absorbant, moins la pente sera influencée par la densité sèche ; plus il sera diffusant, plus la densité sèche influera sur l'ordonnée à l'origine. On exprime bien cette influence par la formule générale des courbes : $N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$. Dans le cas d'un sol caillouteux, on démontre (annexe p. 49) que le pourcentage de cailloux est un paramètre de la courbe d'étalonnage, mais qu'il est implicitement pris en compte par la densité sèche globale de l'ensemble sol + cailloux. Mis à part la mesure de cette densité sèche et moyennant une répartition homogène, il n'y a pas de problèmes de mesure en sols caillouteux ; la granulométrie ne joue de surcroît aucun rôle dans la diffusion des neutrons.

Nature de la source : la nature de la source n'intervient pas dans les mesures si on les rapporte à une valeur de référence ; c'est la conséquence de l'influence prépondérante de l'eau libre et de constitution sur le développement du flux thermique.

Distance source-détecteur : Confirmant les données de la figure 20 , on trouvera en annexe p.48 , l'allure de la variation des courbes d'étalonnage en fonction de la distance source-détecteur ; la sensibilité s'annule pratiquement aux alentours d'une distance de 25 cm. Ce sont donc des distances plus faibles (en gros entre zéro et 10 cm) qui devront être retenues pour la construction d'un appareil et il importera pour chaque type d'appareil (mais ceci est le rôle du constructeur et non de l'utilisateur) de connaître la déformation des courbes d'étalonnage due à la géométrie de mesure.

Tubage : Dans le cas des mesures en profondeur la sensibilité de la courbe d'étalonnage diminue en fonction de l'augmentation du diamètre⁺ du tube. Le passage du tube en alliage d'aluminium, couramment utilisé, à un tube diffusant en matière plastique se traduit par une augmentation de l'ordonnée à l'origine, la pente étant conservée le passage à un tube en acier se traduira par une baisse de comptage.

Mesure en milieu non infini. Mesure de surface : La courbe d'étalonnage est modifiée lorsque le milieu n'est plus infini ce qui est le cas des mesures proches de la surface. Il n'y a pas de règle générale d'évolution si ce n'est que la proximité de l'interface sol-air diminue la sensibilité de la mesure. Une technique palliative consiste à reproduire artificiellement le milieu infini en posant sur le sol à la verticale de la mesure un échantillon diffusant qui jouera en quelque sorte le rôle de réflecteur de neutrons : le milieu le mieux adapté est naturellement le sol humide, lui-même, mais on peut le simuler par un bloc en polyéthylène, léger et peu encombrant (forme presque hémisphérique, diamètre de la base 206 mm, hauteur 60 mm).

Relation de passage : Les trois derniers problèmes relatifs aux conditions géométriques de mesure trouvent une solution pratique intéressante : puisque l'humidimètre doit fournir des résultats relatifs, on peut connaître la courbe d'étalonnage de n'importe lequel en établissant simplement la relation de passage sur les comptages avec l'humidimètre standard présenté dans ce texte. Cette relation est obtenue par exemple en déterminant dans un sol humide un profil hydrique avec chacun des appareils à un mètre de distance ; les points images des comptages fournis par les deux appareils donnent la relation de passage. Celle-ci sera linéaire si le nouvel appareil a des caractéristiques peu différentes de l'humidimètre standard ; toutes les données relatives à ce dernier deviennent alors

+ Baisse de comptage d'environ 7% lorsque le diamètre extérieur du tube passe de 40 mm à 60 mm à 20% d'humidité.

transposables, à commencer par la procédure d'étalonnage. Dans le cas contraire on étudiera le nouvel appareil avec le modèle en établissant la relation calcul-expérience sur quelques points expérimentaux.

Conditions climatiques : Ce problème ne relève pas de notre propos mais de la fiabilité électronique ; rappelons toutefois que les mesures doivent être effectuées entre -10°C et $+45^{\circ}\text{C}$ et dans des conditions hygrométriques pouvant aller jusqu'à 100% environ. Combien d'humidimètres ne sont malheureusement que de simples thermomètres.

C - LE VOLUME DE MESURE

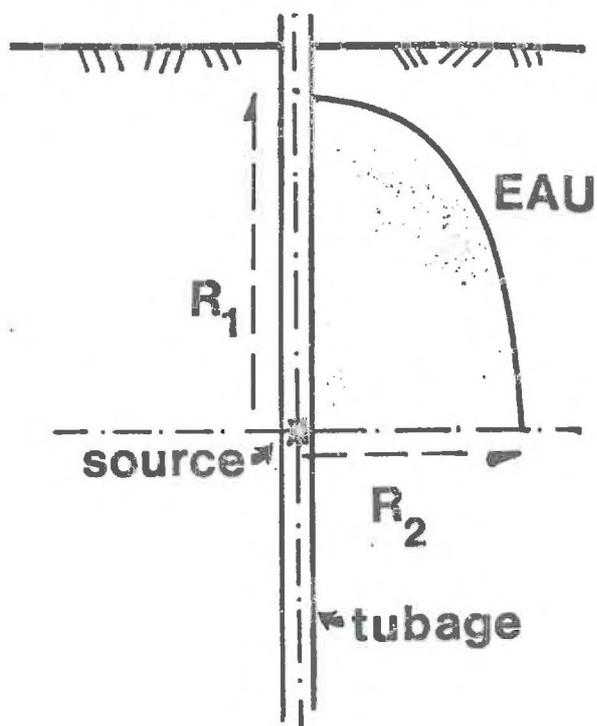
1.-Volume intéressé par la mesure.

On le définit à partir de la répartition spatiale des neutrons thermiques. Il est rendu fortement anisotropique à cause du vide créé par le tubage mais on a coutume cependant de parler d'une sphère d'influence représentant le volume qui contient 95% du flux thermique. Son rayon est donné par la célèbre formule de Van Bavel :

$$R_{cm} = 15 \sqrt[3]{\frac{100}{H_v}}$$

Le volume intéressé par la mesure est d'autant plus grand que le sol est plus sec. Mais il serait plus exact de parler d'ellipsoïde d'influence et l'on aurait un schéma du type suivant :

$$\text{avec } \begin{cases} R_1 = 15 \sqrt[3]{\frac{100}{H_r}} \\ R_2 = 15 \sqrt[3]{\frac{100}{H_v}} \end{cases}$$



Allure de l'ellipsoïde
d'influence de l'humidimètre.

En fait on a ainsi une idée peu précise des phénomènes ; le rôle du sol n'est pas mis en évidence, ce qui équivaut à considérer l'étalonnage de l'humidimètre comme représenté par la réponse dans un milieu fictif eau + air : le pouvoir diffusant du sol augmente le volume exploré par les neutrons, tandis que la présence de traces absorbantes le réduit d'autant. Enfin le concept de sphère d'influence passe sous silence l'évolution spatiale du flux thermique ; comme on le constate dans l'étude de l'humidimètre de surface, les couches n'ont pas le même poids sur le comptage suivant qu'elles sont proches ou loin de la source. Il importe donc davantage de connaître l'influence d'une répartition hétérogène de l'eau et du sol sur la réponse de l'humidimètre définie en milieu homogène.

2. Hétérogénéité horizontale du sol humide.

a) Sphère d'importance.

En géométrie à une dimension, Ølgaard étudie la variation du flux thermique au niveau d'une source placée au centre d'une sphère de sol humide plongée dans l'air ; le calcul est mené en annulant les flux rapides et thermique sur la paroi extérieure. Le volume qui fournit 95% du comptage obtenu pour le milieu infini, est appelé sphère d'importance par l'auteur. Elle a un rayon plus grand que la sphère d'influence puisqu'on prend en compte le sol diffusant. C'est là un concept plus directement utilisable, particulièrement pour l'étalon-

nage en milieux de dimensions finies (annexe p.38) : en effet dans un plan radial, l'étude de l'influence d'un fût de dimensions limitées revient à chercher l'influence sur le comptage au niveau de la source, d'une limite circulaire sol-air. Toutefois le calcul d'Ølgaard suppose l'annulation du flux sur la paroi et non, comme il est normal, à la surface extrapolée. Nous avons alors comparé ces résultats avec ceux du modèle à deux dimensions ; les rayons des cylindres qui fournissent, pour une hauteur considérée comme infinie, 95% du comptage par rapport au milieu infini sont du même ordre que ceux prévus par l'application du modèle simplifié à une dimension. Ce résultat qui confirme la notion de sphère d'importance était prévisible puisque, dans un plan radial, le modèle à deux dimensions prévoit les mêmes répartitions de flux que le modèle à une dimension à cause du terme en r de la forme $K_0(\xi_1 r)$; de plus la faible contribution des couches extérieures sur le comptage diminue l'importance du remplacement de la surface extérieure par la surface extrapolée.

L'influence d'un milieu non infini radialement sur le comptage de l'humidimètre est valablement représentée par la sphère d'importance et non par la sphère d'influence laquelle donne des valeurs par défaut. On corrigerait la formule de Van Bavel en faisant un calcul du rayon de la sphère d'influence à partir des répartitions réelles du flux thermique dans le milieu sol humide. De toutes façons ces deux notions ne tiennent pas compte de l'anisotropie due au tube et à la mesure du flux par un détecteur axial de plusieurs centimètres de longueur active.

b) Influence sur le comptage d'une répartition hétérogène de l'eau et du sol dans un plan radial.

Ce problème, important pour le praticien, n'est pas décrit par les concepts de sphère d'influence et de sphère d'importance. Le cas des multicouches cylindriques (2 et 3 milieux) a été abordé par Tittle et Glauberman dans l'approximation de la diffusion à un et deux groupes pour des études géophysiques ; ces auteurs ne prennent pas en considération le tubage vide. Par ailleurs Glauberman présente une solution analytique qui ne permet pas de retrouver les résultats connus en milieu homogène infini ; ce résultat provient du fait qu'il omet de prendre en compte dans le flux thermique (second groupe de neutrons) la part due aux sources rapides distribuées dans le milieu (termes en $S_{j,i}$). La formulation de Czubeck à partir de l'équation de l'âge, bien qu'elle fasse intervenir le tubage, ne convient pas à cause des hypothèses

nécessaires à sa résolution : le milieu doit notamment être non absorbant. Par ailleurs la solution, même dans le cas d'un simple milieu homogène et infini, est lourde, ce qui découle de la remarque précédemment faite sur l'inadéquation de la variable τ pour tenir compte de géométries complexes. On doit signaler enfin l'approche de Barsukov qui traite le problème avec les équations multi-groupes dans l'approximation de la diffusion en les réduisant à un système d'équations aux différences finies. Bien qu'intéressante, cette position ne nous paraît pas devoir convenir au cas des humidimètres à neutrons essentiellement pour l'introduction des conditions aux limites et pour le temps prohibitif nécessité par le processus de calcul.

Nous n'avons pas recherché une formulation analytique des flux thermiques et rapides dans le cas de n milieux concentriques mais nous proposons une généralisation du principe des sources fictives. En se plaçant à l'intérieur du milieu i , les composantes du flux correspondant au groupe de neutrons j sont données par le système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{j,i} = \frac{a}{4\pi^2 D_{j,i}} \sum_{j^i} \varphi_{j-1,i} \\ \varphi_{j,i}^{\circ} = \frac{a}{4\pi^2 D_{j,i}} \int_{j^i} f_{j^i}^{\circ} \kappa_0(\beta_{j^i} \alpha) I_0(\beta_{j^i} \alpha_{i-1}) e^{-\alpha r} d\alpha \\ \varphi_{j,i}^* = \frac{a}{4\pi^2 D_{j,i}} \int_{j^i} f_{j^i}^* \kappa_0(\beta_{j^i} \alpha_i) I_0(\beta_{j^i} \alpha) e^{-\alpha r} d\alpha \end{array} \right.$$

avec
$$\sum_{j \neq 1, i} = \frac{L_{j,i}^2}{L_{j-1,i}^2 - L_{j,i}^2} \cdot \frac{D_{j-1,i}}{D_{j,i}}$$

on écrit donc
$$\Phi = \varphi + \varphi^{\circ} + \varphi^*$$

On applique au système précédent les conditions aux limites suivantes : égalité des flux et des courants aux interfaces, courant nul à travers le tube pour tout groupe différent du premier groupe et enfin annulation du flux pour tout groupe, à la distance extrapolée, pondérée sur le ralentissement et la diffusion, pour le milieu n le plus extérieur. Il s'ensuit l'ensemble d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 D_{j,i-1} \frac{\partial \phi_{j,i-1}}{\partial z} \Big|_{a_i} = D_{ji} \frac{\partial \phi_{j,i}}{\partial z} \Big|_{a_i} \\
 \phi_{j,i-1}(a_i, z) = \phi_{j,i}(a_i, z) \quad \forall z \\
 D_{j+1,i} \frac{\partial \phi_{j+1,i}}{\partial z} \Big|_{a_i} = 0 \\
 D_{1,i} \frac{\partial \phi_{1,i}}{\partial z} \Big|_{a_1} = \frac{a}{4\pi^2 D_1} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-zR(1+zR)} e^{-z^2} dz \\
 \phi_{j,m}(a_{m+1}, z) = 0 \quad \forall z
 \end{array} \right.$$

La solution du problème consiste à déterminer les valeurs des fonctions $f_{j,i}^0$ et $f_{j,i}^+$. Par application des conditions aux limites, on obtient un système linéaire dont la résolution donne les différentes fonctions f . La matrice des coefficients est constituée par les composantes des flux et des courants à chacune des interfaces. Le calcul se fait par itération sur la variable η comme présenté précédemment pour tous les milieux simultanément et en allant du premier au dernier groupe.

Le programme (annexe) détermine sur les parois du tube et en fonction de la distance radiale r , le flux thermique en présence d'un milieu multicouches ; il permet l'étude, par simulation, des volumes de mesure. On ne peut dans le cadre de ce travail passer en revue tous les cas de figures, mais nous présentons un exemple d'application : supposons l'humidimètre plongé dans un sol artificiellement constitué de deux couches cylindriques d'humidités différentes soit 15% et 36% ; on peut déterminer la variation du comptage, traduite en erreur sur la teneur en eau fournie par l'appareil, en fonction de la position de l'interface (tableau).

	Milieu I (tube)	Milieu II (sol)	Milieu III (sol)	valeurs fournies par l'humidimètre standard
distances	de 0 à 2,25 cm	de 2,25 à 5 cm	de 5 cm à + ∞	
humidité	/	15%	38%	17,6%
humidité	/	36%	15%	34,5%
Volume intéressé par la mesure	15% : 36 cm		36% : 22 cm	

D'autre part la figure 33 donne l'évolution en fonction de la distance du flux thermique pour un milieu à 36% entouré d'un milieu à 15% de teneur en eau, dans le cas d'une interface à 5 cm et celui d'une interface à 10 cm.

