

Homogénéisation des mesures d'humidité du sol faites avec diverses sondes à neutrons et à partir d'étalonnages différents

H. CAMUS

Maître de Recherches à l'ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé
(Côte d'Ivoire).

RÉSUMÉ

Plus de quatre années d'exploitation intensive de divers humidimètres à neutrons sur un bassin versant de 3 km² doté de 18 sites équipés pour les mesures ont apporté une solide expérience à l'auteur et lui ont permis de résoudre les principaux problèmes de méthodologie d'emploi.

Les progrès de la technologie ont en quelques années modifié les appareils à plusieurs reprises et conduit les spécialistes à essayer diverses méthodes d'étalonnage.

Comment rendre homogènes, c'est-à-dire comparables en termes de teneur en eau, des mesures neutroniques effectuées avec des sondes différentes pas toujours associées aux mêmes échelles de comptage? Comment veiller à la fidélité des mesures devant les risques dus à une utilisation intensive sur le terrain? Comment s'assurer qu'un tube est bien en place dans le sol et que l'étalonnage au champ reflète celui effectué en laboratoire?

L'auteur aborde tous ces problèmes, insiste sur la nécessité des contrôles « Point eau » et « Référence étui » avant et après les mesures, compare les méthodes d'étalonnage et montre leur complémentarité. Il opte finalement pour une homogénéisation des résultats en prenant une référence de 1 000 impulsions/seconde dans l'eau à laquelle il ramène toutes les sondes employées.

ABSTRACT

More than four years of an intensive utilization of several kinds of neutron moisture probes in a watershed, with 3 km² catchment area, equiped of 18 access tubes for measurements provided the author with strong experience and gave to him the ways to solve many problems of field procedures.

During a few years, the advance in technology had many times modified the neutron probes and pushed forward new calibration procedures. How to turn into homogeneous data, in terms of water content, soil moisture measurements made with different neutron probes not always connected with the same ratemeters? How to be sure of the measurements fidelity if it's taken account of risks due to an intensive field use? How to take care of a good installation of the access tubes into the soil and how to get reliable calibrations from chemical analysis and from field test?

The author is dealing with all these subjects. He stresses that tests of count rates in water and in probe socket are required before and after each daily measurement sequency. He also shows that the different calibration procedures are complementary. Finally, he get good homogeneisation of the results using a reference position of 1 000 counts per second to which he reduce measurements from all kinds of neutron probes.

SOMMAIRE

1. Les différents types de sondes
 - 1.1. Sondes à neutrons (1^{re} génération)
 - 1.2. Sondes à neutrons (2^e génération)
 - 1.3. Equipement de mesure automatique d'humidité des sols (EMHS)
 - 1.3.1. EMHS
 - 1.3.2. Interface de lecture
 - 1.4. Humidimètre neutronique à pointe

2. *Utilisation des sondes à neutrons*

- 2.1. Généralités
- 2.2. Relations théoriques pour le dépouillement des mesures
- 2.3. Cas d'utilisation de plusieurs sondes à neutrons sur le même bassin versant

3. *Dépouillements et homogénéisation des données*

- 3.1. Liaison Etui — Point Eau
- 3.2. Corrélation Etui — Point Eau
 - 3.2.1. Corrélation HP/IP 110, ensemble 125/125
 - 3.2.2. Corrélation HP/IP 110, ensemble 133/133
 - 3.2.3. Corrélation HP/IP, EC 310, ensemble 037/130
 - 3.2.4. Corrélation HP/IP, EC 310, ensemble 064/130
- 3.3. Homogénéisation des données

4. *Méthodes d'étalonnages*

- 4.1. Etalonnage expérimental ou au champ
 - 4.1.1. Principe de la méthode
 - 4.1.2. Etalonnage au champ (Profil 18)
- 4.2. Etalonnage théorique (Méthode Chimique)
- 4.3. Etalonnage par la Méthode « Sigma A »
 - 4.3.1. Principe de la Méthode
 - 4.3.2. Appareillage utilisé
 - 4.3.3. Méthode de mesure
- 4.4. Méthode SIGMA A — CADARACHE

5. *Résultats acquis sur le bassin de Korhogo*

- 5.1. Etalonnage au champ ou de terrain
- 5.2. Etalonnage théorique calculé
- 5.3. Etalonnage Sigma A
 - 5.3.1. Résultats — laboratoires Radioisotopes
 - 5.3.2. Résultats — Cadarache

6. *Comparaison entre les méthodes utilisées*

Bibliographie

Les sondes à neutrons pour mesurer l'humidité des sols sont des appareils de conception récente, d'où la diversité des types mis en service en quelques années.

La nouveauté de la technique a engendré l'élaboration de nombreuses techniques d'étalonnage apparemment concurrentes, en réalité plutôt complémentaires.

Il n'est donc pas anormal qu'au cours d'une étude s'étendant sur plusieurs années, on soit contraint d'utiliser divers types d'humidimètres neutroniques ayant fait l'objet d'étalonnages différents. Comment rendre homogènes les mesures d'humidité des sols ainsi obtenues. Tel est le but de cet article dans lequel nous avons pris le parti de tout rapporter à une sonde fictive de référence donnant 1 000 impulsions/seconde dans l'eau.

1. LES DIFFÉRENTS TYPES DE SONDES

L'utilisation de plus en plus grande qui est faite des sondes à neutrons dans divers domaines d'application, a conduit les chercheurs et techniciens du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), à modifier et à perfectionner les appareils successifs.

Il y a eu en service jusqu'à maintenant trois générations de sondes à neutrons. La première génération comprenait des ensembles dénommés HP/IP 100 et HP/IP 110, la deuxième génération comprend les ensembles HP/

IP 310 ou HP/EC 310 et enfin la troisième génération voit la naissance des sondes automatiques enregistreuses (EMHS).

Signalons toutefois qu'une quatrième génération de sonde est en préparation. Il s'agit d'une sonde simplifiée à enregistreur incorporé et ne comportant pas de protection. Nous ne possédons encore que peu de renseignements sur cet appareil.

Quelques renseignements seront donnés sur l'humidimètre neutronique à pointe ou humidimètre de surface, utilisé par MM. MOUTONNET et POURRUT [8] à Madagascar, pour les mesures d'humidité des sols en surface.

Afin de faciliter la compréhension du texte, nous signalons dès à présent que les sondes et échelles de comptage se désignent par des sigles tels que HP, IP ou EC.

La signification en est la suivante :

- humidimètre de profondeur (HP),
- intégrateur de profondeur (IP),
- échelle de comptage (EC),
- échelle de comptage portative (ECP),
- minuterie électronique (ME).

Comme les marques de véhicules, ces appareils ont un numéro de fabrication et dans le texte nous emploierons par exemple HP/IP 110, ensemble 125/125, ce qui doit s'interpréter comme humidimètre de profondeur type 110, n° 125 couplé avec un intégrateur de profondeur type 110, n° 125.

1.1. SONDES A NEUTRONS (première génération)

Le type d'appareil, précurseur de sondes plus élaborées, était celui des HP/IP 110.

Cet ensemble, comme les suivants, comprend : un bloc sonde (renfermant la source émettrice), un câble reliant cet appareil à l'intégrateur et un intégrateur (fig. 1).

La source émettrice de 5 mCi, étant une source de Radium-Beryllium (Ra-Be) émettant des rayons γ dangereux pour l'utilisateur, l'étui de protection en plomb prévu rendait l'ensemble assez lourd.

La gamme de lectures était réduite et ne dépassait pas 500 coups ou impulsions par seconde.

Malgré son poids et cet inconvénient ce type était cependant un appareil intéressant pour l'utilisateur de brousse, car étant alimenté par une série de piles rondes ordinaires de 1,5 v, il présentait un avantage certain pour travailler loin d'une source permanente d'énergie.

Le temps de stabilisation étant important, les lectures étaient longues et fastidieuses, car elles demandaient une attention soutenue pour repérer le maximum et le minimum d'impulsions par seconde pendant la période de mesure choisie (en général 60 secondes).

Cet équipement a été utilisé de 1968 à 1970 sur le bassin de Korhogo et à l'utilisation on peut porter :

a) au passif

- intégrateur sensible à l'humidité (amorçage avec la masse résultant de la diminution de l'isolement par suite de l'humidité régnant à l'intérieur de l'appareil) ;
- nécessité d'une plaquette T.H.T. en réserve au cas où l'intégrateur tombe en panne ;
- danger des rayons γ du Radium pour l'utilisateur ;
- poids excessif.

b) à l'actif

— alimentation sur piles, ce qui rend cet appareil utilisable sur le terrain quelles que soient les conditions d'éloignement. (Il est toujours possible d'emporter avec soi, une boîte de piles rondes de rechange).

1.2. SONDES A NEUTRONS (deuxième génération)

Ces sondes de deuxième génération regroupent les types de sondes dénommés HP/IP 310 ou HP/EC 310. L'échelle de comptage peut être couplée à une minuterie électronique du type ME 310 (fig. 2 et 3).

Les premières sondes 310 étaient comme les précédentes équipées elles aussi de sources Ra-Be (5 mCi) d'où l'étui de protection en plomb pour protéger l'opérateur du rayonnement.

Le remplacement de la source Radium-Beryllium par des sources Americium-Beryllium (Am-Be) de 100 mCi n'est intervenu que plus tard.

La grande différence avec les sondes de la première génération se situe au niveau de l'échelle de comptage.

Cet appareil plus moderne, a l'avantage de posséder une gamme étendue et des constantes de temps réglables ; les lectures sont simplifiées et rapides.

Ce nouveau type de sonde présente pour l'utilisateur de terrain avantages et inconvénients.

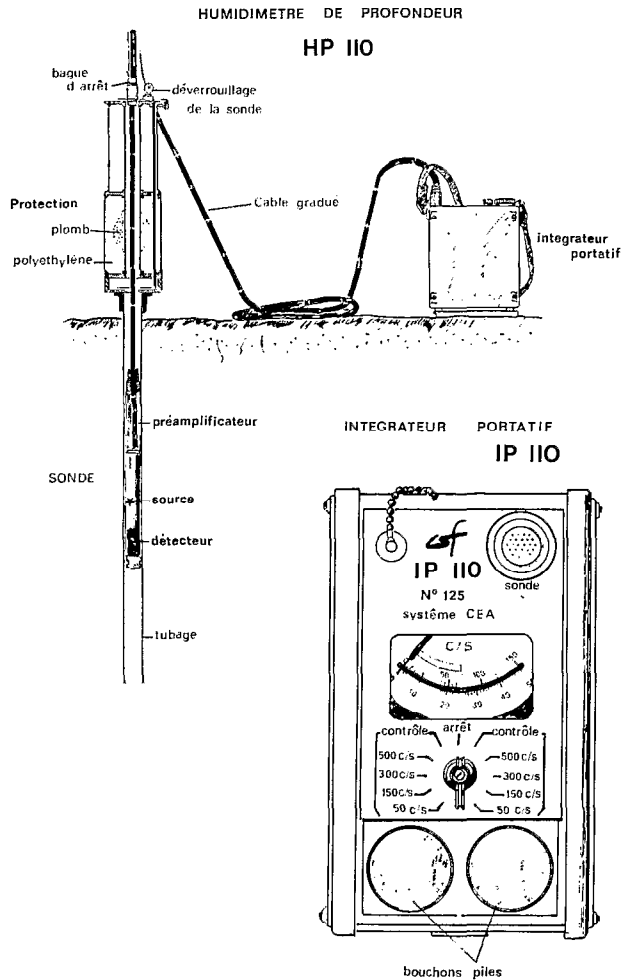


Fig. 1 — Sonde à neutrons. Ensemble HP/IP 110

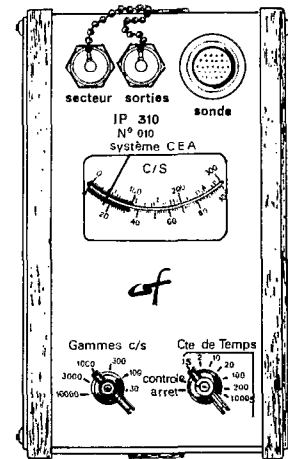


Fig. 2. — Intégrateur portatif IP 310

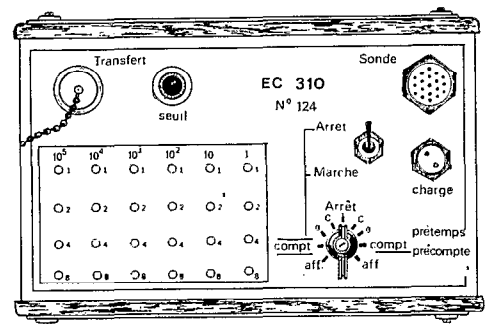


Fig. 3. — Echelle de comptage EC 310

- a) au passif
- échelle de comptage fonctionnant sur batteries, rechargeable sur le secteur après douze heures d'utilisation ; ceci suppose des possibilités d'alimentation en énergie électrique, à partir du secteur ou à partir de groupes électrogènes ;
 - relative fragilité des plaquettes de comptage sensibles à l'humidité. Il est cependant possible d'avoir des plaquettes de rechange : le remplacement, d'une très grande facilité, est fait en quelques minutes ;
 - ensemble beaucoup plus lourd, malgré la suppression de la gaine de plomb (avec source Am-Be) ; le poids de l'ensemble atteint environ 14 kg, minuterie comprise.
- b) à l'actif
- amélioration de la précision des mesures ;
 - gamme étendue de lectures allant de 1 à 999 999 i/s ;
 - lectures plus faciles (affichage du résultat) ;
 - temps de comptage pré-réglé si l'on désire (prétemps de 1, 2, 10, 20, 100 et 200 secondes). Il est conseillé cependant de faire l'affichage du résultat manuellement, car le précomptage avec affichage automatique est un gros consommateur d'énergie. On risque cependant avec cette méthode d'introduire une erreur due à la synchronisation de l'arrêt du chronomètre et de l'arrêt du comptage au temps désiré ;
 - possibilité en « manuel » de choisir le temps de comptage désiré. Cela est très intéressant dans les cas de répétition des mesures, mais il est cependant recommandé pour des mesures de routine, de ne pas descendre en dessous de 50 à 60 secondes, afin de ne pas nuire à la précision des mesures.

