

**UNE MÉTHODE RAPIDE POUR CALCULER LA VITESSE DE PROPAGATION
D'UN FRONT D'HUMECTATION AVEC UNE SONDE NEUTRONIQUE**

J.M. IRIS

*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en
Coopération*

Centre ORSTOM d'Adiopodoumé BP. V 51 Abidjan Côte d'Ivoire.

Mots clefs :

Hydrodynamique, Humidité neutronique, Modélisation.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 28832 , ex 1

Cpte : B

RÉSUMÉ

Le développement de nouveaux humidimètres neutroniques à comptage rapide permet, en réduisant la durée de chaque mesure in situ, de suivre dans le sol des dynamiques d'humectation en temps réel. La vitesse de propagation du front est obtenue sans étalonnage de la source sans le sol par un modèle théorique d'évolution de la configuration du volume d'influence de la source au passage du front d'humectation. Deux types de dynamiques d'humectation sont traitées: l'humectation du sol par le passage d'un front à une cote z, et l'humectation du sol par le passage de deux fronts successifs caractérisés par des vitesses et des taux de saturation différents.

Sur les deux exemples traités, l'erreur induite par l'ajustement au modèle est du même ordre de grandeur que l'incertitude mesurée sur les valeurs des comptages neutroniques.

ABSTRACT

A SIMPLE METHOD FOR WET FRONT VELOCITY DETERMINATION USING A NEUTRON PROBE

Nowadays, neutron probes are largely used for hydrodynamical studies in soils. New apparatus can follow continuous wetting evolution in real time. In this case, a simple model calculates the wet front velocity in the volume of influence of the neutron probe.

The model is based on the calculation of the volume of influence as a function of the position of the wet front within this volume, and on the count rate estimation in such conditions.

Two wetting mechanisms can be taken in account by the model, according to the experimental plotting curve of the count rate evolution.

The first benefit of this model is to make it unnecessary for the user to calibrate the probe in the soil; so results are also given without any calibration error.

Two examples show that the error on the adjustment method is close to the experimental measurement error.

INTRODUCTION

La répétitivité des mesures sur un même site, permettant de suivre des processus hydrodynamiques est un facteur important dans le succès des méthodes d'humidimétrie neutronique. La réduction notable de la durée des mesures sans perte de précision (POSS, 1985) rend actuellement possible l'étude des dynamiques rapides telles que la propagation des fronts au cours de l'humectation du sol. Dans ces conditions, les courbes d'évolution des comptages neutroniques en fonction du temps présentent, à différentes cotes et dans différents matériaux, des similitudes de forme induites par la méthode de mesure plutôt que par le processus lui-même. A partir d'un modèle reproduisant, sous certaines hypothèses, les modifica-

tions géométriques du volume de mesure de la sonde neutronique induites par le passage d'un front d'humectation, il est possible de déterminer sa vitesse de propagation sans étalonnage de l'appareil dans le milieu.

L'ajustement des résultats expérimentaux au modèle doit être pris comme une interprétation des courbes selon les hypothèses du modèle. Le bénéfice qu'en tire l'utilisateur est l'absence d'étalonnage, souvent fastidieux sinon rédhibitoire, préalable à l'interprétation des résultats.

Les exemples présentés après la description du modèle et la présentation des calculs indiquent que l'erreur induite par l'ajustement est voisine de l'incertitude sur les comptages, mesurée expérimentalement.

I — DESCRIPTION DU MODÈLE

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode d'humidimétrie neutronique impose généralement que chacune des mesures corresponde à une couche de sol de faible épaisseur (le plus souvent 10 cm). En réalité les neutrons thermalisés dans le milieu sont comptés dans un ellipsoïde allongé selon l'axe du tube d'accès (COUCHAT, 1974). Ce volume dit "d'influence" est le plus souvent considéré, dans un milieu homogène, comme une sphère dont le diamètre est compris entre 15 et 50 cm selon l'humidité (VAN BAVEL, 1962).

La formule qui lie l'humidité volumique H_v du milieu au rayon de la sphère d'influence a été élaborée par Van Bavel dont elle porte le nom (COUCHAT, 1974):

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

Cette formule empirique exprime l'invariance du produit du volume d'influence par l'humidité volumique quel que soit le milieu (15 cm étant le rayon de la sphère d'influence dans l'eau donné par le constructeur). Elle ne tient cependant pas compte de l'effet diffusif des minéraux du sol vis-à-vis des neutrons.