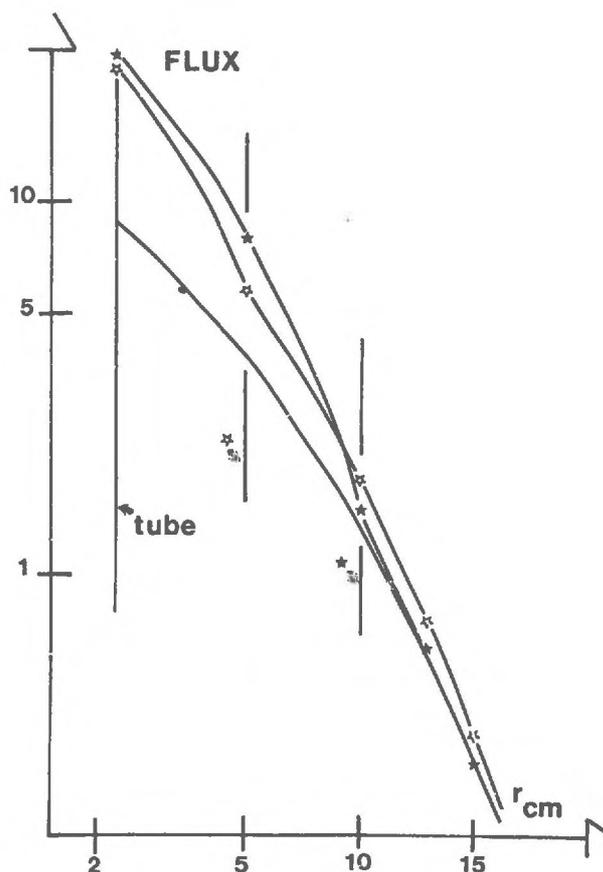


Fig. 33 - Evolution radiale du flux thermique au niveau de la source pour des milieux à 15 et 36%. La courbe la plus basse est la répartition du flux pour un sol homogène à 15%. Le milieu le plus humide est à l'intérieur (interface à 5 cm (★) et 10 cm (✕)).

Il n'y a pas de rapport entre répartition du flux thermique ou volume intéressé par la mesure et volume de mesure : ce dernier, défini par l'influence d'un gradient de teneur en eau sur la mesure, est bien moins important que le volume intéressé par la mesure comme le montrait déjà le résultat de l'étalonnage avec réflecteur (annexe p. 38). Les quelques premiers centimètres de sol autour du tube sont ceux qui interviennent le plus dans la mesure ; si le sol est sec près du tube (15% environ), la présence de sol humide tout autour à 5 cm n'affectera la mesure que de 2 points environ ; inversement si le sol est humide près du tube (35% due à des infiltrations le long du tube), la présence de sol sec (15%) à 5 cm n'affectera la mesure que de 1,5 points environ. En pratique les gradients rencontrés ne seront pas de cet ordre (diffusion de l'eau) et le volume de mesure encore plus réduit. Seul un calcul en multicouches permet de mettre en évidence ces résultats d'où il ressort qu'il faut éviter

d'employer sans méfiance la notion de sphère d'influence. La convolution en z , explicitée dans notre modèle, montre que le volume de mesure dépend de la position axiale de mesure du flux. On note que dans un milieu à 37% d'humidité l'influence d'une couche centrale de 24% de teneur en eau épaisse de 7,5 cm décroît et cesse pratiquement si la mesure se fait à 10 cm de la source. Il y a là une possibilité d'analyse des couches de sol autour du tube par des mesures à plusieurs distances source-détecteur.

3. Hétérogénéité de répartition verticale de l'eau et du sol.

C'est le problème de la lecture du profil hydrique par l'humidimètre et donc de la définition du pouvoir de résolution ; la hauteur d'une couche de sol où la réponse ne dépend que de la couche elle-même est appelée "longueur de transition". Perrier et Lawless ont présenté des résultats expérimentaux qui situent le problème mais ne sont pas généralisables ; de son côté Kashi a formulé mathématiquement le flux thermique en fonction de la distance de la source dans un milieu stratifié sans toutefois appliquer ses résultats ni prendre en compte la géométrie avec tubage.

Nous utilisons la formulation, présentée à l'occasion de la mise en place du modèle à deux dimensions (p. 44), et qui permet le traitement des interfaces planes. On peut appliquer à nouveau le principe des sources fictives ; dans le cas d'un milieu i en présence d'un milieu j , le flux rapide résultant dans le milieu i sera issu de la source origine placée dans le milieu i et des sources fictives réparties sur l'interface. En posant la distance source-interface égale à u , nous avons :

$$\phi_i = \varphi_i^o + \varphi_i^*$$

la condition de sources fictives est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1(r, z) = a_1(z) \delta(z-u) \\ \delta(z-u) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik(z-u)} dk \\ a_1(z) = \int_0^{+\infty} g_1(z) J_0(zr) r dr \end{array} \right.$$

L'application de ces conditions de source fournit les expressions des flux φ_i^0 et φ_i^* où figurent les fonctions inconnues f_i^0 et f_i^* . Ces dernières sont déterminées comme précédemment en opérant l'égalité des flux et des courants sur l'interface. Le flux rapide est alors donné par :

$$\varphi_{1i} = \frac{a}{4\pi^2 D_{1i}} \int \left[\frac{e^{-\xi_{1i} z}}{\xi_{1i}} + \frac{D_{1i} \xi_{1i} - D_{1j} \xi_{1j}}{D_{1i} \xi_{1i} + D_{1j} \xi_{1j}} \cdot \frac{e^{-\xi_{1i} (2u-z)}}{\xi_{1i}} \right] J_0(kr) J_0(kR) k dk$$

avec $\xi_{1i} = \sqrt{k^2 + \frac{1}{L_{1i}^2}}$

Pour calculer le flux thermique, Taliansky utilise ce même principe des sources fictives dans une géométrie infinie et sans tubage, mais reprenant le formalisme de Glauber, il omet lui aussi le terme de flux issu des sources rapides du premier groupe ce qui ne permet pas de retrouver les résultats classiques lorsque l'interface est renvoyée à l'infini. En introduisant ces termes, les flux φ_{2i} et φ_{2j} sont déterminés à partir des flux φ_{1i} et φ_{1j} comme solution du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{2i}^0 = S_i \varphi_{1i} + \varphi_{2i} \\ \varphi_{2i}^* = \frac{a}{4\pi^2 D_{2i}} \int f_{2i}^*(k) \frac{e^{-\xi_{2i} (u-z)}}{\xi_{2i}} J_0(kr) J_0(kR) k dk \\ \varphi_{2j}^0 = S_j \varphi_{1j} \\ \varphi_{2j}^* = \frac{a}{4\pi^2 D_{2j}} \int f_{2j}^*(k) \frac{e^{-\xi_{2j} (z-u)}}{\xi_{2j}} J_0(kr) J_0(kR) k dk \end{array} \right.$$

φ_{2i} provient de la solution de l'équation différentielle sans second membre qui définit le deuxième groupe de neutrons. On réalise l'égalité des flux et des courants sur l'interface pour obtenir une solution analytique de ϕ_2 . Moyennant les corrections sus-citées et la prise en compte du tube, on peut trouver

aisément l'explicitation de la solution analytique, mais dans le cadre de notre étude, celle-ci n'a pas d'intérêt dans la mesure où elle ne peut pas s'analyser facilement ; notons simplement que le flux ϕ_2 présente un terme asymptotique et un terme transitoire.

Dans l'étude d'un profil hydrique c'est la variation du flux thermique lorsque la source passe d'un milieu i à un milieu j qui nous intéresse, donc la variation de ϕ_2 en fonction de u . Bien que pour une valeur de u donnée, les valeurs respectives des flux ϕ_{2i} et ϕ_{2j} , soient égales à l'interface, on constate au passage de la frontière ($u = 0$) une discontinuité dans ϕ_2 due à la non symétrie de la formule par rapport aux milieux i et j . On voit là les limites de l'approximation de la diffusion qui ne nous donne que les termes asymptotiques de diffusion en laissant de côté les termes transitoires de transport. Ces derniers sont nécessairement à prendre en compte pour une explication plus exacte du phénomène, mais pour des raisons déjà maintes fois évoquées, nous avons préféré une autre voie d'approche.

En appelant $\varphi_{t,ij}$ le flux dans le premier milieu i modulé par le deuxième milieu j et $f_{i,j}$ une fonction d'ajustement de ce flux, on peut écrire pour les deux milieux

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_i = \varphi_{a_i} + f_{ij} \varphi_{t,ij} \\ \varphi_j = \varphi_{a_j} + f_{ji} \varphi_{t,ji} \end{array} \right.$$

On pose par raison de symétrie $f_{ij} = f_{ji}$; les flux φ_a et φ_t sont calculés par l'approximation de la diffusion suivant les formules ci-dessus définies. Le flux transitoire est la différence entre le flux calculé pour le cas de plusieurs milieux et celui déterminé pour le milieu considéré seul. Il reste à déterminer la fonction $f_{ij} = f_{ji}$, ce que l'on fait en appliquant les conditions d'égalité des flux à l'interface des milieux i et j .

On a étendu ce raisonnement au cas de n milieux représentant par exemple la lecture du profil hydrique par un humidimètre à neutrons. En appliquant le principe de superposition on écrit que le flux dans le milieu i est la somme

du flux asymptotique et des flux transitoires dûs aux milieux $i-1$ et $i+1$. Le dernier milieu pourra être considéré comme non limité et le premier milieu (surface) pourra être traité comme nous le verrons plus loin par la théorie du miroir ce qui revient à admettre une condition supplémentaire. Le système représentant le phénomène est donc du type (z position de la source)

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(z, z) = \varphi_{a_1} + f_{1,2} \varphi_{t,1,2} - \varphi_1(z, a-z) \\ \text{-----} \\ \varphi_i(z, z) = \varphi_{a_i} + f_{i,i-1} \varphi_{t,i,i-1} + f_{i,i+1} \varphi_{t,i,i+1} \\ \text{-----} \\ \varphi_m(z, z) = \varphi_{a_m} + f_{m,m-1} \varphi_{t,m,m-1} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{a distance de l'interface} \\ \text{sol-air, distance extrapolée} \\ \text{incluse} \end{array}$$

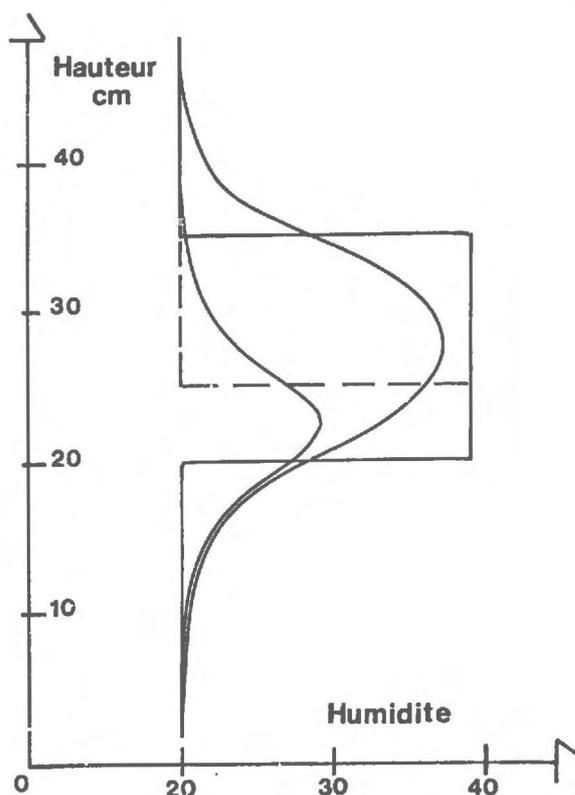
La détermination des fonctions inconnues se fait à l'aide des conditions d'égalité aux interfaces. Le paramètre l_i de hauteur de la couche i intervient explicitement car si la source est sur l'interface i/j le terme φ_t est pris pour $u = 1$ et réciproquement. On applique une condition par interface et les fonctions sont solution d'un système linéaire de $n-1$ équations, la matrice des coefficients étant de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{t,1,2}(0) - \varphi_{t,2,1}(0) \quad - \varphi_{t,2,1}(l_2) \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad \varphi_{a_2} - \varphi_{a_1} \\ \text{-----} \\ 0 \quad \dots \quad \varphi_{t,i,i-1}(l_i) \quad \varphi_{t,i,i+1}(0) - \varphi_{t,i+1,i}(0) \quad - \varphi_{t,i,i+1}(l_i) \quad \dots \quad \varphi_{a_{i+1}} - \varphi_{a_i} \\ \text{-----} \\ 0 \quad \dots \quad \dots \quad \varphi_{t,m-1,m-2}(l_{m-1}) \quad \varphi_{t,m-1,m}(0) - \varphi_{t,m,m-1}(0) \quad \dots \quad \varphi_{a_m} - \varphi_{a_{m-1}} \end{array} \right.$$

Les flux φ_a et φ_t sont intégrés sur la longueur active du capteur ; dans le cas où le capteur se trouve au niveau d'un interface, on fait la somme des flux transitoires i/j et j/i pris en compte par le détecteur en pondérant sur la longueur présente dans chaque milieu.

La figure 34 montre les résultats obtenus pour le passage d'une couche de sable à différents taux d'humidité, le flux étant intégré sur 10 cm. 5 cm de hauteur de couche entraîne, au centre de la couche, un écart de 29% de comptage quand le gradient d'humidité est de 19% relatif ; une hauteur de 15 cm ne se traduit que par un écart de 5% représentant 1,5 point d'humidité. La longueur de transition, définie comme la hauteur de couche qui entraîne une erreur donnée de comptage, peut être prise égale à 15 cm. On vérifie que le facteur primordial de résolution est la longueur active du compteur, bien que la diminution artificielle des longueurs de diffusion puisse entraîner un effet analogue ; en fait les essais menés aussi bien avec des sources de faible énergie (Sb-Be) ou des détecteurs blindés de cadmium, n'ont pas donné d'améliorations sensibles, ce qui confirme bien notre hypothèse. Compte tenu de ce que nous venons de voir et de ce que nous avons dit à l'occasion de l'anisotropie de diffusion dans le tube, il semble que la solution la meilleure pour réduire la longueur de transition réside dans le double comptage avec deux tubes parallèles et un détecteur type ^3He de faible dimension, ce qui réduit l'effet anisotrope du tube.

Fig. - Evolution du flux thermique dans le cas d'un compteur de 10 cm au passage d'une couche de 5 et 15 cm.



En dernier exemple nous donnons sur la figure 35 la représentation du passage des profils hydriques aux profils neutroniques au cours de l'avancement d'un front d'humidité. Cet essai montre l'intérêt du programme de calcul pour juger de l'applicabilité de l'humidimètre dans l'étude des mouvements d'eau dans le sol comme l'avancement d'un front d'humidité. Le point d'inflexion du profil neutronique n'est pas représentatif du front et l'on devra en tenir compte dans la détermination des vitesses d'avancement.

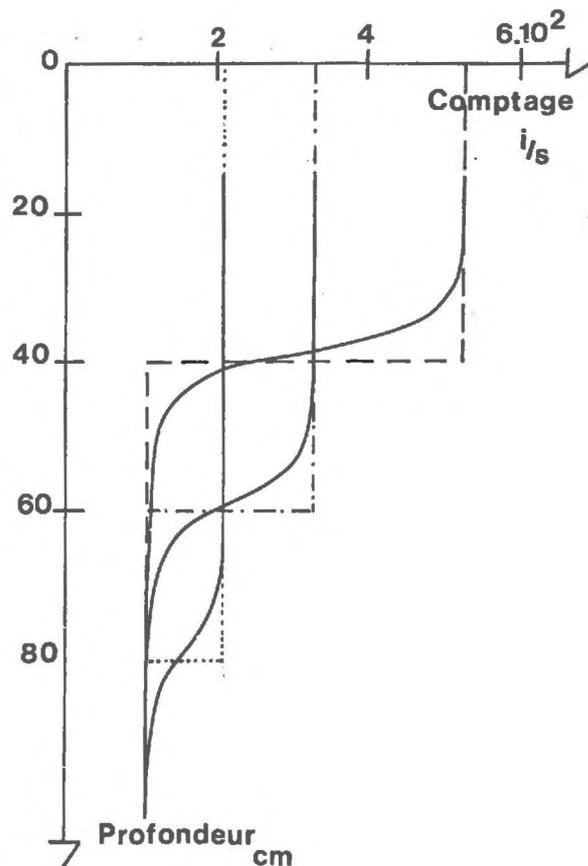


Fig.35 - Evolution des profils neutroniques dans le cas d'une infiltration avec un front brusque d'humidité.