Enfin, signalons que l'ensemble HP 310 peut être équipé d'une échelle de comptage de type EC 310 ou bien d'une ECP 510 ou 511, avec affichage numérique. Cette ECP, d'une grande fiabilité, possède un prétemps réglable et annule les erreurs de lectures. Cependant c'est un ensemble encombrant et lourd, qui doit être plus ou moins utilisé en poste fixe.

1.3. EQUIPEMENT DE MESURE AUTOMATIQUE D'HUMIDITÉ DES SOLS (EMHS)

Cet équipement moderne permet de déplacer automatiquement une sonde de mesure dans un tube introduit dans le sol, en vue d'établir un profil de l'humidité en fonction de la profondeur. La sonde de mesure comporte essentiellement une source de neutrons rapides, et un détecteur de neutrons thermiques. Nous reprenons ici intégralement la description de l'appareil faite par P. COUCHAT, C. PALUMBO du Service de Radio-Agronomie de Cadarache et J.P. VOLAT et B. LEGRAND de la Société Bertin et Cie, Département Automatique et Informatique [7].

« L'ensemble d'acquisition et d'exploitation des mesures d'humidité est constitué de deux appareils :

— Un équipement de relevé de profil, portable, autonome, l'EMHS qui assure la gestion automatique des cycles de mesures, les mesures d'humidité proprement dite et l'enregistrement des résultats numériques sur bande magnétique, type minicassette.

— Un équipement interface de lectures des minicassettes, qui édite des informations enregistrées pour leur exploitation, soit par l'opérateur (par imprimante), soit par le calculateur (par perforation de bande)».

1.3.1. L'EMHS

« Cet équipement de terrain permettant la mesure neutronique d'humidité des sols, peut assurer trois types de fonctionnement :

a) Relevés des profils

Relevés des profils jusqu'à une profondeur minimale de 10 cm. Dans ce mode de fonctionnement la sonde de mesure descend à une profondeur donnée, puis remonte pas à pas, chaque pas étant suivi d'une mesure.

Le taux de neutrons est compté par la sonde pendant un temps donné (prétemps) et enregistré avec des données complémentaires telles que la cote de la mesure et la date.

L'enregistrement de la dernière mesure au terme de la remontée comporte des indications caractérisant le profil : N° du profil, hauteur aérienne, prétemps.

L'opérateur peut programmer tous les paramètres du relevé : nombre de pas, longueur de pas, hauteur aérienne, prétemps. Il peut de plus programmer le nombre de relevés à effectuer et leur période. Dans ce cas, l'enchaînement des profils est automatique.

b) Mesures d'humidité à niveau constant

La sonde descend alors à une profondeur donnée et à cette cote, effectue des mesures périodiques. Lorsque le nombre de mesures affiché est réalisé, la sonde remonte en position de référence.

L'opérateur peut programmer la cote où doivent se faire les mesures, le nombre, la période des mesures et le temps de comptage.

c) Mesures en sonde extérieure

Il est prévu un connecteur pour le raccordement d'une sonde neutronique externe. L'opérateur peut, dans ce cas, programmer le nombre de mesures à réaliser, la période des mesures et le temps de comptage.

L'équipement de mesure est constitué de 3 sous-ensembles.

— la sonde neutronique qui effectue le comptage des neutrons thermiques. Elle comprend un tube détecteur de neutrons thermiques, une source de neutrons, un module électronique qui assure à la fois la génération de très haute tension pour le détecteur, l'amplificateur et le calibrage des impulsions de mesure, la transmission de ces impulsions vers l'électronique d'enregistrement.

— le module mécanique comportant un treuil électromécanique et son circuit de commande, d'arrêt et d'inversion de sens de rotation. Le câble de liaison du treuil à la sonde assure à la fois la transmission de mouvement et le transfert sur un seul conducteur de la tension d'alimentation de la sonde et des impulsions de mesures.

La partie mécanique contient également un dispositif de protection biologique permettant la manipulation de l'appareil sans danger.

— le module électronique assurant les fonctions suivantes :

— La programmation des paramètres de fonctionnement :

nombre de pas :	0 à 99
Longueur de pas :	1 à 99 décimètres
hauteur aérienne programmée :	1 à 99 centimètres
prétemps :	1 à 99 dizaines de secondes
nombre de cycles :	0 à 99
période de cycles et d'information de repérage :	0 à 99 dixièmes d'heures
hauteur aérienne réelle :	0 à 99 centimètres
numéro du profil :	0 à 999

— la gestion automatique des cycles de mesures

— l'enregistrement digital sur minicassettes des résultats de la mesure.

Cet ensemble a un encombrement de $30 \times 44 \times 44$ cm, un poids de 25 kg, une autonomie moyenne de douze heures (extensible par batterie extérieure ou à partir du réseau).

1.3.2. Interface de lecture

Cet équipement a été développé pour assurer le dépouillement en laboratoire ou en centre de calcul, des enregistrements effectués sur le terrain.

Il transcrit les informations de la minicassette sur une imprimante et sur un perforateur de bande.

Sortie des résultats

Sur l'imprimante, les informations sont frappées de la façon suivante quelle que soit la mesure :

- 1^{re} ligne — la cote : 3 chiffres décimaux en cm
 - un blanc
- la mesure : 5 chiffres décimaux en dizaines de coups.
- 2^e ligne — le jour : 3 chiffres décimaux
 - un blanc
 - l'heure : 2 chiffres décimaux
 - un zéro
 - les minutes : 2 chiffres décimaux.

Pour la deuxième mesure d'un relevé de profil effectué en position de référence alors que la source est au milieu du bloc de protection biologique, on imprime une ligne supplémentaire.

- le numéro de profil : 3 chiffres
- un blanc
- hauteur aérienne réelle : 2 chiffres
- un zéro
- le prétemps : 2 chiffres décimaux en dizaines de secondes.

Sur le perforateur de bande, les chiffres sont perforés en code binaire sur les quatre premiers canaux. Le canal 8 est perforé lorsque les informations correspondent à une mesure en position haute.

Nous rappelons que la Société Bertin et Cie compte développer en collaboration avec le Commissariat à l'Energie Atomique, des équipements destinés à vulgariser et à promouvoir la méthode neutronique dans la mesure de l'humidité des sols.

Cet ensemble d'appareils, dont nous venons d'emprunter la description détaillée à une publication de MM. COUCHAT, PALUMBO, VOLAT et LEGRAND [7] sera mis en service en Côte d'Ivoire, en 1974, sur les bassins versants de Sakassou (région de Toumodi). Dans le même temps des mesures avec les ensembles HP, IP et EC 310 seront entreprises en divers sites des mêmes bassins.

1.4. HUMIDIMÈTRE NEUTRONIQUE A POINTE

Cet appareil a été utilisé par MM. MOUTONNET et POURRUT [8] à Madagascar pour des mesures d'humidité des sols en surface. Les méthodes classiques de contrôle de l'humidité de surface (prélèvements à la tarière par exemple) sont assez mal adaptées aux conditions et à la détermination, avant, pendant et après la pluie, de l'humidité instantanée de la couche superficielle du sol.

La mesure neutronique, installée à poste fixe, permet un contrôle non destructif et continu de la teneur en eau.

Un prototype a été mis au point par COUCHAT et MOUTONNET du CEA.

La description de cet appareil, utilisé par certaines sociétés [6] est la suivante :

- un humidimètre à pointe HS 310
- une échelle de comptage type IP 110, EC 310 ou ECP 500 et 511.

Humidimètre à pointe

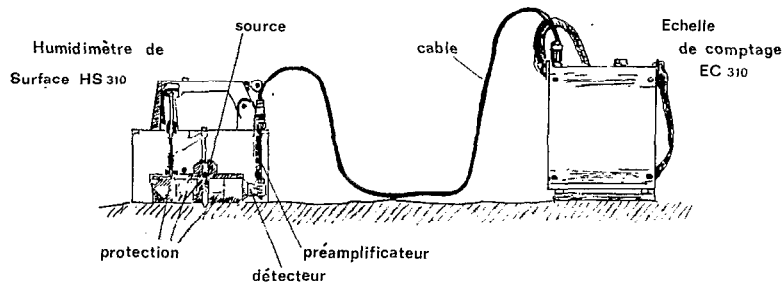
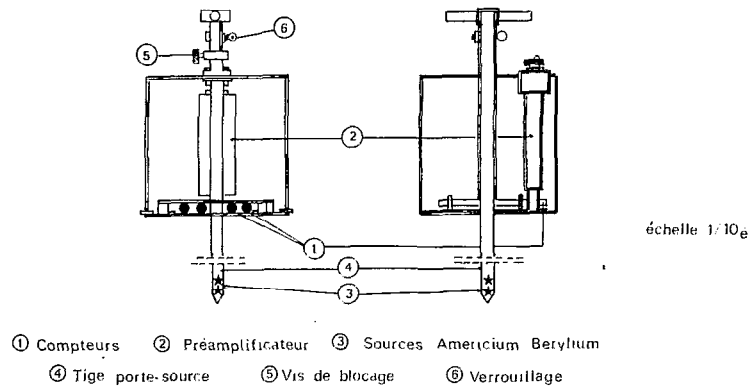


Fig. 4. — Mesure d'humidité en surface à l'aide de l'humidimètre à pointe

Sur la figure 4, nous donnons le détail de l'appareil qui est constitué essentiellement :

- de quatre détecteurs au trifluorure de Bore (1)
- d'un préamplificateur (2)
- d'une ou 2 sources d'Américium-Beryllium (3)

Ces sources se trouvent à l'extrémité d'une tige (4) qui permet de les introduire dans le sol jusqu'à une profondeur de 25 cm. Cette tige est graduée de façon à connaître la position exacte de la source par rapport à la surface du sol. Le système (5) permet de bloquer la tige dans la position choisie.

Afin d'empêcher toute fausse manœuvre lorsque l'on remonte la source, le système de sécurité constitué par un ergot a été prévu. Celui-ci évite que la partie radio active de la tige puisse être remontée au-dessus de la position repos. La source se trouve alors au milieu de la sonde — la tige est automatiquement verrouillée dans cette position grâce au blocage Neimann (6).

Cet appareil a été décrit par ailleurs [3]. D'autre part des variantes appliquées aux différentes mesures à réaliser ont été mises au point par certains utilisateurs [2], [6] ; raison pour laquelle nous bornerons là notre description de l'humidimètre à pointe, préférant renvoyer le lecteur aux articles cités ci-dessus.

2. UTILISATION DES SONDES A NEUTRONS

2.1. GÉNÉRALITÉS

L'utilisation des sondes à neutrons sur le terrain, ne présente pas de difficultés majeures (en dehors de la recharge de batterie pour la HP EC 310), cependant il est nécessaire de prendre certaines précautions afin d'obtenir des résultats cohérents.

Nous ne reviendrons pas sur la technologie de la mise en place des tubages, ni sur les précautions à prendre tout au long de cette phase très importante [9]. Il nous paraît toutefois nécessaire, au risque de se répéter, de rappeler que ces appareils sont grands, même assez fragiles et que leur manipulation doit se faire avec un minimum de précautions et de soins, tant dans leur transport que lors de leur utilisation sur le terrain.

En cours de mesure, sur le terrain, il est bon de mettre les appareils de mesure à l'abri du soleil, comme de la pluie. (L'intégrateur peut être placé dans une cabane prévue à cet effet, ou sous un parasol, ou encore dans une voiture). L'humidité ambiante, entraîne souvent des pannes à l'intérieur même de l'intégrateur. De même, avant la première mesure de référence Etui, il est recommandé de laisser chauffer l'ensemble 2 à 3 mn, et de bien vérifier le verrouillage de la source à l'intérieur de l'étui. Ces quelques rappels, ne sont pas inutiles, car on a trop souvent tendance à oublier certains détails techniques, qui viendront perturber la qualité des mesures.

2.2. RELATIONS THÉORIQUES POUR LE DÉPOUILLEMENT DES MESURES

En règle générale le dépouillement des mesures de sonde à neutrons se fait par rapport à une valeur sans dimension R [1].

R représente le quotient de la mesure M en un point donné par la valeur moyenne entre les mesures de l'Etui début et de l'Etui fin, tous éléments gradués en impulsions par seconde.

$$R = \frac{M}{E} \text{ dans laquelle } E = \frac{\text{Etui début} + \text{Etui fin}}{2}$$

Ceci suppose également que l'étalonnage sur le terrain a été fait par rapport à R, suivant l'équation :

$$Hv = aR + b \text{ où } Hv \text{ représente l'humidité volumique en } \%$$

Les valeurs Etui et point Eau dépendent directement du type de sonde utilisé. On peut dire qu'à une mesure M_1 faite en un point donné avec une sonde S, ayant une valeur Etui de référence E_1 , correspond une mesure M_2 faite au même point avec une sonde S' ayant un Etui de référence E_2 et que l'on a les relations :

$$R_1 \neq R_2 \text{ avec } R_1 = \frac{M_1}{E_1} \text{ et } R_2 = \frac{M_2}{E_2}$$

2.3. CAS D'UTILISATION DE PLUSIEURS SONDES A NEUTRONS SUR LE MEME BASSIN VERSANT

Le problème que nous voudrions traiter dans ce paragraphe, est en fait celui que peut poser à l'utilisateur, l'emploi au cours d'une campagne de mesures d'ensembles différents. Ce fut le cas à Korhogo, où de 1968 à 1970, nous avons utilisé, comme P. POURRUT sur la Tafaina (Madagascar) des ensembles HP/IP 110, et de 1970 à 1972 des ensembles HP/IP et EC 310. Nous décrirons également les problèmes de variations de la mesure Etui, donc de la mesure point Eau, après avoir rappelé l'intérêt de ces deux mesures, et verrons ensuite le processus que nous avons adopté pour le dépouillement des mesures.

L'utilisation de deux types de sondes, nous a amené à résoudre les problèmes suivants :

- 1) Passage d'une sonde à l'autre et homogénéisation des données
- 2) Problème d'étalonnage

Signalons ici qu'en quatre ans, sur le bassin de Korhogo, nous avons utilisé les ensembles suivants :

- type HP/IP 110 Sonde 125/125
 Sonde 133/133
- type HP/EC 310 Sonde 037/130
 Sonde 064/130

Avec les ensembles HP/IP 110, les observations sont directement faites en impulsions/seconde ou coups/seconde (i/s ou c/s). Alors qu'avec les HP/IP et EC 310, nous obtenons une somme d'impulsions pendant un temps choisi, toujours le même, que nous avons pris égal à 60 secondes. Le nombre d'i/s étant le résultat du nombre d'impulsions total divisé par le temps de mesure.