Si on caractérise un milieu par une densité volumique de chocs d aboutissant à la thermalisation des neutrons sans préciser la nature de l'agent thermalisant, le nombre de neutrons thermalisés N_c dans un volume homogène V sera:

$$N_c = V \cdot d$$

En reprenant l'hypothèse d'invariance tirée de la formule de Van Bavel, on a :

$$N_c \cdot V = C_{ste}$$

Et, pour une sphère de rayon R :

$$N_c \cdot R^3 = C_{ste}$$

La connaissance du rayon de la sphère d'influence et du comptage correspondant dans un milieu de référence (le plus souvent dans l'eau: $R = 15$ cm pour N_{ref} Impulsion/seconde) permet de calculer le rayon de la sphère d'influence dans un milieu homogène quelconque en tenant compte de ses propriétés diffusives vis-à-vis des neutrons :

$$R = 15 \sqrt[3]{\frac{N_{ref}}{N_c}}$$

Le passage d'un front humide au cours de l'humectation du sol modifie la densité volumique de chocs du milieu. Si l'on dispose d'un nombre suffisant de mesures à une cote z, il est alors possible de reproduire les modifications géométriques du volume d'influence de la sonde provoquées, au passage du front, par la réduction du rayon de la sphère (figure 1).

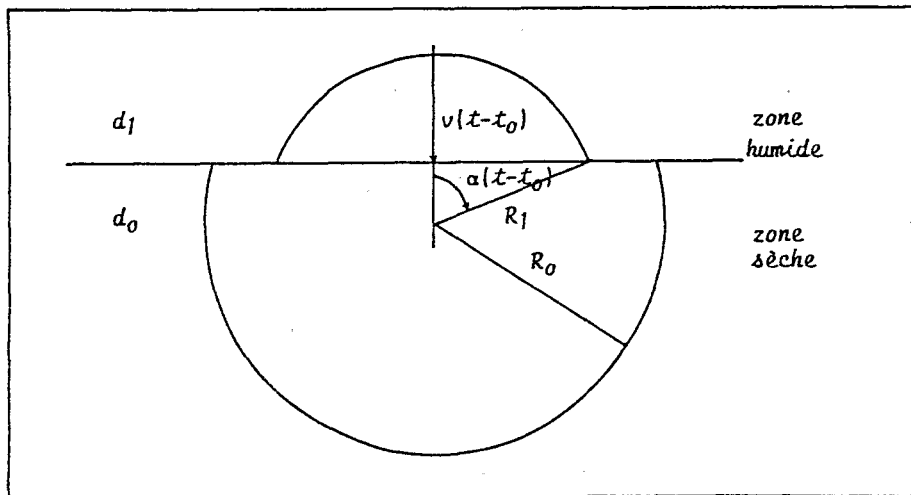


Figure 1 : Coupe du volume d'influence au passage d'un front humide (cas n° 1).

Après l'entrée du front humide (densité d_1) dans la sphère d'influence du milieu initialement homogène et sec (densité d_0), le volume d'influence devient hétérogène. Il est alors constitué de deux hémisphères dont le plan de contact évolue à la vitesse de progression du front d'humectation v du haut vers le bas. Si t_0 est la date d'entrée du front dans la zone d'influence initiale, et t la date courante, la distance du sommet du volume d'influence au plan de contact est :

$$H(t) = v \cdot (t - t_0)$$

Le comptage neutronique mesuré dans la totalité du volume d'influence est alors décomposé en une somme de deux comptages dans les hémisphères homogènes.

$$N_c(t) = V_0(t) \cdot d_0 + V_1(t) \cdot d_1$$

Le volume d'une portion de sphère de hauteur $H(t)$ est donné par la formule (*) :

$$N_c(t) = V_0(t) \cdot d_0 + V_1(t) \cdot d_1$$

Le volume d'une portion de sphère de hauteur $H(t)$ est donné par la formule (*) :

$$V(t) = \frac{\pi}{3} (H(t))^2 \cdot \left(R - \frac{H(t)}{3} \right)$$

En coordonnées polaires la vitesse linéaire v est remplacée par la vitesse angulaire α et le volume est donné par :

$$V(t) = \frac{\pi}{3} R^3 (\cos \alpha (t - t_0) \cdot (\cos^2 \alpha (t - t_0) - 3) + 2)$$