4. Mesure de l'humidité en surface.

La mesure de l'humidité en surface est importante pour l'agronome car la couche superficielle est une zone de fort gradient de teneur en eau tant au cours de l'alimentation (irrigation ou pluie), qu'au cours de la consommation (évaporation ou évapotranspiration) ; de plus les horizons de surface sont le siège de phénomènes transitoires très importants pour les transferts d'eau en phase vapeur. Il s'agit donc de connaître soit une valeur intégrale soit un profil hydrique à pas faible dans une zone essentiellement hétérogène.

Plusieurs réponses ont été proposées à ce problème :

- utiliser l'appareil classique de profondeur jusqu'à la surface, soit en procédant à une déconvolution du profil hydrique obtenu, soit en plaçant à la surface un réflecteur de neutrons thermiques adéquat dont la composition idéale serait évidemment celle d'un milieu équivalent au sol étudié quant à ses caractéristiques neutroniques (p. 53).
- employer un humidimètre où la source et le détecteur seraient en surface ; cet appareil utilisant le principe de rétrodiffusion est la version 2π de l'humidimètre de profondeur.

La mauvaise résolution de ces deux méthodes, cause de leur grande dépendance vis à vis de l'hétérogénéité du sol, a rendu dans la pratique leur emploi difficile lorsque seule l'information de teneur en eau de surface était recherchée. L'application du principe de la mesure du flux thermique à une certaine distance de la source (ce qui n'est pas de la transmission) a été concrétisée par un appareil qui mesure en surface le flux thermique issu de la diffusion des neutrons rapides d'une source enfoncée dans le sol à différentes profondeurs.

Nous ne nous étendrons pas sur la description des appareillages utilisés ni sur les divers résultats expérimentaux qui ont permis de mettre en évidence puis d'exploiter différentes possibilités de la méthode. Nous allons montrer comment obtenir une représentation mathématique simple en appliquant l'approximation de la diffusion dans une théorie multigroupe. Notons à ce stade, dans le cas des appareils de type sabot, l'approche proposée par Gemmel ; celui-ci traite le problème dans la théorie du transport qui est certainement plus exacte, surtout si le milieu est très hétérogène, mais n'a pas donné et donnerait difficilement des résultats aisément applicables au cas de l'humidimètre.

En reprenant le principe des sources fictives dans une géométrie cylindrique en présence d'interface plane, on déterminera le flux thermique comme résultant des flux réels et fictifs dûs aux sources fictives réparties sur l'interface sol-air ; cette interface ne sera pas l'interface réelle mais celle résultant de la précédente par une translation égale à la distance extrapolée. On annulera le flux thermique sur cette surface. On explicite les

flux rapides et thermiques après intégration sur z dans l'application de la condition de source ce qui donne, en appelant a la distance source-surface extrapolée :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{a}{4\pi^2 D_1} \iint \left[\frac{e^{-\xi_1 z}}{\xi_1} - \frac{e^{-\xi_1 (2a-z)}}{\xi_1} \right] J_0(kr) k dk \\ \varphi_2 &= \frac{a}{4\pi^2 D_2} \frac{L_1^2}{L_1^2 - L_2^2} \iint \left[\frac{e^{-\xi_1 z}}{\xi_1} - \frac{e^{-\xi_1 (2a-z)}}{\xi_1} \right] - \left[\frac{e^{-\xi_2 z}}{\xi_2} - \frac{e^{-\xi_2 (2a-z)}}{\xi_2} \right] J_0(kr) k dk \end{aligned} \right.$$

Puisque la mesure se fait en général sur l'interface (par l'intermédiaire de deux compteurs au bore placés parallèlement de chaque côté de la source), la valeur représentative du flux thermique mesurée est :

$$\varphi_2(z, a') \quad a' \text{ distance source interface}$$

On remarque dans la formulation de φ_2 que les résultats obtenus permettent de retrouver le principe du miroir de Wigner ; l'expression de φ_2 montre que le flux thermique n'est autre que la résultante du flux réel en l'absence d'interface et du flux fictif donné par une source négative placée, relativement à la source réelle, à égale distance et de l'autre côté de la surface extrapolée. Ceci résulte du fait que la seule condition de nullité de flux à l'interface suffit à résoudre le problème.

Ce formalisme pourrait s'appliquer alors à la géométrie sphérique mais ne serait exactement valable qu'à la verticale de la source ; pour des questions d'homogénéité de résolution des divers problèmes et de conditions de source, la géométrie plane ne paraît pas dans ce cas plus intéressante. Soulignons que la description de Kulinkovich permet d'étendre les résultats à trois ou plusieurs groupes et qu'en tout état de cause le problème essentiel pour représenter au mieux l'expérience est celui de la définition de la distance extrapolée.

Le graphique 36 qui donne la relation entre les comptages expérimentaux et calculés dans le cas d'un sol limoneux montre l'adéquation de notre

modèle pour toutes les profondeurs sauf zéro. Dans ce dernier cas, l'approximation de la diffusion relève de l'acrobatie mais on remarque la bonne concordance des résultats. On doit en conclure que le modèle est apte aussi à représenter le cas limite de l'humidimètre à rétrodiffusion. Ce n'est rien d'autre qu'une illustration de la simplification qu'apporte la condition de relativité des calculs retenus dans toute notre étude.

On donne sur la figure 37 les courbes d'étalonnage de l'humidimètre du type "diffusion" (pour le distinguer des méthodes par transmission et rétrodiffusion) ; on constate un maximum de sensibilité pour une profondeur comprise entre 5 et 10 cm. Une étude expérimentale a permis par ailleurs de montrer que cette zone de mesure correspond à un minimum d'influence de l'hétérogénéité des sols.

Enfin, dans l'expression de ϕ_2 , apparaît le terme $J_0(kr)$ qui vient moduler la fonction de k ; on peut alors dire que r joue dans le cas de la mesure de l'humidité en surface le même rôle que z dans la mesure en profondeur : si la détection du flux thermique se fait à une grande distance axe-détecteur, l'appareil ainsi conçu aura un volume de mesure d'autant plus grand ; ceci est d'ailleurs à combiner avec la profondeur de la source pour obtenir un optimum ; le programme tel que nous l'avons présenté ne permet pas cette généralisation aussi est-il nécessaire de conduire le calcul pour la mesure en surface de l'humidité de sols hétérogènes. Un tel calcul est présenté en annexe p. 57.

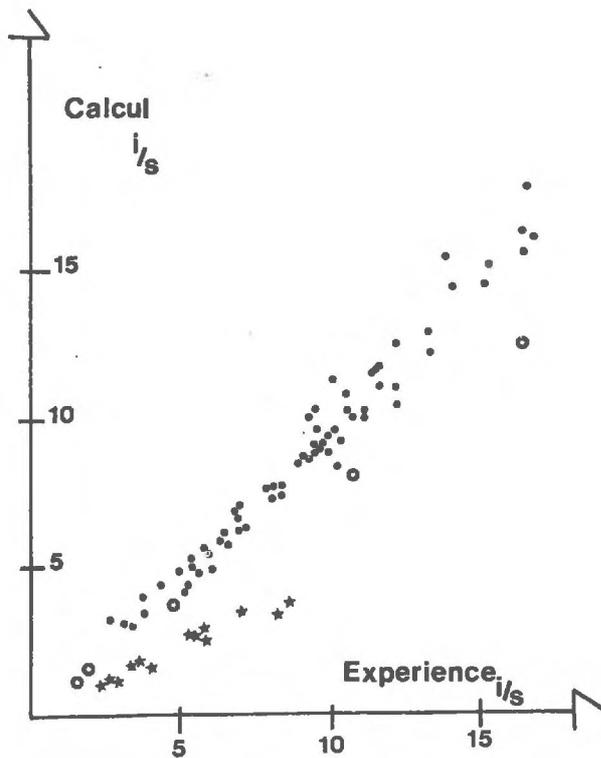
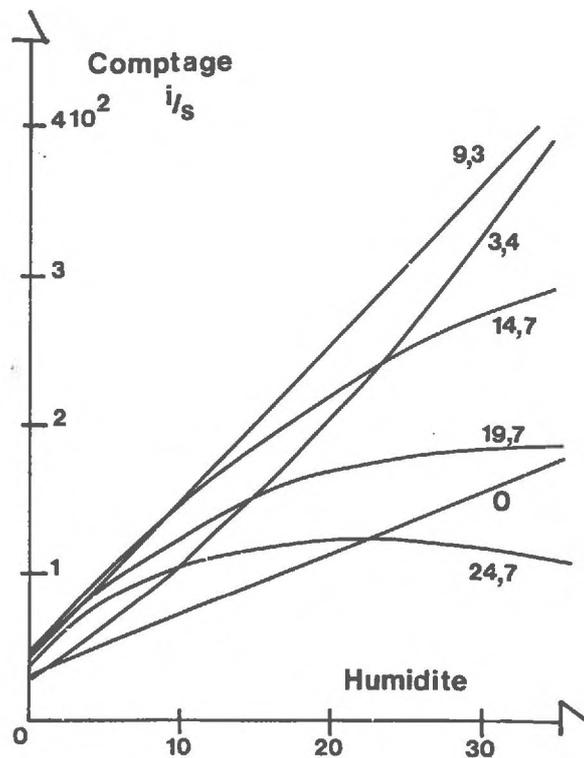


Fig. 36 - Points images des résultats expérimentaux et théoriques pour des mesures du flux thermique en surface correspondants aux profondeurs suivantes de sources :
(●) 3,4 ; 9,3 ; 14,7 ; 19,7 -
★ 0 cm ; les points dans l'eau sont indiqués par des (⊙).

Fig. 37 - Courbes d'étalonnage d'un humidimètre basé sur la mesure du flux thermique obtenu en surface avec une source de neutrons rapides enfoncée dans le sol. Les chiffres se réfèrent aux différentes positions de la source.



5. Conclusion.

L'assimilation volume intéressé par la mesure (sphère d'influence ou d'importance) et volume de mesure doit être évitée ; si le volume intéressé est de l'ordre de 22 cm de rayon autour du tube pour un sol à 36% d'humidité, la présence d'une humidité de 15% à 5 cm seulement du centre de mesure n'entraîne qu'une erreur de 1,5 point, ce qui donne à la notion de sphère d'influence un caractère tout relatif : l'humidimètre, à l'instar des méthodes gammamétriques est surtout sensible aux couches proches du tube. Le modèle à deux dimensions étendu au cas de n couches permet une approche simple de ce problème.

Le pouvoir de résolution vertical de l'humidimètre est plus important et ceci est dû en partie à l'anisotropie de diffusion créée par le vide du tubage et en partie à la longueur active de mesure du détecteur (à ce titre une mesure à l'aide d'un scintillateur est favorable). Dans les conditions de l'humidimètre utilisé en France avec environ 5 cm de longueur active, le pouvoir de résolution est tel que le passage d'une couche d'humidité 40% dans une couche d'humidité 20% est définie avec une erreur de 1,5 point si la couche a 15 cm d'épaisseur. Une étude de Kristensen parue au moment de la rédaction de ce texte confirme nos résultats ; il propose des mesures dans le sol tous les 15 cm. Le pouvoir de résolution peut être amélioré en effectuant des mesures plus rapprochées que l'on analyse par déconvolution. Toutefois ce procédé suppose connu le profil d'étalonnage, et le pas de déconvolution est en fait limité par les phénomènes eux-mêmes de diffusion de l'eau dans le sol.

Nous avons montré que le modèle à deux dimensions peut traiter le cas la mesure de surface. Cette remarque généralise la proposition selon laquelle l'approximation de la diffusion en théorie multigroupe dans un modèle à une ou deux dimensions est suffisante pour régler tous les problèmes relatifs à la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols dans le cas de la détection des neutrons thermiques.

PROPOSITIONS

A - NEUTRONS EPITHERMIQUES

Si on met à part le travail de Tittle relatif au domaine géophysique, il existe une bibliographie très légère sur les neutrons épithermiques. Présentant une application à la mesure de teneur en eau des sols, Priess s'appuie sur la loi en $1/v$ qui caractérise l'absorption des éléments du sol, pour estimer qu'un montage source de neutrons rapides (dans son étude il s'agit d'une source de Po-Be de 1 curie !) et compteur au bore blindé de cadmium, optimisé à une distance de 7 cm pour obtenir une bonne statistique de comptage, permet la mesure de teneur en eau des sols indépendamment de la densité sèche et de la composition chimique. Corompt, de son côté, suggère, sans le démontrer, que le dépouillement des informations fournies par des mesures thermiques à deux distances et une mesure épicaadmique permettrait de connaître dans un sol à la fois l'humidité, la densité sèche et la composition chimique. Plus récemment, Priess et Haccoun proposent une double mesure, thermique et épicaadmique, pour déterminer la teneur en chlore des sols, l'ordre de précision de la méthode étant estimé à 300 ppm de chlore.

1. Réponse d'un humidimètre à détection de neutrons épicaadmiques.

Nous proposons en annexe une expression des flux thermiques et épithermiques en théorie à trois groupes en notant que le modèle à deux dimensions s'avère très efficace puisqu'il permet la prise en compte du tube pour les deux types de neutrons. Par contre Ølgaard est amené à utiliser un jeu de deux coefficients correcteurs pour calculer les deux flux car le modèle à une dimension -- sans tube -- surestime fortement le comptage thermique par

rapport à l'épithermique. Nous donnons, toujours en annexe, la formule du comptage épithermique pour un détecteur ayant une loi en $1/v$.

