

SUR LA PRÉCISION DES TENEURS EN EAU MESURÉES PAR LA SONDE À NEUTRONS

COQUET Y.⁽¹⁾, BOIVIN P.⁽²⁾, TOUMA J.⁽³⁾

⁽¹⁾ *Science des sols et hydrologie, Département Agronomie-Environnement,
B.P. 01,78850 THIVERVAL-GRIGNON
tél. : (33) (0) 1 30 81 54 04, fax : (33) (0) 1 30 81 53 96,
e-mail : coquet@grignon.inra.fr*

⁽²⁾ *ORSTOM, DAKAR, B.P. 1386, SENEGAL*

⁽³⁾ *ORSTOM, 911 avenue d'Agropolis, B.P. 5045, 34032 MONTPELLIER CEDEX 1*

Mots-clefs : teneur en eau, sonde à neutrons, étalonnage, erreur de mesure, variance d'estimation, biais, régression linéaire.

Keywords : water content, neutron probe, calibration, measurement error, estimation variance, bias, linear regression.

RÉSUMÉ

Après avoir rappelé les différentes sources d'incertitude dans l'estimation des teneurs en eau volumiques par la sonde à neutrons, nous présentons un exemple d'application d'un étalonnage non biaisé de la sonde à neutrons, tenant compte des erreurs de mesure sur les points d'étalonnage. Nos résultats montrent que l'élimination du biais dû aux erreurs de mesure n'apporte qu'un gain de précision négligeable aux estimations de teneurs en eau volumique lorsque l'on utilise une balance suffisamment précise pour la mesure de la teneur en eau pondérale lors de l'étalonnage. L'élimination du biais dû à des sources d'erreur autres que celles liées aux instruments de mesure, comme par exemple celle due à la variabilité spatiale des propriétés du sol, est plus difficile car elle implique une évaluation objective des variances d'erreur correspondantes.

ABSTRACT

ON THE PRECISION OF THE WATER CONTENT ESTIMATION BY NEUTRON MODERATION

After recalling the various sources of uncertainty for the soil water content estimation by neutron moderation, we present an application of an unbiased neutron probe calibration. This type of calibration differs from the standard biased calibration in that it takes into account the various sources of error in the calibration points. Our results show that removing the bias due to measurement errors in the linear regression does not improve significantly the accuracy of the water content estimates. We analyse the contributions of the various calibration measurements to the error variance of the calibration points co-ordinates, and compare them to those calculated by former authors. These found that the main source of error was the on gravimetric water content estimation. If we consider that this error is only due to measurement inaccuracy, the use of a precise balance (accuracy ± 0.01 g) makes this error negligible and allows the use of the common linear regression estimators in calculating the neutron probe calibration curve. The elimination of the bias due to errors other than measurement inaccuracies is difficult because an objective method is needed to evaluate the variances corresponding to these errors in a justifiable manner.

1. INTRODUCTION

1. Introduction

La sonde à neutrons est une méthode de mesure indirecte, non destructive, de la teneur en eau des milieux poreux, développée depuis plusieurs dizaines d'années (GARDNER et KIRKHAM, 1952 ; STONE *et al.*, 1955 ; VAN BAVEL *et al.*, 1956 ; STEWART et TAYLOR, 1957). Paradoxalement, l'analyse des sources d'erreur dans la détermination des teneurs en eau par la sonde à neutrons a connu un développement nettement moins rapide, à cause, vraisemblablement, de la variété des techniques d'étalonnage disponibles. Parmi celles-ci, la plus fréquemment utilisée consiste à étalonner la sonde au champ en prélevant, simultanément au comptage neutronique, un échantillon de terre remanié dont on mesure par pesées la teneur en eau pondérale, pour la transformer en une teneur volumique à l'aide d'une mesure de la masse volumique du sol en place.

D'une manière générale, on distingue, en dehors des erreurs liées au manipulateur (erreurs de lecture, ...), trois sources d'erreur dans l'estimation d'une teneur en eau volumique à l'aide d'une sonde à neutrons (VAUCLIN *et al.*, 1984) :

- instrumentale, liée à la sonde elle-même (au caractère aléatoire du comptage neutronique, mais aussi au "bruit de fond" dû à l'électronique de l'appareil) ;
- spatiale, liée à la variabilité dans l'espace de la teneur en eau du sol et des paramètres influant sur l'étalonnage de la sonde (masse volumique du sol, taux de matière organique, ...) ;
- due à la qualité de l'étalonnage de la sonde, i.e. à la dispersion des points d'étalonnage autour de la courbe reliant la teneur en eau volumique du sol au comptage neutronique, obtenue par régression linéaire.

De toutes les sources d'erreur, celle due au caractère aléatoire de l'émission neutronique est la plus facile à évaluer (MERRIAM et KNOERR, 1961 ; BELL et EELES, 1967). STONE *et al.* (1960) ont constaté que la dérive dans le temps de l'appareil (chauffage de l'électronique, évolution de la source) était négligeable par rapport à l'erreur de comptage. Cependant l'erreur due à la dérive électronique semble être dépendante du type d'instrument et des conditions d'utilisation, car les résultats sont contradictoires selon les auteurs (POSS, 1984).