En posant :

$$A(\alpha, t) = \cos \alpha (t - t_0) \cdot (\cos^2 \alpha (t - t_0) - 3)$$

on obtient la valeur de comptage dans l'ensemble du volume d'influence en fonction de la vitesse de progression du front et du temps :

$$N_c(\alpha, t) = \frac{\pi}{3} (R_0^3 \cdot d_0 (2 - A(\alpha, t)) + R_1^3 \cdot d_1 (A(\alpha, t) + 2))$$

* Voir le détail des calculs en annexe

où R_0 et R_1 sont les rayons des sphères d'influence respectivement sèche et humide.

Le modèle peut être repris si l'humectation est provoquée par le passage de deux fronts d'humectation se propageant à des vitesses différentes dans le volume d'influence (figure 2). Ces modalités (cas n° 2) reproduisent une percolation rapide dans la macroporosité et la diffusion de l'eau dans la microporosité du sol, à partir des parois des macropores conducteurs.

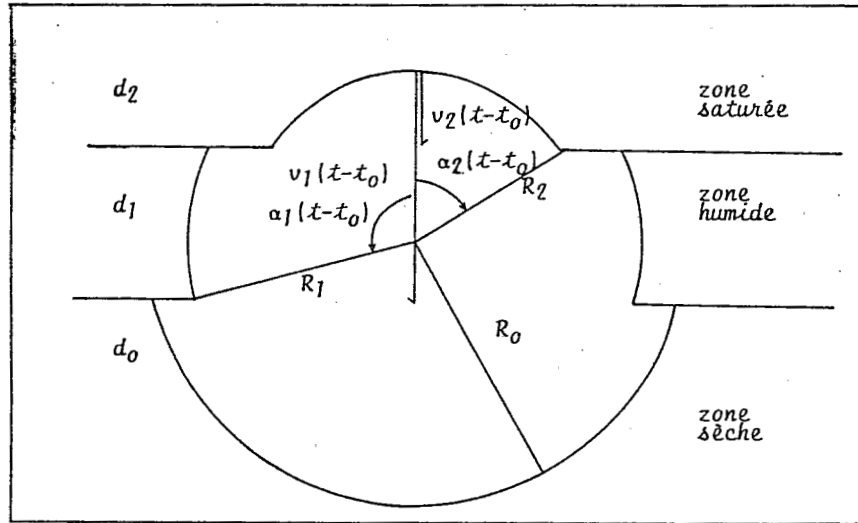


Figure 2: Coupe du volume d'influence au passage de deux fronts évoluant à des vitesses différentes (cas n° 2).

Les calculs ne diffèrent pas dans leur principe et la formule finale tient compte des deux vitesses angulaires α_1 et α_2 :

$$Nc(t) = \frac{\pi}{3} (R_0^3 \cdot d_0 (2 - A(\alpha_1, t)) + R_1^3 \cdot d_1 (A(\alpha_2, t) - A(\alpha_1, t)) + R_2^3 \cdot d_2 (A(\alpha_2, t) + 2))$$

où R_0 , R_1 et R_2 , et d_0 , d_1 et d_2 correspondent à des degrés d'humectation croissants.

La forme des courbes obtenues diffère selon la formulation choisie. Dans le premier cas les comptages neutroniques évoluent dans le temps selon une sigmoïde régulière entre ses bornes (figure 3, courbe 1), avec l'introduction du second front, l'évolution des comp-

tages ralentit lorsque le premier front atteint la base du volume d'influence (figure 3, courbe 2).