Il s'est de plus trouvé que lors de l'utilisation des différentes sondes, nous avons eu des variations non négligeables dans les Etuis de référence et dans les mesures point Eau.

Le point Eau doit avant tout rester la mesure de base. En cours d'utilisation, nous faisons des mesures systématiques du point Eau et d'Etui tous les deux jours. Ces mesures peuvent être selon les cas faites au laboratoire ou sur le terrain (il est recommandé de les faire sur le terrain) [9].

Afin que d'une série à l'autre, les observations soient valables, il est nécessaire qu'il y ait un minimum de variations entre les mesures point Eau de référence.

L'origine de ces variations est très diverse : piles défectueuses, batteries mal chargées, humidité dans l'intégrateur, mise à la masse des plaquettes etc. chaque intervention sur l'ensemble pouvant entraîner une variation.

En 1970, lors du passage d'un type de sonde à un autre, nous avons effectué sur l'ensemble des sites de mesures du bassin, des séries complètes de mesures ponctuelles avec les deux appareils. Ceci nous a permis de lier par une corrélation les mesures effectuées avec les deux types d'appareils.

Nous avons alors pris en compte les mesures point Eau et les mesures Etui correspondantes et nous nous sommes aperçus que celles-ci étaient liées.

En fait toutes ces recherches étaient motivées par le fait que certains étalonnages de terrain avaient été faits avec les ensembles HP/IP 110 et d'autres avec les ensembles HP/IP et EC 310. Il ne nous était pas possible de refaire des étalonnages pour chaque type de sonde en 18 sites de mesures.

Ceci nous a donc amené à chercher le moyen de ramener l'ensemble des mesures à des mesures que nous aurions obtenues avec une sonde de référence type, n'ayant pas de variations dans le temps, ni de l'étui, ni de la mesure point Eau.

3. DÉPOUILLEMENTS ET HOMOGENÉISATION DES DONNÉES

3.1. LIAISON ETUI — POINT EAU

Pour mieux représenter les problèmes posés, nous donnons ci-après des valeurs en *i/s* correspondant, pour deux types de sondes utilisés, à des mesures Etui et point Eau.

Date	HP/IP 110		HP/IP/EC 310	
	Etui	Point Eau	Etui	Point Eau
12-1-1971	139	401	414	1 257
13-1-1971	156	410	408	1 256
14-1-1971	146	416	405	1 246
16-1-1971	144	411	416	1 249
18-1-1971	144	412	414	1 257

Cet échantillonnage pris au hasard fait apparaître à la fois une fluctuation dans le temps entre Etui et point Eau obtenus avec un même type d'appareil, et d'autre part une grande différence de valeurs entre les mesures effectuées avec des ensembles différents. Cette fluctuation est un phénomène aléatoire d'origine nucléaire ; la précision des mesures, à 95% de confiance, étant de ± 2 impulsions/seconde.

Ceci ne pose pas de problèmes lorsque l'on a pu effectuer un étalonnage de terrain avec chacun des appareils. Dans notre cas, cette solution n'était pas possible.

Nous avons donc opté pour la solution qui consistait à homogénéiser les valeurs. Pour ce faire nous avons ramené toutes les observations effectuées, modifiées soit par corrélation, soit par correction, à des valeurs qu'aurait donnée une sonde de référence ayant comme valeur point Eau = 1 000 *i/s*.

C'est sur cette base que la totalité de nos dépouillements et calculs ont été faits.

3.2. CORRÉLATIONS ETUI — POINT EAU

Avant de ramener toutes les valeurs à celles qui auraient été mesurées avec une sonde de référence, il nous fallait connaître le coefficient de correction à apporter pour chaque type de sonde utilisé. Ceci nous a conduit à étudier pour chaque appareil, la corrélation Etui — point Eau.

Nous donnons dans les tableaux I, II et III les valeurs des Etuis et des points Eau qui ont servi à établir ces corrélations. Ces valeurs sont en fait des valeurs moyennes.

La variation des étuis pour les HP/IP 110 s'est échelonnée entre 110 *i/s* (nous avons même obtenu 98-100 *i/s*) et 150 *i/s* (cf. tableau I).

Etant donné les variations que nous avons observées, nous avons effectué, chaque fois, une série de 3 à 10

mesures, tant du point Eau que de la référence Etui. C'est la valeur moyenne de ces mesures que nous avons consignée dans les tableaux.

TABLEAU I
MESURES ETUI ET POINTS EAU DES TYPES HP/IP 110

HP/IP 110, Ensemble 125/125					HP/IP 110, Ensemble 133/133				
Date	Etui i/s	Nombre mesures	Point Eau i/s	Nombre mesures	Date	Etui i/s	Nombre mesures	Point Eau i/s	Nombre mesures
16-03-1970	115	2	364	2	13-03-1970	145	3	420	3
16-03-1970	114	2	366	3	16-03-1970	144	2	419	2
16-03-1970	116	2	368	4	21-03-1970	144	3	422	2
16-03-1970	115	2	368	2	29-03-1970	147	8	422	6
16-03-1970	149	3	440	3	31-03-1970	151	1	425	1
21-03-1970	114	5	361	4	02-04-1970	147	8	421	6
26-03-1970	112	5	354	3	02-04-1970	145	3	418	3
31-03-1970	111	1	350	1	08-04-1970	146	5	420	5
02-04-1970	110		355		16-04-1970	147	5	420	5
02-04-1970	110	3	355	3	23-04-1970	147	3	420	4
08-04-1970	110	3	355	3	19-05-1970	130	3	370	4
16-04-1970	113	4	361	5	26-05-1970	128	5	365	5
19-05-1970	138	3	385	3	27-05-1970	128	4	365	4
04-06-1970	136	4	382	4	28-05-1970	135	4	375	4
25-06-1970	134	4	375	4	30-05-1970	128	4	365	4
30-06-1970	129	6	362	6	03-06-1970	128	4	364	4
02-07-1970	129	4	365	5	04-06-1970	128	4	365	4
31-07-1970	132	4	375	4	07-06-1970	129	5	366	5
01-08-1970	136	3	380	3	08-06-1970	128	5	365	5
10-08-1970	134	3	380	3	17-06-1970	132	4	367	4
18-09-1970	143	3	392	3	22-06-1970	129	5	365	5
19-09-1970	142	3	393	3	22-06-1970	133	3	366	3
27-09-1970	137	3	384	3	25-06-1970	138	4	368	4
28-09-1970	133	3	386	3	31-07-1970	129	6	364	5
05-10-1970	135	3	382	3	11-08-1970	101	4	278	4
06-10-1970	139	3	390	3	17-08-1970	111	10	318	10
07-10-1970	137	4	386	4	25-08-1970	113	3	319	3
12-10-1970	135	2	386	2	27-08-1970	113	3	318	3
13-10-1970	141	2	400	2	31-08-1970	115	3	319	3
22-10-1970	140	2	394	2					
23-10-1970	150	2	402	2					
27-10-1970	150	7	403	6					
28-10-1970	141	2	396	2					
02-12-1970	148	3	407	3					
03-12-1970	145	3	405	3					
05-12-1970	144	3	413	3					
13-12-1970	141	5	405	5					
19-12-1970	142	7	402	6					
22-12-1970	144	6	405	5					
24-12-1970	141	9	392	7					
12-01-1971	139	5	401	6					
14-01-1971	146	5	416	4					
16-01-1971	144	8	411	4					
18-01-1971	144	8	412	4					
20-01-1971	144	8	409	5					

3.2.1. Corrélation HP/IP 110, ensemble 125/125

En raison de changement de préamplificateur de cet appareil le 2 juillet 1970, et au vu des résultats obtenus après cette modification il a fallu chercher une corrélation Etui/Eau valable pour les deux périodes d'utilisation.

Période antérieure au 2-7-1970

$$Y = 2,23 X + 108 \quad (12 \text{ couples})$$

Période postérieure au 2-7-1970

$$Y = 2,20 X + 86 \quad (33 \text{ couples})$$

Dans les équations des droites de corrélation données, Y représente la valeur du point Eau mesuré, et X la mesure Etui. Ces valeurs sont exprimées en i/s. Les points de mesures et les droites de corrélation sont portés sur la figure 5.

3.2.2. Corrélation HP/IP 110, ensemble 133/133

Nous disposons de 29 couples de points de mesures :

$$Y = 3,01 X - 23$$

(Cf. figure 6)

3.2.3. Corrélation HP/EC 310, ensemble 037/130

La droite de corrélation représentée a été calculée à partir de 31 couples de valeurs (cf. figure 7, tableau II) :

$$Y = 2,68 X + 146$$

TABLEAU II
MESURES ETUI ET POINTS EAU DE L'ENSEMBLE 037/130, TYPE HP/EC 310

HP/EC 310, Ensemble 037/130				
Date	Etui i/s	Nombre mesures	Point Eau i/s	Nombre mesures
27-10-1970	375	3	1 125	3
03-11-1970	410	3	1 249	3
04-11-1970	398	3	1 227	3
11-11-1970	410	4	1 245	5
13-11-1970	404	3	1 242	3
29-11-1970	403	4	1 227	4
02-12-1970	412	4	1 248	4
03-12-1970	402	3	1 222	3
11-12-1970	404	8	1 229	11
12-12-1970	410	9	1 255	12
12-12-1970	403	9	1 221	12
27-12-1970	406	6	1 241	6
29-12-1970	405	10	1 229	7
05-01-1971	417	10	1 254	6
06-01-1971	413	11	1 256	7
12-01-1971	414	6	1 257	7
13-01-1971	408	8	1 256	4
14-01-1971	405	7	1 246	7
15-01-1971	412	7	1 247	8
16-01-1971	416	9	1 249	5
18-01-1971	414	9	1 257	5
16-02-1971	515 *	9	1 386	5
16-02-1971	489 *	10	1 362	10
19-02-1971	436	10	1 310	10
22-02-1971	433	10	1 299	5
26-02-1971	436	12	1 308	12
27-02-1971	433	6	1 313	6
27-02-1971	437	6	1 315	6
03-03-1971	434	10	1 302	11
08-03-1971	435	12	1 307	12
18-03-1971	433	6	1 304	6
19-03-1971	436	6	1 308	7
20-03-1971	435	9	1 313	9

* Valeurs aberrantes, mauvais fonctionnement de l'échelle de comptage détecté par les mesures « Etui » de contrôle avant les mesures sur le terrain.

3.2.4. *Corrélation HP/EC 310, ensemble 064/130*

Cette corrélation a été établie à partir de 79 couples de valeurs et l'équation est la suivante :

$$Y = 3,06 X - 30$$

(cf. fig. 8 et tableau III)

Ces corrélations Etui-point Eau, ont été rendues nécessaires, en raison de la variation des valeurs Etui au cours d'une journée de mesure. En effet, ces mesures de base (point Eau et Etui) n'étaient effectuées que le matin avant une série de mesures. Il nous fallait donc lorsque la valeur Etui variait sur le terrain, entre différents profils, pouvoir recalculer le point Eau correspondant, puisque le point Eau devait servir de base pour l'homogénéisation des résultats.

TABLEAU III

MESURES ETUI ET POINTS EAU DE L'ENSEMBLE 064/130, TYPE HP/EC 310

HP/EC 310, Ensemble 064/130					HP/EC 310, Ensemble 064/130				
Date	Etui i/s	Nombre mesures	Point Eau i/s	Nombre mesures	Date	Etui i/s	Nombre mesures	Point Eau i/s	Nombre mesures
20-03-1971	443	6	1 330	6	06-06-1971	438	10	1 314	10
24-03-1971	439	9	1 301	9	07-06-1971	441	10	1 308	10
26-03-1971	437	6	1 312	6	08-06-1971	436	10	1 310	10
30-03-1971	432	6	1 300	6	12-06-1971	441	10	1 328	10
07-04-1971	431	3	1 298	3	16-06-1971	441	10	1 322	10
07-04-1971	437	3	1 814	3	19-06-1971	446	10	1 327	10
07-04-1971	437	3	1 315	3	22-06-1971	436	10	1 315	10
07-04-1971	437	3	1 309	4	28-06-1971	438	10	1 316	10
10-04-1971	435	6	1 310	6	30-06-1971	440	10	1 316	10
12-04-1971	437	9	1 306	9	04-07-1971	439	10	1 316	10
16-04-1971	434	9	1 311	9	13-07-1971	437	12	1 322	12
20-04-1971	440	9	1 320	9	19-07-1971	438	12	1 316	12
22-04-1971	432	9	1 307	9	19-07-1971	441	8	1 329	8
24-04-1971	435	9	1 319	9	26-07-1971	440	12	1 311	12
02-05-1971	434	3	1 306	3	05-08-1971	440	8	1 331	8
02-05-1971	439	3	1 320	3	05-08-1971	443	8	1 336	8
03-05-1971	441	13	1 318	12	12-08-1971	441	12	1 323	12
03-05-1971	440	3	1 303	3	12-08-1971	441	10	1 323	10
03-05-1971	440	6	1 322	6	25-08-1971	416	11	1 248	11
03-05-1971	438	9	1 319	9	02-09-1971	415	10	1 254	10
04-05-1971	433	3	1 302	3	14-10-1971	435	10	1 267	10
04-05-1971	434	4	1 305	4	20-10-1971	437	10	1 281	10
04-05-1971	437	3	1 315	3	28-10-1971	424	11	1 260	11
05-05-1971	431	9	1 320	9	30-10-1971	456	10	1 332	10
05-05-1971	434	6	1 325	6	06-11-1971	429	10	1 256	10
05-05-1971	434	6	1 328	6	10-11-1971	422	11	1 251	11
08-05-1971	439	6	1 320	6	16-11-1971	399	11	1 172	11
08-05-1971	439	3	1 316	4	03-12-1971	424	12	1 247	12
11-05-1971	439	7	1 314	7	09-12-1971	419	11	1 243	11
11-05-1971	441	3	1 312	3	18-12-1971	422	10	1 250	10
12-05-1971	430	6	1 312	6	27-12-1971	418	10	1 253	10
12-05-1971	434	6	1 319	6	27-12-1971	409	5	1 255	10
17-05-1971	439	10	1 309	10					
24-05-1971	439	10	1 317	10	07-01-1972	421	10	1 238	10
24-05-1971	440	10	1 327	10	12-01-1972	423	10	1 245	10
25-05-1971	440	10	1 326	10	19-01-1972	423	10	1 246	10
31-05-1971	438	10	1 321	10	06-02-1972	425	9	1 247	9