Dans le cas d'une estimation ponctuelle de teneur en eau, réalisée à partir d'un tube d'accès particulier, l'influence de la variabilité spatiale du sol s'identifie au problème de repositionnement de la sonde dans le tube d'accès au cours des mesures successives. Cette source de variabilité est généralement faible (STONE *et al.*, 1960 ; ARIBI *et al.*, 1985). En revanche, lorsqu'il s'agit d'estimer la teneur en eau moyenne d'une parcelle (estimation globale, par exemple pour le suivi du bilan hydrique du sol), à partir de mesures réalisées dans plusieurs tubes répartis sur la parcelle, la composante spatiale de la variance d'estimation de cette teneur en eau moyenne peut devenir prépondérante (HEWLETT *et al.*, 1964). À l'effet dû à l'hétérogénéité verticale du sol, s'exprimant lors des erreurs de repositionnement de la sonde dans chacun des tubes, s'ajoute celui, nettement plus important, lié à l'hétérogénéité du sol à une même profondeur entre les différents tubes d'accès.

Il faut attendre SINCLAIR et WILLIAMS (1979) pour que soit introduite dans la variance d'estimation des teneurs en eau volumiques une composante liée à la qualité de l'étalonnage, i.e. de la régression linéaire ayant permis l'obtention de la droite d'étalonnage.

La dispersion des points d'étalonnage est dépendante :

- des erreurs de mesure des comptages neutroniques (erreurs instrumentales) des points d'étalonnage ;
- de la méthode de mesure de la teneur en eau volumique utilisée pour étalonner la sonde à neutrons ; non seulement cette mesure est entachée d'une certaine erreur liée à la précision des instruments, mais elle est aussi effectuée dans un volume de sol (support de la mesure) de taille différente de celle du volume de sol dans lequel on effectue le comptage ("zone d'influence" de la sonde à neutrons) ;
- du protocole d'étalonnage ; compte tenu du caractère destructif des méthodes de mesure de teneur en eau généralement utilisées pour l'étalonnage, les supports des mesures changent à chaque point d'étalonnage ; cette source de variabilité supplémentaire est du même type que celle rencontrée lors de l'estimation de la teneur en eau moyenne d'une parcelle (composante spatiale).

HAVERKAMP *et al.* (1984) et BERTUZZI *et al.* (1987) ont montré que la prise en compte des erreurs expérimentales associées aux points d'étalonnage pouvait améliorer la qualité de l'étalonnage et réduire significativement l'incertitude sur les teneurs en eau volumiques estimées à l'aide de cet étalonnage.

L'objectif de cet article est de montrer, sur un exemple pratique :

1°/ que la principale difficulté de la méthode proposée par HAVERKAMP *et al.* (1984) et BERTUZZI *et al.* (1987) est l'évaluation objective des différentes sources d'erreur lors de l'étalonnage, en particulier celles sur la teneur en eau volumique des points d'étalonnage ;

2°/ que l'utilisation d'instruments de mesure précis, autant que possible, lors de l'étalonnage de la sonde permet d'améliorer directement la qualité de l'étalonnage sans recourir aux calculs lourds nécessités par la méthode proposée par HAVERKAMP *et al.* (1984) et BERTUZZI *et al.* (1987).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2. *Materials and methods*

Dans le cadre d'une étude *in situ* sur les propriétés de retrait linéaire de sols faiblement gonflants (COQUET, 1996 et 1998), nous devons mesurer simultanément les variations d'épaisseur et de teneur en eau de couches de sol, au cours d'un cycle humectation-dessiccation. Ces deux mesures ne pouvant être effectuées sur le même volume de sol, nous avons utilisé la sonde à neutrons pour évaluer la teneur en eau du sol de façon non destructive au plus près de l'appareil de mesure des variations d'épaisseur (le tube d'accès de la sonde était placé à 40 cm de celui-ci).

Chaque point d'étalonnage de la sonde a été obtenu en mesurant par gravimétrie un profil de teneur en eau à une distance du tube d'accès allant de 30 à 60 cm et en effectuant simultanément un profil de comptage à la sonde à neutrons. Le passage entre les expressions pondérale et volumique de la teneur en eau a été réalisé grâce à un profil simultané de masse volumique humide mesuré par une sonde gammamétrique à rétrodiffusion. Ce protocole d'étalonnage diffère de celui d'HAVERKAMP *et al.* (1984) et BERTUZZI *et al.* (1987), qui implantent un tube à chaque point d'étalonnage : les comptages neutroniques et gammamétriques sont effectués sur la même verticale que les prélèvements de sol.