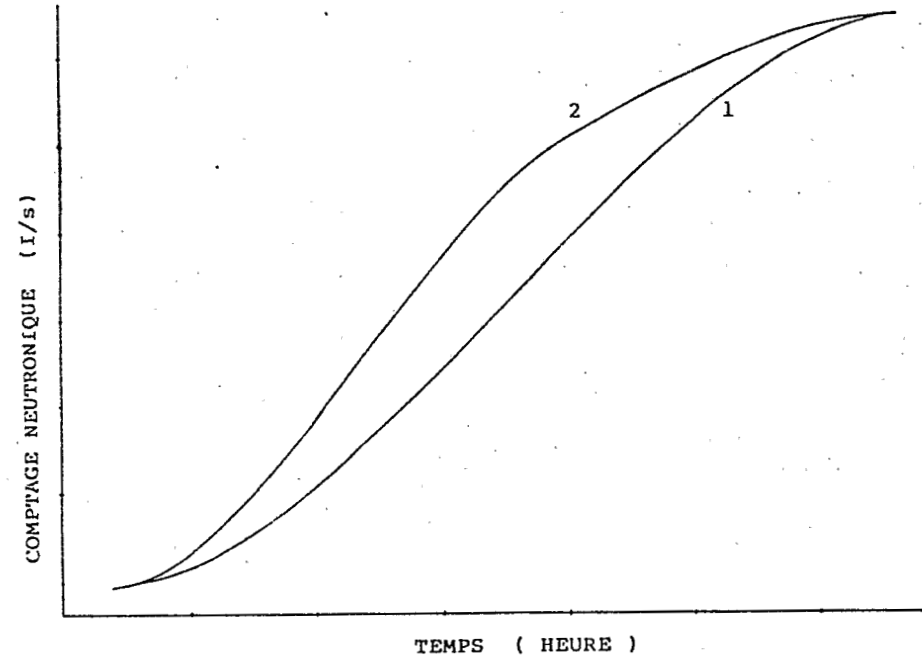


Figure 3: Modèle théorique d'évolution des comptages neutroniques dans le temps. courbe 1 = cas n° 1, courbe 2 = cas n° 2.

Dans ce second cas il est possible de calculer l'effet du passage du premier front sur l'humectation finale dans le volume d'influence. Le rapport des recharges hydriques ne dépendant que des variations de comptages:

$$\Gamma = 100 \cdot \frac{H_1 - H_0}{H_2 - H_0} = 100 \cdot \frac{Nc1 - Nc0}{Nc2 - Nc0}$$

où $Nc1$ est le nombre de comptage maximum produit par le premier front:

$$Nc1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_1^3 \cdot d_1$$

En pratique les paramètres du modèle d'ajustement ne sont pas directement accessibles, ils sont déterminés à partir des données expérimentales de comptage et la valeur de référence mesurée dans l'eau.

II — DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

L'ajustement porte sur la durée d'humectation du matériau, entre une date initiale t_i et une date finale t_f , les valeurs de comptage étant alors respectivement N_i et N_f .

Au début et à la fin de l'humectation le milieu est supposé homogène, c'est-à-dire que l'hétérogénéité initiale dans le volume d'influence ne perturbe pas l'analyse des transformations induites par l'humectation.

Deux types d'ajustements sont proposés selon la formulation analytique choisie.

En présence d'un front unique évoluant dans le volume d'influence (cas n° 1), les paramètres du modèle (respectivement d_i , R_i et d_f , R_f , au début et à la fin de l'humectation du volume d'influence) sont entièrement déterminés par les états initiaux (t_i , N_i) et finaux (t_f , N_f) mesurés aux points extrêmes de la courbe expérimentale, $N_c(t)$, et par la valeur de référence dans l'eau, N_{ref} .

$$R_i = 15 \sqrt[3]{\frac{N_{ref}}{N_i}}$$

$$d_i = \frac{3 \cdot N_i}{4 \cdot \pi \cdot R_i^3}$$

$$R_f = 15 \sqrt[3]{\frac{N_{ref}}{N_f}}$$

$$d_f = \frac{3 \cdot N_f}{4 \cdot \pi \cdot R_f^3}$$

La vitesse de progression du front est donnée par :

$$v = \frac{2 \cdot R_f}{t_f - t_i}$$

En présence de deux fronts évoluant simultanément dans la sphère d'influence (cas n° 2) le calcul de la vitesse de propagation la plus lente (v_2) est conduit de la même façon que dans le cas n° 1. Par

contre le calcul de la vitesse rapide (v_1) est gêné par l'absence d'homogénéité du milieu lorsque le premier front atteint la base du volume d'influence. L'évaluation directe de v_1 étant impossible, on introduit arbitrairement deux données supplémentaires t_{int} et N_{int} afin de décomposer la courbe expérimentale irrégulière (figure 3, courbe 2) en deux courbes sigmoïdes simples. Ces données estimées sont analogues aux données expérimentales et correspondent aux coordonnées du point extrême de la courbe fictive relative à la progression du seul front rapide.