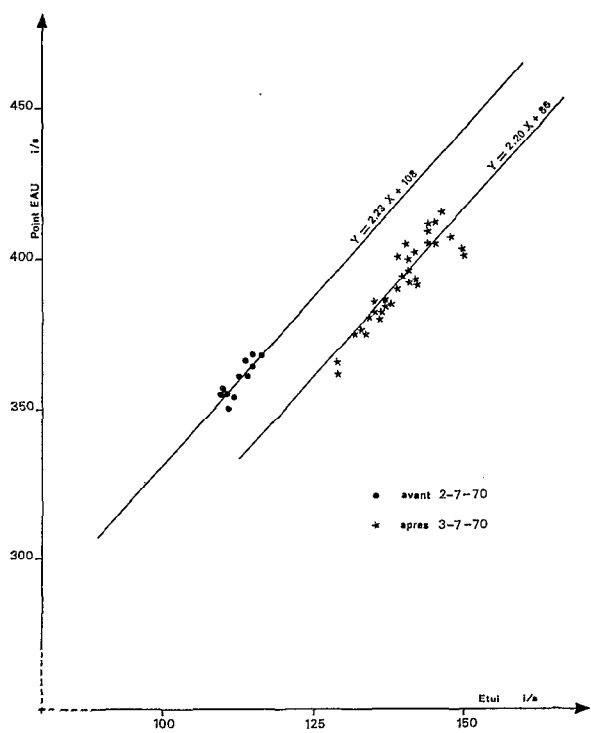


Fig. 5. — Corrélation Etui-Point eau HP/IP110. Ensemble 125/125

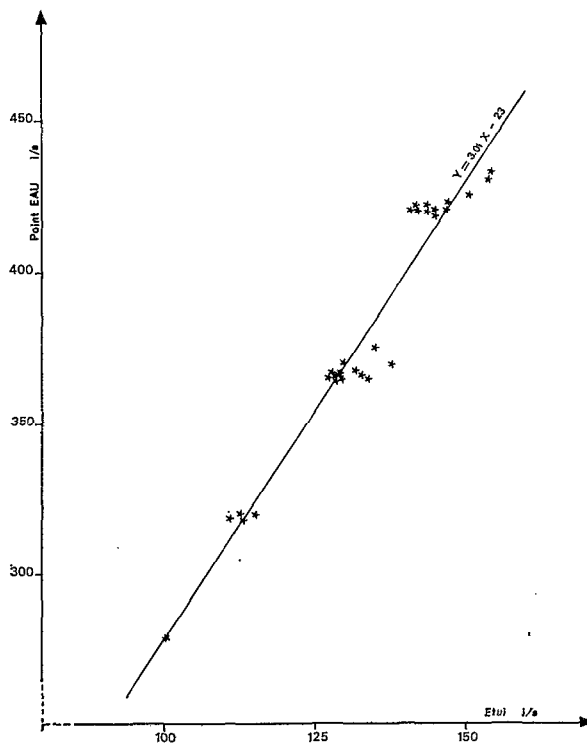


Fig. 6. — Corrélation Etui - Point eau HP/IP. Ensemble 133/133

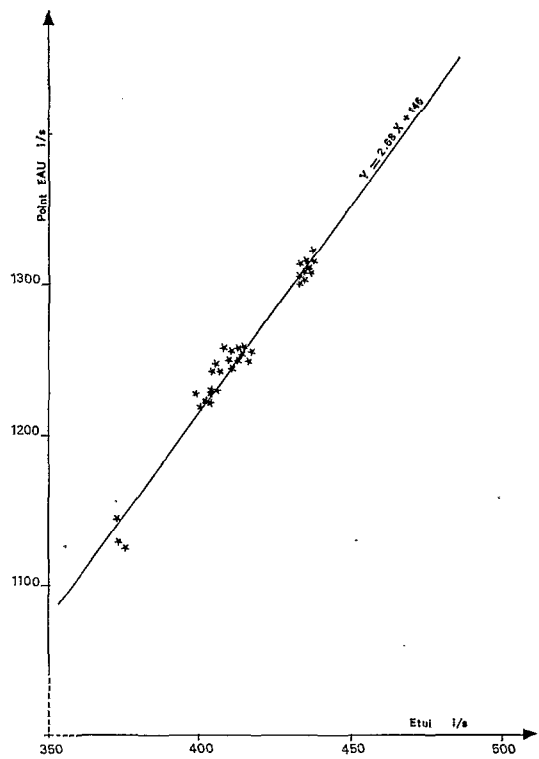


Fig. 7. — Corrélation Etui- Point eau HP/EC 310. Ensemble 037-130

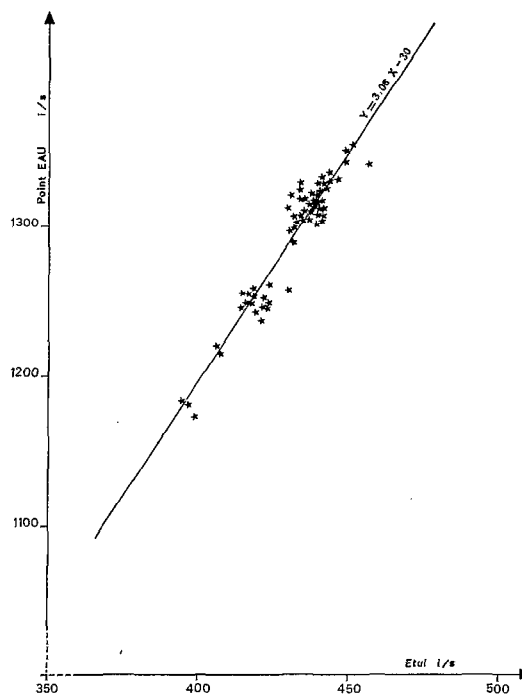


Fig. 8. — Corrélation Etui - Point eau HP/EC 310. Ensemble 064/130

3.3. HOMOGÉNÉISATION DES DONNÉES

En ce qui concerne les mesures effectuées à Korhogo, nous nous sommes aperçus qu'en raison de la dispersion des valeurs *Etui*, le dépouillement par la méthode identique à celle présentée au paragraphe 2.2. ne nous donnait pas entière satisfaction, certaines séries de profils étant incohérentes.

Nous avons donc opté pour une autre méthode, plus longue, mais qui en dépouillement automatique ne pose aucun problème. Elle consiste à ramener toutes les valeurs mesurées aux diverses sondes à neutrons à celles qui auraient été obtenues avec une sonde de référence, donnant comme valeur point Eau = 1 000 i/s.

Nous avons en effet préféré nous baser sur la référence point Eau, qui nous a semblé plus valable, que sur la référence *Etui*. Comme il ne nous était pas possible de disposer d'un fût pour cette mesure en chacun des 18 sites d'étude du bassin, nous avons pu, grâce aux corrélations, recalculer pour chacune des séries de mesures les points Eau correspondant aux valeurs moyennes des *Etuis* début et fin de chaque profil.

La valeur du point Eau calculée (O_c) est donnée pour chaque ensemble de type de sonde par l'équation :

$$O_c = cE_M + d$$

dans laquelle : c et d = coefficients constants

$$E_M = \text{Etui moyen mesuré}$$

La valeur de la mesure corrigée (M_c) ramenée à une sonde de référence donnant pour le point Eau 1 000 i/s (O_R) est définie par l'équation :

$$M_c = M \cdot \frac{O_R}{O_c} \text{ soit } M_c = \frac{M}{c E_M + d} \cdot O_R$$

dans laquelle :

M_c	=	Mesure corrigée
M	=	Mesure observée
E_M	=	Etui moyen du profil de la mesure
O_R	=	Point Eau de référence 1 000 i/s

Pour passer d'un type de sonde à l'autre, sans que les mesures soient incohérentes, nous avons à partir de 581 points de mesure faits avec deux types différents d'appareil, recherché les valeurs des corrélations, pour juger de la validité de cette méthode, par rapport à la méthode classique.

La première méthode avec le rapport R , nous a donné l'équation :

$$Y = 0,953 X - 0,311 \quad \text{avec} \quad r = 0,9885$$

La deuxième méthode avec

$$\frac{M}{c E_M + d} \cdot O_R$$

nous a donné :

$$Y = 1,0326 X - 0,0566 \quad \text{avec} \quad r = 0,9892$$

Dans ces équations Y représente les valeurs obtenues avec la HP/IP 110, ensemble 125/125 et X les valeurs de la HP/EC 310, ensemble 037/130 (cf. fig. 9).

On peut dire que les deux méthodes sont voisines. Mais en ce qui nous concerne cette seconde méthode présente par ailleurs l'avantage d'éliminer une source d'erreur liée à des défauts éventuels du bloc de protection en polyéthylène ; donc la mesure du point « *Etui* », sensible dans ce cas à la température, est plus raisonnablement remplacée par la mesure du point « Eau » qui correspond à une mesure plus concrète. C'est cette deuxième méthode de dépouillement que nous avons utilisée pour les observations neutroniques du bassin de Korhogo.

Il est évidemment nécessaire de ramener tous les étalonnages de terrain à la sonde de référence choisie.

Signalons, dès à présent, que, dans le cas où l'utilisateur de sonde à neutrons n'a pas de problème de changement d'appareillage en cours de la campagne de mesures, il n'est pas nécessaire d'effectuer les corrélations que nous avons été amenés à faire. Nous conseillons cependant de ramener toutes les mesures de terrain, y compris celles d'étalonnage, à une sonde de référence donnant 1 000 i/s dans l'eau.

4. MÉTHODES D'ÉTALONNAGE

A l'origine, une courbe d'étalonnage était fournie par le constructeur et valable pour un sol moyen.

Cependant lorsque l'on utilise l'humidimètre à neutrons, il est nécessaire d'étalonner l'appareil utilisé pour chaque type de sol étudié [10].

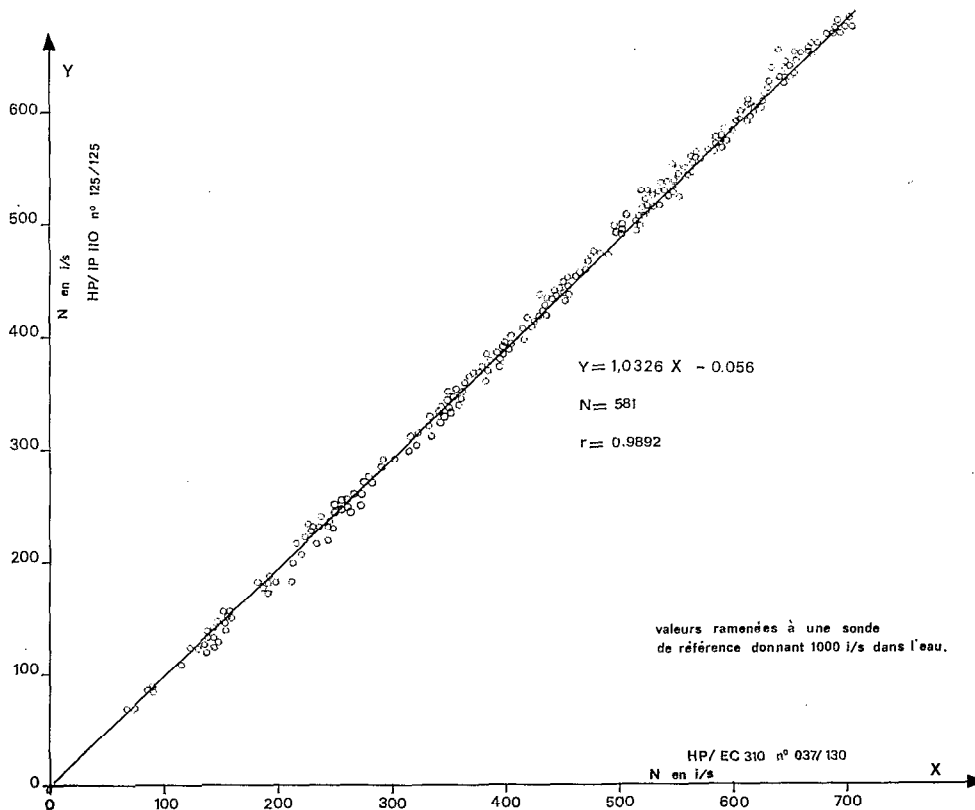


Fig. 9. — Corrélation entre une sonde HP/IP 110 et une sonde HP/EC 310 (2^e méthode)

Les noyaux d'hydrogène étant les plus influents, mais non pas les seuls, la densité de répartition des autres noyaux doit être prise en compte si l'on veut effectuer des mesures quantitatives d'humidité.

Cela signifie que la transformation des lectures directes en valeur de Hv % dépend :

- de la densité apparente ou densité sèche (d_a ou ρ_s)
- de la composition chimique du sol qui détermine sa section efficace d'absorption neutronique

Nous exposerons successivement, les quatre méthodes d'étalonnage que l'on peut utiliser et qui sont :

- 1) l'étalonnage expérimental ou au champ
- 2) l'étalonnage calculé ou étalonnage chimique
- 3) la détermination de la pente d'étalonnage (méthode Sigma A)
- 4) l'étalonnage calculé par la mesure de la section efficace d'absorption et de diffusion du sol (méthode Sigma A-Cadarache)

4.1. ETALONNAGE EXPÉRIMENTAL OU AU CHAMP

4.1.1. Principe de la méthode

Le principe de la méthode est simple : on relève à un moment de l'année (saison sèche de préférence, mais nous reviendrons ultérieurement sur la période à choisir) un profil hydrique à la sonde à neutrons $N = f(Hv)$ exprimé en impulsion par seconde (i/s). Dans ce même temps on relève un second profil $Hv \% = g(Z)$ exprimé en humidité volumique, à partir de mesures gravimétriques effectuées dans 6 trous verticaux, autour du tube d'étalonnage de profondeur Z, c'est-à-dire 6 mesures à une profondeur Z, 6 autres à une profondeur Z + 10 cm et ainsi de suite jusqu'à une profondeur correspondant à celle du tube d'étalonnage [10].

Les profils ainsi obtenus sont représentés par des courbes plus ou moins semblables par rapport à l'axe des Z. Si la relation d'affinité n'est pas respectée ou présente de trop gros écarts, il est possible en traçant ces courbes d'éliminer certaines valeurs (N, Hv) correspondantes d'un des points du profil.