Le sol étudié était un réductisol fluviatique brut dans la classification du RPF (AFES, 1990) ou eutric fluvisol dans la classification FAO (FAO/UNESCO, 1985), situé en bordure d'une cuvette alluviale de la moyenne vallée du fleuve Sénégal (BOIVIN *et al.*, 1995). Il s'agit d'un sol limono-sablo-argileux (tab. 1), sans végétation, massif, hydromorphe sur toute sa profondeur. Sa fraction argileuse est constituée de smectites et de minéraux argileux interstratifiés (60 %), de kaolinite (30 %), d'illite (5 %) et de chlorite (5 %). Les méthodes analytiques utilisées pour l'étude de ce sol sont celles du laboratoire commun du centre ORSTOM de Dakar (PAYCHENG, 1980). La granulométrie 5 fractions a été réalisée par la méthode de Robinson, pour les fractions argile et limon fin, et par tamisage, pour les fractions sableuses, après destruction de la matière organique par de l'eau oxygénée et dispersion des particules par du pyrophosphate de sodium. Le pH eau du sol a été mesuré sur une suspension 1/2,5 sol/eau. Le carbone organique a été déterminé par colorimétrie après oxydation par du dichromate et de l'acide sulfurique concentré (méthode Anne). Le fer total a été dosé par colorimétrie après extraction par de l'HF à chaud. Enfin la CEC a été mesurée par saturation du complexe échangeable par du CaCl_2 puis déplacement par du KNO_3 et détermination par colorimétrie du Ca^{2+} déplacé.

Tab. 1 - Caractéristiques physiques et chimiques du sol alluvial
Physical and chemical characteristics of the eutric fluvisol

Profondeur (m)	0-0,15	0,15-0,35	0,35-1,40
Argile < 2µm (%)	17,5	16,0	13,2
Limon fin 2-20 µm (%)	7,4	5,9	6,5
Limon grossier 20-50 µm (%)	34,7	33,9	32,6
Sable fin 50-200 µm (%)	40,3	44,2	46,9
Sable grossier 0,2-2 mm (%)	0,1	0,0	0,8
Masse volumique apparente sèche (g/cm ³)	1,57	1,55	1,39
Matière organique (%)		0,54	0,49
pH dans l'eau		4,6	4,7
Fer total (%)		3,19	3,10
CEC (cmol(+)/kg)		13,2	12,8

La sonde à neutrons utilisée était une sonde Nardeux Solo 25, d'activité 1,48 GBq (40 mCi), avec un temps de comptage "long" (temps de comptage effectif : 21 s). Un réflecteur en polyéthylène permettait de limiter le départ de neutrons vers l'atmosphère lorsque des mesures étaient faites près de la surface. La masse volumique a été mesurée à l'aide d'une sonde Campbell CPN 501B d'activité 0,37 GBq (10 mCi). Le tube d'accès était en aluminium.

3. EFFETS DES ERREURS EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉTALONNAGE

3. *Effects of experimental errors on calibration*

Nous avons cherché à évaluer l'incidence des erreurs expérimentales réalisées lors de l'étalonnage de la sonde à neutrons sur la précision des estimations de teneur en eau.

Cet étalonnage met en relation plusieurs comptages réduits \hat{n} , obtenus à l'aide de la sonde à neutrons, avec les mesures de teneur en eau volumique $\hat{\theta}$ correspondantes. Chaque comptage réduit \hat{n} est calculé en faisant le rapport de la moyenne \bar{C} de p comptages \hat{C}_j , $j = 1..p$, dans le sol, à la moyenne \bar{C} de q comptages \hat{C}_k , $k = 1..q$, dans un milieu standard (un grand réservoir d'eau). La teneur en eau volumique $\hat{\theta}$ du sol est obtenue en mesurant simultanément sa teneur en eau pondérale \hat{W} et sa masse volumique humide $\hat{\rho}$:

$$\hat{\theta} = \frac{\hat{\rho}}{\rho_w} \frac{\hat{W}}{1 + \hat{W}} \quad (1)$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau, supposée constante.

Si l'on suppose que la courbe d'étalonnage est une droite :

$$\theta = a_0 + a_1 n + e \quad (2)$$

où e est une variable aléatoire (v.a.) ayant une distribution normale centrée (i.e. d'espérance nulle) de variance estimée $s^2(e)$, l'étalonnage consiste à déterminer la pente \hat{a}_1 et l'ordonnée à l'origine \hat{a}_0 de cette droite, à partir de m points d'étalonnage indépendants $(\hat{n}_i, \hat{\theta}_i)_{i=1..m}$.

Soient u et v , les v. a. représentant les erreurs de mesure sur n et q :

$$\hat{n} = n + u \quad (3)$$

$$\hat{\theta} = \theta + v \quad (4)$$

On supposera ces v. a. distribuées normalement, centrées et de variances estimées $s^2(u)$ et $s^2(v)$. Les paramètres d'étalonnage de la sonde sont obtenus par régression linéaire à l'aide des estimateurs non biaisés proposés par BERTUZZI *et al.* (1987). Ces auteurs ont montré que leurs estimateurs avaient un biais plus faible que ceux calculés par HAVERKAMP *et al.* (1984), et négligeable dans le cadre d'une application à l'étalonnage d'une sonde à neutrons. Les expressions algébriques de ces estimateurs sans biais sont (voir HAVERKAMP *et al.*, 1984, et BERTUZZI *et al.*, 1987, pour l'obtention de ces expressions) :

$$\hat{a}_1 = \frac{s(\hat{n}, \hat{\theta})}{s^2(\hat{n}) - \frac{m-3}{m-1} s^2(u)} \quad (5)$$