$$R_{int} = 15 \sqrt[3]{\frac{N_{ref}}{N_{int}}}$$

$$d_{int} = \frac{3 \cdot N_{int}}{4 \cdot \pi \cdot R_{int}^3}$$

$$v_1 = \frac{2 \cdot R_{int}}{t_{int} - t_i}$$

$$v_2 = \frac{2 \cdot R_f}{t_f - t_i}$$

Les paramètres et les vitesses de progression des fronts sont calculés après l'ajustement manuel de la courbe théorique sur les points expérimentaux en modifiant les bornes expérimentales. Le contrôle du résultat se fait "de visu" dans un premier temps, puis est ensuite affiné en minimisant à la fois le biais systématique et l'Erreur Moyenne.

Le biais est un paramètre de centrage de l'ajustement :

$$\text{biais (\%)} = \frac{100}{N} \cdot \sum_i \frac{N_{ti} - N_{ei}}{N_{ei}}$$

où N_{ti} est la valeur théorique correspondant au i ème comptage expérimental N_{ei} , et N le nombre d'observations entre les deux dates extrêmes.

L'Erreur Moyenne mesure la concordance entre les valeurs observées et les valeurs théoriques :

$$E.M. (I/s) = \frac{1}{N} \cdot \sum_i |N_{ti} - N_{ei}|$$

III — EXEMPLE D'AJUSTEMENTS

Ces applications sont tirées d'une expérimentation infiltrométrique effectuée en Côte d'Ivoire. Un suivi neutronique du front d'humectation sous pluie simulée sur une parcelle d'un m² équipée d'un tube d'accès neutronique est à l'origine des données traitées. La pluie de 120 mm/h a duré 185 minutes, le sol est sablo-argileux homogène jusqu'à 100 cm où se situe une discontinuité texturale nette caractérisée par l'élévation des teneurs en argile. Sous les horizons humifères perturbés (Ap) profonds de 40 cm et jusqu'à cette discontinuité, la structure du sol est massive légèrement fragmentaire. Les variables traitées sont, outre la valeur de référence neutronique dans l'eau (50 mesures), les dates exactes de comptage (en heures) et les valeurs *non corrigées* de ces comptages.

Le traitement des données est conduit par l'utilisateur de façon entièrement conversationnelle sur un micro-ordinateur Goupil G3. La modification des paramètres d'ajustement s'effectue sur l'écran graphique (IRIS et SAVY, 1985).

Selon les cotes z des points de comptage, les deux types d'ajustements ont été employés. La valeur de référence dans l'eau (Nref) a été calculée à partir de 50 mesures successives; dans ces conditions l'écart moyen des valeurs de comptage à Nref est 3,7 Impulsions/seconde (I/s).

Les ajustements selon le cas n° 1 (figure 4 et tableau I) aux cotes 30 et 105 cm présentent des valeurs de biais faibles et des Erreurs Moyennes (EM) voisines de l'incertitude sur Nref.

prof. cm	Ti h	Tf h	v m/h	biais %	EM I/s
30	0.05	0.55	1.3	- 0.2	4.8
105	1.1	1.55	1.3	- 0.1	2.2

Tableau 1 : Résultats d'ajustements (cas n° 1).

Deux ajustements selon le cas n° 2 sont présentés sur la figure 5 et dans le tableau II, les valeurs de biais sont légèrement plus élevées que celles de l'exemple précédent mais les valeurs des EM sont plus faibles. On remarque aussi la faible contribution du passage du front rapide dans l'humectation du matériau.