Les couples de valeurs (N, Hv) conservés permettent de tracer une courbe d'étalonnage assez bonne, valable seulement pour un type de sonde donné et pour le type de sol considéré. On obtient en général des droites passant non loin de l'origine ; pour $Hv = 0$, N est assez faible.

Dans les cas de sols à horizons très différenciés, on peut être amené à tracer plusieurs courbes d'étalonnage, valables chacune pour des profondeurs différentes [1].

- Cette méthode fait donc appel sur le terrain à 3 série de mesures qui doivent être faites dans la journée :
- des profils neutroniques dans le tube « Etalonnage » et dans le tube servant habituellement aux mesures.
 - des mesures pondérales dans 6 trous autour du tube d'« étalonnage »
 - des mesures de densité (ρ_s ou d_a) dans une fosse pédologique située à proximité du tube d'étalonnage.

Nous rappellerons ici plusieurs points importants :

a) Les mesures pondérales prises en compte sont en fait la moyenne des 6 mesures effectuées au même horizon de profondeur Z, après élimination des valeurs aberrantes. Dans la plupart des cas, il n'a pas été possible de descendre au-delà de 2,50 — 2,60 m. Dans le cas où l'équipement comprend des tubages profonds, il est recommandé, si toutefois cela ne pose pas trop de difficultés, d'effectuer des prélèvements pondéraux jusqu'à la limite des tubages.

b) Les mesures de densité apparente (ρ_s ou d_a) ont été effectuées à l'aide d'un densitomètre à membrane, dans une fosse pédologique creusée au fur et à mesure.

c) Enfin les mesures pondérales, densimétriques et neutroniques ont été faites tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 1 m, et tous les 20 cm au-delà de 1 m.

Afin d'illustrer au mieux la technique de l'étalonnage au champ, nous donnons ci-après les résultats obtenus sur un profil du bassin de Korhogo.

4.1.2. Etalonnage au champ (Profil 18)

Cet étalonnage a été réalisé le 5 février 1970, avec une sonde type HP/IP 110, ensemble 125/125. Nous donnons dans le tableau IV, l'ensemble des résultats neutroniques, pondéraux, densimétriques et volumiques obtenus.

TABLEAU IV
RÉSULTATS DES MESURES NEUTRONIQUES, DENSIMÉTRIQUES
ET VOLUMIQUES
Etalonnage au champ du profil P 18 (Korhogo, cf. fig. 10)

1	2	3	4	5	6
Prof. cm	N i/s	N i/s	H _p %	d _a ou ρ_s	Hv %
10	66	70	2,07	1,64	3,4
20	90	90	4,58	1,77	8,1
30	109	110	6,55	1,60	10,5
40	122	126	8,05	1,44	11,6
50	129	133	8,98	1,64	14,7
60	130	136	10,94	1,60	17,5
70	130	137	12,74	1,53	19,5
80	130	139	13,64	1,32	18,0
90	128	134	14,73	1,39	20,5
100	125	134	16,45	1,29	21,2
120	120	130	16,35	1,36	22,2
140	118	140	15,57	1,49	23,2
160	118	136	15,63	1,36	20,4
180	119	135	16,32	1,24	20,2
200	126	142	15,23	1,33	20,2
220	132	142			

2. — Impulsions tube « étalonnage ».

3. — Impulsions tube de « mesure ».

Étui moyen de la mesure sur tube étalonnage E = 111 i/s et étui moyen sur profil mesure E = 110 i/s.

Ces résultats permettent de tracer les profils correspondants (cf. fig. 10).

Les équations d'étalonnage peuvent être données sous l'une des formes suivantes :

$$\begin{aligned} H_v \% &= a R + b \\ N \text{ i/s} &= a_n H_v + b_n \end{aligned}$$

ou

$$H_v \% = \frac{1}{a_n} N - \frac{b_n}{a_n}$$

En ce qui concerne le profil 18, nous avons calculé les étalonnages donnant H_v en fonction de R et de N . Dans un premier temps nous avons considéré l'ensemble des points de mesures (soit 15) et calculé les courbes d'étalonnage pour une densité moyenne de 1,60 entre les profondeurs 0 et 80 cm, et une densité moyenne de 1,35 entre 90 et 220 cm.

Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{aligned} H_v &= 22,5 R - 6,7 \\ N &= 2,39 H_v + 77,0 \end{aligned}$$

ou

$$H_v = 0,418 N - 32,2$$

En ne considérant que 7 points de 0 à 0,80 m (élimination de la mesure à 0,70 qui semble aberrante) on obtient les droites d'étalonnages suivantes :

$$\begin{aligned} H_v &= 23,8 R - 11,7 \\ N &= 4,35 H_v + 58,5 \end{aligned}$$

ou

$$H_v = 0,230 N - 13,4$$

Si l'on prend en compte en plus de ces 7 valeurs, celles correspondant aux mesures des horizons 1,20 m, 1,40 m et 1,60 m, les droites d'étalonnage deviennent :

$$\begin{aligned} H_v &= 27,1 R - 12,7 \\ H &= 2,56 H_v + 75,2 \end{aligned}$$

ou

$$H_v = 0,391 N - 29,4$$

Que constatons-nous au vu de ces résultats?

- a) tout d'abord qu'en règle générale, l'étalonnage doit être calculé sur des couples de valeurs (N , H_v) comparables et non dispersés ;
- b) qu'il est préférable, en raison de la variabilité des résultats obtenus, de prendre une valeur moyenne de densité apparente en fonction de l'horizon pédologique considéré ;
- c) que les valeurs des humidités pondérales obtenues à des profondeurs supérieures à 1 m, sont sujettes à caution, car il est difficile de savoir ce que l'on mesure vraiment.

Ceci étant dit, nous avons retenu comme valeur d'étalonnage pour ce profil :

$$H_v = 23,8 R - 11,7$$

et

$$H_v = 0,230 N - 13,4$$

(Sonde de type HP/IP 110, ensemble 125/125)

Dans l'exemple que nous venons de citer, les écarts entre les différentes courbes, au-delà de 0,80 m de profondeur sont dues à deux causes :

— Il est possible que le colmatage du tubage se soit mal fait. En ce cas en saison sèche (époque à laquelle a été fait l'étalonnage) les valeurs neutroniques sont sous-estimées (présence de vides le long du tubage).

— Le terrain étant dur au-dessous de 0,80/0,90 m, les prélèvements à la tarière pour les mesures d'humidité pondérale ne correspondent à rien. En effet, pour descendre dans un sol dur, le fait de tourner énormément la tarière crée un échauffement ainsi qu'un effritement des parois, et l'échantillon remonté n'est plus tellement représentatif de l'horizon auquel il a été prélevé. Nous pensons que la méthode de prélèvements horizontaux autour d'une fosse pédologique creusée au fur et à mesure doit donner de bien meilleurs résultats.

Ceci nous amène à parler de la période ad-hoc pour réaliser l'étalonnage de terrain.

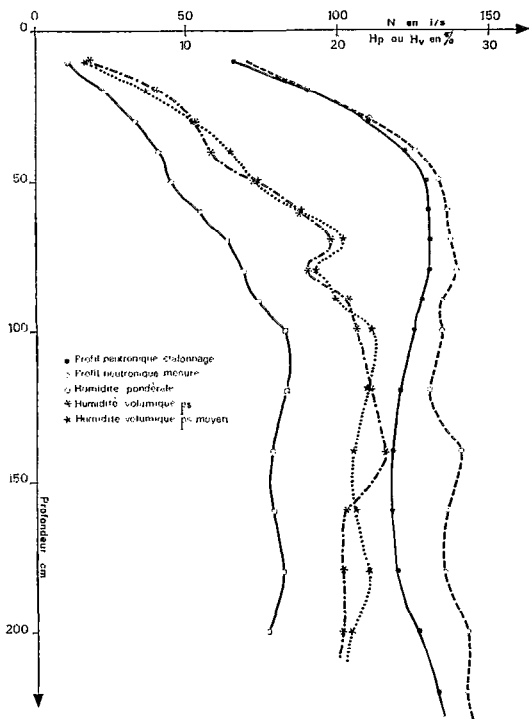


Fig. 10. — Etalonnage au champ P 18

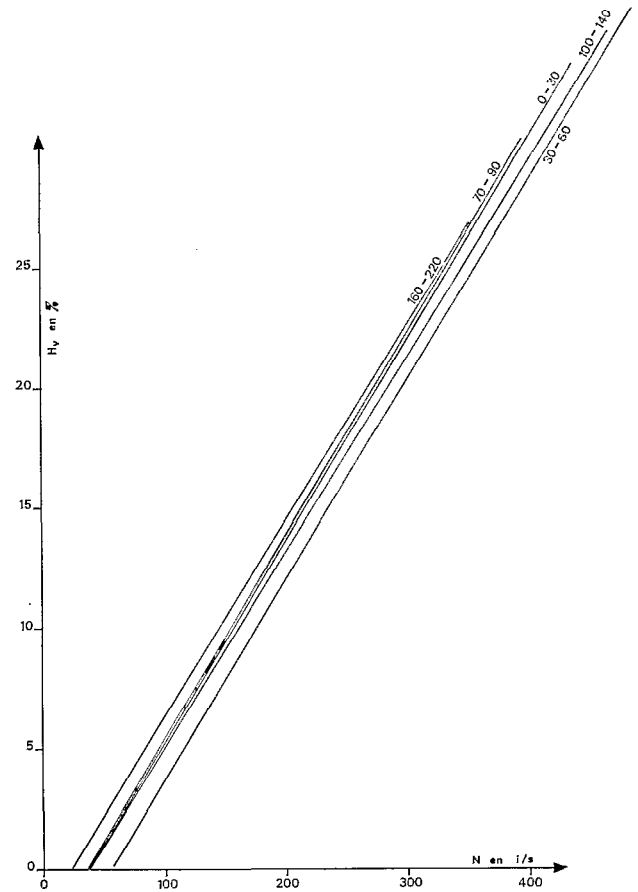


Fig. 11. — B.V. de Korhogo. Etalonnage chimique P 18.
Courbes par horizon

En règle générale, on préconise de faire l'étalonnage de terrain en saison sèche car c'est à cette époque que la gamme des humidités entre la surface d'un sol et une certaine profondeur est la plus étendue.

A la lueur de notre expérience, nous estimons que l'étalonnage devra se faire en période de présaison des pluies, c'est-à-dire, lorsque les terrains, sans attendre qu'ils soient à capacité de rétention, ont reçu un minimum d'eau suffisant pour permettre le gonflement des particules argileuses et assurer ainsi un meilleur colmatage des tubes de mesures. Les valeurs d'humidité entre la surface et le fond, sont alors encore suffisamment différentes pour que l'étalonnage soit bon.

En effet, il n'est pas possible d'avoir un étalonnage correct, lorsque les valeurs d'humidité de surface et de profondeur sont très voisines (cas d'un sol à sa capacité de rétention par exemple.)

En saison sèche, les terrains sont plus durs, mais nous pensons qu'il peut y avoir en raison de la rétraction des argiles, un léger décolmatage du tubage, néfaste à la qualité des mesures neutroniques.

Il faut tenir compte également des types de sol sur lesquels l'opérateur travaille, il est évident qu'un sol de bas fond à hydromorphie permanente ou semi-permanente, ne posera pas autant de problèmes qu'un sol rouge de plateau à tendance ferrallitique.

L'opérateur doit donc ainsi tenir compte également du critère type de sol, et de la situation de ce sol (sous savane, sous forêt, ou sous sol nu).

Ceci nous amène aux conclusions suivantes pour la procédure à suivre :

- Sur sols assez durs ou durs, étalonnage au champ en présaison des pluies
- Choix des couples de valeurs (N, Hv) cohérents (élimination des points aberrants)
- Densité moyenne ρ_s par horizon pédologique

Nous donnerons ultérieurement les résultats des étalonnages de terrains effectués à Korhogo.

Enfin, avant de parler des autres méthodes d'étalonnage possibles, nous pensons qu'il est bon de rappeler que *seul l'étalonnage de terrain permet de travailler en valeurs absolues*. C'est à partir de cet étalonnage que l'on peut calculer la capacité de rétention, et approcher les valeurs du point de flétrissement. Il semble cependant que la méthode Sigma A, améliorée par le Centre de Radio-Agronomie de Cadarache, puisse désormais donner de bons résultats.

4.2. ETALONNAGE THÉORIQUE CALCULÉ (méthode chimique)

Il est tentant de chercher à prévoir, par un calcul théorique, la forme des courbes d'étalonnage en fonction de la densité et de la composition chimique du sol.

A l'heure actuelle le problème majeur posé par l'utilisation de l'humidimètre à neutrons est l'établissement de la courbe d'étalonnage. La méthode classique, par gravimétrie, conduite en laboratoire ou au champ, reste une opération longue et coûteuse, au surplus elle apporte peu d'informations sur la cause des variations observées, tant en fonction de la densité sèche que de la nature du sol. Une recherche théorique menée de pair avec l'expérience semble être le mode d'approche adéquat pour déterminer l'influence des paramètres de mesures sur la réponse de l'humidimètre.

« P. COUCHEAT [5], du Service de Radio-Agronomie du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache a mis au point un modèle mathématique de représentation de l'humidimètre et du milieu étudié (défini par sa composition chimique totale). Ce modèle construit à partir de la théorie à 3 groupes de diffusions des neutrons, utilise le code Fortran IV.

L'exploitation de ce modèle par ordinateur permet de calculer, pour un sol, défini par ρ_s (densité sèche) et sa composition chimique (11 éléments étant pris en compte) :

- la valeur du flux de neutrons thermiques en fonction de la distance à la source.
- la vitesse de comptage fournie par l'appareillage en fonction de Hv .

Une première confrontation des résultats avec l'étalonnage expérimental d'un sol de Cadarache a mis en évidence des différences systématiques. On a repris alors l'étude théorique dans le cas de milieux artificiels de composition chimique simple (comme le sable, l'hydrargilite etc.), le contrôle de l'étalonnage calculé étant effectué avec la sonde à neutrons, en opérant dans un fût.