$$\hat{a}_0 = \bar{\theta} - \hat{a}_1 \bar{n} \quad (6)$$

$$s^2(\hat{a}_1) = \frac{1}{m-2} \left\{ \frac{s^2(\hat{\theta})}{s^2(\hat{n}) - \frac{m-5}{m-1} s^2(u)} - \hat{a}_1^2 \right\} + \frac{1}{(m-2)^2} \frac{s^2(u)}{s^2(\hat{n})} \left\{ (m-6) \frac{s^2(\hat{\theta})}{s^2(\hat{n})} + 4\hat{a}_1^2 \right\} \quad (7)$$

$$s^2(\hat{a}_0) = \frac{m-1}{m(m-2)} \left\{ s^2(\hat{\theta}) - \hat{a}_1^2 s^2(\hat{n}) \right\} + \frac{(\bar{n})^2}{m-2} \left\{ \frac{s^2(\hat{\theta})}{s^2(\hat{n}) - \frac{m-5}{m-1} s^2(u)} - \hat{a}_1^2 \right\} + \frac{s^2(u)}{m-2} \left\{ \frac{2(m-3)}{m} \hat{a}_1^2 + \frac{1}{m-2} \frac{(\bar{n})^2}{s^2(\hat{n})} \left((m-6) \frac{s^2(\hat{\theta})}{s^2(\hat{n})} + 4\hat{a}_1^2 \right) \right\} \quad (8)$$

$$s(\hat{a}_0, \hat{a}_1) = -\bar{n} s^2(\hat{a}_1) \quad (9)$$

$$s^2(e) = \frac{m-1}{m-2} \left\{ s^2(\hat{\theta}) - \hat{a}_1^2 s^2(\hat{n}) \right\} + \frac{s^2(u)}{m-2} \left\{ \frac{s^2(\hat{\theta})}{s^2(\hat{n})} + (m-5)\hat{a}_1^2 \right\} - s^2(v) \quad (10)$$

$$s^2(\hat{\theta}_0) = \hat{n}_0^2 s^2(\hat{a}_1) + 2\hat{n}_0 s(\hat{a}_0, \hat{a}_1) + s^2(\hat{a}_0) + \left\{ \hat{a}_1^2 - s^2(\hat{a}_1) \right\} s^2(u) + s^2(e) \quad (11)$$

où \bar{n} et $\bar{\theta}$ sont les moyennes arithmétiques des valeurs de \hat{n} et $\hat{\theta}$ des m points d'étalonnage, $s^2(\hat{n})$, $s^2(\hat{\theta})$ et $s(\hat{n}, \hat{\theta})$ sont les estimateurs des variances et covariance de \hat{n} et $\hat{\theta}$, $s^2(\hat{a}_1)$, $s^2(\hat{a}_0)$ et $s(\hat{a}_0, \hat{a}_1)$, les estimateurs des variances et covariance des paramètres de la régression, et $s^2(\hat{\theta}_0)$, la variance de la prédiction de la teneur en eau volumique $\hat{\theta}_0$ pour une nouvelle valeur \hat{n}_0 . Si l'on néglige les erreurs de mesure sur n et q , c'est-à-dire si l'on néglige les termes des équations (5) à (11) où $s^2(u)$ et $s^2(v)$ apparaissent, on retrouve les expressions fournies par la régression linéaire classique.

L'émission neutronique suit une loi de distribution poissonnienne. La variance de \hat{n} peut donc être estimée par :

$$s^2(\hat{n}) = \hat{n}^2 \left(\frac{1}{p \hat{C}} + \frac{1}{q \hat{C}_s} \right) \quad (12)$$

qui peut aussi s'écrire :

$$s^2(\hat{n}) = \frac{1}{\hat{C}_s} \left(\frac{\hat{n}}{p} + \frac{\hat{n}^2}{q} \right) \quad (13).$$

La variance estimée de $\hat{\theta}$ s'écrit :

$$s^2(\hat{\theta}) = \hat{\theta}^2 \left(\frac{s^2(\hat{W})}{(1 + \hat{W})^2 \hat{W}^2} + \frac{s^2(\hat{\rho})}{\hat{\rho}^2} \right) \quad (14)$$

qui peut aussi s'écrire :

$$s^2(\hat{\theta}) = \frac{1}{\rho_v^2 (1 + \hat{W})^2} \left(\frac{\hat{\rho}^2}{(1 + \hat{W})^2} s^2(\hat{W}) + \hat{W}^2 s^2(\hat{\rho}) \right) \quad (15).$$

Si l'on considère que les erreurs de mesure sont la seule source d'incertitude sur \hat{W} , $s^2(\hat{W})$ peut être calculée à partir des erreurs absolues sur les pesées. Ce faisant, nous avons considéré que toute erreur absolue était équivalente à un intervalle de confiance à 95 % (approximativement 2 écarts types) autour de la mesure, en supposant une erreur distribuée normalement. De même, $s^2(\hat{\rho})$ peut être estimée à partir des incertitudes sur les mesures réalisées à la sonde gammamétrique. Nous n'avons pris en compte que la variance associée à l'émission aléatoire des rayonnements gamma (comme calculé dans l'équation (12) ou (13) pour la sonde à neutrons). La variance liée à l'étalonnage de la sonde a été négligée (même cas de figure que SCHMIDT et MOUTONNET, 1985).