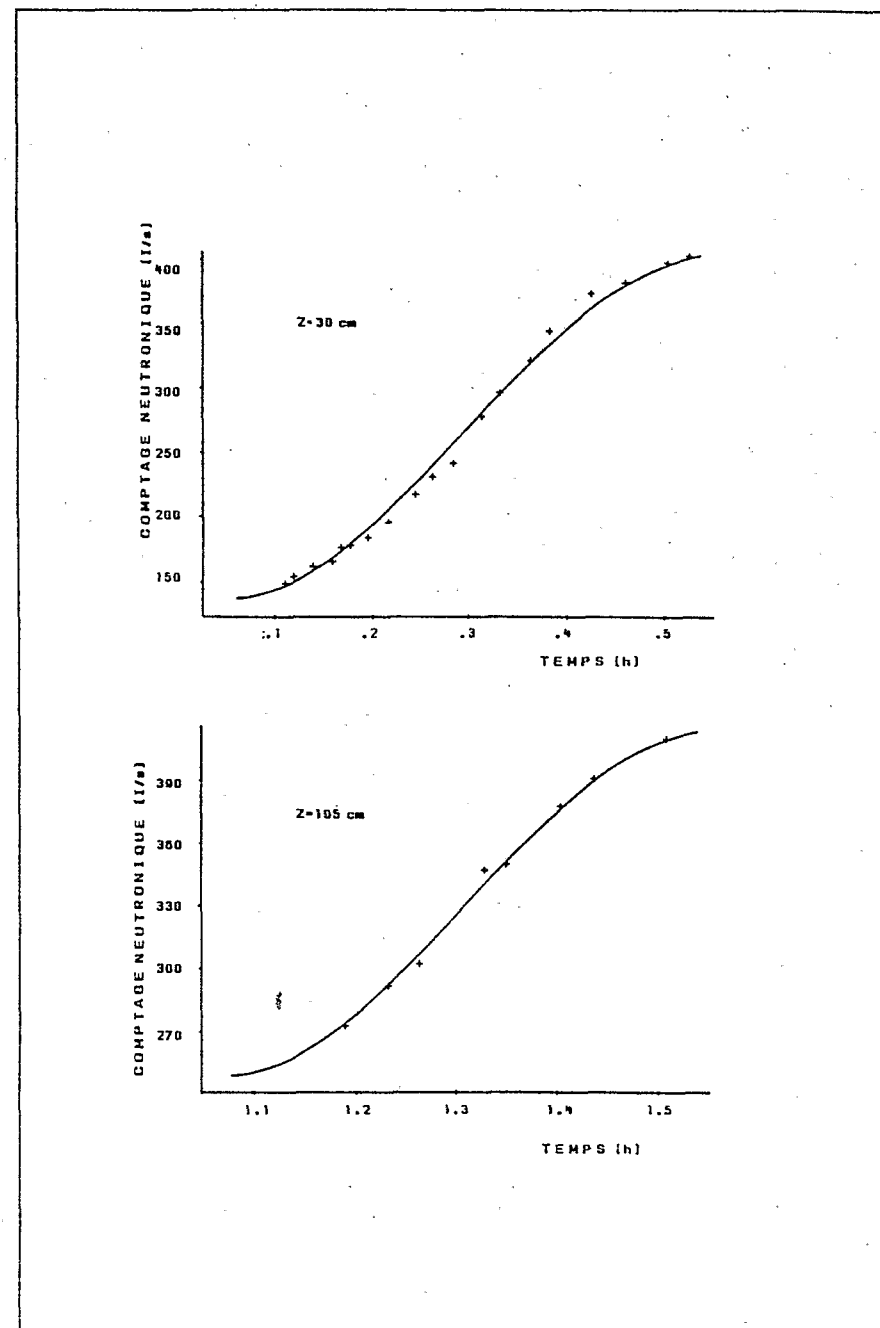


Figure 4 : Exemples d'ajustements selon le cas n° 1 (un seul front d'humectation).