Pour un milieu artificiel déterminé, les écarts entre les valeurs calculées et observées du flux neutronique pouvaient être justifiés par la prise en compte de certains paramètres :

- paramètres du système de mesure :
 - 1) Existence du tubage dans le trou de sonde (diminution du flux neutronique, à proximité immédiate de la source, compensée par une augmentation du rayon de la sphère d'influence).
 - 2) Existence de raies secondaires dans le spectre d'émission des neutrons
 - 3) Comptage parasite de certains neutrons « épicaudmiques », c'est-à-dire d'énergie égale ou supérieure à 0,4 eV donc n'ayant pas atteint tout à fait le stade « thermique » de 0,025 eV.
- paramètres du milieu étudié :
 - 1) Présence d'éléments absorbateurs de neutrons (chlore, potassium, fer, titane, etc.)
 - 2) Présence de l'eau de constitution, qui comparée à l'eau libre, pourrait avoir vis-à-vis des neutrons, un comportement différent. (Mais les expériences en cours semblent prouver le contraire).

Le modèle mathématique ayant été adopté par la prise en compte des paramètres évoqués ci-dessus, permet cette fois de prévoir les vitesses de comptage avec une bonne précision, pour les quelques sols étudiés.

La composition chimique définit donc pour un sol un faisceau de courbes d'étalonnage théoriques ayant pour paramètre la densité sèche ρ_s . Le comptage N est donné par la fonction $N = f(\rho_s, Hv)$. Le calcul théorique montrant que la dérivée partielle de N par rapport à ρ_s est indépendante de ρ_s et réciproquement. On peut alors expliciter la fonction N de la manière suivante :

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

α , ρ , γ et δ sont des constantes définies par la composition chimique du milieu étudié.

Des expériences faites à Cadarache, ont montré qu'en pratique, pour un sol de cette région, si ρ_s varie de 12,5% (soit de 1,4 à 1,6 g/cm³), la pente varie de 1,8%.

Par contre, une même variation de ρ_s entraîne une variation de comptage qui se traduit par une erreur de 2 points pour une humidité volumique de 30%.

Si l'on envisage d'avoir les résultats d'étalonnage par cette méthode, il est nécessaire d'étudier les composants suivants :

1 — H ₂ O (Eau de constitution)	8 — K ₂ O
2 — SiO ₂	9 — Na ₂ O
3 — Al ₂ O ₃	10 — TiO ₂
4 — CO ₂	11 — BO
5 — Fe ₂ O ₃	12 — MnO
6 — CaO	13 — P ₂ O ₅
7 — MgO	

Les analyses chimiques peuvent très bien être faites sur les prélèvements qui ont été pris en vue de l'analyse pondérale ou encore sur une fraction de terrain prélevée pour la mesure des densités.

Cette méthode d'étalonnage théorique permet :

- de déterminer l'étalonnage par horizon lorsque ρ_s est différent
- de déterminer un étalonnage par tranche de sol
- de déterminer un étalonnage moyen pour un type de sol

Dans le tableau ci-dessous, nous reproduisons les résultats de l'étalonnage théorique de P 18 fourni par le laboratoire de Radio-Agronomie de Cadarache.

RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE CHIMIQUE POUR LE PROFIL 18

Horizon	α	β	γ	δ	ρ_s	Droite d'étalonnage
0/030	1,74	9,08	112,36	— 150,57	1,66	N = 11,97 Hv + 35,9
030/060	1,72	9,31	136,92	— 164,67	1,60	N = 12,06 Hv + 54,4
070/090	1,87	9,42	146,99	— 170,93	1,41	N = 12,05 Hv + 36,3
100/140	2,02	9,52	155,31	— 176,56	1,38	N = 12,31 Hv + 37,8
160/220	2,03	9,50	152,58	— 175,21	1,31	N = 12,16 Hv + 24,7

Ces droites d'étalonnage sont tracées sur le graphique n° 11. Elles sont de pentes très voisines, avec de légers décalages quant à l'ordonnée à l'origine.

4.3. ETALONNAGE PAR LA MÉTHODE « SIGMA A »

Cette méthode d'étalonnage en laboratoire, mise au point par P. MOUTONNET à Madagascar, en collaboration avec MM. P COUCHAT et P. MARINI, est basée sur la mesure du pouvoir absorbant d'un sol sur un flux de neutrons thermiques.

Le nom de « Sigma A » a été choisi, car c'est par cette appellation que l'on caractérise la section efficace d'absorption d'un sol aux neutrons.

4.3.1. Principe de la Méthode

Le principe de cette méthode consiste à placer un échantillon de sol à analyser, finement broyé dans des conditions géométriques déterminées, pouvant être reproductibles (bacs en alliage d'aluminium). L'échantillon à analyser provient d'un prélèvement in situ, de 4 à 5 kg de terre, pris dans une fosse pédologique et caractéristique d'un horizon du sol à étudier.

Cet échantillon est tout d'abord séché à l'air, puis tamisé, pour obtenir la fraction fine. La fraction plus grossière contenant agglomérats et gravillons est reprise, concassée et finement broyée. Cette fraction est ensuite rajoutée à la fraction fine, le tout mélangé et l'ensemble séché à 105 °C.

4.3.2. Appareillage utilisé

Nous avons représenté sur la figure 12, l'ensemble de l'appareillage utilisé pour cette mesure (cf. photo. 2 et 3 à la fin de l'article).

L'obtention du flux de neutrons thermiques est réalisée à l'aide d'une source de mesures rapides (Am-Be de 100 mCi) placée dans un bac rempli d'eau distillée (cela limite les suspensions). Cette source est positionnée à 10 cm des compteurs de neutrons thermiques (qui peuvent être au nombre de 2 ou 4). Les 10 cm d'eau à traverser sont suffisants pour permettre la transformation des neutrons rapides en neutrons thermiques.

L'ensemble de comptage est constitué par un humidimètre de surface à pointe, mis en place sur une face du bac de mesure. Cet appareil est relié à une échelle de comptage de type ECP 510 à affichage numérique.

Enfin, l'échantillon de terre à analyser est placé dans un bac en alliage d'aluminium de dimensions déterminées : hauteur 350 mm, largeur 300 mm et d'épaisseur 30 mm (petit bac) à 50 mm (grand bac).

4.3.3. Méthode de Mesure

La mesure consiste à effectuer dans un premier temps une série de 5 mesures à vide (correspondant à une mesure point Eau), sur un temps préréglé de 100 secondes.

Ensuite on met le bac (petit ou grand) en position avec la terre à analyser. On fait alors une série de 5 mesures. On enlève le bac, et on refait 5 mesures de point Eau.

On ne prend en compte que la moyenne des mesures point Eau et celles des mesures avec Bac (mesures « Σ_a » brutes, non corrigées).

On fait ensuite le rapport de la moyenne des Σ_a obtenus, sur la moyenne des points Eau mesurés, multipliés par 1 000, pour ramener les valeurs moyennes Σ_a trouvées à des valeurs homogènes et comparables. Les valeurs ainsi trouvées sont appelées « valeurs Σ_a » pour le type de sol étudié. M. MOUTONNET qui a étudié spécialement cette méthode à Madagascar l'a fait sur au moins 11 sols malgaches différents, dont il connaissait parfaitement bien les équations des droites d'étalonnages ($N = \alpha H_v + b$). Il s'est aperçu qu'il existait une corrélation nette entre la pente a des équations de droites et les « valeurs Σ_a » des sols correspondants (valeurs obtenues par la méthode décrite ci-dessus).

Lorsque le montage nécessaire à l'utilisation de la méthode dite « Σ_a » a été mis en place au laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé, afin de tester le bon fonctionnement de l'appareil réalisé sur place, conformément à celui existant à Madagascar, il a été demandé au laboratoire des Radio-isotopes de Tananarive de bien vouloir envoyer trois échantillons des sols tests utilisés par M. MOUTONNET. Le montage fait à Adiopodoumé étant la réplique exacte de celui de Tananarive, on est conduit à penser qu'avec les mêmes types de sols, on obtiendrait les mêmes résultats, quel que soit le lieu où ces mesures sont faites. Les expériences ont prouvé que l'appareil d'Adiopodoumé fonctionnait bien.

Il était raisonnable à ce moment-là, d'utiliser ces trois types des sols malgaches comme référence, ce qui a permis de tracer une courbe, à partir de laquelle on détermine graphiquement les valeurs des pentes d'étalonnage (a) des sols à étudier (cf. fig. 12).

4.4. MÉTHODE SIGMA A (Cadarache)

A Cadarache, il existe un dispositif complexe et plus précis [12] de mesures. Cette méthode consiste essentiellement à mesurer les perturbations apportées par un échantillon de sol sur un flux de neutrons.

On mesure ainsi la section efficace d'absorption et de diffusion des neutrons du sol à étudier.

Les paramètres mesurés (absorption et diffusion des neutrons) permettent à l'aide d'un programme de calcul spécifique, de déterminer les différents coefficients α , β , γ et δ de l'équation générale, ainsi que l'eau de constitution :

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

avec ρ_s densité sèche

Cette méthode de calcul est totalement indépendante de la méthode de calcul employée pour l'étalonnage chimique.

5. RESULTATS ACQUIS SUR LE BASSIN VERSANT DE KORHOGO

Nous donnons dans les tableaux ci-après les résultats des étalonnages obtenus sur les sols du bassin de Korhogo par les quatre méthodes dont nous venons de parler :

- Etalonnage au champ ou de terrain
- Etalonnage théorique calculé (méthode chimique)
- Etalonnage méthode Sigma A (Adiopodoumé)
- Etalonnage méthode Sigma A (Cadarache)

5.1. ETALONNAGE AU CHAMP OU DE TERRAIN

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau V. Nous avons fait figurer pour certains profils les courbes d'étalonnage obtenues en tenant compte de l'ensemble des couples (H_v , N) (Colonne 1) et celles obtenues en ne

TABLEAU V

RÉSULTATS DES ÉTALONNAGES DE TERRAIN (KORHOCO) OBTENUS AVEC DIFFÉRENTS TYPES DE SONDES UTILISÉES ET NON RAMENÉS A UNE SONDE DE RÉFÉRENCE DONNANT 1 000 *i/s* COMME POINT EAU

N° du Profil	Hv = a R + b		N = a Hv + b		Hv = a' N + b'	
	1. — Courbe moyenne totalité des couples Hv, N	2. — Couples cohérents Hv, N	1. — Courbe moyenne totalité des couples Hv, N	2. — Couples cohérents Hv, N	1. — Courbe moyenne totalité des couples Hv, N	2. — Couples cohérents Hv, N
9	—	Hv = 24,80 R — 12,00	—	N = 14,99 Hv + 245,00	—	Hv = 0,067 N — 16,30
10	—	Hv = 27,10 R — 13,50	N = 15,30 Hv + 238,00	N = 14,37 Hv + 256,00	Hv = 0,065 N — 15,50	Hv = 0,069 N — 17,80
12	Hv = 19,20 R — 1,80	—	N = 22,00 Hv + 139,00	—	Hv = 0,045 N — 6,30	—
13	Hv = 19,60 R — 4,80	—	N = 4,37 Hv + 29,00	N = 20,30 Hv + 116,00	Hv = 0,049 N — 5,70	—
14	—	Hv = 22,70 R — 4,88	N = 4,37 Hv + 29,00	N = 4,60 Hv + 25,90	Hv = 0,228 N — 6,60	Hv = 0,217 N — 5,60
14	Hv = 16,30 R — 1,80	—	N = 28,80 Hv × 71,20	N = 29,80 Hv + 58,20	Hv = 0,035 N — 2,50	Hv = 0,033 N — 1,95
16	—	Hv = 20,80 R — 8,34	N = 16,40 Hv + 228,00	N = 17,20 Hv + 207,80	Hv = 0,061 N — 13,90	Hv = 0,058 N — 12,00
18	Hv = 22,79 R — 10,73	—	N = 2,34 Hv + 39,20	—	Hv = 0,427 N — 16,70	—
20	—	Hv = 17,00 R — 5,00	N = 8,13 Hv + 216,00	N = 19,80 Hv + 203,00	Hv = 0,434 N — 26,60	Hv = 0,051 N — 10,20
32	Hv = 24,20 R — 4,58	Hv = 22,30 R — 2,78	N = 3,85 Hv + 37,50	N = 4,09 Hv + 32,90	Hv = 0,259 N — 9,70	Hv = 0,245 N — 8,00
41	—	Hv = 22,50 R — 7,75	—	N = 16,70 Hv + 179,00	—	Hv = 0,059 N — 10,70
43	—	Hv = 26,60 R — 7,20	N = 3,29 Hv + 83,10	N = 3,92 Hv + 32,80	Hv = 0,304 N — 26,20	Hv = 0,255 N — 8,40
49	Hv = 19,30 R — 2,40	Hv = 19,80 R — 2,50	N = 18,40 Hv + 146,00	N = 17,80 Hv + 140,00	Hv = 0,054 N — 7,90	Hv = 0,056 N — 8,30
53	Hv = 20,40 R + 4,40	Hv = 19,70 R + 3,63	N = 20,70 Hv — 43,10	N = 17,20 Hv + 36,30	Hv = 0,048 N — 36,30	Hv = 0,058 N — 2,10
95	Hv = 19,60 R + 2,10	—	N = 10,20 Hv + 349,00	—	Hv = 0,098 N — 34,20	—

prenant que les couples (Hv, N) cohérents (Colonne 2). Les droites d'étalonnage ont été exprimées soit en fonction de R (rapport de la mesure à l'Etui moyen), soit en fonction de Hv, soit en fonction de N (i/s), équation inverse de la précédente.

D'autre part afin de rendre compte des problèmes que nous avons eus, nous donnons pour chacun des profils, la date à laquelle l'étalonnage a été fait, ainsi que les sondes qui ont été utilisées, dans le tableau VI.

TABLEAU VI

N° Profil	Date de l'étalonnage	Sonde utilisée pour l'étalonnage
9	14-09-1971	HP/EC 310 064/130
10	20-10-1971	HP/EC 310 064/130
12	17-02-1971	HP/EC 310 037/130
13	04-12-1971	
14	18-02-1971	HP/EC 310 037/130
16	14-01-1971	HP/EC 310 037/130
18	05-02-1971	HP/IP 110 125/125
20	15-01-1971	HP/EC 310 037/130
32	12-12-1969	HP/IP 110 125/125
41	15-01-1971	HP/EC 310 037/130
43	10-12-1969	HP/IP 110 125/125
49	15-09-1971	HP/EC 310 064/130
53	25-07-1972	HP/EC 310 064/130
95	13-09-1971	HP/EC 310 064/130

En règle générale, nous avons pris comme étalonnage celui qui a été calculé sur les points (Hv, N) cohérents. Le problème du changement quasi-permanent d'appareillage, et l'impossibilité pour nous, de refaire les étalonnages en chaque site avec tous les types de sondes utilisés, nous a conduit à ramener tous nos étalonnages à ceux que nous aurions obtenus avec une sonde à neutrons donnant comme point Eau, une valeur de 1 000 i/s.