La réponse d'un humidimètre à détection de neutrons épithermiques est fonction de la teneur en eau du sol avec une sensibilité près de cent fois inférieure à celle de l'humidimètre à neutrons thermiques (cas du détecteur BF_3 blindé au cadmium). Ce comptage dépend aussi, tout comme le flux thermique, de la densité sèche et de la composition chimique. Cependant on vérifie que le flux épithermique, situé dans une zone de faible absorption pour le sol est très sensible à la densité sèche (fig.38) ; la composition chimique intervient par l'intermédiaire du pouvoir diffusant et la pente d'étalonnage d'une sonde "épithermique" sera indépendante de la nature du sol. Ce dernier point a retenu l'attention des utilisateurs, mais la méthode n'a jamais vraiment débouché : en effet s'il est toujours possible au prix d'un effort technologique évidemment coûteux de détecter le flux épithermique avec une précision compatible avec celle attendue sur la teneur en eau, l'influence de la densité sèche et malgré tout, du pouvoir diffusant des sols (ordonnée à l'origine des courbes d'étalonnage) restent des facteurs limitants de cette méthode. Ceci étant, le comptage épithermique obtenu avec une sonde de profondeur classique peut être représenté par la formule suivante

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

α' β' γ' δ' seront essentiellement fonction de Σ_d

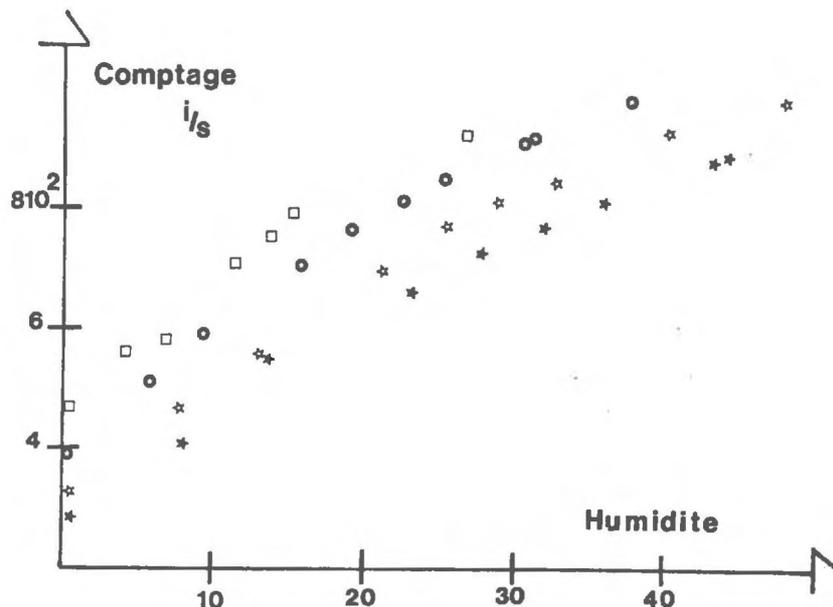


Fig. 38 - Points d'étalonnage des comptages épithermiques en fonction de l'humidité volumique ; les densités sèches correspondantes varient de 1 g/cm^3 à 2 g/cm^3 (* , * , ⊙ , □).

2. Utilisation du double comptage thermique-épithermique.

Utilisé seul, le flux épithermique présente donc un intérêt limité ; associé au flux thermique, il apporte sans beaucoup de difficultés technologiques, une information complémentaire dont nous proposons l'exploitation pour résoudre, entre autres, deux problèmes particuliers : la mesure du taux d'humidité des sols caillouteux et la détermination in situ des variations d'absorption des sols.

a) Mesure de l'humidité indépendamment de la densité sèche.

Les expressions qui lient les comptages thermiques et les comptages épithermiques à la teneur en eau, dans la zone d'utilisation agronomique, explicitent l'intervention du paramètre ρ_s sur les mesures :

$$\begin{cases} N = (\alpha\rho_s + \beta) H_v + \gamma\rho_s + \delta \\ N' = (\alpha'\rho_s + \beta') H_v + \gamma'\rho_s + \delta' \end{cases}$$

En éliminant le paramètre ρ_s entre les deux équations ci-dessus, on obtient une relation du type :

$$H_v = f(N, N')$$

Un double comptage thermique et épithermique fournit l'humidité volumique indépendamment de la densité sèche.

La résolution des deux équations ci-dessus, fournit H_v comme solution positive d'un polynôme du second degré. Cependant on peut trouver une solution asymptotique par le raisonnement suivant qui trouve sa justification dans les faibles valeurs de alpha par rapport aux autres paramètres. Puisque nous cherchons une fonction de N et N' indépendante de ρ_s , il est logique d'examiner la variation de la fonction suivante

$$\left. \frac{\partial (N + AN')}{\partial \rho_s} \right|_{H_{vcte}} = f(A)$$

on observe que $f(A)$ possède pour A positif une racine qui correspond au minimum d'influence de ρ_s . Nous traçons alors la fonction $A = f(H_v)$; sur la gamme

d'humidité qui correspond à l'utilisation agronomique, cette fonction peut être linéarisée (elle est du type parabolique pour des domaines très larges). Nous pouvons alors remplacer A par son expression en fonction de H_v dans la fonction de N et N' et en étudier la variation suivant H_v seul.

$$\text{Soit } N - (\mu \rho_s + \nu) N' = g(H_v)$$

On remarque que cette dernière fonction g peut être elle-même linéarisée sur le domaine étudié et il vient enfin :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = (a N' + b) H_v + c N' + d \\ H_v = \frac{N - c N' - d}{a N' + b} \end{array} \right.$$

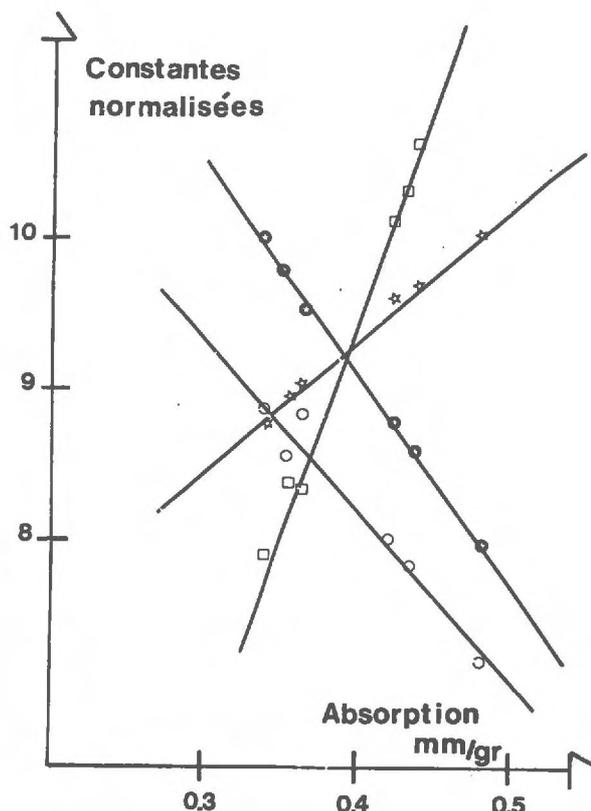
La première expression qui donne N (H_v , N') est comparable à celle qui donne N (H_v, ρ_s), on peut dire que le comptage épithermique joue sur le comptage thermique un rôle de correction analogue à celui de la densité sèche. Par ailleurs H_v est connu lorsque l'on a N, N' et les paramètres a, b, c et d relatifs au sol étudié.

L'étalonnage d'un tel appareil ne pose pas plus de problème que dans le cas de l'humidimètre à neutrons thermiques ; en effet on vérifie que les constantes relatives aux divers sols peuvent être déduites des constantes neutroniques Σ_a et Σ_d que nous avons déterminées ; ceci provient des relations étroites qu'il y a entre l'eau liée et d'une part la diffusion, d'autre part le ralentissement ; la figure 39 présente les courbes obtenues pour des sols traités en eau totale où seule intervient l'absorption. On a remplacé une mesure de densité sèche par un comptage épithermique.

Il est intéressant de rapprocher ce résultat de celui obtenu pour l'étalonnage en sols caillouteux. En effet, nous avons vu que l'influence des cailloux est équivalente à celle de la densité sèche sol + cailloux. Si on utilise une sonde à double comptage thermique-épithermique, la variation du pourcentage de cailloux n'aura pas d'effet sur le résultat.

Fig. 39 - Variation des constantes de l'équation $H_v = f(N, N')$ en fonction du pouvoir absorbant des sols.

⊗ a. ☆ b. ○ c.
□ d.



b) Détermination in situ de la pente des droites d'étalonnage pour l'humidimètre à détection de neutrons thermiques.

La pente des droites d'étalonnage des humidimètres à neutrons thermiques est fonction de l'absorption et de la diffusion thermiques des sols par contre celle des appareils à neutrons épicaudmiques ne dépend que de la diffusion. Par ailleurs si on recherche in situ une pente d'étalonnage, il nous faut connaître la relation entre une variation de comptage et la variation associée d'humidité ; ceci implique des mesures d'humidité longues et, comme nous l'avons vu, très imprécises ; le raisonnement suivant permet d'éviter cet écueil : 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 épicaudmique et une variation plus faible dans y du comptage thermique. On peut alors dans un sol porté à deux taux d'humidité par infiltration étudier la relation :

$$\pi_{th} (pente) = \varphi \left(\frac{\Delta N_{th}}{\Delta N_{epi}} \right)$$

B - NEUTRONS RAPIDES

On ne trouve pas, dans la littérature, de travaux concernant l'utilisation des neutrons rapides pour mesurer le taux d'humidité du sol, si ce n'est celui de Barsukov appliqué à la géophysique ; ce dernier présente des répartitions de flux à plusieurs énergies discrètes d'activation voisines de quelques dizaines d'électrons-volts.

1. Etude spectrométrique.

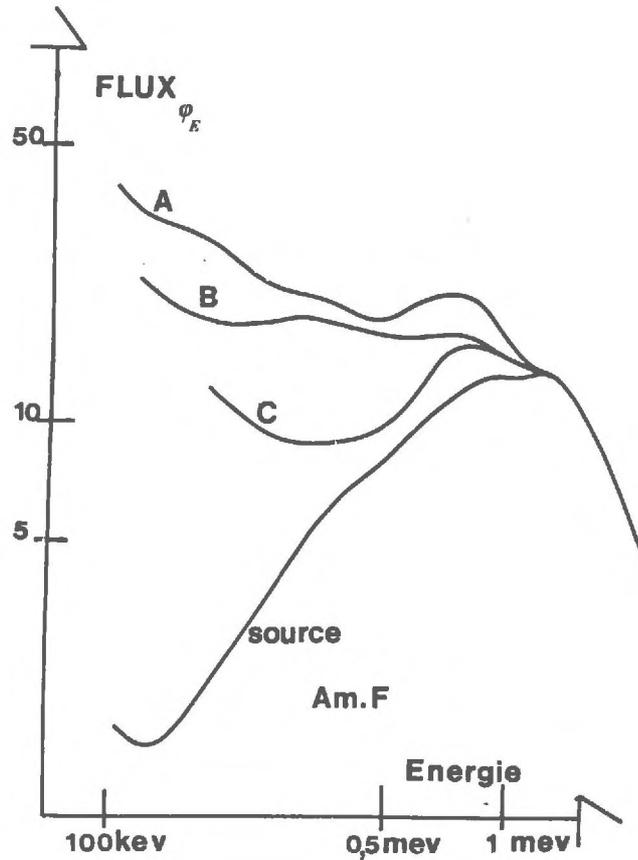
Les limitations dans ce domaine sont d'une part l'énergie élevée des neutrons émis par les sources classiques qui exige des moyens de détection encombrants et d'autre part les contraintes géométriques des mesures en profondeur. Nous avons procédé aux essais dans les tubages avec des sources d'énergie inférieure à 2 MeV (AmF, AmLi, PoLi). Dans le cas où la détection a été réalisée en surface, nous avons pu mesurer le spectre déformé des sources AmBe. Les diverses méthodes spectrométriques employées sont présentées en annexe (p.63) avec quelques détails sur les expériences réalisées : multisphères, compteur à ^3He et compteurs à protons de recul.

a) Mesure en profondeur.

On évalue la déformation subie par le spectre source (AmF de 1 Ci) dans le tubage de sonde en fonction de la distance. La différence des spectres fournis par le compteur ^3He avec et sans sol met en évidence la somme des effets de réflexion et de rétrodiffusion des neutrons vers le détecteur ; lorsqu'on passe du sable sec à l'eau, on note un déplacement du spectre où l'on met en évidence deux plages : le pic source qui reflète les neutrons qui ont atteint directement le détecteur et une plage intermédiaire entre 100 KeV et 1 MeV dont les neutrons sont "absorbés" par ralentissement dans le groupe inférieur d'énergie d'autant plus que le milieu est plus humide (fig. 41). Il est difficile de repérer le pic correspondant au premier choc des neutrons et dont la valeur peut être donnée par le paramètre de ralentissement que l'on calcule pour le

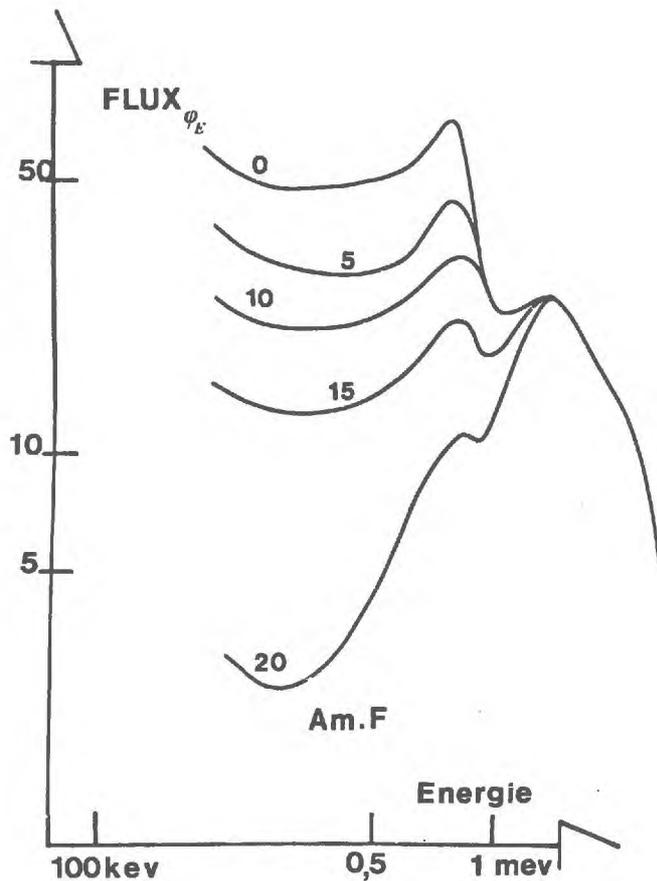
mélange des éléments H, O et Si. On a ainsi 1,179 MeV pour le sable sec, 0,89 MeV pour le sable saturé et 0,6487 MeV pour l'eau. Avec une source d'activité élevée (30 Ci) on observe un pic de superposition qu'il ne faut surtout pas confondre avec un pic de premier choc ; il souligne cependant de manière plus évidente la part des neutrons directement issus de la source.

Fig. 41 - Spectre en profondeur normalisé, pour la distance axiale 0 cm avec la source Am-F de 1 Ci.
A sable sec
B eau
C sable saturé



Si nous nous éloignons de la source axialement le flux total diminue ; la normalisation des spectres met en évidence une "absorption" progressive dans la bande 100 KeV - 1 MeV qui se traduit par une prédominance du spectre source aux grandes distances. Les neutrons de source les plus énergiques et compris dans l'angle solide du tubage vont frapper le détecteur ; les neutrons intermédiaires sont diffusés et ce phénomène apparaît d'autant plus que l'on s'éloigne de la source. La sensibilité de la mesure d'humidité décroît pour devenir négative en fonction croissante de la teneur en eau et de la distance, la fonction de l'énergie passant par un maximum (fig. 42).

Fig. 42 - Spectre en profondeur dans le sable saturé et normalisé au pic source pour des distances croissantes axiales et avec une source de 30 Ci d'AmF.