Comme HAVERKAMP *et al.* (1984), nous estimons les variances des erreurs u et v à partir des variances des points d'étalonnages par

$$s^2(u) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m s^2(\hat{n}_i) \quad (16)$$

et

$$s^2(v) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m s^2(\hat{\theta}_i) \quad (17),$$

en faisant appel aux équations (12) ou (13) et (14) ou (15). Lors de toute prédiction de la teneur en eau volumique à partir d'une nouvelle mesure \hat{n}_0 , on vérifiera que $s^2(\hat{n}_0)$ n'est pas statistiquement différente de $s^2(u)$.

L'étalonnage tenant compte des erreurs de mesure sur les points d'étalonnage sera dénommé "étalonnage non biaisé (E.N.B.)", par opposition à l' "étalonnage biaisé (E.B.)", qui néglige ces erreurs.

4. RÉSULTATS

4. Results

Pour chaque type d'étalonnage, les droites de régression obtenues aux différentes profondeurs de mesure ont été comparées entre elles à l'aide d'un test statistique (AIVAZIAN, 1970). Trois groupes de profondeurs ont été mis en évidence : 10 cm, 20 & 30 cm, 40-140 cm, quel que soit le type d'étalonnage. Ceci est cohérent avec la très faible différenciation pédologique du sol (tab. 1) : seules se distinguent les couches de surface du sol, pour lesquelles la mesure neutronique est affectée par la présence de l'interface sol/atmosphère. Chaque mesure \hat{n} est la moyenne \bar{C} de $p = 2$ à 4 comptages dans le sol rapportée à la moyenne \bar{C} , des $q = 10$ à 22 comptages réalisés dans l'eau pendant toute la durée de l'étalonnage. Pour chacun des groupes de profondeur, on a calculé les paramètres d'étalonnage de la sonde (tab. 2) en tenant compte (E.N.B.) ou non (E.B.) des erreurs de mesure. On constate que les paramètres E.N.B. ne diffèrent pratiquement pas des paramètres E.B.. La figure 1 montre la droite de régression E.B. obtenue à la profondeur 10 cm. Les erreurs de mesure de chaque point d'étalonnage sont représentées, ainsi que l'intervalle de confiance à 95 % de la droite.

Tab. 2 - Paramètres de la droite d'étalonnage de la sonde à neutrons
(E.B. : étalonnage biaisé ; E.N.B. : étalonnage non biaisé).

Neutron probe calibration curve parameters

(E.B. : *biased calibration* ; E.N.B. : *unbiased calibration*).

Profondeur (m)	Nombre de points d'étalonnage	Type d'étalonnage	\hat{a}_0	\hat{a}_1	$s^2(\hat{a}_0)$	$s^2(\hat{a}_1)$	$s(\hat{a}_0, \hat{a}_1)$	$s^2(e)$
			$10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^3$		$10^{-4} (\text{m}^3/\text{m}^3)^2$			
0-0,1	17	E.B.	-2,314	78,04	2,750	35,08	-9,308	4,768
		E.N.B.	-2,322	78,07	2,752	35,10	-9,314	4,713
0,2-0,3	31	E.B.	-6,225	78,33	3,137	25,38	-8,745	3,851
		E.N.B.	-6,248	78,40	3,142	25,42	-8,759	3,781
0,4-1,4	136	E.B.	-1,322	63,86	0,8900	7,129	-2,468	4,864
		E.N.B.	-1,341	63,91	0,8914	7,141	-2,472	4,790

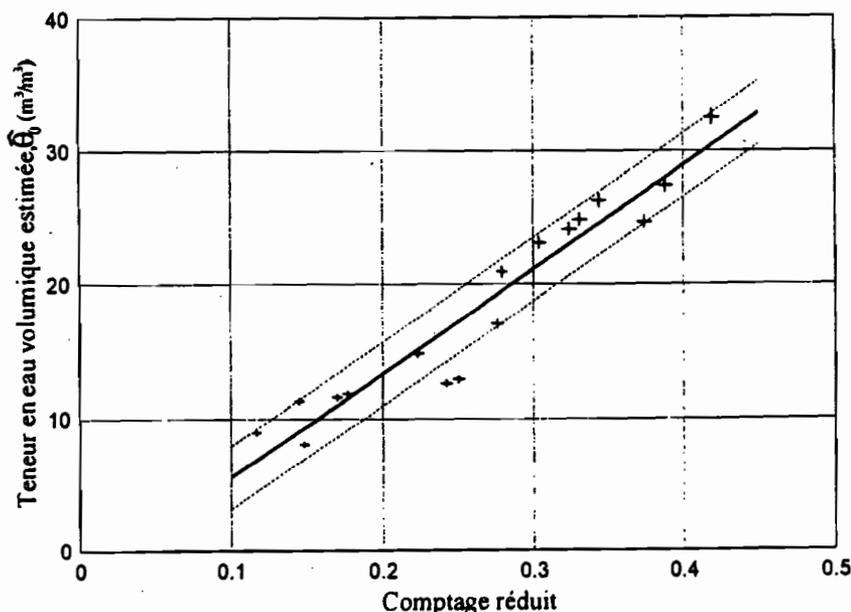


Fig. 1 - Droite d'étalonnage de la profondeur 10 cm (trait continu); les lignes pointillées indiquent l'intervalle de confiance à 95 % de la droite ; les barres verticales et horizontales, les intervalles de confiance à 95 % des mesures de chaque point d'étalonnage.