Nous présentons ci-dessous (tableau VII) les équations des droites d'étalonnage ramenées à une sonde de référence.

Ces étalonnages sont ceux que nous avons choisis pour dépouiller les mesures. Les droites d'étalonnage sont portées sur un graphique (cf ; fig. 13).

TABLEAU VII

RÉSULTATS DES ÉTALONNAGES DE TERRAIN
RAMENÉS A UNE SONDE DE RÉFÉRENCE
DONNANT 1 000 i/s DANS L'EAU

N° du Profil	Droite d'Etalonnage	Droite d'Etalonnage
9	N = 12,00 Hv + 197,00	Hv = 0,083 N - 16,40
10	N = 11,64 Hv + 181,00	Hv = 0,086 N - 15,50
12	N = 14,60 Hv + 92,50	Hv = 0,068 N - 6,30
13	N = 16,30 Hv + 93,30	Hv = 0,061 N - 5,70
14	N = 13,15 Hv + 74,00	Hv = 0,076 N - 5,60
16	N = 15,60 Hv + 130,00	Hv = 0,064 N - 8,30
18	N = 11,40 Hv + 182,00	Hv = 0,088 N - 15,90
20	N = 15,50 Hv + 159,00	Hv = 0,064 N - 10,30
32	N = 12,46 Hv + 100,00	Hv = 0,080 N - 8,00
41	N = 12,70 Hv + 155,00	Hv = 0,078 N - 12,20
43	N = 12,06 Hv + 101,00	Hv = 0,082 N - 8,40
49	N = 14,10 Hv + 117,00	Hv = 0,071 N - 8,30
53	N = 13,30 Hv + 28,00	Hv = 0,075 N - 2,10
95	N = 8,18 Hv + 279,00	Hv = 0,122 N - 34,10

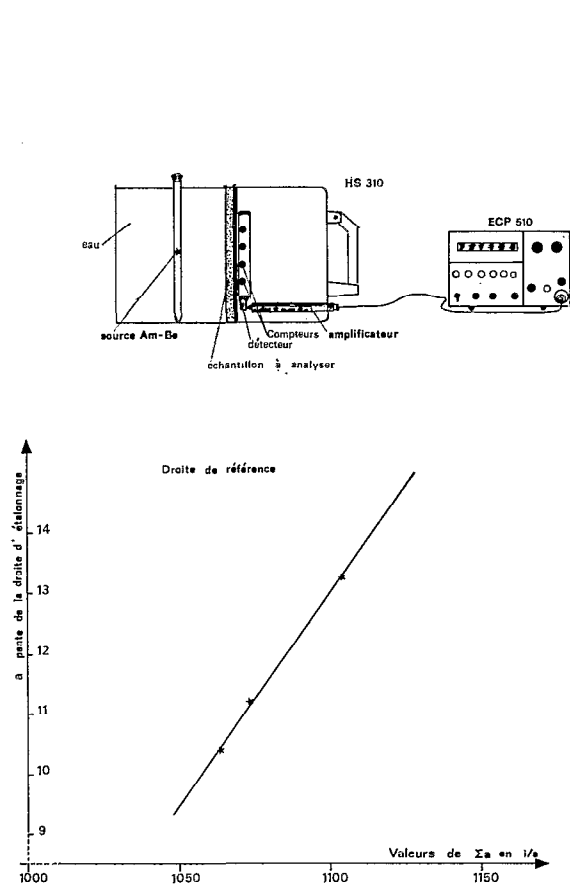


Fig. 12. — Etalonnage méthode ΣA

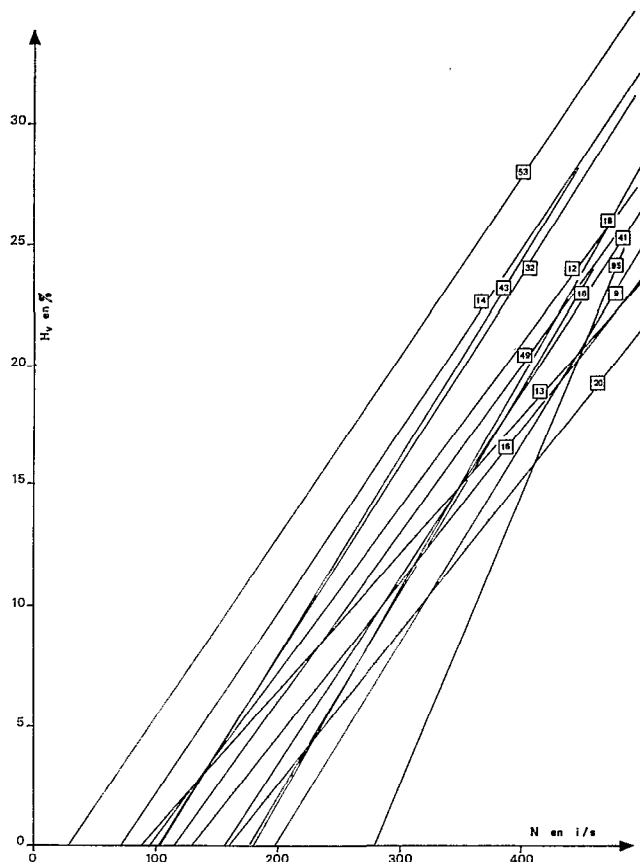


Fig. 13. — Sol du B.V. de Korhogo. Courbes d'étalonnages (étalonnage au champ)

5.2. ÉTALONNAGE THÉORIQUE CALCULÉ

Nous donnons dans le tableau VIII, l'ensemble des résultats d'étalonnage théorique calculé, envoyé par le laboratoire de Radio-Agronomie du Centre de Cadarache, concernant les profils du bassin de Korhogo.

Dans ce tableau sont données également les valeurs des coefficients α , β , γ et δ ainsi que celles des densités sèches (ρ_s).

Ces droites d'étalonnage se rapportent toutes, chaque fois que nous avons pu le faire à des horizons pédologiques caractéristiques. Ceci fait que pour certains profils nous disposons, en fonction des différents horizons de 3 ou 4 droites d'étalonnage

Au vue de ce tableau, et des résultats qui y sont consignés, il apparait quelques anomalies. Prenons le cas de l'horizon 020/060 du profil 16. Nous possédons à partir des mêmes données, 2 droites pour cet horizon.

$$N = 11,49 H_v + 58,5$$

et

$$N = 10,90 H_v + 176$$

Si l'on remarque que les pentes de ces 2 droites sont sensiblement voisines (11,49 pour 10,90), il n'en est pas de même de la constante b (58,5 pour 176) variant dans le rapport 1 à 3

Lorsque l'on travaille en différences des stocks d'eau entre 2 états du sol, la faible différence de pente ne joue que très peu dans le résultat final. En effet, avec une augmentation de 100 i/s, on aurait, suivant que l'on prend l'une ou l'autre une variation de 8,7 à 9,1 mm d'eau. Par contre si l'on veut connaître cette variation et chiffrer l'état initial du sol, la constante b, joue un rôle très important dans le cas présent. Imaginons que la réponse soit

TABLEAU VIII

RÉSULTATS DES ÉTALONNAGES THÉORIQUES (MÉTHODE CADARACHE)

N° du Profil	Horizon	α	β	γ	δ	ρ_s	Droites d'Etalonnage	
9	0/020	- 0,21	11,60	252,38	- 188,04	1,75	N = 11,23	Hv + 253,00
13	020/050	- 0,19	11,52	232,21	- 181,25	1,34	N = 11,27	Hv + 130,00
	060/110	0,73	10,61	197,15	- 163,07	1,36	N = 11,60	Hv + 105,00
14	0/020	2,56	9,34	90,72	- 112,72	1,60	N = 13,43	Hv + 32,00
	020/095	2,02	9,78	125,74	- 131,89	1,78	N = 13,37	Hv + 92,00
16	0/020	1,42	8,61	100,82	- 137,02	1,60	N = 10,88	Hv + 24,30
	020/060	1,57	8,98	134,45	- 156,65	1,60	N = 11,49	Hv + 58,50
	060/090	1,85	9,30	159,31	- 172,50	1,56	N = 12,18	Hv + 76,00
	090/140	1,80	9,23	154,11	- 169,01	1,54	N = 12,00	Hv + 68,30
	140/200	1,81	9,20	149,62	- 186,52	1,53	N = 11,97	Hv + 42,40
16	020/060	- 0,33	11,42	219,09	- 174,85	1,60	N = 10,90	Hv + 176,00
	090/140	0,49	11,22	235,46	- 184,03	1,54	N = 11,97	Hv + 178,00
18	0/030	1,74	9,08	112,36	- 150,57	1,66	N = 11,97	Hv + 35,90
	030/060	1,72	9,31	136,92	- 164,67	1,60	N = 12,06	Hv + 54,40
	070/090	1,87	9,42	146,99	- 170,93	1,41	N = 12,05	Hv + 36,30
	100/140	2,02	9,52	155,31	- 176,56	1,38	N = 12,31	Hv + 37,80
	160/200	2,03	9,50	152,58	- 175,21	1,31	N = 12,16	Hv + 24,70
20	020/080	1,78	9,28	159,05	- 171,49	1,43	N = 11,82	Hv + 55,60
	100/200	1,77	9,15	146,00	- 164,45	1,62	N = 12,02	Hv + 72,00
	0/040	- 0,05	11,50	232,80	- 182,57	1,45	N = 11,43	Hv + 155,00
	040/080	- 0,06	11,74	268,62	- 197,09	1,50	N = 11,65	Hv + 206,00
32	0/020	2,05	9,15	104,77	- 147,87	1,90	N = 13,04	Hv + 51,20
	020/050	1,55	9,06	102,97	- 146,34	1,81	N = 11,86	Hv + 40,00
	050/070	1,95	9,28	124,40	- 159,03	1,82	N = 12,83	Hv + 63,50
	070/180	2,11	9,34	130,52	- 162,90	1,65	N = 12,82	Hv + 52,40
	180/200	2,12	9,26	122,71	- 158,09	1,70	N = 12,06	Hv + 50,00
41	0/020	0,40	10,92	200,87	- 167,98	1,68	N = 11,59	Hv + 169,00
	020/060	0,04	11,14	217,04	- 172,65	1,65	N = 11,20	Hv + 185,00
43	0/030	2,66	9,03	91,35	- 139,36	1,49	N = 12,99	Hv - 3,30
	040/060	2,24	9,47	147,28	- 172,70	1,34	N = 12,47	Hv + 24,80
	070/100	1,89	9,22	119,97	- 156,13	1,34	N = 11,52	Hv - 9,80
95	0/010	1,99	9,85	131,17	- 134,86	1,72	N = 13,27	Hv + 90,70
	010/040	1,30	10,47	180,99	- 159,82	1,64	N = 12,60	Hv + 137,00
	040/170	1,02	10,89	206,21	- 173,83	1,68	N = 12,60	Hv + 173,00

de 400 i/s, cela correspondrait à une humidité volumique de 29,7 % (1^{re} équation) ou à une humidité volumique de 20,6% (2^e équation).

C'est d'ailleurs pour ces raisons que l'on ne peut utiliser l'étalonnage théorique, que dans le cas où l'on procède à des études de différences de stock d'eau entre deux états hydriques du sol. Si l'on veut connaître l'état hydrique de départ, il est nécessaire d'utiliser l'étalonnage de terrain.

Cette méthode est désormais abandonnée.

En effet, elle ne pouvait pas être généralisée à tous les types de sols, car elle ne prenait pas en compte la présence d'éléments traces, absorbants de neutrons (tel que Gadolinium, Bore, etc.).

De plus ces éléments traces sont difficilement dosables (opérations coûteuses), mais peuvent influencer d'une façon considérable sur le comptage neutronique.

5.3. ETALONNAGE « SIGMA A »

5.3.1. Résultats Sigma A (Radio-isotopes)

Ces étalonnages ont été faits au laboratoire des radio-isotopes du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Nous donnons dans le tableau IX, les valeurs des pentes d'étalonnage obtenues avec le petit et grand bac.

TABLEAU IX

VALEURS DES PENTES A DES DROITES D'ÉTALONNAGE
OBTENUES PAR LA MÉTHODE « SIGMA A »

N° du Profil	Profondeur (cm)	A (petit bac)	A (grand bac)	A moyen (petit bac)	A moyen (grand bac)
9	0-20	11,32	11,36	11,73	11,76
	20-110	11,83	11,61		
	110-150	12,06	12,31		
10	0-20	11,97	11,69	11,71	11,39
	110-80	11,46	10,62		
	100-150	—	11,85		
12	0-30	12,39	12,90	12,52	12,68
	30-90	12,66	12,46		
13	0-20	13,90	10,46	12,28	11,56
	20-50	10,62	11,16		
	60-110	12,29	11,98		
	110-190	12,34	12,47		
14	0-20	13,87	12,98	13,27	12,81
	20-95	13,27	13,04		
	95-115	13,31	12,47		
	115-200	12,66	12,76		
16	0-20	10,76	10,87	11,33	11,31
	20-60	10,48	10,46		
	90-140	12,38	12,14		
	140-200	11,79			

TABLEAU IX (suite)

N° du Profil	Profondeur (cm)	A (petit bac)	A (grand bac)	A moyen (petit bac)	A moyen (grand bac)
18	0-30	11,65	11,50	11,81	12,13
	30-60	12,20	12,92		
	60-140	11,60	11,99		
20	0-40	10,90	10,70	11,58	11,78
	40-80	11,60	11,89		
	80-100	12,15	12,55		
	100-200	11,69	11,98		
32	0-20	13,12	14,02	12,15	12,65
	20-90	11,44	12,04		
	90-130	11,90	11,90		
41	0-20	11,69	11,44	11,48	12,21
	20-60	11,04	10,70		
	60-100	11,22	10,91		
	100-200	11,97	11,77		
43	0-20	13,95	14,20	12,99	13,23
	20-80	12,54	12,94		
	80-100	12,50	12,56		
49	0-30	13,22	13,13	12,31	12,81
	30-90	11,46	12,84		
	90-160	12,25	12,46		
95	0-10	13,41	13,04	12,88	13,01
	10-40	12,80	13,13		
	40-170	12,43	13,08		
	170-200	12,90	12,80		

N.B. — Ces moyennes Sigma A, petit bac et grand bac correspondent à la pente moyenne de la droite d'étalonnage pour l'ensemble du profil étudié.