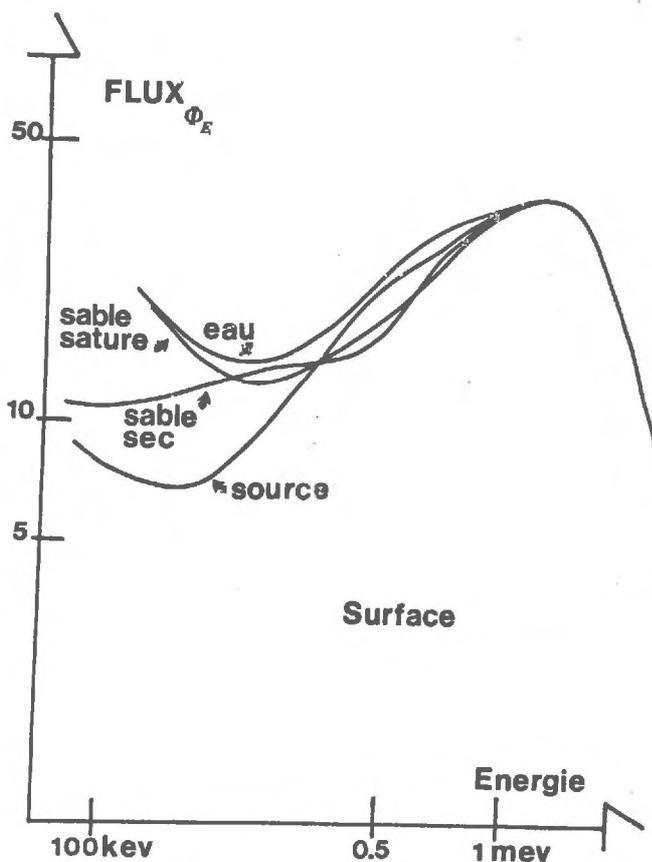


On peut trouver le spectre propre de ralentissement en faisant la "différence" du spectre déformé dans le sol et des spectres source pour une source d'AmF dont le pic est à 1,3 MeV, le spectre de ralentissement s'étend jusqu'à 700 KeV environ dans le tube et près de la source ; au-delà les neutrons sont essentiellement des neutrons de source. Le flux en fonction de l'énergie suit grossièrement une loi en $1/E$, comme le montrent (annexe p. 65) les résultats obtenus par la méthode des protons de recul (dans le cas de l'hélium et surtout pour des sources d'activité élevée cette loi est plus délicate à obtenir). La déformation du spectre en fonction de la distance ne permet pas aux distances supérieures à 15 cm, d'admettre l'hypothèse de séparation des variables sur $\varphi(E, r)$. Nos calculs en approximation de la diffusion de la théorie multigroupe se justifient donc d'autant plus que le flux thermique est détecté plus près de la source.

b) Mesure en surface.

Contrairement aux essais en profondeur, on n'observe aucune déformation du spectre source (fig. 43) ; la source impose son spectre, ce qui était à prévoir et conduit à dire qu'on ne peut pas envisager de mesure en neutrons rapides avec l'ensemble source-détecteur en surface.

Fig. 43 - Spectres des neutrons rapides en surface pour la source d'Am-F sur différents milieux, normalisés au pic source.



Pour apprécier la possibilité d'étendre aux sources AmBe la technique commode des compteurs proportionnels, nous avons fait une expérience avec les multisphères dans le cas d'une géométrie de surface (source dans le sol). On n'obtient pas un spectre mais la fraction des neutrons d'énergie supérieure à 2 MeV. Ce pourcentage diminue lorsqu'on enfonce la source dans le sol ce qui s'explique par la diminution de l'angle solide sous lequel on voit la source et par l'augmentation de la part de la diffusion. On ne remarque pas de variations importantes quand la teneur en eau du sol passe de 22% à environ 30% ; on constate presque paradoxalement une augmentation lorsque la

distance radiale croît de 25 à 35 cm mais ce dernier phénomène est probablement un artéfact d'expérimentation. Il est donc exclu d'étudier avec les compteurs à ^3He ou à protons de recul existants les spectres obtenus dans les sols humides avec les sources AmBe.

Méthode multisphères. Fraction du spectre au-dessus de 2 MeV

Niveau (cm)	0	5	10	15	25	35
Humidité (%)	19,25	28,44	25,25	23,74	25,54	22,18
Fraction (D=25 cm)	55	46	40	30	25	23
Fraction (D=35 cm)	58	48	42	31	26	29
Humidité	32,64	27,28	30,32	29,45	28,80	21,77
Fraction (D=25 cm)	53	47	36	38	33	25
Fraction (D=35 cm)	56	46	39	34	33	34

+ D représente la distance par rapport à l'axe vertical de la source, le niveau est repéré par rapport à la surface du sol sans tenir compte de la géométrie de détection.

Ces résultats permettent d'expliquer les expériences réalisées par Wack et qui concernent des essais de mesure de l'humidité en surface par une méthode dite de "transmission". On voit en effet que pour les valeurs géométriques proposées par l'auteur (D = 35 cm), le pourcentage de neutrons d'énergie simplement supérieure à 2 MeV, bien que non négligeable, n'est pas très important ; or la source a un spectre qui s'étend de 1 MeV jusqu'à 11 MeV avec un maximum à 5,5 MeV : les neutrons obtenus au niveau des détecteurs ne sont donc pas en majorité les neutrons de sources ; par ailleurs, même avec un étui de polyéthylène de 3 cm, le spectre de détection s'étend probablement au-dessous de 2 MeV ; il s'ensuit que l'appareil construit par Wack utilise le principe de diffusion des neutrons rapides et intermédiaires, lesquels sont mesurés

par le compteur à ^3He . On comprend alors que la corrélation des mesures expérimentales ne puisse se faire que sur une formule intégrant la transmission et la diffusion, ce qui en plus de l'incidence sur l'étalonnage a une répercussion importante sur le volume mesuré. On aurait des informations plus complètes en effectuant une spectrométrie des neutrons ralentis par le bloc de polyéthylène qui entoure le détecteur. En effet le spectre source issu du sol est déformé dans le bloc en donnant un spectre de ralentissement dont l'interprétation doit conduire aux neutrons de source. Ceci permet l'utilisation de compteurs à seuil supérieur (^3He ou protons de recul) pour l'étude de sources d'énergie élevée type AmBe.

En conclusion de ce rapide tour d'horizon des spectres de neutrons rapides dans les sols humides, on peut énoncer les propositions suivantes :

- En géométrie de surface, la source impose son spectre.
- En profondeur, dans l'axe du tubage et près de la source, le spectre de ralentissement se distingue du spectre source mais le passage du sol sec à humide n'est pas bien traduit au niveau rapide.
- Il y a bien "absorption" relative des neutrons en cours de ralentissement lorsqu'on s'éloigne de la source ainsi que la mise en évidence consécutive du pic source.

Ces remarques conduisent à dire qu'aucune plage de mesure n'est privilégiée hormis le pic source. En tout état de cause la mesure en neutrons rapides ne peut se faire que dans une géométrie à double tube ou avec une forte distance source détecteur dans le même tube, ce qui nécessite des sources puissantes compte tenu de la faible sensibilité des compteurs aux énergies élevées. Aussi la méthode semble devoir être appliquée aux mesures par transmission, au laboratoire ou, en grand volume, au champ.

2. Mesure des neutrons rapides transmis dans un sol humide.

Les recherches expérimentales actuelles concernant le mouvement de l'eau dans les sols non saturés conduisent la plupart des chercheurs à mettre en oeuvre, au laboratoire, des modèles uni ou bidimensionnels sur lesquels le plus grand nombre possible de paramètres sont mesurés de manière non destructrice : il en est ainsi du potentiel, de la température et de la position

des traceurs. L'humidité est le plus souvent déterminée par transmission de rayons gamma ; mais la diffusion Compton dépend en premier lieu des éléments lourds et la mesure ainsi réalisée est celle d'une densité humide où l'eau n'est qu'un facteur correctif. Il a fallu envisager une méthode double gamma (source ^{137}Cs et ^{241}Am) pour connaître l'humidité dans les sols gonflants où ρ_s varie avec la teneur en eau.

Dans un ordre de grandeur différent, les agronomes constatent la forte incidence de l'hétérogénéité de répartition de l'eau dans le sol sur la définition des bilans hydriques dans les cultures ; ils mettent à juste titre l'accent sur les dimensions alors non représentatives du volume de mesure de l'humidimètre. Dans ce domaine, et en partie pour les mêmes raisons que précédemment, les méthodes de transmission gamma n'apportent pas la réponse au problème posé.

Il suffit de nous rappeler que le volume nécessaire pour le ralentissement et la diffusion des neutrons rapides est important (cylindre d'environ 30 cm de diamètre pour un sol à 25% d'humidité) et que le maximum de sensibilité du flux thermique aux variations de teneur en eau se situe au niveau de la source et décroît très vite, pour constater que les deux problèmes posés ci-dessus ne seront pas résolus non plus par les neutrons thermiques.

a) Mesure de l'humidité des grands volumes de sols.

La mesure des volumes importants de sol doit être envisagée avec des neutrons de forte énergie et les sources du type AmBe répondent au problème ; les résultats obtenus grâce à la méthode des multisphères montrent qu'à 50 cm de la source, pour un sol d'humidité 25%, la fraction du spectre au-dessus de 2 MeV est de 30% environ. C'est aussi dans cette optique que doivent être interprétés les essais conduits par Wack, lequel obtient des variations mesurables du flux au delà du niveau épithermique en fonction de la teneur en eau, bien qu'ayant au départ une sensibilité faible et une mauvaise réponse aux neutrons d'énergies supérieures à 2 MeV (compteur à ^3He). La mise au point d'une telle méthode de mesure de teneur en eau requiert : l'étude de la déformation du spectre de ralentissement des neutrons dans l'espace (que nous avons supposée faible pour nos calculs en épithermique) en fonction de la teneur en eau ; le choix de la partie de ce spectre la plus sensible et correspondant au volume

le plus grand ; enfin la mise au point d'un détecteur approprié qui peut être un scintillateur en matière plastique, le bruit de fond gamma étant évidemment faible. Un calcul a été mené avec un code Monte-Carlo à une dimension en géométrie cylindrique infinie avec source linéaire ; les premiers résultats indiquent une sensibilité très faible du spectre de ralentissement au voisinage de la source, ils demandent à être étendus et confirmés. D'autre part un compteur à protons de recul de gros volume est à l'essai, il doit permettre de dépasser la limite des 2 MeV d'utilisation des compteurs classiques et donc d'apprécier expérimentalement la déformation du spectre des sources AmBe dans les sols humides.

b) Mesure de l'humidité par transmission de neutrons rapides.

Les études de transmission nécessitent une méthode peu sensible à la présence du sol (composition chimique et densité) et fournissant une mesure focalisée. Dans ce sens, nous avons analysé l'évolution comparée, en fonction de l'énergie, des sections efficaces de diffusion élastique de l'eau et de sols à diverses teneurs en eau de constitution (fig. 43) ; l'influence de l'eau diminue de 50 à environ 20% aux alentours du KeV, résultat que laissait prévoir d'ailleurs les relations de diffusion données au chapitre 1. Si on se souvient que la diffusion inélastique prend place pour les sols à partir de 2 MeV et que le niveau thermique est fortement influencé par le pouvoir d'absorption, lequel diminue l'intervention de l'eau, on en conclut que la zone favorable à nos mesures se situera entre 100 KeV et 2 MeV. Par ailleurs pour obtenir une bonne focalisation, il faut rétrécir, à l'instar des méthodes gamma, la bande d'énergie des neutrons qui participent à la mesure, l'optimum étant obtenu si l'on détecte le spectre source. Nous proposons donc cette méthode que nous avons appliquée en utilisant une source d'AmF et un détecteur à ^3He dopé au Kr pour réaliser le spectre.

Pour un modèle de 25 cm d'épaisseur, la figure 44 nous donne les spectres expérimentaux après passage à travers un sable sec et un sable saturé (40% d'humidité). Le spectre source a subi une déformation due aux neutrons rétrodiffusés par le modèle lui-même ; celle-ci interviendra toujours dans les modèles de sols que nous serons amenés à utiliser. Néanmoins le passage du sable sec au sable saturé se traduit par un déplacement sans déformation notable ; on peut étalonner la réponse spectrale du compteur suivant la teneur

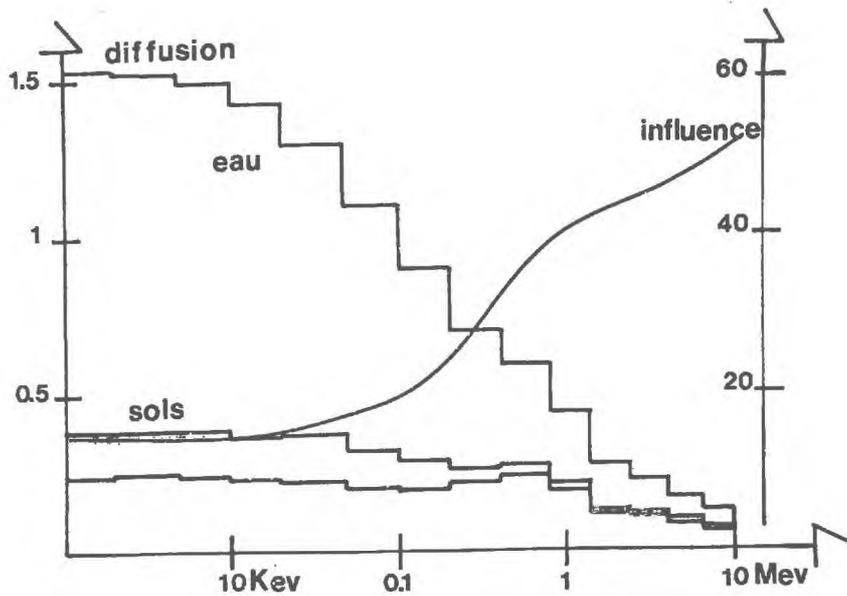


Figure 43- Evolution du pouvoir de diffusion de l'eau et de divers sols en fonction de l'énergie des neutrons : l'influence est indiquée en pourcent.

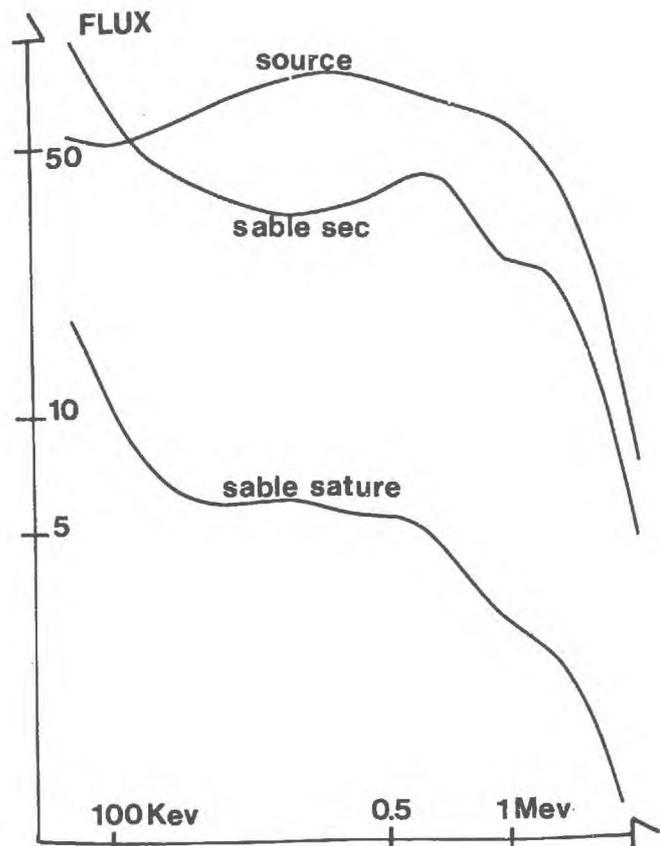


Fig. 44 - Evolution du flux rapide par transmission à travers une épaisseur de 25 cm de sable sec et humide. Le spectre source est déformé par des diffusions dues au montage expérimental.

en eau et déterminer expérimentalement l'influence de la densité sèche et de la composition chimique. On se souvient que les spectres propres de ralentissement (sol humide - source) peuvent être considérés comme limités à environ 700 KeV ; nous aurons par suite la meilleure focalisation en considérant le spectre mesuré au-dessus de 700 KeV puisqu'alors son évolution sera représentative de la perte des neutrons de source diffusés par le sol humide. On a ainsi obtenu, dans nos essais, des comptages variant de 33,86 C/mn à 4,07 C/mn du sable sec au sable saturé. Un programme expérimental de spectrométrie rapide, en cours de réalisation confirme ces premiers résultats ; l'utilisation d'un compteur de gros volume, récemment mis au point, permet une étude plus fine de la partie rapide entre 1 MeV et 3 MeV.

c) Utilisation d'un programme Monte-Carlo pour l'étude théorique des spectres de neutrons rapides dans un sol humide.