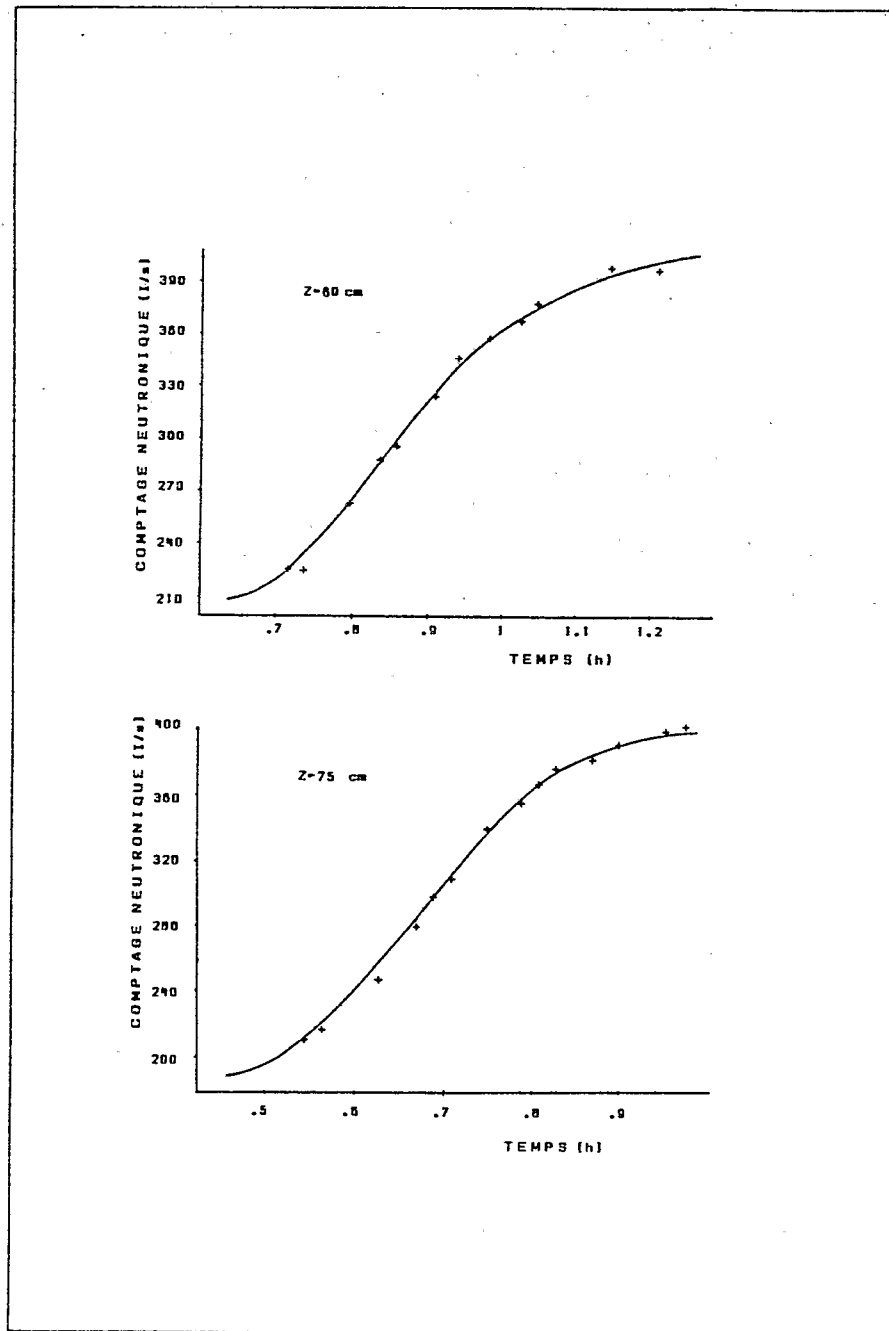


Figure 5: Exemples d'ajustements selon le cas n° 2 (deux fronts évoluant simultanément).

prof. cm	Ti h	Tf h	v1 m/h	v2 m/h	biais %	EM l/s	Γ %
60	0.45	1	1.8	1.2	-0.4	2.8	10.8
75	0.63	1.28	1.9	1	-0.4	2.9	12.4

Tableau II: Résultats d'ajustements (cas n° 2).

Une vérification expérimentale des vitesses calculées par le modèle d'ajustement a été effectuée à partir des dates de passage des fronts observées aux cotes $z = 30, 45, 60, \dots, 200$ cm de profondeur. Ces dates sont déterminées par l'estimation du point d'inflexion des courbes expérimentales $N_c(t, z)$. Le passage des fronts aux mêmes cotes a par ailleurs été calculé à partir des valeurs des vitesses calculées par le modèle. Du fait des faibles écarts entre v_1 et v_2 et des faibles contributions des fronts les plus rapides, seules les vitesses lentes ont été prises en compte.

Les points obtenus (figure 6) s'alignent selon la première bissectrice avec un coefficient de corrélation très hautement significatif; de plus la pente mesurée n'est pas significativement différente de l'unité. Le biais observable est de l'ordre de 5 minutes de retard des dates mesurées par rapport aux dates expérimentales; il a pu être provoqué par le fait de n'avoir pris en compte que les vitesses de déplacement les plus lentes.