Calibration curve (continuous line) for the 10-cm depth ; dashed lines show the 95 % confidence interval of the curve ; horizontal and vertical bars show the 95 % confidence interval of each calibration point measurement.

La figure 2 montre, pour le groupe de profondeurs 40-140 cm, l'évolution de l'écart type d'estimation de la teneur en eau volumique $s(\hat{\delta}_0)$ obtenue, pour chaque type d'étalonnage (E.N.B., E.B.), en faisant varier \hat{n}_0 dans la gamme des valeurs d'étalonnage rencontrées (0,2-0,5 pour cet exemple). En moyenne, l'intervalle de confiance à 95 % d'une estimation est réduit de seulement 0,6 % lorsque l'on tient compte des erreurs de mesure (0,3 et 0,5 % pour les groupes de profondeur 10 cm et 20-30 cm).

Pour le cas présenté ici, l'utilisation d'un étalonnage sans biais de la sonde à neutrons n'apporte qu'un gain de précision négligeable.

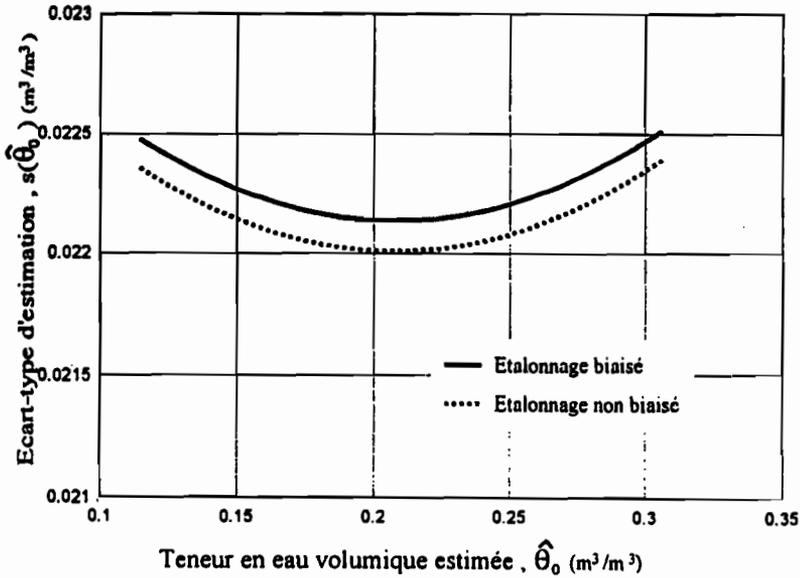


Fig. 2 - Ecart-types des estimations de teneur en eau volumique pour un étalonnage de la sonde à neutrons avec ou sans biais.

Standard deviation as a function of the predicted volumetric water content for biased and unbiased neutron probe calibrations.

5. DISCUSSION

5. Discussion

La faible influence des erreurs de mesure sur les paramètres d'étalonnage est liée à la faible variance d'erreur de la teneur en eau volumique $s^2(v)$, pour l'ensemble du sol étudié (tab. 3). Celle-ci est presque 100 fois plus faible que celles observées par HAVERKAMP *et al.* (1984) et BERTUZZI *et al.* (1987). En conséquence, la réduction de la variance résiduelle autour de la droite d'étalonnage est beaucoup plus faible que celles calculées par ces auteurs. Si l'on examine les contributions respectives des erreurs expérimentales sur W et r dans la variance $s^2(\hat{\theta})$ (équations (14) ou (15)), on constate (tab. 4) que la variance d'erreur de la teneur en eau pondérale $s^2(\hat{W})$ est beaucoup plus faible que celle calculée par BERTUZZI *et al.* (1987). HAVERKAMP *et al.* (1984) n'ont pas détaillé quelles étaient les contributions respectives de $s^2(\hat{W})$ et $s^2(\hat{p})$ à $s^2(\hat{\theta})$.

Tab. 3 - Variances d'erreur des comptages réduits ($s^2(u)$) et des teneurs en eau volumiques ($s^2(v)$) et variances résiduelles des régressions linéaires d'étalonnage ($s^2(e)$).

Error and residual variances for biased and unbiased calibrations.

Source des données		$s^2(u)$ X 10^{-6}	$s^2(v)$	$s^2(e)$, E.B.	$s^2(e)$, E.N.B.
		————— $10^{-4} (m^3/m^3)^2$ —————			
0,1 m		3,66	0,03	4,77	4,71
0,2 - 0,3 m		4,71	0,04	3,85	3,78
0,4 - 1,4 m		4,50	0,06	4,86	4,79
BERTUZZI <i>et al.</i> , 1987		50,0	3,06	7,23	3,84
HAVERKAMP <i>et al.</i> , 1984	Sonde A 0,1 m			3,31	0,654
	≥ 0,2 m			5,32	3,28
	Sonde B 0,1 m			3,47	1,95
	≥ 0,2 m			2,73	0,885

Tab. 4 - Contributions des erreurs de mesure de la masse volumique humide et de la teneur en eau pondérale à la variance d'erreur de la teneur en eau volumique.