Il nous a semblé qu'un modèle Monte-Carlo simplifié pouvait trouver sa justification si on recherche non plus le simple flux thermique, mais l'évolution du flux rapide des neutrons en cours de ralentissement, l'information obtenue étant plus riche dans ce cas. Aussi avons-nous adapté un modèle, mis au point pour étudier la réponse thermique d'un détecteur directionnel⁺, au calcul des spectres de ralentissement dans un sol humide.

Le modèle doit servir aux études de transmission aux alentours du MeV et au-dessous, aussi la diffusion inélastique a-t-elle été négligée. On considère que la source est ponctuelle et placée sur l'axe d'un tube vide entouré d'un cylindre de sol humide de hauteur limitée. La source est monoénergétique et le tubage n'intervient pas dans le ralentissement des neutrons ; le flux rapide est obtenu en stockant tous les neutrons dans une bande dE à l'énergie E, qui traversent une épaisseur donnée de sol humide à une distance donnée : ceci permet de réduire notablement le nombre d'histoires nécessaires au calcul statistique et on montre que dans la plupart des cas 1000 neutrons de source suffisent pour obtenir une bonne précision (par exemple 4% de variation lorsqu'on passe de 1000 à 4000 neutrons). Il est hors du cadre de notre texte de présenter des développements de ce modèle que nous avons utilisé par ailleurs pour appréhender les problèmes de mesures par transmission de neutrons rapides. Nous donnons ci-dessous simplement deux exemples de spectres obtenus

⁺ Modèle mis au point par M. Leroy

Fig. 45 - Spectre de neutrons rapides calculé sur 1000 histoires cumulées lorsqu'on est en vue directe de la source dans le tubage.

- ⊙ sable sec
- ☆ sable saturé (40%)
- ★ eau

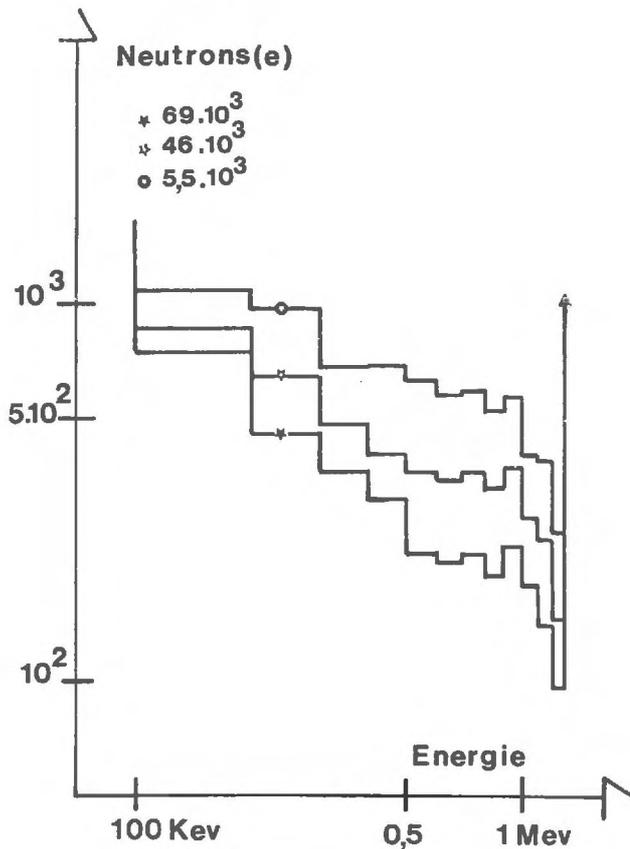
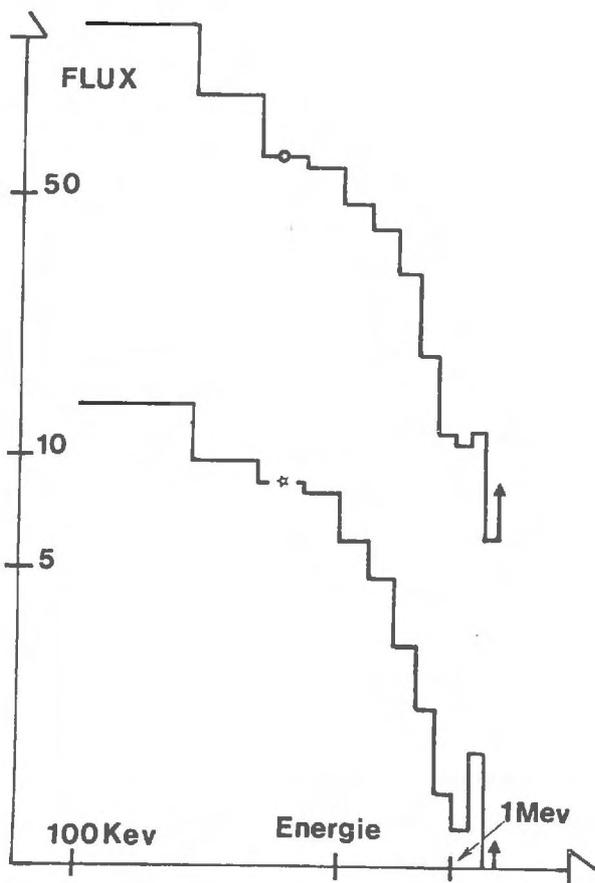
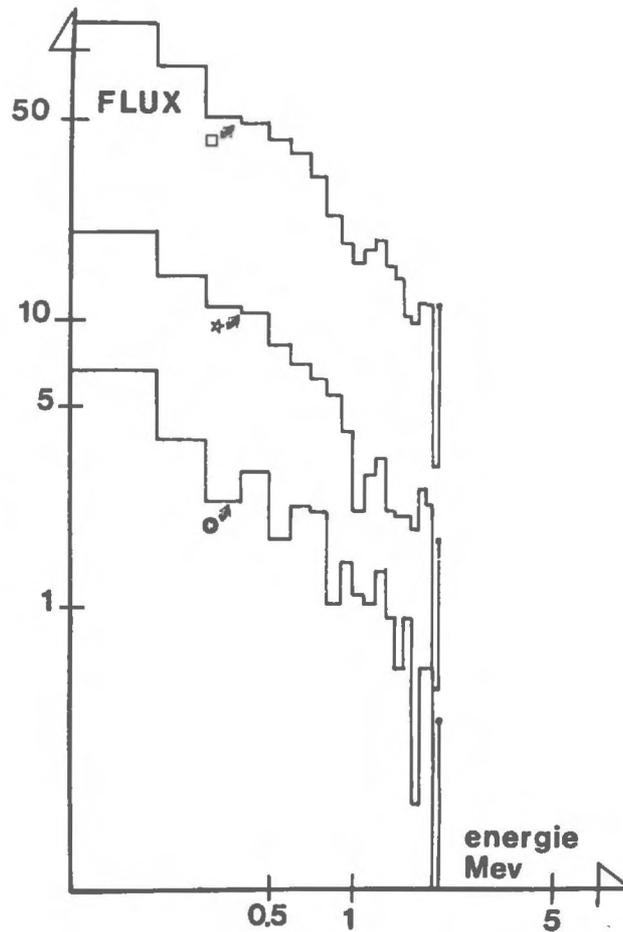


Fig. 46 - Spectre de neutrons rapides calculé sur 1000 histoires cumulées avec interposition de 20 cm de sol autour du tubage

- ⊙ sable sec
- ☆ sable saturé (40%)

Fig. 47 - Spectre calculé de neutrons rapides à travers un massif de sable de 20 cm pour une source de 2 MeV.

□ 0%, ☆ 20%, ⊙ 40%



dans des cylindres concentriques autour du tubage (fig. 45 et 46) ; le modèle rend compte de manière acceptable de la réalité. L'atténuation du spectre source (dans le cas présenté, source monoénergétique) s'accroît lorsque l'épaisseur de sol traversée, d'où une meilleure sensibilité aux neutrons rapides. Le spectre de ralentissement par contre ne se déforme pas sensiblement près de la source quand on passe du sable sec au sable saturé. La figure 47 reproduit le résultat obtenu dans la simulation d'un essai par transmission avec 20 cm de sable sec et humide. La source ($E_0 = 2$ MeV) est placée d'un côté du massif et le détecteur de l'autre simulé par le flux rapide à la surface du massif. On constate le bon accord avec les expériences présentées ci-dessus. Les temps de calcul, de l'ordre de quelques minutes, font de ce modèle un outil assez intéressant pour étudier les spectres de ralentissement dans les essais de transmission.

C - PARAMETRES NEUTRONIQUES DES SOLS

Nous avons mis en évidence tout au long de ce travail l'étroite relation qu'il y a entre les constantes d'absorption et de diffusion au stade thermique et les mesures obtenues avec l'humidimètre à neutrons thermiques ; ceci nous a amené à proposer une méthode nouvelle d'étalonnage qui s'appuie sur la mesure de ces paramètres. Nous allons nous y arrêter un instant.

1. Mesure directe des constantes thermiques des sols.

La méthode classique de mesure de l'absorption thermique d'échantillons quelconques (méthode jusque là non appliquée aux sols) consiste à introduire cet échantillon dans une pile en équilibre et à lui imprimer un mouvement périodique ; 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. La méthode d'oscillation de phase repose 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 une 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.

On a mesuré par cette dernière méthode les sections efficaces thermiques de plusieurs sols préalablement séchés à 105°C pendant 24 h. On note sur les résultats du tableau ci-dessous une variation importante d'un sol à l'autre : l'écart extrême de 1,11 mm²/g est à comparer à la section efficace de l'eau qui est de 2,20 mm²/g. On constate de plus une divergence sensible entre les valeurs calculées à partir de la composition chimique et les valeurs mesurées, ces dernières étant presque toujours plus fortes. Un tel écart exprime en grande partie la présence de traces non facilement dosables dans les sols ; il confirme la limitation de l'étalonnage par voie chimique. Mais la corrélation qui existe néanmoins entre calcul et expérience pour l'absorption explique les résultats relativement bons obtenus par cette approche pour l'humidimètre à neutrons thermiques.

Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées
du pouvoir absorbant des différents sols

Sol utilisé	expérimental mm ² /g	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	0,585
Nossi 3	1,13	0,857
Nossi 1	1,19	0,932
Nossi 2	1,21	1,00
Antanimalandy argile	1,33	1,18

Une telle mesure de Σ_a est assez longue et onéreuse. Justifiée par les résultats fondamentaux qu'elle fournit, elle n'est pas utilisable pour une détermination systématique appliquée aux humidimètres à neutrons. Grâce à un travail effectué en relation étroite avec les services du DPRMA (SECPR et SPE) a été mise au point et testée une méthode plus simple : déjà mis en oeuvre pour des évaluations de teneur en bore dans des échantillons d'aluminium, un empilement graphite calqué sur le montage Boréal a été construit à Cadarache. Un flux de neutrons thermiques est créé dans un bloc de graphite à l'aide d'une source d'AmBe de plusieurs curies ; un compteur au trifluorure de bore détermine la perturbation induite par l'introduction entre la source et le détecteur d'un échantillon de sol. La variation de comptage, obtenue pour deux échantillons, reflète la variation de leur capture, mais elle est influencée de manière importante par son pouvoir diffusant Σ_d . Une correction est nécessaire. Cette valeur Σ_d peut être atteinte par la teneur en eau de constitution des sols en application des résultats du premier chapitre ; cependant nous avons proposé, comme suite à des essais de transmission de flux thermique, une deuxième mesure : un compteur extérieur blindé de cadmium détecte le flux

thermique transmis depuis l'une des faces du massif à travers le même échantillon que celui mesuré à l'intérieur de l'empilement. On obtient une valeur représentative du pouvoir diffusant des sols, qu'il est possible de relier à leur teneur en eau de constitution ; dans cette mesure le pouvoir absorbant intervient peu. On a donc deux comptages N_i et N_e fonction tous deux de Σ_a et Σ_d . On en déduit, après étalonnage, les constantes thermiques de l'échantillon

2. Etude neutronique des sols.

a) Comportement neutronique des sols.

La mesure des constantes Σ_a et Σ_d permet de vérifier expérimentalement les relations $\Sigma_a (H_2O)$, $\Sigma_d (H_2O)$ présentées au premier chapitre et issues du seul calcul : la diffusion dépend de la teneur en eau de constitution et l'absorption ne suit pas une loi simple. Ceci a pour conséquence une dispersion des points représentatifs de la relation $\Sigma_a (\Sigma_d)$ montrant qu'il ne faut pas attendre la simplification d'étalonnage qu'apporterait une relation serrée.

La mesure de Σ_d permet d'approcher la valeur de la section efficace de diffusion de l'hydrogène du sol ($\sigma_{s,H}$) qui règle l'influence de la liaison chimique, sur la diffusion thermique. Pour cela, nous mesurons la diffusion thermique d'un sol ayant une teneur en eau de constitution connue, du même sol calciné à 1000°C, et enfin de ce sol réhumidifié ; en étudiant les relations entre la teneur en eau et la diffusion thermique pour les deux types d'expériences, on vérifie plus précisément l'identité ou la différence entre eau libre et eau liée. En comparant les valeurs obtenues aux valeurs calculées on pourra le cas échéant approcher une valeur plus exacte de $\sigma_{s,H}$.

La mesure directe de Σ_a et Σ_d peut enfin apporter un début de solution au problème de la microhétérogénéité du sol et plus particulièrement de l'influence éventuelle du pourcentage de vide sur la valeur des sections efficaces ; des essais doivent être faits dans ce sens avec des sols de granulométries différentes et de composition chimique identique.

b) Classification neutronique des sols.

La mesure de Σ_a et Σ_d permet une classification des sols vis à vis de la mesure neutronique tant à l'échelle de la parcelle qu'à celle du bassin versant ou de la région d'exploitation hydro-pédologique : les valeurs présentées en figure 48 montrent que, contrairement à ce que pouvaient faire penser certaines analyses d'éléments comme le Bore, le Manganèse ou le Titane (annexe p. 10), on ne doit pas s'attendre à des variations importantes et aléatoires du pouvoir absorbant des sols en fonction de la profondeur, ce qui est un facteur évidemment favorable pour l'application de la méthode neutronique. Il se manifeste une augmentation sensible de Σ_a en surface qui amènera en pratique à considérer cet horizon de façon privilégiée ; les mesures rapprochées faites dans le cas du sol A précisent bien ce phénomène. Par contre si on considère une couche de terrain à une cote donnée, la variation du pouvoir absorbant dans l'espace semble être faible ; dans le cas étudié ici, nous avons constaté, pour 12 prélèvements faits à la cote 50 cm, à 50 cm d'intervalle, une hétérogénéité de 4%, qui est à comparer aux 23% que l'on observe suivant la profondeur.