5.3.2. Résultats Sigma A (Cadarache)

Un certain nombre d'échantillons du bassin de Korhogo ont été envoyés à Cadarache afin de savoir si les résultats obtenus au laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé étaient satisfaisants (cf. par. 4.4.).

Signalons qu'en plus, le Laboratoire de Radio-Agronomie, nous a non seulement envoyé les résultats Sigma A, mais possédant un programme de calcul permettant de déterminer les paramètres α , β , γ et δ nous a fait parvenir les valeurs de ces paramètres, permettant aussi de calculer la droite d'étalonnage.

6. COMPARAISON ENTRE LES MÉTHODES UTILISÉES

Après avoir décrit les différentes possibilités d'étalonnage dont l'utilisateur peut disposer, il nous a semblé intéressant de comparer les résultats obtenus par ces diverses méthodes.

Nous ne pouvons bien entendu que comparer les pentes obtenues par chaque méthode (nous ne possédons pas en effet, de calcul de droite pour la totalité de profils et par toutes les méthodes).

TABLEAU X

VALEURS DES PENTES A DES DROITES D'ÉTALONNAGE
OBTENUES PAR LA MÉTHODE « SIGMA A » (CADARACHE)

N° du Profil	Profondeur (cm)	A Cadarache	A moyen Cadarache
9	0-20	11,36	11,64
	20-100	11,72	
	110-150	11,86	
10	0-20	11,71	11,61
	40-80	11,52	
13	0-20	11,38	11,50
	20-50	11,23	
	60-110	11,91	
14	0-20	13,18	13,27
	20-95	13,37	
16	20-60	10,83	11,47
	90-140	12,11	
20	0-40	11,43	11,54
	40-80	11,65	
41	0-20	11,52	11,32
	20-60	11,09	
	60-100	11,36	
49	0-30	12,47	11,91
	30-90	11,35	
95	0-10	13,31	12,83
	10-40	12,58	
	40-170	12,60	

Ceci est tout de même intéressant, car pour étudier la variation d'un stock d'eau d'une période à une autre, on n'a besoin que de la pente de la droite d'étalonnage.

Dans le tableau XI, nous avons consigné les différents résultats. Dans la colonne 1, figurent les pentes des droites d'étalonnage obtenues par la méthode au champ, et non ramenées à une sonde de référence. Dans les colonnes 2, 3, 4 et 5 les pentes sont toutes ramenées à une sonde de référence donnant 1 000 i/s dans l'eau.

Colonne 1. Etalonnage au champ — résultats bruts valables seulement pour la sonde utilisée lors de l'étalonnage.

Colonne 2. Etalonnage au champ — résultats ramenés à une sonde de référence à 1 000 i/s dans l'eau.

Colonne 3. Etalonnage théorique calculé (Cadarache).

Colonne 4. Etalonnage Sigma A (Radio-isotopes, Adiopodoumé) moyennes grand bac et petit bac.

Colonne 5. Etalonnage Sigma A (Cadarache).

TABLEAU XI

VALEURS DES PENTES D'ÉTALONNAGE OBTENUES PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉTALONNAGE

N° du Profil	1 Etalonnage au champ	2 Etalonnage au champ (1 000 i/s)	3 Etalonnage théorique calculé	4 Méthode Sigma A (Adiopodoumé)	5 Méthode Sigma A (Cadarache)
9	14,99	12,00	11,23	11,74	11,64
10	14,37	11,64	11,30	11,55	11,61
12	22,00	14,60	—	12,60	—
13	20,30	16,30	11,45	11,92	11,50
14 *	4,60	13,15	13,40	13,04	13,27
16	17,20	15,60	11,60	11,32	11,47
18 *	2,34	11,40	12,10	11,97	—
20	19,80	15,50	11,73	11,68	11,54
32 *	4,09	12,46	12,68	12,40	—
41	16,70	12,70	11,39	11,34	11,32
43 *	3,92	12,06	12,32	13,11	—
49	17,80	14,10	—	12,56	11,91
53	17,20	13,30	—	—	—
95	10,20	8,18	12,82	12,94	12,83

* Etalonnages effectués avec les sondes HP/IP 110. Tous les autres étalonnages ont été faits avec des sondes HP/EC 310.

Nous constatons que la variation de pente, sur l'ensemble des profils est faible (de 13,11 à 11,32 pour la méthode Sigma A Adiopodoumé, ce qui correspond à une variation pour $N = 100$ i/s de 7,6 mm à 8,8 mm d'eau).

Nous pouvons dire que dans l'ensemble les valeurs des pentes obtenues par les différentes méthodes sont très comparables.

Il existe cependant des différences pour les profils 12, 13, 16 et 20 entre l'étalonnage de terrain et les autres. Nous nous étions aperçu que les tubes 12, 16 et 20 étaient mal colmatés (présence de nombreux vides sur les parois du tubage, atteignant pour certains 3 à 6 mm). Il est à peu près sûr que le mauvais colmatage de ces tubes n'a pas permis d'effectuer un étalonnage de terrain correct [9].

Quels sont les avantages que présentent, pour l'utilisateur de la sonde à neutrons, ces différentes méthodes?

Tout d'abord, rappelons ici que la seule connaissance de la pente de la droite d'étalonnage, ne permet pas de travailler en valeurs absolues, mais uniquement en différence de stocks d'eau entre deux époques différentes (amplitudes de variations annuelles du stock d'eau pour un horizon, pour un profil etc.). Si l'on veut, au moyen de la cinétique, étudier la saturation d'un sol (recherche de la porosité totale), ou la capacité de rétention, il est nécessaire de posséder l'équation complète de la droite d'étalonnage.

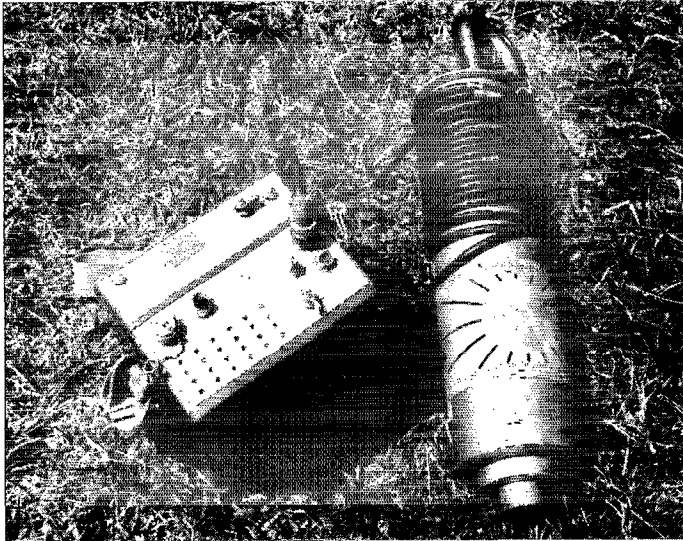
L'établissement de cette droite d'étalonnage faisait appel à des mesures de terrain, souvent longues, et fastidieuses. De plus les résultats (nous pensons aux humidités pondérales) ne sont pas toujours cohérents.

Il est évident qu'on ne peut nier actuellement les avantages de la méthode Sigma A (les comparaisons faites plus haut témoignent de la qualité des résultats obtenus). En effet cette méthode permet, très rapidement, soit un mois après la pose d'un tube et les premières mesures, de connaître la pente de la droite, donc d'avoir rapidement une idée des variations de stock d'eau.

Ceci permet donc à l'utilisateur de se rendre compte très vite, de la qualité de ces mesures ou des résultats incohérents (mauvais colmatage, peu d'échange, etc.).

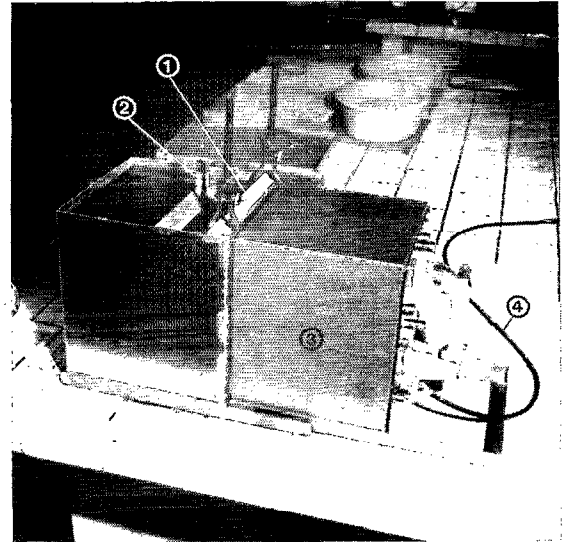
Il est également possible, dès les premiers mois de mesures d'effectuer des comparaisons entre les humidités pondérales et neutroniques, en effectuant quelques séries de prélèvements à 2 ou 3 profondeurs différentes. La connaissance de la pente de la droite permettant alors immédiatement de calculer l'équation générale.

Le programme « sonde à neutrons » qui va démarrer sur les bassins versants de Sakassou (région de Toumodi) permettra de tester ces différentes méthodes. Mais d'ores et déjà, nous pouvons dire que la méthode Sigma A présente de nombreux avantages pour les futurs utilisateurs.



Cliché ORSTOM. Photo : G. Petiot.

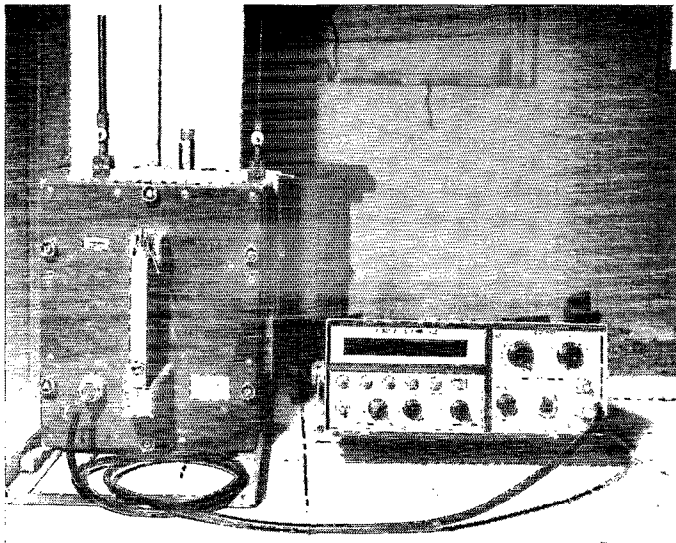
Sonde à neutrons HP 310, équipée d'une échelle de comptage EC 310. Cette échelle de comptage est couplée avec une minuterie électronique type ME 310



Cliché ORSTOM. Photo : G. Petiot.

Etalonnage par la méthode SIGMA A au laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé (bac de mesure, bac contenant l'échantillon à analyser et humidimètre de surface HS 310.

1. Bac de mesure avec échantillon à analyser. — 2. Tube contenant la source Am-Be. — 3. Humidimètre de surface type HS 310. — 4. Câble reliant le HS 310 à l'échelle de comptage ECP 510.



Cliché ORSTOM. Photo : G. Petiot

Etalonnage méthode SIGMA A.

Humidimètre de surface HS 310 et échelle de comptage portable ECP 510. (Laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé.)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] POURRUT (P.) – 1968 – Utilisation pratique de l'Humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le bassin de la Tafaina (Madagascar) *Cah. ORSTOM, Service Hydrologique*, vol. V, n° 2, pp. 15-31.
- [2] MOUTONNET (P.) – 1969 – Une méthode neutronique de mesures de l'humidité des sols en surface. *Ijari*, vol. 20.
- [3] MARCESSE (J.) – 1967 – Détermination in situ des capacités de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons. *Isotopes Radiation Techniques*, AIEA, Vienne.
- [4] POURRUT (P.) – 1970 – Détermination de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols par utilisation des méthodes neutroniques. *Cah. ORSTOM, Service Hydrologique*, vol. VIII, n° 1 pp. 37-64.
- [5] COUCHAT (P.) – Détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons à partir de l'analyse chimique des sols. *Isotopes and Radiations techniques in soil and Irrigation Studies*. Symposium AIEA et FAO. Istanbul.
- [6] CARIU, DELTOMBE, WAJDENFELD – 1969 – Etude des caractéristiques d'un humidimètre neutronique à pointe Org. Tech. Rég. des Ponts et Chaussées, Fiche programme n° 62.099.
- [7] COUCHAT (P.), PALUMBO (C.), VOLAT (J.P.), LECRAND (B.) – Un appareil automatique de mesures neutroniques de l'humidité des sols – BIS T, CEA, n° 172 – Juillet-Août pp. 71-75.
- [8] POURRUT (P.), MOUTONNET (P.) – 1971 – Contrôle neutronique de l'humidité des sols en surface. Applications hydrologiques sur sol ferrallitique tropical (Bassin versant de la Tafaina, République Malgache), *Cah. ORSTOM Service Hydrologique*, vol. VIII, n° 2 pp. 51-66.
- [9] CAMUS (H.) – Règles d'emploi de l'humidimètre à neutrons à l'échelle d'un bassin versant. Note technique n° 34, *ORSTOM, Service Hydrologique*, 19 p. multigraph – 1973.
- [10] HERBAUD (J.) – Renseignements concernant les humidimètres à neutrons et les densimètres à rayon Gamma adaptés aux mesures dans le sol. Note technique n° 10, *ORSTOM, Service Hydrologique, ronéo*, 27 p. multigraph. 1967.
- [11] POURRUT (P.), CAMUS (H.) – Etude fine du bilan hydrique par utilisation de la sonde à neutrons. *International Symposium on the results of research on representative an experimental basins*, Wellington, New-Zealand, Déc. 1970, ronéo, 28 p.
- [12] LE HO (G.F.) – « Dispositif de mesure de l'absorption et de la diffusion d'échantillons de terre ». Note technique SECPR/ECM/72/114 du CEA
- [13] « Echelle de comptage portative EC 310 – GG. EI – LEPAUTE, Notice technique n° 4509, Janvier 1965.
- [14] « Minuterie électronique ME 310 – CG EI – LEPAUTE, Notice technique n° 5415 – Janvier 1965.