Contributions of the errors on the wet density and the gravimetric water content to the error variance of the volumetric water content.

Source des données	$s^2(\hat{\rho})$	$s^2(\hat{W})$	$s^2(\hat{\theta})$	Contribution à $s^2(\hat{\theta})$, %	
	$10^2(kg/m^3)^2$	$10^{-2}(kg/kg)^2$	$10^{-4}(m^3/m^3)^2$	$s^2(\hat{\rho})$	$s^2(\hat{W})$
balance à 1/100 g	2,97 2,2 - 4,2	6,13 0,091 - 81	0,05 0,01 - 0,11	96,1 57,9 - 99,98	3,9 0,02 - 42,1
	2,99 2,2 - 4,2	0,254 0,091 - 1,3	0,06 0,01 - 0,11	99,9 99,1 - 99,98	0,1 0,02 - 0,9
balance à 1/10 g	2,90 2,2 - 3,7	26,0 8,9 - 81	0,03 0,01 - 0,06	83,3 57,9 - 96,9	16,7 3,1 - 42,1
BERTUZZI <i>et al.</i> , 1987	0,46 - 1,35	1000	2,4 - 3,3	18 - 41	59 - 82

^a valeur moyenne ; ^b gamme de variation

L'estimation de $s^2(\hat{W})$ semble donc jouer un rôle central dans la qualité de l'étalonnage de la sonde à neutrons. Une façon objective d'estimer $s^2(\hat{W})$ consiste à l'assimiler, comme nous l'avons fait, à l'incertitude de la mesure de W réalisée sur l'échantillon de sol prélevé pour l'étalonnage. $s^2(\hat{W})$ est alors directement déterminée par la méthode et l'instrument de mesure de W (généralement par pesées). Nous avons mesuré W à l'aide d'une balance précise au centième de gramme, pour la plupart des pesées. Mais nous avons aussi utilisé une balance au dixième (pour un cinquième des points d'étalonnage). Si l'on examine séparément la contribution de $s^2(\hat{W})$ à $s^2(\hat{\theta})$ pour les deux types de balance utilisés (tab. 4), on voit que celle-ci est réduite au centième de sa valeur lorsque l'on passe d'une balance au dixième de gramme à une balance au centième. Lorsque l'on utilise une balance au centième de gramme, l'erreur de mesure sur W devient négligeable devant celle sur r , pour la sonde gammamétrique que nous avons utilisée. Un moyen de réduire $s^2(\hat{W})$ consiste donc à utiliser des instruments de mesure de W plus précis. L'étalonnage de la sonde à neutrons auquel nous avons procédé aurait pu être encore amélioré en prenant en compte d'autres sources d'erreur comme celle due à l'étalonnage du gamma-densimètre. Nous ne disposons malheureusement pas des données brutes de cet étalonnage ni d'indication sur la qualité de cet étalonnage, mais seulement de l'équation d'étalonnage fournie par le constructeur.

Des sources d'erreur autres que celles liées aux appareils de mesure de W ou r sont aussi intervenues. Elles sont dues :

- à la différence de taille des volumes de sol impliqués dans la mesure de W et le comptage neutronique : la mesure de W est effectuée sur un volume de sol d'environ $0,2 \text{ dm}^3$ prélevé à la tarière, tandis que le volume de sol prospecté par la sonde à neutrons est une sphère d'une dizaine de dm^3 au minimum ;
- à la variabilité spatiale du sol : le lieu où sont effectuées les mesures de W change à chaque point d'étalonnage et est distant de plusieurs décimètres de la "zone d'influence" de la sonde à neutrons.

La quantification de ces erreurs est plus délicate que celle des erreurs de mesure. Elle est cependant nécessaire à une estimation de $s^2(\hat{\theta})$ "compatible avec la réalité expérimentale" (BERTUZZI *et al.*, 1987), et permettrait un gain de précision plus grand lors de l'utilisation de l'E.N.B.. Cette quantification implique l'utilisation de techniques objectives, comme par exemple, celle issues de la géostatistique.