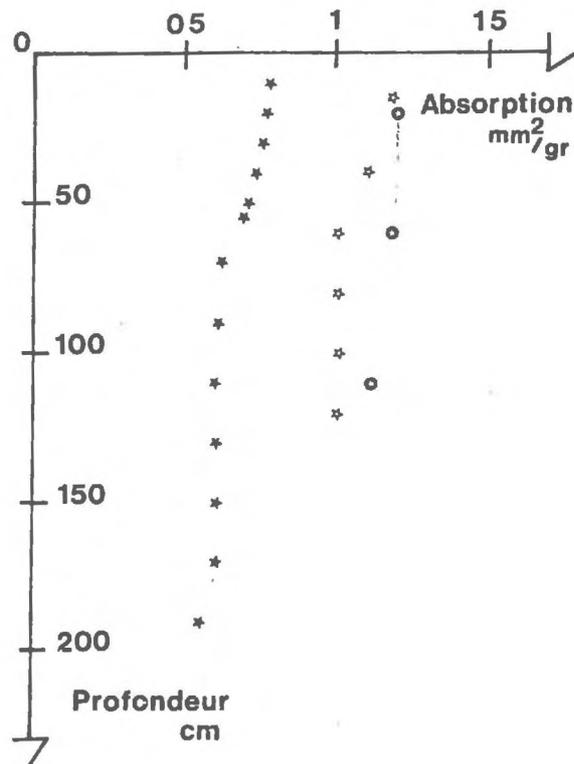


Fig. 48 - Evolution en fonction de la profondeur du pouvoir absorbant de trois sols

★ Sol A

Le pouvoir diffusant des sols, analysé par la teneur en eau de constitution nous permet d'aboutir aux mêmes conclusions d'homogénéité ; mais l'augmentation que nous constatons souvent, en fonction de la profondeur, peut être telle qu'elle fausse les interprétations d'étalonnage si l'on ne prend pas en compte cette variation (fig. 49). Sur cette base Maertens propose un étalonnage des humidimètres en eau totale ; si cette proposition a le mérite de corriger les erreurs dues à la diffusion, elle ne tient aucun compte de la variation du pouvoir absorbant qui n'est pas en relation directe avec la teneur en eau liée.

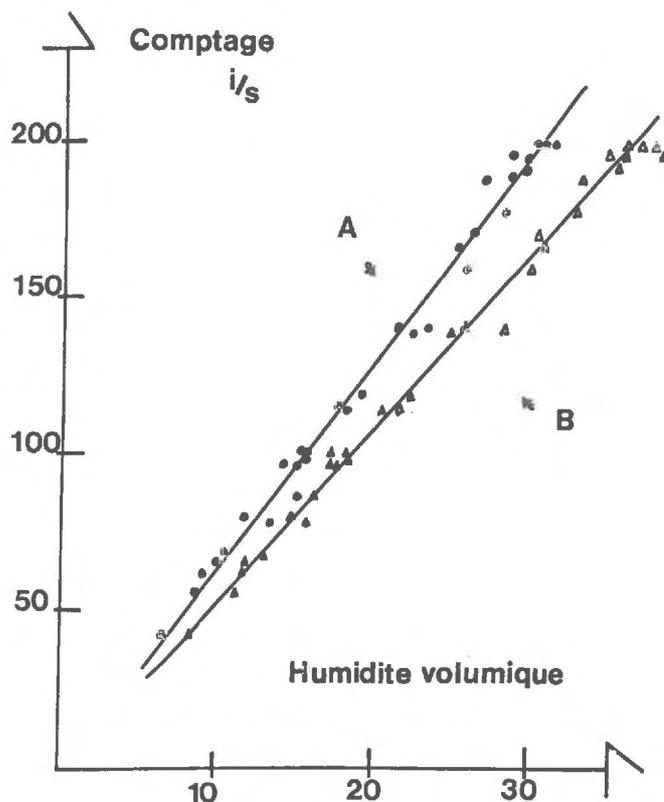
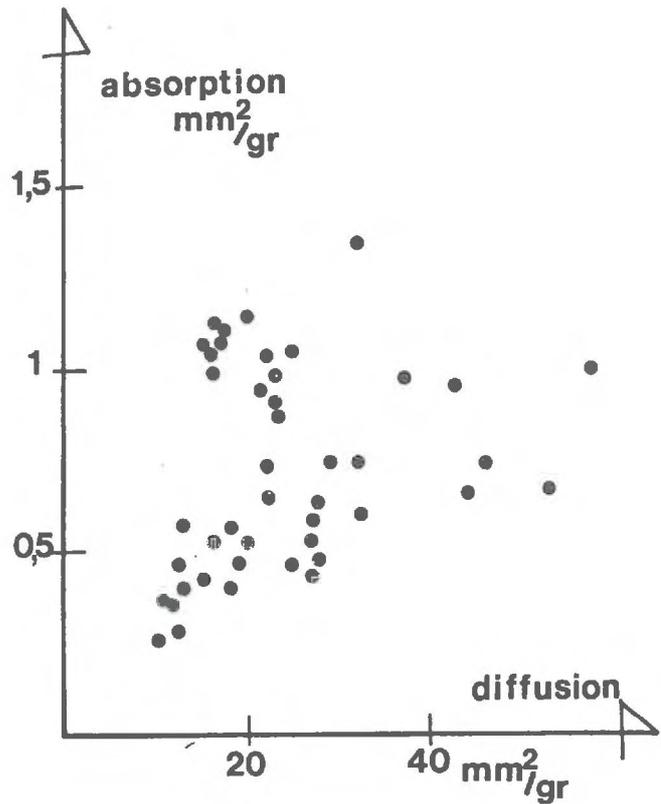


Fig. 49 - Points d'étalonnage expérimentaux pour un sol sableux avec variation de teneur en eau de constitution. La droite A correspond aux abscisses calculées en humidité volumique d'eau libre et la droite B correspond aux humidités volumiques totales.

La relation entre Σ_a et Σ_d (fig. 50) laisse entrevoir que les points images des sols étudiés pourront se rassembler en fonction des sites de mesures. Ceci est la conséquence du fait que d'une part l'absorption est significative de la présence d'éléments traces dans le sol, comme le confirment les spectres d'activation en pile que nous avons étudiés sur trois sols différents ; d'autre

Fig. 50 - Points représentatifs de la relation entre l'absorption des sols et leur pouvoir diffusant. Une analyse des résultats montre que les points se groupent par sites de prélèvement.



part la diffusion est représentative de la présence d'eau de constitution donc d'argile.

Nous avons là une dernière application des mesures directes de Σ_a et Σ_d qui intéresse les sols eux-mêmes. Il sera alors instructif de rechercher les relations possibles entre certains caractères géologiques et les constantes neutroniques correspondantes, la détermination du paramètre Σ_d nous renseignant sur les hydrogènes et celle de Σ_a sur les éléments traces qui peuvent, comme le manganèse, caractériser certains sols.

CONCLUSION

Au terme du dernier chapitre, il reste à justifier le parti que nous avons pris d'explorer la plupart des nombreux aspects de la méthode neutronique ; de même le lecteur a-t-il noté que nous présentons peu de développements, aussi bien sur les modèles physiques retenus que sur les expériences réalisées. Ce n'est pas méconnaître la complexité et l'intérêt de chacune des questions soulevées, mais nous avons voulu nous plier aux exigences du problème posé : à savoir la mesure, absolue et relative, dans une gamme étendue, de l'humidité des sols, milieux hétérogènes et discontinus, appréhendés dans des conditions géométriques très diverses. Aux multiples facettes de ce problème doivent répondre différentes possibilités de la méthode neutronique, nous espérons l'avoir montré en développant les applications de notre modèle en neutrons thermiques et les potentialités des neutrons épithermiques et rapides.

Pour éviter un fastidieux rappel du contenu des différents chapitres, nous soulignons quelques points qui nous apparaissent les plus importants et les plus originaux. L'étude du comportement neutronique des sols humides conduit à mettre en évidence les relations entre le pouvoir de ralentissement, la section efficace de diffusion thermique d'une part et la teneur en eau de constitution d'autre part ; ces deux valeurs sont définies dès que la teneur en eau est connue. La section efficace moyenne de transport rapide dépend quant à elle de l'eau de constitution mais aussi du sol "sec" ; ce phénomène est encore plus important pour l'absorption thermique. Mais il ressort de notre calcul

comme de nos expériences que la seule connaissance des constantes thermiques suffit à définir le flux thermique créé par une source de neutrons rapides plongée dans un sol humide. Nous avons exploité cette propriété intéressante en proposant une méthode d'étalonnage des humidimètres à détection de neutrons thermiques basée sur la seule mesure des paramètres de diffusion et d'absorption du sol au niveau thermique.

Cette innovation prend toute son importance quand on se rappelle le difficile chemin suivi depuis la mesure in situ jusqu'au calcul à partir de l'analyse chimique. Le massif de graphite qui permet la mesure sur échantillons nous fournit nombre de résultats sur des sites d'expérimentation divers et nous conduit à la notion de classification des sols par leurs caractéristiques neutro-niques. Ce nouveau critère qui est lié à la teneur en eau de constitution et en éléments traces pourra intéresser en lui-même le géologue, indépendamment de tout souci de mesure de l'humidité ; c'est une sorte d'analyse nucléaire très grossière, mais rapide et peu onéreuse.

Dans la méthode neutronique, les flux mesurés au voisinage de la source, dans un tube vide ou en surface ont une importante composante transitoire. Deux positions se sont manifestées devant ce problème : l'ignorance complète du phénomène dans la présentation de modèles physiques à formulations analytiques très simplifiées, la prise en compte de toutes ces composantes dans des codes de calcul très élaborés mais difficilement utilisables de manière intensive (surtout dans le cas des mesures de surface). La première attitude a vite limité le chercheur dans la compréhension des processus mis en jeu, surtout en ce qui concerne les questions liées à la géométrie de mesure ; la seconde fournissait une information absolue "chère" et bien trop précise en regard des expériences mises en oeuvre pour la vérifier. Nous avons montré que l'approximation de la diffusion en théorie multigroupe est à même de résoudre tous les problèmes posés par la mesure de l'humidité à partir de la détection du flux thermique, y compris la mesure en surface ; appliquée dans un modèle à deux dimensions elle nous a permis d'aborder toutes les questions liées aux conditions géométriques de mesure auxquelles n'avaient été apportées jusqu'à maintenant que des solutions expérimentales (influence du tube, volume de mesure, pouvoir de résolution de l'humidimètre, mesure en milieu semi-infini) ;

d'autre part un modèle à une dimension, corrigé pour la prise en compte du tube, s'est avéré très efficace pour simuler les variations physico-chimiques des sols et leur influence sur le flux thermique (courbe d'étalonnage des humidimètres, étude des sols caillouteux, mesure de l'humidité sur petits volumes).

Des propositions sont faites dans le domaine de la détection des neutrons épithermiques et rapides : un comptage épicaadmique complémentaire du comptage thermique est le moyen d'obtenir l'humidité indépendamment de la densité sèche des sols (mesure liée aux seuls paramètres d'absorption et de diffusion thermique) ; ce type d'humidimètre doit rendre des services dans le cas des sols caillouteux puisque nos études ont montré que l'influence des cailloux passe par la densité sèche. De même la double détection thermique-épicaadmique peut nous renseigner sur la variation en place de l'absorption thermique d'un sol en profondeur ; indiquons à cette occasion que le problème de l'étalonnage in situ n'est cependant pas soluble pour les raisons suivantes : la détection des neutrons thermiques obtenus depuis des sources d'énergie variable fournit des résultats dont le rapport est indépendant du milieu mesuré ; les mesures à deux niveaux d'énergie et à plusieurs distances ne permettent d'atteindre qu'une partie des paramètres ; enfin la méthode neutronique ne distingue pas les types d'eaux dans le sol. Par ailleurs nous avons réalisé l'application des méthodes spectrométriques au cas de l'ensemble "source artificielle de neutrons rapides-sol" ; la déformation du spectre source, lorsque celle-ci est introduite dans un sol, précise les limites de l'approximation faite en exprimant le flux rapide par séparation des variables énergie et distance : cette approximation se justifie dans le cas des mesures proches de la source. Enfin comme on le prévoyait, la détection en surface et en profondeur au voisinage de la source est inadéquate pour les neutrons rapides ; l'application la plus prometteuse est la mesure de l'humidité sur des colonnes ou des modèles bidimensionnels de sols en laboratoire à partir d'une source de ^{252}Cf et d'un scintillateur plastique, le seuil étant fixé après spectrométrie pour ne conserver que le spectre source ; dans ce travail le programme Monte Carlo simplifié que nous proposons est un bon complément des expériences.

Pratiquement tout dispositif de mesure neutronique de l'humidité fera appel à trois composants : une source, un détecteur et une électronique d'alimentation et de comptage. Le constructeur d'humidimètre devra veiller à rendre les humidimètres modulaires, ce qui est loin d'être réalisé. L'agronome ayant défini son problème étudiera en liaison avec le spécialiste la meilleure disposition de l'ensemble source-détecteur (pour une mesure de ruissellement, ce pourra être une source à 10 cm dans le sol et un petit détecteur en surface) ; il définira si la prise d'information doit être faite par enregistrement automatique sur papier ou sur cassette magnétique, ou par relevé périodique manuel des résultats. Se posera alors le problème de l'étalonnage : dans la mesure du possible un étalonnage linéaire est souhaitable et on obtiendra ce résultat en plaçant le détecteur à une distance de la source variant de 3 à 10 cm ou en intégrant sur quelques centimètres le flux thermique. La mesure en profondeur se fera avec le tube le plus étroit possible. Ceci étant fait, l'agronome aura à sa disposition le cas type de l'humidimètre de profondeur étudié dans ce travail et pour lequel une formulation analytique simple d'étalonnage est utilisable ; si les caractéristiques de son humidimètre sont proches de celles du cas type, on passera facielement de l'un à l'autre par simple rapport des comptages dans un milieu de référence ou par la relation linéaire de passage établie dans le sol lui-même. Ce sera le cas si l'on change de type de source (PuBe au lieu d'AmBe), si le diamètre du tube n'est pas trop supérieur à 40 mm, si la distance source-détecteur n'est pas trop importante. Dans le cas contraire la relation de passage pourra n'être pas linéaire. Le modèle à deux dimensions est alors utilisable pour définir l'étalonnage : connaissant les caractéristiques géométriques de la mesure, on ajuste si besoin est, par comparaison avec une dizaine de points expérimentaux, le modèle qui, à partir des valeurs mesurées de Σ_a et de Σ_d , fournit les courbes d'étalonnage.

Telle que nous venons de l'étudier la mesure neutronique de l'humidité ne se limite donc pas à la seule "sonde à neutrons" classique ; il s'agit bien d'envisager le domaine plus vaste de la méthode neutronique en évitant de s'enfermer dans le cercle restreint de quelques appareils existants. Au delà des mesures d'humidité, l'agronome est en droit d'attendre d'autres services de la méthode neutronique : c'est ainsi qu'il importe d'explorer toutes les possibilités offertes par la mesure directe des constantes thermiques des sols. La détermination, par la réaction gamma-neutrons, de l'eau deutérée doit rendre de bons services dans le marquage de l'eau en vue d'étudier les phénomènes de dispersion in situ. Enfin la neutronographie s'est avérée très féconde dans

l'étude de la répartition spatiale des racines dans un sol. Nous avons là trois exemples des développements attendus de la méthode neutronique qui offrent au chercheur des techniques nouvelles à ce carrefour de l'agronomie et de la neutronique que nous qualifierons de neutrono-agronomie.

En terminant, nous relisons l'extrait de l'étude de base de la FAO, cité dans l'introduction ; bien que nous fondions beaucoup d'espoir sur la méthode neutronique, notre expérience nous oblige à tempérer l'optimisme de l'organisme international. Puissant outil de mesure, la méthode neutronique nécessitera encore longtemps l'intermédiaire du radio-agronome pour être appliquée efficacement au développement des terres irriguées. Nous souhaitons qu'elle incite le chercheur à être encore plus exigeant dans ses études sur l'alimentation en eau des plantes et leur conséquence, l'irrigation des cultures.

Nous voudrions (...) inviter chaque homme à rentrer en lui-même : il lui faut sonder ses valeurs et ses fins tout autant que ce monde qu'il aspire à changer. A l'une et l'autre tâche, il faut se consacrer entièrement. Mais en fin de compte, l'important n'est pas tant de savoir si l'humanité veut survivre, mais si elle peut le faire dans des conditions où la vie vaut la peine d'être vécue.

(Le Comité exécutif du Club de Rome, 1972).

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

- ABAGYAN L.P., BAZAZIANTIS N.O., BONDARENKO I.I., NICOLAEV M.N.,
Utilisation des constantes multigroupes des neutrons rapides et intermédiaires
pour le calcul des réacteurs atomiques, Moscou (1964)
- ALLEN L.S., TITTLE C.W., MILLS W.R. and CALDWELL R.L.
Dual spaced neutron logging for porosity,
Geophysics vol. XXXII n°1, février 1967, 60-68
- AMALDI E.,
The production and slowing down of neutrons,
Encyclopedia of physics, 38/2 - 1959
- ANDRIEUX C., BUSCARLET L.A., GUITTON J., MERITE B.,
N.P. 11380, CEN Saclay, 1962
- ANL 5800, Second Edition, Reactor Physics constants (1963)
- APOSTOL I.
Moisture gauge calibration based on the distribution of neutron scattering
in construction materials,
Nucl. Eng. and Des. 4, 322-328 (1966)
- BALLARD L.F. and GARDNER A.
Density and moisture content measurements by nuclear method, interim report,
National Cooperative Highway Research program, 1965, Report 14
- BARSUKOV O.A., AUZYANOV V.S.
The space-energy distribution of neutrons in a stratum containing a bore hole
Atomnaya Energiya, vol. 10 n°5, 478-486, 1961
- BELCHER D.F., CUIKENDALL T.R., SACK H.S.
The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma ray scattering,
Civil Aeronautics Adm. Tech. Dev. Rep. 127, 1950
- BENZ L.C., Neutron moisture meter calibration for use in saline soils,
Agric. Engin. 1965
- BLAQUIERE A.
Théorie de la réaction de fission en chaîne
Bibliothèque des sciences et techniques nucléaires, INSTN 1962
- BLOEMEN G.W.,
L'étalonnage au champ des sondes à neutrons
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Mededeling 10, 1962
- BRUMMER E., MARDOCK E.S.
A neutron method for measuring saturations in laboratory flow experiments
Amer. Inst. Mining and Metall. Engineers, Los Angeles Meeting, 1945

BURN K.N.

Effect of iron on the determination of moisture content by the neutron method,
Can. J. Earth. Sci. 34, 129-32, 1966

CARRE J.C., VIDAL R.

Mesure des sections efficaces thermiques d'absorption de l'Al, du Mg, du Fe et
du Cu par la méthode d'oscillation
Rapport CEA R 2485, 1964

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

COHEN

Thermal neutron spectrum in harmonically bound hydrogen moderators
ORNL 2739 (1959)

COHEN O.P.,

A procedure for calibrating neutron probes in the field,
Israël Journal of Agricul. Research, 14, n°4, 169-78, 1964

COMTE R., DAUPHIN G.

Compteurs à protons de recul pour spectrométrie des neutrons,
note 2106/SER/1352, 1967

COREY J.C., BOULOGNE A.R., HORTON J.M.

Determination of soil density and water content by fast neutrons and gamma rays
Water Resources Research vol. 6 n°1, 223-29, 1970

CORROMPT P., CALMELS P.

Exploitation des informations contenues dans un flux de neutrons thermalisés et
possibilités d'application à la mesure de l'humidité et de la densité des sols
Colloque AIEA Istambul 1967

COTECCHIA V.

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

CZUBEK J.A.

Neutron-neutron well logging theory,
Proceedings of Symposium of Cracow, 1963, 127-45

DEUTCH R.W. and PODHOREX I.A.

Calculation of neutron age in hydrogenous mixtures
KAPL-M-RWD-13, 1962

DEUTSCH R.W.

Nucleonics 15, 1, 47-51 (1957)

DOUGLASS James

Volumetric calibration of neutron moisture probes
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30, 541-44, 1966

DUCHAUFOUR

Précis de pédologie

Librairie Masson, 1960

ETEMAD AKBAR,

Etude de la pénétration des neutrons thermiques dans des canaux cylindriques vides traversant un milieu hydrogéné

Thèse, Université de Lausanne, 1966

FISHER C.H.

Neutron scattering and soil moisture

Thèse, Department of civil engineering, 1962

GEIGER K.W., HARGROVE C.K.

Neutron Spectrum of an Am ²⁴¹Be,

Nuclear Physics 53 - 204-208

GEMMELL W., GREGOR B., MOSS G.F.

Estimation of moisture content by neutron scattering : theory, calculation and experiment

IJARI 1966, vol. 17, 615-20

GERVAISE F.

Programme Elf-Neutron

Note CEA N 1255, 1970

GOLDBERG I., NORMAN A., GILLIVRAY Mac, ZIEMER R.

Effects of neutron type source on soil moisture measurement

Isotopes and radiations 20-1, n°3

GLASSTUNE S., EDLUND M.

The elements of nuclear reactor theory

Nostrand Cie, Princeton, New-Jersey, 1962

GLAUBERMAN A.E., TALIANSKY I.I.

Neutrons flux distributions in media separated by a cylindrical boundary

Journal of nuclear energy 11, vol.8, 1958, 84-90

GREENBORG J.

Neutron attenuation mechanisms in concrete-concrete for nuclear shielding,

184-5

GRIMM

Clay mineralogy

Mc Graw Hill, Book Company, Inc. 1953

GUILLIEN R.

Physique nucléaire appliquée

Eyrolles éditeur 1963

GUILLOU G., QUILICHINI P.

Détermination des courbes d'étalonnage théoriques d'un humidimètre

Rapport SCE n°35, 1966

HAAHR Af WAGNER

Radioaktive isotopers anvendelse til jordbundsphysike målinger. Anvendelse af neutron-spredning til måling af jordens vandidhold
Grundförbättring 1963, 4

HANKINS DALE E.

The response of selected neutron monitoring instruments to several types of neutrons sources
LA DC 7702 - Conf. 660621-5, 1966

HASKELL C.C., HAWKINS R.M.

D₂O.²⁴Na. Method for tracing soil moisture movement in the field
Soil Sci. Soc. Proceed. 725-28, 1964

HASKIN L., GEHL Mary A.,

The rare-earth distribution in sediments
Journal of geophysical research vol. 67 n°6, 1962

HAWKINS R.L., OVERMAN R.F., COREY J.C.

²⁰⁸Tl and ²⁴Na. Sources for identifying soil water tagged with deuterium
Soil Sci. Soc. Am. Proceed. vol. 35 n°2, 199-201, 1971

HENIN S.

Minéralogie des argiles,
Masson, 1957

HOLMES J.W.

Calibration and field use of the neutrons scattering method for measuring soil water content
Aust. Jour. Appl. Sci. 7 , 45-48, 1956

IJIMA J., MIYASHITA Y., INAMOTO K.

Determinazione, mediante neutroni dell'humidita' nelle materie prime impiegate par la produzione della Ghisa
Nippon Kokan Giho 26, 90-100, 1963

KALNAES O., NELTRUP H., ØLGAARD P.L.

A recipe for heavy-water. Lattice calculations.
Riso Report n°81, 1964

KASHI S.

Influence of rare earths on neutron moisture measuring
Nuclear engineering and design, 8, 317-20, 1968

KASHI and KOSKINEN

Analysis calculation and measurement concerning the moisture measuring by the neutron method
Nucl. Engr. and Design, 3, 74-82, 1966

KEYS W.S., BOULOGNE A.R.

Well logging with ²⁵²Cf
SPWLA tenth annual logging symposium may 25-28, 1969

KIRKEGAARD P.

Monte-Carlo study of neutrons in soil for surface moisture gauges
Riso Report n°896, 1969

KOBILIANSKII V.B., TALIANSKII I.I., GLAUBERMAN A.E.

The distribution of neutrons in media with cylindrical interfaces for the case of off-axis source location

Soviet Advances in nuclear Geophysics F.A. ALESKEEV, New-York, 1955, pp.104-109

KOSHEVNIKOV D.A.

Calculation of the neutron characteristics of rocks

Trudy Moskov. Inst. Neft. I Gazovoi Prom. 14 : 54-75, 1963

KREFT A.

A generalisation of the multigroup approach for calculating the neutron slowing down length

Report n°321 I, Cracovie, 1972

KRISTENSEN K.J.

Depth intervals and topsoil moisture measurement with the neutron depth probe

Nordic hydrology, 4, 1973, 77-85

KRUZK 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

KULINKOVICH A.E.

On the solution of the neutron logging theory problem by the "Group" method

Soviet advances in nuclear geophysics edited by Alekseev, 1965

PAUL LAWLESS G., NORMAN A. MAC GILLIVRAY

Soil moisture interface effect upon reading of neutron moisture probe

Soil Science Proceedings vol. 27 n°5, 502, 1963

LERIDON A. and all

Spectrométrie par compteurs proportionnels à protons de recul

Note CEA N 1525, mars 1972

LEROY J.L., HUET J.L., GENTIL J.

Mesure des flux neutroniques d'énergie comprise entre 10 KeV et 1 MeV par la méthode du bain de manganèse et application à l'étalonnage d'un compteur

Rapport DRP/SMPNF/70/08, 1970

LIPPOLD W.J.

Monte-Carlo simulation of neutron thermalization in soils

Thèse, North Carolina State University, 1969

LORCH S.,

Mesure de la teneur en eau des sols à l'aide d'une sonde à neutrons

Z Geophysic. Dtsch. 29, n°6, 261-308, 1963

MAERTENS C. and all

Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à neutrons

Annales agronomiques, 16 (1), 5-23, 1965

MARAIS G., SMITH W.B. de V.

Effect of bulk density of soils on the calibration curve of the neutron moisture meter

S. Afr. J. Agric. Sci. 3, 457-77, 1960

MARAIS P.G., SMITH W.B. de V.

Laboratory calibration of the neutron moisture meter

S. Afr. J. Agric. Sci. 3, 581-601, 1960

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 SM 68/39, 1965

MEEM J.L.

Two group reactor theory
Gordon and Breach, New-York, 1964

MELKONIAN E.

Phys. Rev. 76, 12, 1750-59, 1949

MILLS W.R., JR

Detection of chemical binding of hydrogen
US patent 3, 497, 692, fév. 1970

MOUETONNET P.

Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols en surface
IJARI vol. 20, 23-27, 1969

ØLGAARD P.L.

On the theory of neutronic method for measuring the water content
Riso Report n°97, 1965

ØLGAARD P.L., HAAR U.

Comparative experimental and theoretical investigations of the DM neutron moisture probe
Nucl. Eng. and Design 5, 311-24, 1967

PALETIN N.I.

Effect of cylindrical channel on neutron diffusion
Energie Atomique 546-53, 1958

PERRIER E.R., JOHNSTON W.

Distribution of thermal neutrons in soil-water system
Soil Science 93, 104-112, 1962

PIEPER G.F.

The measurement of moisture content of soil by the slowing of neutrons,
Thesis, Cornell University, 1949

PRIESS K., GRANT P.J.

The optimisation of a neutron scattering water content gauge for soils or concrete
J. Sci. instr. 14, 541-51, 1964

PRIESS K., HACCOUN A.

A possibility study of a method for measuring chloride content of water in a borehole by neutron moderation
Department Report n°109, Neguet Institute for arid zone research, 1971

RUMIANTZEV G.Y., OMITRIEVA V.S.

Précision de l'approximation P_2 dans le problème de diffusion des neutrons dans un milieu avec un canal vide
Energie atomique vol. 25, n°6, 92-94, 1968

SALMON J.

Théorie cinétique des neutrons rapides
Bibliothèque des sciences et techniques nucléaires, 1961

SEMMLER R.A.

Neutron moderation moisture meters
Final Report, COO 712-73, 1963

SHEVELEV Ya, SAUL'EV V.K.

Certain aspects of the application of the diffusion two dimensional two
group program
Atomnaya Energya vol. 14, n°2, 200-205, fév. 1963

SZILVASI A.J., GEIGER K.W., DIXON W.R.

Study of neutrons from a Po-F (α , n) source
J. Nucl. Energ. part A reactor science vol. 11, 131-35, 1960

TALIANSKY I.I.

Neutron distribution in media with know properties and plane boundaries
Soviet Journal of atomic energy, vol. 4 n°4, 88-90, 1958

TAYLOR S.R.

Abundance of chemical elements in the continental crust : a new table
Geochemica et cosmochimica acta, vol. 28, 1273-85, 1964

TITTLE E.W., FAUL H., GOLDMAN CLARK.

Neutron logging of drill holes : the neutron neutron method.
Geophysics 16, n°1-4, 626-58, 1951

TITTLE C.W.

How to compute neutron transmission and diffusion.
Nuclear Chicago technical Bulletin n°12, 1962

TITTLE C.W.

The slowing down and diffusion of neutrons in hydrogenous media
Technical report n°21, 1962

TITTLE C.W.

Theory of neutron logging I
Geophysics vol. XXVI n°1, 27-39, fév. 1961

TITTLE C.W., ALLEN L.S.

Theory of neutron logging II
Geophysics vol. 31, n°1, 214-24, 1966

VAN BAVEL, NIELSEN D.R., DAVIDSON

Calibration and characteristics of two neutron moisture probe
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25, 329-34, 1961

VIALLETES J., Le THANH PHUNG

Utilisation du compteur proportionnel à ^3He pour la spectrométrie des neutrons
Rapport CEA 3310, 1967

WACK

Etude expérimentale de la mesure de l'humidité des sols par transmission de neutrons intermédiaires

CRAS t. 264, 1098-1101, juin 1967

WATERS E.H., MOSS G.F.

Estimation of water content by neutrons scattering : effect of sample density and composition

Nature 15, 209, 287-89

WEINBERG M., WIGNER P.

The physical theory of neutron chain reactors, 1958

WOZNIAK JAN

Solution of the neutron diffusion. Equation in an infinite medium with a cylindrical hole

Nukleonika, tome XVII, NR 9172, 433-37

YEMEL, YANOV

Neutron method for measuring soil moisture content and its future

Pochvovedenié, n°7, 1963

ZARACHENKO V.F.

Nuclear Geophysics investigations

Trans. n°6, Geophys. inst. Ural Branch. Acad. Sci. USSR, SVERDLOVSK 3, 1968

Autorisation de Soutenance accordée
TOULOUSE, le 16 JAN. 1974

Le Président
de l'Université PAUL-SABATIER



L. LARENG