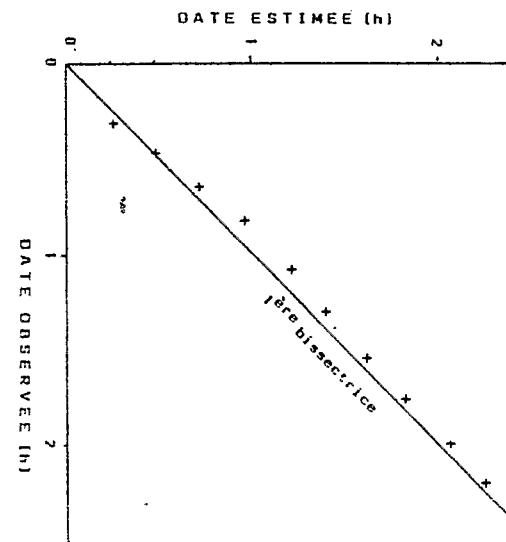


Figure 6: Vérification des vitesses calculées par comparaison des dates estimées par le modèle avec les dates observées du passage des fronts aux cotes de mesure.

CONCLUSIONS

Les mesures de vitesses d'infiltration et de percolation de l'eau dans le sol revêtent en milieu tropical et subtropical une importance particulière pour l'établissement des normes d'irrigation. Il en est de même partout où les économies d'eau sont nécessaires. Les études hydrodynamiques dans les sols, souvent longues et coûteuses ne sont malheureusement pas toujours adaptées à ce genre de problème.

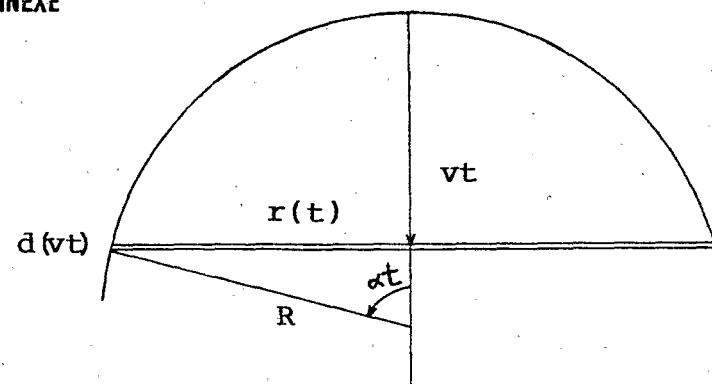
La méthode de détermination des vitesses de progression des fronts présentée dans cette note peut être rapidement mise en œuvre car elle ne nécessite aucun étalonnage de la sonde neutronique dans le milieu étudié; de plus elle est basée sur le traitement des données de comptage immédiatement accessibles après la mesure.

Les informations obtenues, bien qu'insuffisantes pour une caractérisation poussée de la dynamique de l'eau dans les sols seront cependant utiles pour la vérification ponctuelle d'une dynamique ou l'élaboration des tests du comportement hydrique d'un sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- COUCHAT, Ph., 1974: Mesures neutroniques de l'humidité des sols. Thèse doct. Univ. P. Sabatier, Toulouse. 206 p.
- IRIS J.M., SAVY L., 1985: Présentation d'un programme de dépouillement rapide des vitesses de percolation de l'eau dans les sols. Rapp. ORSTOM Adiopodoumé, 15 p. et 1 disquette.
- POSS R., 1985: La précision du comptage neutronique avec l'humidimètre Solo 25. Définition des protocoles de mesure. Bull. GFHN, 16. 109-122.
- VAN BAVEL C.W.M., 1962: Accuracy and source strength in soil moisture neutron probe. Soil Science Soc. Am. Proc., 26, p. 405.

ANNEXE



Le calcul du volume d'un hémisphère s'effectue de la façon suivante:

$$r^2(t) + (R - vt)^2 = R^2$$

$$r^2(t) = vt(2R - vt)$$

$$\text{vol}(t) = \int_0^{vt} \pi vt (2R - vt) d(vt) = \pi (vt)^2 \left(R - \frac{vt}{3}\right).$$

En coordonnées polaires:

$$vt = R(1 - \cos \alpha t)$$