6. CONCLUSION

6. Conclusion

Lorsque l'on cherche à tenir compte des incertitudes expérimentales dans l'étalonnage d'une sonde à neutrons, l'estimation des variances d'erreur de la teneur en eau pondérale du sol et de sa masse volumique humide est une étape essentielle. En effet, les valeurs de ces variances d'erreur déterminent directement le gain de précision que l'on peut obtenir lorsque l'on utilise un étalonnage sans biais. En général, la principale source d'incertitude dans l'étalonnage d'une sonde à neutrons provient des

estimations de teneur en eau pondérale. Si l'on considère que les erreurs de mesure sont la seule source d'incertitude de ces estimations, celle-ci peut être facilement réduite en utilisant un instrument de mesure plus précis. Nous avons montré que l'utilisation d'une balance au centième de gramme, voire au dixième, suffit à rendre négligeable l'effet des erreurs de mesure sur l'étalonnage, et peut permettre l'utilisation des estimateurs classiques de la régression linéaire pour obtenir les paramètres de l'étalonnage et limiter ainsi une autre source d'erreur potentielle : celle des erreurs de calcul possibles lors du calcul des paramètres non biaisés de la droite d'étalonnage et des teneurs en eau volumiques estimées à partir de cette même droite. Toutefois, ce résultat ne dispense pas chaque utilisateur de la sonde à neutrons d'une étude des erreurs de mesure, car celles-ci varient d'un instrument à l'autre. Enfin, la procédure d'étalonnage sans biais pourrait être encore améliorée, car d'autres sources d'incertitude que celles liées aux erreurs de mesure interviennent lors de l'étalonnage de la sonde à neutrons (mesure sur des volumes de sol variables en fonction de la méthode de mesure et variabilité spatiale des propriétés du sol). L'estimation de ces autres sources d'erreur est plus difficile que l'estimation des erreurs liées aux appareils de mesure et nécessite une méthode objective et rigoureuse, afin de ne pas conduire à la correction d'un biais irréaliste entraînant un gain de précision injustifiable des teneurs en eau volumiques estimées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

References

- AFES, 1990** - Référentiel pédologique français. Troisième proposition. *Multicop.*, Éd. AFES.
- AIVAZIAN, S., 1970** - Étude statistique des dépendances. Éd. Mir, 236 p.
- ARIBI K., SMAJSTRLA A. G., ZAZUETA F. S., SHIH S. F., 1985** - Accuracies of neutron probe water content measurements for sandy soils. *Soil Crop Sci. Soc. Florida*, 44, 44-49.
- BELL, J. P., EELES C. W. O., 1967** - Neutron random counting error in terms of soil moisture for nonlinear calibration curves. *Soil Sci.*, 103, 1-3.
- BERTUZZI P., BRUCKLER L., GROS, C., 1987** - Régression linéaire avec erreur sur les variables : application à l'étalonnage d'un gammadensimètre à transmission et d'un humidimètre à neutrons. *Agronomie*, 7, 507-515.
- BOIVIN P., DIA I., LERICOLLAIS A., POUSSIN J.-C., SANTOIR C., SECK S.M., 1995** - Agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal. *ORSTOM Actual.*, 45, 8-12 et 21-23.
- COQUET Y., 1996** - Étude *in situ* des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. *Thèse Dr., Univ. Orléans, Thèse Doc. Microfich. n°149, Éd. ORSTOM, Paris, 355 p. (+ 119 p. Annex.)*
- COQUET Y., 1998** - In situ measurement of the vertical linear shrinkage curve of soils. *Soil Till. Res.*, à par. .

- GARDNER W., KIRKHAM D., 1952** - Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Sci.*, 73, 391-401.
- HAVERKAMP R., VAUCLIN M., VACHAUD G., 1984** - Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : 1. Local standpoint. *Soil Sci.*, 137, 78-90.
- HEWLETT J. D., DOUGLASS J.E., CLUTTER J.L., 1964** - Instrumental and soil moisture variance using the neutron-scattering method. *Soil Sci.*, 97, 19-24.
- MERRIAM R. A., KNOERR K.R., 1961** - Counting times required with neutron soil-moisture probes. *Soil Sci.*, 92, 394-395.
- PAYCHENG C., 1980** - Méthodes d'analyse utilisées au laboratoire commun de Dakar. *ORSTOM, Dakar*, 104 p.
- POSS R., 1984** - La précision du comptage neutronique avec l'humidimètre Solo 25. Définition des protocoles de mesure. *Bull. GFHN*, 16, 99-122.
- SCHMIDT F., MOUTONNET P., 1985** - Analyse de l'erreur d'étalonnage d'une sonde de mesure neutronique de l'humidité des sols. *Bull. GFHN*, 18, 55-79.
- SINCLAIR D. F., WILLIAMS J., 1979** - Components of variance involved in estimating soil water content and water content change using a neutron moisture meter. *Aust. J. Soil Res.*, 17, 237-247.
- STEWART G. L., TAYLOR, S. A., 1957** - Field experience with the neutron-scattering method of measuring soil moisture. *Soil Sci.*, 83, 151-158.
- STONE J. F., KIRKHAM D., READ A. A., 1955** - Soil moisture determination by a portable neutron scattering moisture meter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 19, 419-423.
- STONE J. F., SHAW R. H. et KIRKHAM D., 1960** - Statistical parameters and reproducibility of the neutron method of measuring soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24, 435-438.
- VAN BAVEL C. H. M., UNDERWOOD N., SWANSON R. W., 1956** - Soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Sci.*, 82, 29-41.
- VAUCLIN M., HAVERKAMP R., VACHAUD G., 1984** - Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : 2. Spatial standpoint. *Soil Sci.*, 137, 141-148.

MILIEUX POREUX ET TRANSFERTS HYDRIQUES

BULLETIN DU GROUPE FRANCOPHONE HUMIDIMÉTRIE
ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX

