

193 JUL. 1971

ÉTUDE FINE DU BILAN HYDRIQUE PAR UTILISATION DE LA SONDE À NEUTRONS

P. POURRUT** et H. CAMUS

Collection de Référence

n° B4848, ex 1

RÉSUMÉ

Les études conduites par l'ORSTOM pour l'étude fine du bilan hydrique sur bassins représentatifs ont rencontré de sérieuses difficultés chaque fois que les nappes souterraines jouaient un rôle important, en particulier sur les bassins représentatifs de KORHOGO (Côte-d'Ivoire) et de la TAFAINA (Madagascar). Il était difficile de suivre sur une surface de plusieurs km² les variations du stock d'humidité dans la zone d'aération et de l'évapotranspiration réelle par les procédés de mesures classiques.

L'emploi de l'humidimètre à neutrons, après une période de mise au point technologique, a apporté une heureuse solution. Après une courte description des méthodes employées et des précautions à prendre, les auteurs montrent comment, sur parcelle, on peut établir le bilan averse par averse, on peut approcher l'influence de l'humidité du sol sur le ruissellement et estimer l'évapotranspiration réelle.

Les mêmes méthodes permettent de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des sols: la vitesse d'infiltration sous charge constante, le potentiel d'infiltration, la porosité utile, la capacité de rétention. Actuellement, les deux bassins versants sont équipés avec un nombre de tubes suffisants pour mesurer le volume d'humidité dans la zone d'aération tous les huit jours en saison des pluies. Sur KORHOGO, les mesures ont été faites à cette cadence depuis deux ans, ce qui permettra le bilan à l'échelle hebdomadaire.

SUMMARY

The researches conducted by the Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer towards the exhaustive study of water balance on representative basins have met big difficulties when the discharge of aquifers was not negligible in the flow at the gauging station. It is the case on representative basins of KORHOGO (Ivory Coast) and of the TAFAINA rivulet (Madagascar). On the areas of several square kilometers, it was difficult to estimate with precision the variations of the total volume of water in the unsaturated zone of the soil and the actual evaporation by the classical methods of measurements.

The use of neutron scattering meter, after technological adjustment, brought a good solution. After a short description of the methods used by the hydrologists of O.R.S.T.O.M. and the necessary cautions in tropical areas, the authors showed that it is possible with this apparatus to establish, on plots, the water balance storm by storm, to approach the influence of humidity of soil on surface runoff and to estimate the actual evapotranspiration.

The same methods permit the determination of hydrodynamical characteristics of the soils: the infiltration speed under constant head, the potential of infiltration, the effective porosity, the capacity of retention.

At the present time, the two basins are equipped with enough tubes for measuring weekly the volume of water in the unsaturated zone in rainy season. On the KORHOGO basin, measurements have been made at this frequency from two years and so it will be possible to establish the water balance each week or each decade.

** Ingénieur hydrologue à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Section de MADAGASCAR

* Hydrologue chargé de recherches à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Section de COTE-d'IVOIRE.

Hydro

INTRODUCTION

Dans le cadre des études générales menées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM sur bassins représentatifs et expérimentaux depuis presque vingt ans, l'établissement du bilan hydrologique a rencontré parfois de sérieuses difficultés, surtout lorsqu'on cherchait à l'analyser sur de courtes périodes.

Le bilan hydrologique sur bassins représentatifs ou expérimentaux peut être estimé de façon très sommaire ou de façon très approfondie. Le cas le plus simple est celui du bilan annuel dans lequel on ne considère que les précipitations et le ruissellement superficiel, leur différence constituant les pertes, terme plus ou moins vague qui englobe souvent tout ce qu'on ne sait pas ou ne peut pas mesurer. Ce bilan simplifié est justifié pour des études préliminaires ou pour des bassins imperméables.

On peut faire mieux en déterminant, pour le bilan annuel, le volume des précipitations, le volume du ruissellement superficiel et le volume de l'écoulement de base ou écoulement des nappes; ce dernier correspond au produit final de l'infiltration. Ceci est tout à fait justifié lorsque tout le débit provenant des nappes aquifères passe dans la section de jaugeage. Le volume perdu par évapotranspiration réelle est estimé, en général, par différence. Il est préférable de l'estimer par des calculs directs de ce facteur en s'appuyant sur des données d'observations climatologiques. Mais un terme du bilan reste alors mal connu, la différence entre le stock de l'eau dans le sol d'une année à l'autre.

En outre, beaucoup d'hydrologues ne sont satisfaits que lorsque, pour un bassin donné, ils ont établi un modèle permettant de reconstituer le régime de l'écoulement superficiel et souterrain à partir des précipitations journalières. Ceci exige un bilan hydrologique au moins à l'échelle hebdomadaire ou décadaire. Dans ce cas, la connaissance précise des mouvements de l'eau dans le sol est indispensable, il faut connaître : les caractéristiques physiques du sol en relation avec les mouvements de l'eau, les variations du niveau de la nappe (lorsqu'il y en a une) et les variations de la quantité d'eau contenue dans la zone d'aération. Un bon réseau de piézomètres ne suffit donc pas, il faut une étude extensive de la zone d'aération.

Dans ces deux cas, deux problèmes importants sont à résoudre : la détermination de l'évapotranspiration réelle et celle du stockage de l'eau dans la zone non saturée.

Par ailleurs, la connaissance précise de ce dernier élément permet, indépendamment de l'établissement du bilan hydrologique, d'analyser de façon plus approfondie l'influence du sol sur le ruissellement superficiel et le processus du ruissellement lui-même.

L'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer s'est efforcé, depuis 1962, d'arriver à des bilans complets de ce genre en vue de faciliter l'étude de l'alimentation des nappes et par voie de conséquence, a cherché à résoudre les deux problèmes signalés plus haut. Un premier bassin représentatif a été aménagé à KORHOGO (Côte-d'Ivoire) avec le concours du BRGM. Plus tard, un second bassin, celui de la TAFAINA (Madagascar) a été équipé suivant le même esprit. On est arrivé très vite à connaître assez bien les variations de la cote de la nappe, mais la zone d'aération a présenté beaucoup plus de difficultés. En effet, sur un bassin représentatif qui presque obligatoirement n'est pas homogène, il est nécessaire de multiplier les sites où est mesurée l'humidité du sol, contrairement au cas de l'étude d'un sol dans un futur périmètre d'irrigation, d'où un nombre de mesures tel que l'emploi des procédés classiques est souvent impraticable.

Au début, en 1966, l'ORSTOM à KORHOGO a cherché à aboutir par des *mesures directes* sur échantillons (méthode gravimétrique). L'humidité du sol à un moment donné, à un site donné et à une profondeur donnée, résultant de la moyenne des mesures sur trois échantillons. Le nombre de mesures était tel qu'il fallait affecter à ce bassin de très gros moyens ou espacer les mesures dans le temps pour diminuer le nombre d'échantillons. En définitive, il n'a pas été possible d'arriver ainsi à une fréquence suffisante des mesures pour un bilan hebdomadaire.

Devant ces difficultés, l'ORSTOM a entrepris, au bassin de la TAFANA à Madagascar, d'employer la sonde ou l'humidimètre à neutrons pour mesurer in situ la mise en réserve de l'eau dans les horizons superficiels et l'évapotranspiration réelle. Une sonde était disponible, ainsi que le personnel spécialisé du Commissariat Français à l'Énergie Atomique pour réparer et entretenir ce matériel.

Il a été procédé d'abord, pendant un an environ, à des essais méthodologiques et technologiques qui, après quelques mises au point, ont donné toute satisfaction. Les mesures faites sur le même profil sont tout à fait comparables, l'exécution et le dépouillement très rapide permettent de les multiplier. Devant ces résultats, l'ORSTOM a décidé, en 1968, de passer directement à l'étude de la zone d'aération par sonde à neutrons sur l'ensemble du bassin de KORHOGO où la mise en place des tubes était plus facile. Les mesures sont faites en 12 sites répartis régulièrement sur les 3,6 km² du bassin à une fréquence correspondant à une série complète tous les 5 ou 6 jours.

Sur la TAFANA, les recherches sur la dynamique de l'infiltration et les propriétés hydrodynamiques des sols se sont poursuivies sur parcelle de ruissellement qui, par rapport au bassin versant lui-même, présentait trois avantages : surface réduite, petit nombre de tubes, possibilité d'étudier le bilan averse par averse. Puis, en 1969, les hydrologues ont entrepris l'équipement du bassin où les mesures à la sonde à neutrons seront effectuées en 6 sites pour un bassin de 4,5 km². La présente Communication donne les premiers résultats obtenus sur ce bassin de la TAFANA; la précision du bilan hydrologique dépendant surtout pour cette partie du cycle de la qualité de l'expérimentation et de l'interprétation des mesures, nous insisterons plus particulièrement sur ces deux points plus intéressants pour les exploitants de bassins représentatifs que les résultats du bilan proprement dit relatif à un bassin particulier. Auparavant, il est nécessaire de présenter les sols du bassin.

1. CARACTÈRES PÉDOLOGIQUES DU BASSIN

Le bassin versant de la TAFANA, situé dans la région centrale de Madagascar, est soumis à un climat humide mésothermique, c'est-à-dire à un climat ferrallitisant, avec orages tropicaux à forte intensité. La végétation est une pseudo-steppe. Les pentes sont fortes.

Les manifestations de l'érosion et du remaniement sont très répandues sur l'ensemble du bassin versant : sols tronqués, stone-lines, profondes ravines d'érosion (lavaka).

La roche mère est constituée, pour la plus grande partie du bassin versant, de gneiss et de migmatites. Sur ces roches les sols sont profonds.

L'hydromorphie devient le principal facteur d'évolution des sols de rizières.

On trouve les sols suivants représentés sur la carte pédologique n° 1 ci-après :

- Les sols minéraux bruts, la roche mère a été mise à nu par l'érosion.
- Les sols peu évolués, sols régosoliques formés sur quartzites. Le profil est du type AC, l'horizon A, humifère épais de quelques centimètres, est bien structuré, poreux. L'horizon C est constitué par des quartzites fissurés;
- Les sols ferrallitiques (de beaucoup les plus répandus) : ils appartiennent tous à la sous-classe des sols fortement désaturés. Deux groupes ont été distingués : les sols remaniés et les sols pénévoués;
- Les sols remaniés possèdent une stone-line. Les minéraux primaires apparaissent dans le profil à une trentaine de centimètres ou juste en dessous de cette stone-line, l'épaisseur du recouvrement au-dessus de celle-ci permet de classer les sols dans le sous-groupe des sols remaniés modaux ou dans celui des sols remaniés pénévoués.

a) Les sols remaniés modaux : le recouvrement au-dessus de la stone-line présente une épaisseur généralement supérieure à 50 ou 60 centimètres.

Un exemple de profil type de ce sol est fourni par le sol I situé près de la station météorologique du bassin versant. La stone-line se trouve entre 80 et 120 centimètres, la morphologie du profil est :

- 0- 10 cm : Horizon brun rouge humifère
Limono-argilo-sableux très poreux
- 10- 60 cm : Horizon rouge
Limono-argilo-sableux devenant limono-sableux en profondeur, porosité tubulaire assez forte
- 60- 90 cm : Horizon brun jaune
Limono-sableux, porosité tubulaire
- 90-120 cm : Stone-line constituée d'un lit irrégulier de blocs de quartz anguleux ou arrondis
- 120-200 cm : Horizon rouge
Sablo-limoneux, porosité tubulaire très forte.
Pas de racines.

Le sol n° II, situé à une cinquantaine de mètres au Nord du profil I, présente une stone-line beaucoup plus dense; une discontinuité dans les caractéristiques hydriques doit se manifester à son niveau.

b) Les sols remaniés pénévulés : le recouvrement au-dessus de la stone-line est peu épais (souvent inférieur à 30 centimètres). Compte tenu de ce fait, le profil est semblable à celui des sols remaniés modaux.

Les sols pénévulés ne possèdent pas de stone-line. Ce sont des sols qui ont été profondément rajeunis par l'érosion. Sur migmatites et gneiss l'horizon C n'est pas toujours atteint, le profil peut être comparé à celui d'un sol remanié tronqué légèrement en dessous de la stone-line.

— Les sols hydromorphes : ils forment la totalité des rizières ou des bas-fonds non cultivés, et sont à rattacher aux sols peu humifères, à pseudogley, tachetés.

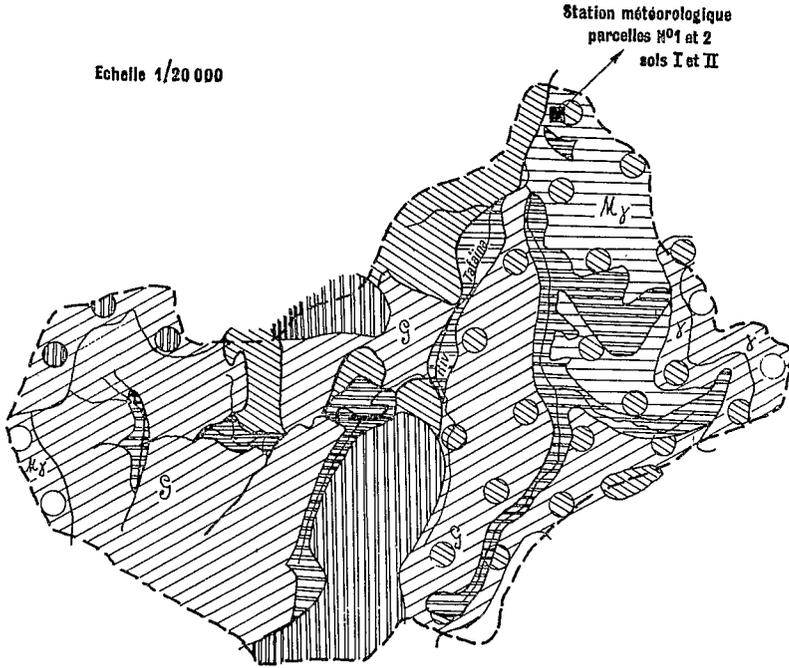
2. MODE D'UTILISATION DE L'HUMIDIMÈTRE A NEUTRONS

Nous supposons connu le principe de cet appareil. Précisons que sur le bassin versant de la TAFANA ont été utilisés les humidimètres de profondeur et de surface HP 110 à source émettrice Ra Be, HP 310 à source émettrice Am Be, HS 310, du Commissariat Français à l'Energie Atomique construit par la Compagnie Générale d'Électronique Industrielle LEPAUTE, ainsi que les accessoires de ces humidimètres : ictomètres portatifs et échelles de comptage; nous reviendrons plus loin sur ce matériel, nous indiquerons simplement ci-après ce que l'on doit retenir de l'expérience acquise sur les bassins représentatifs qui correspondent à des conditions nettement plus difficiles que celles du laboratoire ou des instituts de recherche agronomique.

2.1. ÉTALONNAGE

Cette opération est capitale et beaucoup moins facile à faire sur le terrain qu'on ne pourrait le penser.

L'étalonnage au laboratoire, qui a donné de bons résultats en terrains homogènes, a conduit à une dispersion inacceptable dans le cas présent malgré l'importance des



CLASSE	SOUS-CLASSE	GROUPE	SOUS-GROUPE	ROCHE_MÈRE
 Sols minéraux bruts	Origine non climatique	D'érosion	Lithosols	
 Sols peu évolués	————— " —————	————— " —————	Regosolique	γ Granite
 Sols ferrallitiques	Fortement désaturé	Remanié	Madal	⊗ Gneiss
 ——— " ———	————— " —————	————— " —————	Pénévolué	Mγ Migmatite granitoïde
 ——— " ———	————— " —————	Pénévolué	Avec érosion	○ Complexe
 Sols hydromorphes	Peu humifères	à pseudogley	Tacheté	

FIG. 1 Carte pédologique du bassin versant de la Tafaina.

moyens mis en œuvre. Il est donc conseillé de procéder à l'étalonnage « au champ » et de prendre pour cette opération les précautions suivantes :

a) Ne pas essayer d'implanter les tubes de mesures n'importe où. Dans la mesure du possible, préférer un endroit relativement plat, où quelques sondages à la tarière auront prouvé que les cailloux ne sont pas trop nombreux et que la tranche superficielle du sol, sur au moins cinquante centimètres, semble assez homogène.

b) Mettre en place les tubes le plus longtemps possible avant la période envisagée pour les mesures. La tarière utilisée doit avoir un diamètre correspondant au diamètre extérieur du tube. Mieux vaut en effet mettre en place celui-ci légèrement en force plutôt que d'avoir des vides trop nombreux.

c) Creuser une fosse de 1,5 mètre de long sur 1 mètre de large, la profondeur étant fonction de la longueur du tube prévu pour la mesure.

d) Faire appel à un pédologue qui, après examen visuel et à l'aide de prélèvements, décrira le profil et déterminera les limites entre tranches de sol pouvant être considérées comme grossièrement identiques.

Si les horizons sont trop nombreux, il vaut mieux choisir un autre emplacement car à chaque horizon va correspondre une courbe d'étalonnage différente*.

e) Étalonner en place, suivant le nombre de tranches de sol définies (fig. 2). Au cours du forage à la tarière pour l'implantation des tubes, prélever des échantillons tous les vingt centimètres pour détermination en laboratoire de la quantité d'eau contenue. Dès que le tube est installé, faire une mesure à l'humidimètre à chaque point de prélèvement des échantillons.

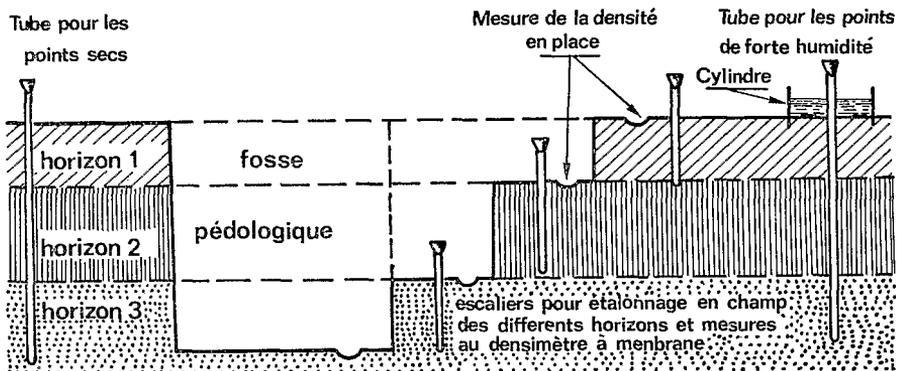


FIGURE 2. Schéma du dispositif utilisé sur la Tafaiña pour l'étalonnage en champ.

Ce profil n'est pas très valable car le tube n'est pas encore en place, mais il donne une première indication que l'on compare avec les résultats obtenus en laboratoire sur les échantillons prélevés.

f) De fréquents arrosages sont alors nécessaires pour permettre le tassement du sol et le comblement des vides subsistant autour du tube lors du creusement. Un « temps de repos », au minimum égal à un mois, doit être observé.

g) On peut alors procéder à « l'étalonnage au champ » proprement dit. Pour cela, on compare les mesures à l'humidimètre et le profil tracé à partir de l'humidité moyenne de trois échantillons prélevés en triangle à égale distance du tube et le plus près possible de celui-ci.

* Il y a beaucoup de terrains où ce choix n'est pas possible (N.D.L.R.)

h) Pour obtenir un meilleur étalonnage sur une gamme plus étendue d'humidité, on installe deux tubes à proximité de la fosse. L'un servira pour l'étalonnage pendant une période sèche. L'autre sera placé à l'intérieur d'un cylindre d'un mètre de diamètre environ, de 50 cm de hauteur et enfoncé dans le sol d'environ 20 cm. Le sol à l'intérieur du cylindre sera humecté par un apport quotidien, pendant une semaine, de 50 litres d'eau. On peut ensuite faire des mesures de référence le long du profil pour les points humides.

i) On obtient pour chaque horizon, une courbe d'étalonnage dont l'équation est de la forme $y = ax + b$. Ainsi, pour le bassin versant de la TAFALNA, sur la parcelle n° 1 (voir fig. 3), nous avons :

de 0 à 1 m (colluvions) $Hv = 22,1 R - 2,65$
 au-dessous de 1 m (zone de départ) $Hv = 30,06 R - 7,15$

R est, pour chaque point de mesure, le rapport lecture/lecture de référence étui soit M/E
 Hv est l'humidité volumique partielle, l'eau de constitution n'étant pas incluse.

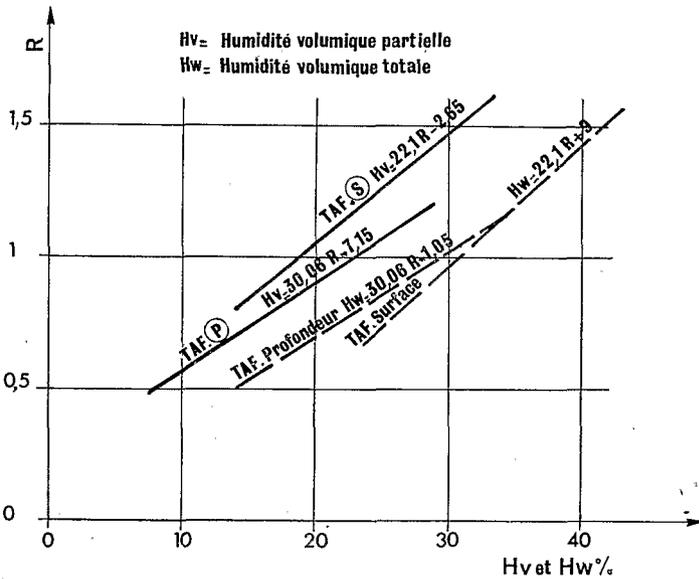


FIGURE 3. Sol de la Tafalna. Courbes d'étalonnage.

Cette eau de constitution est connue par dessiccation des échantillons à 850°C. Pour Hw, humidité volumique totale, les deux formules ci-dessus sont transformées en :

$$Hw \text{ surface} = 22,1 R + 9$$

$$Hw \text{ profondeur} = 30,06 R - 1,05$$

j) Récemment une nouvelle méthode d'étalonnage, basée sur l'analyse chimique des sols, a été mise au point par P. COUCHAT au Centre de Recherches Nucléaires de GADARACHE, nous n'avons pas encore les résultats pour le bassin de la TAFALNA, nous ne pouvons donc pas comparer.

2.2. APPAREILLAGE UTILISÉ ET MODIFICATIONS APPORTÉES EN COURS D'UTILISATION

a) *Humidité en profondeur*

L'équipement, humidimètre de profondeur HP 310, ictomètre IP 310 et échelle de comptage EC 310, a été décrit dans d'autres publications. Moderne, l'IP 310 a l'avantage de posséder une gamme étendue, des constantes de temps réglables. On peut de plus lui adjoindre une échelle de comptage qui simplifie les lectures. Il a malheureusement l'inconvénient d'être alimenté par une batterie et il n'est pas facile d'en trouver d'excellente qualité. Inconvénient mineur si on travaille en laboratoire, majeur pour un hydrologue installé en brousse avec des sources d'électricité sujettes à des pannes plus ou moins fréquentes. Le modèle antérieur : IP 110, a une gamme plus réduite allant jusqu'à 500 C/s. Par contre, il est plus léger et est alimenté par une série de quatre piles rondes ordinaires de 1,5 volt, avantage certain pour travailler sur le terrain. Les lectures sont plus longues (temps de stabilisation) et plus fastidieuses qu'avec une échelle de comptage car elles demandent une attention soutenue pour repérer le maximum et le minimum d'impulsions par seconde. C'est ce dernier équipement qui a été utilisé sur le bassin versant de la TAFANA de 1966 à 1969.

Il a, en saison sèche, donné toute satisfaction. En saison des pluies, par contre, les pannes dues à des chutes de tension brutales, provoquées par des amorçages dans la plaque très haute tension, ont été fréquentes. Ces amorçages avec la masse résultent d'une diminution de l'isolement par suite de l'humidité régnant à l'intérieur de l'appareil malgré les soins apportés pour sa protection pendant les mesures.

De là un impératif catégorique : étanchéité absolue de l'intégrateur. Bien que cet appareil soit donné pour parfaitement étanche, notre expérience nous a appris qu'il valait mieux prendre certaines mesures de sécurité. Les points par lesquels l'humidité pénètre le plus facilement sont les prises pour le branchement du câble et de l'enregistreur. La marque donnant actuellement le maximum de garanties est la « DEUTSCH », surtout si on enduit ses éléments de graisse au silicone. Une précaution supplémentaire indispensable est l'enrobage de la plaquette T.H.T., soit avec de l'araldite, soit avec de la résine S.I.184*. Nous préférons cette dernière, plus souple et qui, s'enlevant en lamelles, facilite le dépannage. Enfin, et dans le cas où l'intégrateur tomberait quand même en panne, il faut avoir une plaquette T.H.T. en réserve. Son remplacement, d'une extrême facilité, peut être fait par n'importe qui en quelques minutes.

L'humidimètre pose moins de problèmes. Cependant, afin de pouvoir changer la profondeur de mesure au cours d'une pluie battante sans risquer la pénétration d'eau dans l'étui, une gaine de plastique transparent de 60 à 80 cm de diamètre et de 1 m de long est utile. Cette gaine recouvrira la partie supérieure de l'humidimètre et une partie du câble. Nous attirons l'attention sur la nécessité absolue de ne pas brutaliser le câble et d'éviter en particulier la formation de coques.

Pour suivre l'évolution de l'humidité à une profondeur donnée, nous avons également utilisé un enregistreur MECI.

Nous utilisons pour l'alimentation de l'enregistreur, un groupe électrogène HONDA, 250 W, 220 V alternatif, 12 V continu. D'un transport facile et d'un encombrement minimal, son fonctionnement est satisfaisant, mais il faut malgré tout adjoindre un régulateur de tension, qui peut, dans certains cas, faire partie de l'enregistreur.

L'utilisation de ce matériel avec un pick-up Land-Rover ordinaire pose parfois quelques problèmes, surtout en ce qui concerne le transport sur mauvaises pistes. Il existe des appareils de terrain convenant beaucoup mieux aux conditions de travail des hydro-

* A employer avec le catalyseur XY 28 A. fourni par la Société Industrielle des Silicones, 10, avenue Franklin-Roosevelt, PARIS (8^e).

logues. Ce sont des enregistreurs potentiométriques portatifs à transistors type E.T.P.3, fabriqués par S.R.A.T.*, avec batterie interne. L'autonomie est de 45 heures, le poids total de 12 kg et l'encombrement très faible. Nous les utilisons associés à une sonde de surface à pointe prototype depuis novembre 1969.

b) *Humidité en surface*

Le problème des mesures de surface est complexe. Nous avons essayé l'humidimètre HS 310. Sans vouloir dénigrer l'intérêt de cet appareil, il ne peut être utilisé qu'en saison sèche et pour une surface préalablement aplanie et nue. Il semble donc assez peu approprié aux mesures de terrain. Sur la TAFAlNA, nous nous sommes contentés au départ de faire des mesures à 10 cm de profondeur avec le HP 110. Une courbe corrective (voir fig. 4) tracée en laboratoire avec l'aide de réflecteurs en graphite placés en surface, nous donne l'humidité moyenne pour les dix premiers centimètres.

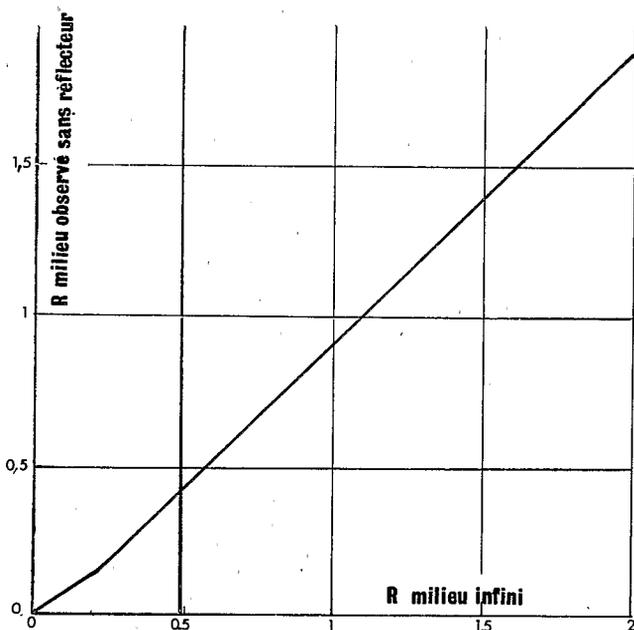


FIGURE 4. Correction à apporter aux mesures faites à 10 cm de profondeur.

Dans le but d'améliorer la précision des mesures d'humidité dans les dix premiers centimètres de sol, nous avons demandé aux spécialistes du C.E.A., la mise au point d'une sonde à pointe. Cette sonde, constituée par une source Am Be placée au bout d'une pointe métallique de 10 cm de long, explore une sphère de diamètre réduit. Le détecteur de neutrons ralentis est placé à la surface du sol. Cet humidimètre est en œuvre depuis novembre 1969.

* Société de Recherches et d'Applications Techniques, 41, rue Emeriau, PARIS (15^{me}).

2.3. PRÉCAUTIONS À PRENDRE SUR LE TERRAIN

Sans demander une extrême minutie, certaines précautions doivent être prises :

- Élimination des gouttelettes d'eau de condensation qui peuvent se déposer sur les parois internes du tube à l'aide d'une éponge ou peau de chamois fixée à une tige métallique.
- L'humidimètre posé sur le tube, placer l'intégrateur à l'abri du soleil ou de la pluie (soit dans une cabane prévue à cet effet, soit tout simplement dans le véhicule). Vérifier que la source est bien verrouillée à l'intérieur de l'étui. Le câble doit passer sur la crosse prévue à cet effet pour éviter la rupture des isolants.
- Si la sonde n'est pas neuve, le câble a pu être amputé d'une longueur C . Dans ce cas se souvenir que :

$$R = Z + H + C$$

R est le repère lu sur le câble,
 Z est la profondeur réelle de mesure,
 H est la hauteur aérienne du tubage.

- Avant de faire la première lecture étui de référence, une durée de chauffage de vingt minutes est nécessaire avec l'IP 110. Le chauffage est quasi instantané avec l'EC 310.
- Après chaque déplacement de l'HP 110, attendre environ trois minutes la stabilisation des indications de l'ictomètre. La lecture proprement dite se fait après ces trois minutes d'attente et dure deux minutes, au cours desquelles on repère le maximum et le minimum d'impulsions/seconde. On note la moyenne de ces deux indications. Le progrès constitué par l'EC 310 est énorme, puisque toutes les variations sont interprétées et que certaines échelles sont, en plus, équipées d'un prétemps.

3. RÉSULTATS OBTENUS SUR PARCELLE EXPÉRIMENTALE

Avant de passer à l'étude sur bassin, nous avons tenu à expérimenter sur une parcelle de ruissellement de 100 m² installée à la station climatologique du bassin; malgré les tâtonnements inévitables, les résultats sont encourageants. Des retouches à ces résultats pourront être apportées par une expérimentation plus poussée.

3.1. INSTALLATIONS UTILISÉES (fig. 5)

Trois tubes de mesures ont été installés à l'intérieur de la parcelle recouverte par la végétation naturelle. Un pluviographe à augets basculeurs donne toutes les indications utiles sur la hauteur pluviométrique et la répartition dans le temps de l'averse. Le ruissellement est collecté dans une cuve de 2 m² de section et d'un volume de 1,5 m³. Un limnigraphe enregistre les variations de hauteur de l'eau recueillie dans les cuves.

Deux tubes sont en polyéthylène; profonds de 1,1 m, ils ont été utilisés pour les mesures en cours de saison des pluies : humidité préalable à 10 cm de profondeur, évolution de cette humidité en cours d'averse, gain du profil après l'averse. Un tube en dur-alumin de 5,5 m a été suivi régulièrement en saison sèche, le dessèchement du profil hydrique étant mesuré tous les quinze jours.

3.2. ÉVOLUTION D'UN PROFIL HYDRIQUE — BILAN SUR UNE PARCELLE POUR UNE AVERSE DONNÉE

L'utilisation de l'humidimètre à neutrons permet de mesurer l'humidification ou la dessiccation d'un profil hydrique sur une verticale donnée matérialisée par le tubage. On entrevoit immédiatement les avantages considérables de l'emploi de cet appareil : verticale immuable, rapidité de l'opération, sol non remanié, pas de manipulations de laboratoire.

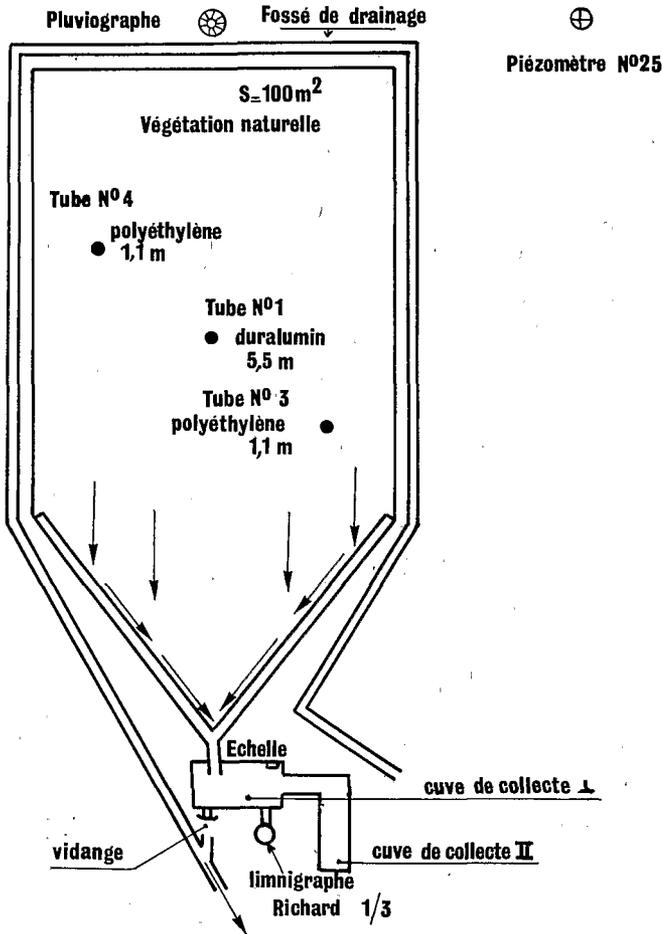


FIGURE 5. Parcelle de ruissellement n° 1. Tubes de mesures à l'humidimètre à neutrons.

La différence entre les profils hydriques mesurés avant et après la pluie nous donnant la quantité d'eau mise en réserve dans le sol, nous pouvons alors boucler le bilan hydrique propre à l'averse considérée tombant sur la parcelle.

On trouvera, sur les figures 6 et 7, une succession de trois profils exécutés les 19 et 20 décembre 1966. L'examen visuel des phénomènes est assez spectaculaire : gain d'humidité après l'averse (fig. 6), dessiccation en surface et gain en profondeur après une période sans pluie (fig. 7).

Nous donnerons comme exemple le bilan hydrique des averses des 19 et 20 décembre qui a été résumé dans le tableau suivant :

Date	Hauteur de la précipitation(mm)	Lame d'eau ruisselée (mm)	Déficit d'écoulement	
			Variation estimée de la lame d'eau en réserve (en mm)	Pertes (mm) (E.T.R. ?)
19/12/1966	35,0	11,2	13,6	10,2
20/12/1966	7,0	0,3	3,2	3,5

On se trouve en présence de pertes importantes : 30 % dans le premier cas, 50 % dans le second, pertes qui peuvent paraître très fortes aux hydrologues d'autant plus qu'elles vont encore être augmentées, une partie du volume mis en réserve en surface étant destiné à rejoindre l'atmosphère. Ces pertes peuvent être constituées :

- par de l'eau gravifique utilisant les macroconduits du sol et atteignant très rapidement les couches inférieures;
- par l'évapotranspiration : interception par le feuillage, évaporation directe sur le sol.

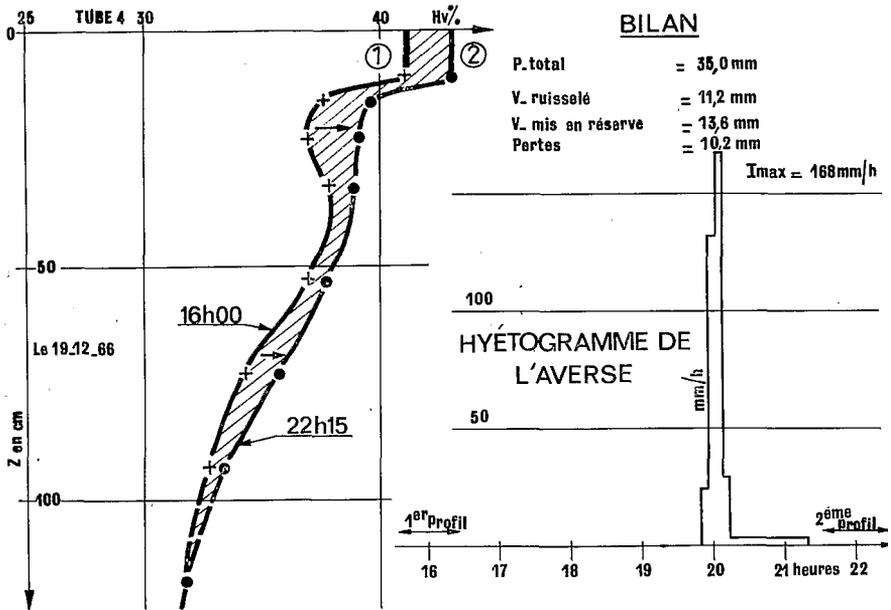


FIGURE 6. Évolution d'un profil sec après une averse (gain d'humidité).

Le premier phénomène peut avoir lieu en des points préférentiels d'infiltration : trous de racines, etc. L'évapotranspiration paraît malgré tout constituer la majeure partie des pertes mesurées et la part qui lui revient dans le bilan hydrique total d'un bassin versant sur sol ferrallitique semble être primordiale.

Mais, comme on le verra plus loin (3.4) le calcul des pertes effectué ainsi est entaché d'imprécision car le profil hydrique observé ne descend pas jusqu'à la nappe; les pertes

respectives de l'infiltration profonde et de l'évapotranspiration ne peuvent être bien différenciées.

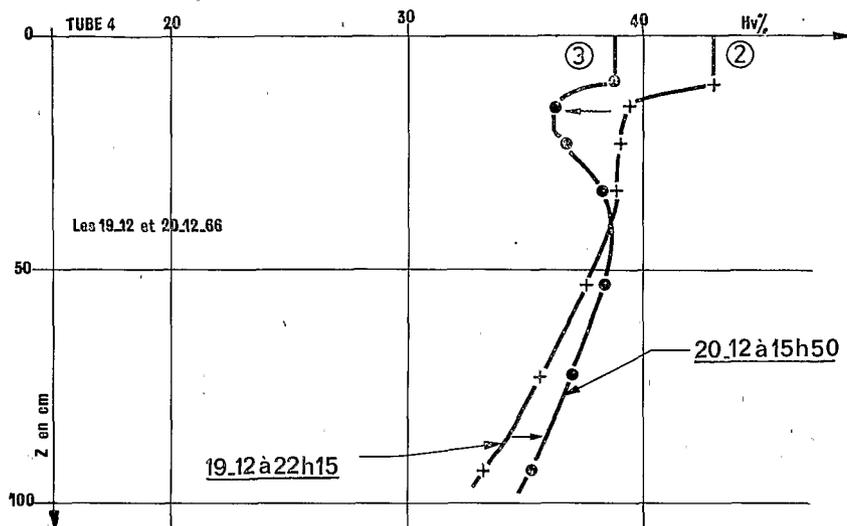


FIGURE 7. Evolution d'un profil humide après une période sans pluie (Perte en surface et infiltration).

3.3. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ PRÉALABLE DU SOL SUR LE RUISSELLEMENT

A priori, le taux d'humidité de la tranche superficielle du sol joue un rôle dans le ruissellement. De deux averses identiques, celle tombant sur un sol très humide au départ ruissellera plus que celle tombant sur un sol sec.

Ne disposant pas jusqu'en 1969 d'appareil permettant de mesurer l'humidité ponctuelle en surface, nous avons fait nos mesures à l'aide de la sonde HP en plaçant la source à une profondeur de 10 cm (voir chapitre 2.2). Bien qu'il n'ait pas été possible de faire des mesures nombreuses, il nous a semblé intéressant d'exposer ici les quelques résultats obtenus entre décembre 1966 et mars 1967 (voir fig. 8) pour des précipitations supérieures à 20 mm..

Les derniers résultats obtenus avec un humidimètre à pointe de surface indiquent que cette influence, si elle n'est pas négligeable, est malgré tout secondaire pour le bassin de la TAFANA en regard du paramètre principal : l'intensité pluviométrique.

3.4. APPROCHE DE LA VALEUR DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE

Tant que nous ne posséderons pas de tubes de mesure atteignant la nappe, il nous sera impossible, en saison des pluies, de séparer à partir d'un profil très humide la partie qui sera reprise par l'évapotranspiration de celle qui s'infiltrera et profitera effectivement à la recharge des eaux souterraines. Avec un tube de quinze mètres de profondeur, nous aurions une vision plus claire de la répartition de l'eau dans le sol et de ses migrations verticales. Les problèmes techniques d'une telle installation sont à l'étude et nous espérons pouvoir la réaliser dans un proche avenir.

Au cours d'une saison sèche de longue durée pendant laquelle les apports météoriques sont très faibles, la régression des profils hydriques nous apporte, pendant cette période, des données très importantes pour la connaissance de l'E.T.R. Travaillant sur le tube n° 1,

de 5,5 m de profondeur, nous avons effectué entre le 15 mars et le 15 septembre 1967 des mesures assez régulières, tous les quinze jours environ suivant la disponibilité de l'appareillage.

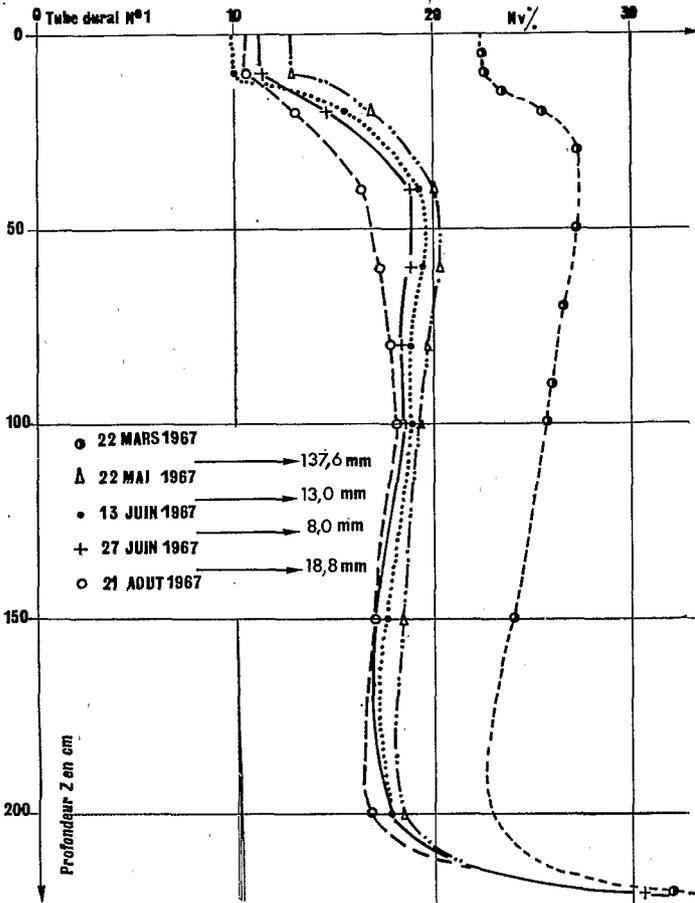


FIGURE 8. Dessiccation du profil au tubage n° 1 en saison sèche.

Premier résultat notable : nous nous sommes aperçus qu'en dessous de 2,30 m de profondeur, même en fin de saison sèche, le sol était toujours à la capacité maximale de rétention : humidité volumique totale voisine de 50 %. Si on place la source à 2,20 m, le taux de comptage baisse de façon spectaculaire et l'humidité se situe aux alentours de 30 %. Ne pouvant, pour l'instant du moins, défoncer la parcelle de ruissellement pour nous rendre compte « de visu » de la cause du phénomène, nous pensons provisoirement qu'il peut être provoqué par rupture capillaire au niveau d'une « stone-line ». Cette hypothèse semble confirmée par la coupe pédologique faite à proximité immédiate de la parcelle.

La figure 8 montre la dessiccation du profil au tubage n° 1 entre le 22 mars et le 21 août 1967. Il faut noter qu'à partir du 21 août et jusqu'aux premières pluies de septembre le profil reste statique : nous avons probablement là, à peu de chose près, le profil correspondant au début du flétrissement de la végétation.

En tenant compte de la pluviométrie, très réduite et à intensités faibles, et grâce à la régression du profil, nous pensons être arrivés à déterminer une valeur approchée de l'évapotranspiration réelle. Le principal avantage de cette approximation semble être le fait qu'elle s'appuie sur des données d'observation au lieu d'être calculée à partir d'une formule, même si cette dernière fait intervenir des paramètres météorologiques; cette méthode permet de contrôler les résultats que donnent les formules.

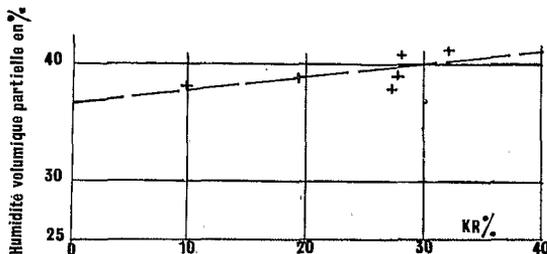


FIGURE 9. Corrélation entre l'humidité préalable à 10 cm de profondeur et le coefficient de ruissellement pour des pluies supérieures à 20 mm.

On trouve ci-après deux tableaux : le premier concerne les périodes comprises entre les mesures, le second est un essai d'extrapolation des valeurs mensuelles et quotidiennes moyennes :

Période	Dessiccation du profil (mm)	Pluie probablement évapotranspirée (mm)	Total (mm)	Moyenne (mm/jour)
22 mars-22 mai 1967 61 jours	137,6	mars 40,0 avril 20,0 mai 1,0	198,6	3,26
22 mai-13 juin 1967 22 jours	13,0	0,8	13,8	0,63
13 juin-27 juin 1967 14 jours	8,0	1,1	9,1	0,65
27 juin-21 Août 1967 54 jours	18,8	1,3	20,1	0,37
Total : 151 jours	177,4	64,2	241,6	1,60

Période	Moyenne journalière (mm/jour)	Total mensuel (mm)
9 derniers jours de		
Mars	5,00	45
Avril	3,00	90
Mai	2,00	62
Juin	0,65	19,5
Juillet	0,50	15,5
Août	0,25	7,8
151 jours	1,60	239,8 très proche de 241,6

3.5. ESSAI D'INTERPRÉTATION : MODE DE PÉNÉTRATION DE L'EAU DANS LE SOL

Lorsque nous avons disposé de l'enregistreur et que des averses bien individualisées ont eu lieu, nous avons procédé, sur le tube n° 4, à des mesures continues à 10 cm de profondeur. Ceci nous a permis d'observer les variations du taux d'humidité pour un point donné pendant la durée de la précipitation.

Examinons la figure 10. Nous assistons à une montée brutale du taux d'humidité correspondant à un accroissement de l'intensité pluviométrique. L'humidité volumique passe par un maximum, décroît assez rapidement puis, alors que l'intensité de la pluie reste constante et faible, se remet à croître lentement. Comment expliquer cette augmentation précédée d'une baisse de l'humidité ?

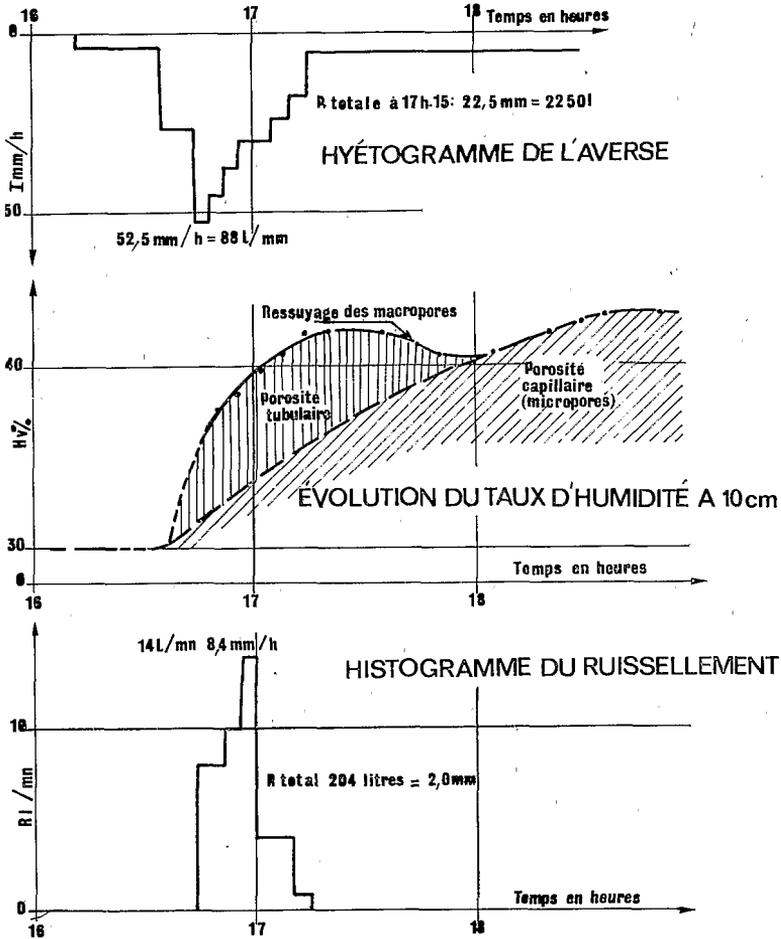


FIGURE 10. Bassin versant de la Tafaina, le 24 novembre 1966 ($K_r=8,9\%$).

Nous pensons en effet qu'il y a, lors de la montée brutale, superposition de deux modes de pénétration de l'eau :

- d'une part, mise en eau des gros conduits (forte porosité tubulaire ou macroporosité);
- d'autre part, remplissage des micropores (porosité capillaire ou microporosité).

La forte porosité tubulaire serait responsable de la transmission rapide à des niveaux inférieurs d'une partie de l'eau. En deçà d'un certain seuil d'intensité, l'approvisionnement n'étant plus suffisant, il se produirait un ressuyage des gros tubes provoquant la baisse observée. La fin de l'averse, bien que faible, serait suffisante pour continuer à alimenter les micropores d'où reprise de la croissance du taux d'humidité. L'étude d'autres averses plus complexes ne paraît pas démentir cette idée qui, nous le répétons, reste une hypothèse de travail et qui devra être vérifiée par plusieurs campagnes de mesures sur le terrain.

4. DÉTERMINATION DE CERTAINES CARACTÉRISTIQUES INTRINSEQUES ET HYDRODYNAMIQUES DES SOLS

Ces opérations qui sont essentielles pour l'analyse et l'interprétation des données des bassins représentatifs ont été effectuées non seulement sur le bassin de la TAFAINA mais sur d'autres types de sols de Madagascar.

On trouvera ci-après quelques conseils pratiques pour ce genre de mesures et les résultats obtenus.

Les caractéristiques à déterminer sont liées à l'infiltration ou au ressuyage des sols.

4.1. CONDITIONS PRÉALABLES ET INSTALLATIONS A RÉALISER

En ce qui concerne le choix des emplacements de mesure, pour le bassin de la TAFAINA, les sols les plus caractéristiques sont les sols ferrallitiques très désaturés. Les propriétés physiques et chimiques des zones de départ, qui sont toutes situées à moins d'un mètre en dessous de la stone-line, sont peu différentes. Les mesures peuvent être effectuées sans inconvénient sur un sol ferrallitique remanié modal (tels les sols I et II), l'horizon situé au-dessus de la stone-line possède des caractéristiques qui lui sont propres alors que l'horizon situé en dessous possède les propriétés générales à tous les sols du bassin versant.

Les mesures demandent à être faites pendant la période de sécheresse pour que tous les points du profil initial soient proches du point de flétrissement et pour que les mesures de ressuyage ne soient pas perturbées par un apport pluviométrique supplémentaire. Dans le cas du bassin versant de la TAFAINA, les travaux ont été effectués du 1^{er} au 8 octobre 1968, 21 jours après une pluie de 3,4 mm et alors que le total pluviométrique des deux mois précédents était de 9,9 mm.

Matériel utilisé : un humidimètre de profondeur, un tube de mesure et une couronne de 0,8 à 1 m de diamètre.

— Les tubes de mesure sont des tubes de duralumin de 40 mm de diamètre intérieur, de 2 mm d'épaisseur et de profondeur variable suivant les horizons à étudier mais généralement de 1,5 m à 2 m. Ce tube demande à être mis en place assez longtemps à l'avance, au minimum un mois, de façon à éliminer toute infiltration préférentielle le long du tubage, le tassement du sol étant accéléré par des arrosages fréquents après l'installation.

— La couronne peut être en tôle ou en toute autre matière imperméable. Celles que nous avons employées étaient en polyéthylène. Elles avaient un diamètre de 0,8 m et une hauteur totale de 0,6 m dont 0,4 m était enfoncé dans le sol pour limiter au maximum les fuites latérales.

Les mesures ont été faites sur les sols I et II correspondant aux parcelles 1 et 2 et décrits au chapitre 1.

4.2. ÉTUDE DE L'INFILTRATION SOUS CHARGE CONSTANTE

L'opération a consisté à suivre l'évolution d'un profil sec après mise en eau et maintien d'une charge constante au-dessus des points de mesure. Cette charge, que nous avons

choisie égale à 5 cm, est conservée dans la couronne pendant toute la durée des mesures par un opérateur consciencieux qui ajoute de l'eau au fur et à mesure des besoins. On opère par profils successifs jusqu'à obtention d'un profil stable sur toute la tranche de sol à étudier.

Cette opération, facilement reproductible dans des conditions standard donc comparables, pourrait éventuellement dans l'avenir compléter la méthode PORCHET. En effet, bien qu'elle ait un intérêt agronomique indiscutable, celle-ci ne paraît pas avoir de signification hydrologique certaine, d'une part parce que ce n'est pas véritablement une mesure de diffusion latérale et d'autre part parce qu'elle néglige l'horizon de surface, facteur déterminant en grosse partie le ruissellement. Nous pensons que la méthode PORCHET reste valable en tant que méthode de prospection et pour l'établissement de la cartographie pédologique.

4.2.1. Progression du front humide — Mesure des vitesses d'infiltration sous charge constante

La progression du front humide est représentée sur le graphique n° 11.

On trouvera, dans le tableau suivant la vitesse de progression du front pour le sol I.

Prof. du Front H cm	Heure	Progression en minutes	Vitesses	
			cm/mn	m/s
0 mise en eau	9 h 40'			
55	10 h 15	35	1,57	$2,62 \cdot 10^{-4}$
65	10 h 50	70	0,93	$1,55 \cdot 10^{-4}$
75	11 h 20	100	0,75	$1,25 \cdot 10^{-4}$
85	12 h 20	160	0,53	$8,83 \cdot 10^{-5}$
105	13 h 55	255	0,41	$6,83 \cdot 10^{-5}$
145	17 h 30	470	0,31	$5,17 \cdot 10^{-5}$

On peut, à partir de ce tableau, connaître les vitesses d'infiltration pour les tranches de sol comprises entre les profils successifs. Le calcul est basé sur la formule suivante :

$$\frac{H}{V} = \frac{H_1}{V_1} + \frac{H_2}{V_2}$$

H et V représentent la profondeur et la vitesse moyenne depuis la surface jusqu'à la base de l'horizon à étudier.

H_1 et V_1 sont la profondeur et la vitesse moyenne du sol situé au-dessus de cet horizon.

H_2 est la profondeur de l'horizon à étudier et V_2 la vitesse recherchée.

$$V_2 = \frac{VV_1}{HV_1 - H_1V} \cdot H_2$$

Vitesse d'infiltration entre 55 et 65 cm

$$V = \frac{10 \times 0,93 \times 1,57}{(65 \times 1,57) - (55 \times 0,93)} = 0,287 \text{ cm/mn ou } 4,78 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

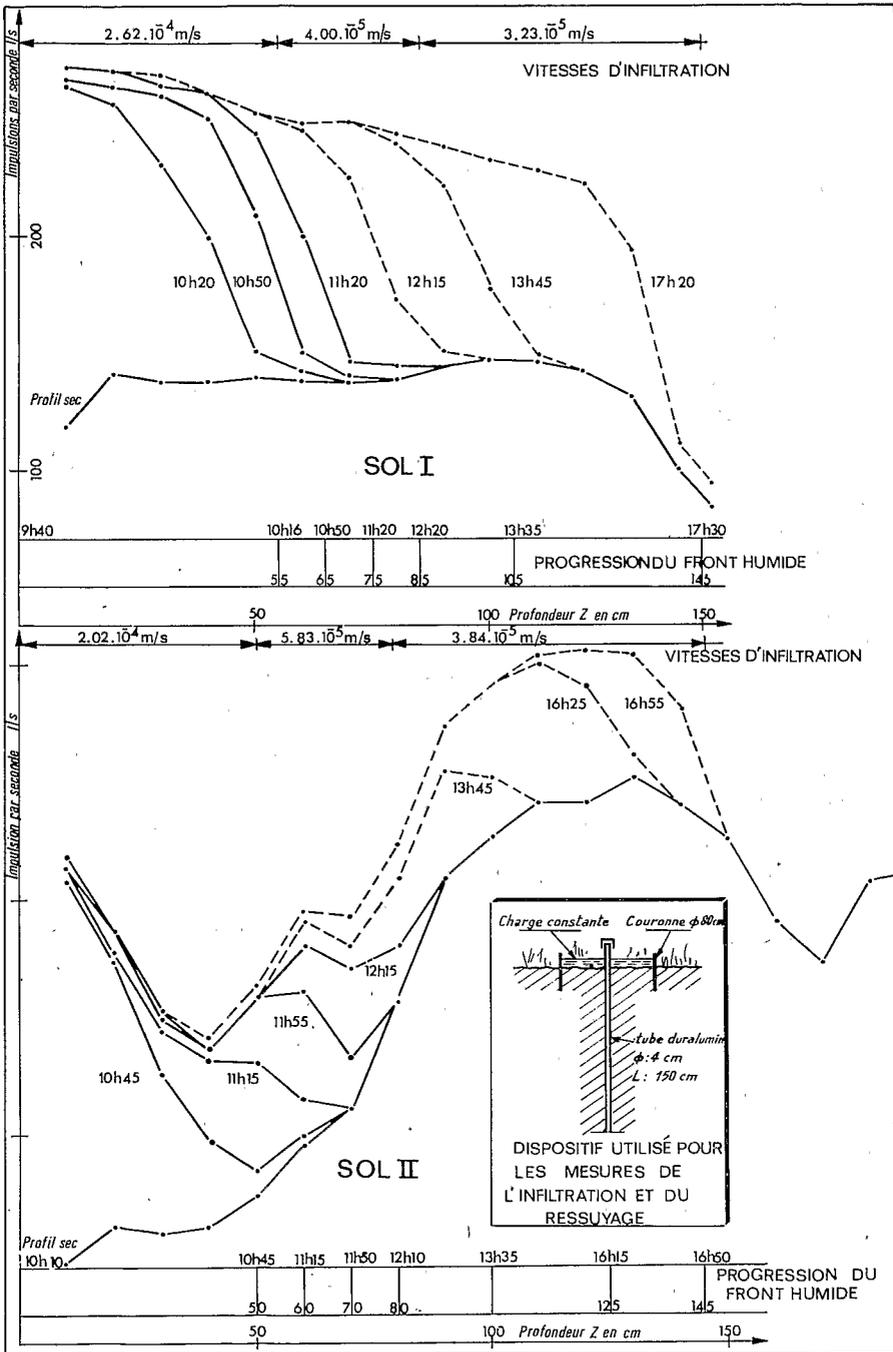


FIGURE 11. Cinétique de l'infiltration sous charge constante.

En opérant de même pour les autres tranches on trouve :

$$V \text{ entre } 65 \text{ et } 75 \text{ cm} = 5,52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$V \text{ entre } 75 \text{ et } 85 \text{ cm} = 4,43 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$V \text{ entre } 85 \text{ et } 105 \text{ cm} = 3,48 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$V \text{ entre } 105 \text{ et } 145 \text{ cm} = 3,15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$V \text{ entre } 0 \text{ et } 145 \text{ cm} = 5,17 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

On remarquera que V_{65-75} est supérieure à V_{55-65} et V_{75-85}

Ceci est très probablement dû à la présence de la stone-line aux alentours de 70 cm de profondeur.

$$V_{0-50} = 1,43 \text{ cm/mn ou } 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$V_{50-80} = 0,35 \text{ cm/mn ou } 5,83 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$V_{80-145} = 0,23 \text{ cm/mn ou } 3,84 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

La vitesse moyenne V_{0-145} est 0,36 cm/mn ou $6,00 \cdot 10^{-5}$ m/s, donc très voisine de celle observée sur le sol I.

Nous avons également procédé à des mesures PORCHET sur le sol I. Nous avons utilisé le protocole de CHEVRON-VILLETTE et ROEDERER en ayant cependant, comme le conseille BOUCHARD, effectué auparavant un premier remplissage des trous, les mesures ayant été faites sur le second remplissage.

L'ajustement graphique des mesures est représenté sur la figure n° 12. La superposition de l'abaque de perméabilité sur ces graphiques donne les résultats suivants pour le coefficient K de perméabilité PORCHET :

$$\text{TROU n° 1 : } K = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ en surface et } 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ en profondeur}$$

$$\text{TROU n° 2 : } K = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ en surface et } 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ puis } 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ en profondeur}$$

$$\text{TROU n° 3 : } K = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ en surface et } 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ puis } 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ en profondeur}$$

Les résultats sur le trou n° 1 sont vraisemblablement faussés par la présence de trous de racines ou d'animaux. Par contre les résultats sur les trous n° 2 et n° 3 sont très proches et on peut dire que, sur les 60 cm de sol étudiés, le coefficient de perméabilité PORCHET est voisin de $K = 1,5 \cdot 10^{-5}$.

4.2.2 Volumes d'eau infiltrés — Potentiel d'infiltration

Il est difficile de calculer les quantités d'eau infiltrées à partir de l'eau ajoutée en surface. En effet les pertes latérales ne sont pas aisément évaluables. Mais l'humidimètre à neutrons nous permet de trouver de façon précise les volumes infiltrés par différence entre deux profils successifs à condition d'avoir effectué préalablement un étalonnage. Un étalonnage grossier, mais la plupart du temps suffisant, peut être fait lors de la mise en place du tube de mesure : il suffit de comparer le profil-sonde fait immédiatement après le tubage avec des échantillons de sol recueillis tous les 10 cm lors du forage, échantillons dont l'humidité est mesurée au laboratoire. Si cet étalonnage ne donne pas satisfaction il faut alors procéder aux mesures plus précises mais plus longues du chapitre 2.

Pour le bassin versant de la TAFANA, sol I, l'équation de la droite d'étalonnage, de la forme $y = ax + b$, est la suivante :

$$H_v = \frac{22,1}{E} M - 2,65 \text{ où}$$

H_v est l'humidité volumique %

M la lecture faite au point de mesure

E la lecture étui

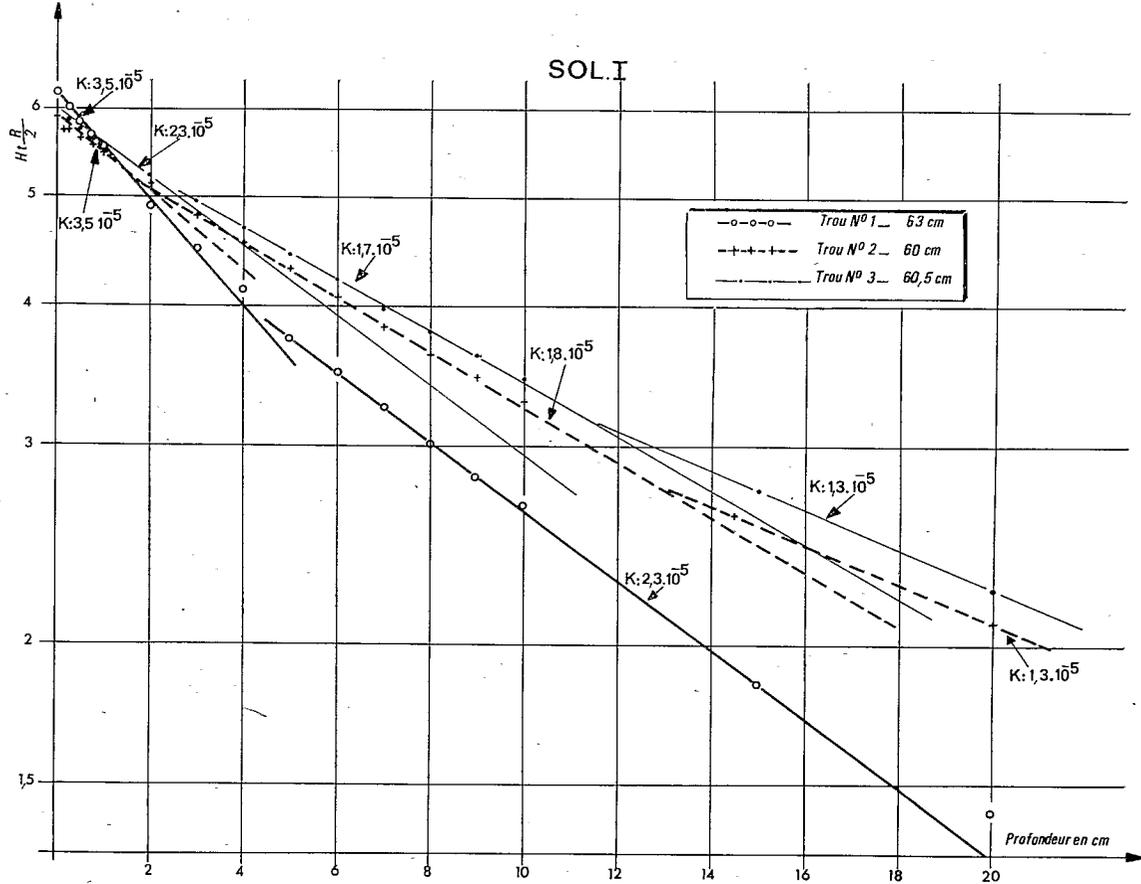


FIGURE 12. Méthode Porchet - Sol I.

Pour connaître la quantité d'eau infiltrée entre deux profils, on peut opérer soit par planimétrage, soit par le calcul; cette deuxième méthode a été choisie ici; elle consiste à faire le produit du gain en impulsions/seconde et de la pente de la droite :

$$x = a(\Sigma_2 - \Sigma_1)$$

x est le volume d'eau infiltré en mm

$\Sigma_1 - \Sigma_2$ est la différence entre les profils final et initial en impulsions/seconde, les points de mesure étant espacés de 10 cm, a est la pente de la courbe d'étalonnage. Dans le cas présent $a = 22,1/150 = 0,147$, 150 étant la lecture étui généralement observée.

D'autre part, on trouvera au tableau ci-après le résultat de ces mesures et le gain en mm d'eau entre les différents profils effectués le 1^{er} octobre. Ce tableau a été réalisé suivant la méthode indiquée ci-dessus. C'est ainsi que, dans le cas du premier profil humide pour lequel le front est à 55 cm de profondeur, on a fait la somme des mesures

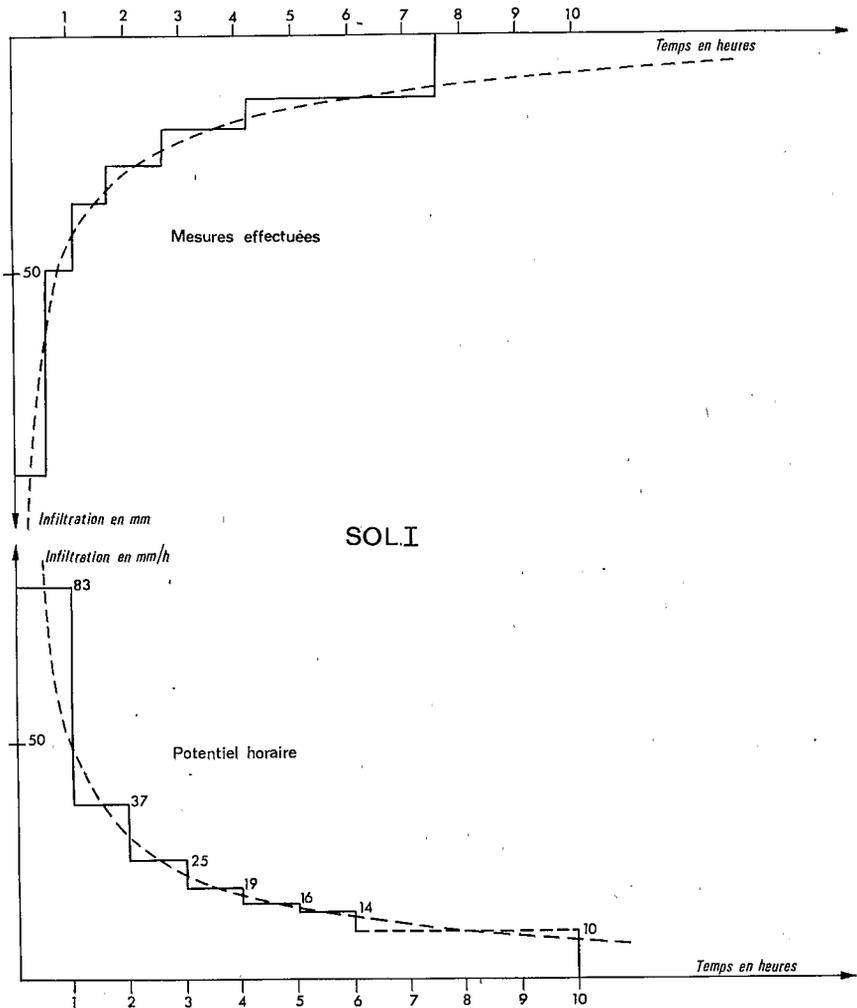


FIGURE 13. Potentiel d'infiltration sous charge constante.

aux points 10, 20, 30, 40 et 50 cm, soit au total 1089 impulsions/seconde. En regard, dans la colonne Σ_1 , 672 représente le total des impulsions/seconde sur la même tranche de sol.

Ces résultats sont particulièrement intéressants.

a) D'une part parce qu'ils peuvent être traduits en potentiel d'infiltration c'est-à-dire en quantité d'eau maximale infiltrable en fonction du temps, notion très proche de celle de la capacité d'absorption souvent utilisée en hydrologie (voir fig. 13). Les intensités de l'infiltration pour des temps partiels ainsi que l'infiltration totale cumulée, observées sur le sol I, sont consignées dans le tableau ci-après.

Sol I - Mise en eau à 9 h 40						Sol II - Mise en eau à 10 h 40							
Heure	Prof. du Front en cm	Σ_1	Σ_2	$\Delta\Sigma$	Gain partiel en mm	Gain total en mm	Heure	Prof. du Front en cm	Σ_1	Σ_2	$\Delta\Sigma$	Gain partiel en mm	Gain total en mm
	Sec	672						Sec	295				
10 h 20	55	672	1 089	417	61,3	61,3	10 h 45	50	295	686	391	57,5	57,5
10 h 50	65	809	1 395	586	24,8	86,1	11 h 15	60	390	907	517	18,5	76,0
11 h 20	75	946	1 653	707	17,8	103,9	11 h 55	70	500	1 133	633	17,0	93,0
12 h 15	85	1 084	1 961	877	25,0	128,9	12 h 15	80	656	1 376	720	12,8	105,8
13 h 45	105	1 374	2 453	1 079	29,7	158,6	13 h 45	100	1 090	1 933	843	18,1	123,9
17 h 20	115	1 520	2 764	1 244	24,3	182,9	15 h 25	125	1 570	2 618	1 048	30,2	154,1
							16 h 55	135	1 820	2 938	1 118	10,3	164,4

Temps partiels	0-30'	0-1 h	1 h-2 h	2 h-3 h	3 h-4 h	4 h-5 h	5 h-6 h	6 h à 10 h
Intensité de l'infiltration en mm/h	100	83	37	25	19	16	14	10 en moyenne
Temps cumulés	30'	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	10 h
Infiltration totale en mm	50	83	120	145	164	180	194	234

b) D'autre part parce qu'on peut connaître simultanément le volume d'eau infiltré et la profondeur atteinte par le front humide (voir fig. 14) pour un temps égal à 2 h 30, le front est à 86 cm de profondeur, le volume d'eau infiltré est de 132 mm et le potentiel d'infiltration est de 25 mm/h.

4.2.3. Mesure de la « porosité utile » d'un sol — Approche de la porosité totale

Ces mesures nous permettent également d'approcher sur une tranche de sol déterminée, la valeur d'une porosité que nous appellerons, pour la commodité, « porosité utile ». Cette porosité est la somme de la porosité efficace correspondant à l'eau gravifique augmentée de celle correspondant à l'eau de rétention, exception faite de l'eau capillaire non absorbable. Les volumes d'eau rentrant en jeu sont ceux utiles pour l'établissement d'un bilan hydrique, c'est-à-dire l'eau libre et l'eau libérable.

Ainsi dans le cas du sol I, la forme du profil sec et les conditions pluviométriques précédant les mesures nous permettaient de penser que nous étions au voisinage du profil de flétrissement. La vérification a été faite en laboratoire sur un échantillon prélevé à 70 cm de profondeur. Les résultats ont montré une humidité pondérale voisine de 11 %. La

mesure faite à l'humidimètre à neutrons le 1^{er} octobre 1968 donne 137 i/s soit $R = 137/150 = 0,91$, valeur qui correspond sur la courbe d'étalonnage à une humidité volumique de 17,4%. La densité du sol étant de 1,5, l'humidité pondérale est de 11,5%, valeur très voisine de celle trouvée en laboratoire pour le point de flétrissement. On peut donc considérer, en particulier pour les horizons supérieurs, que le profil de départ

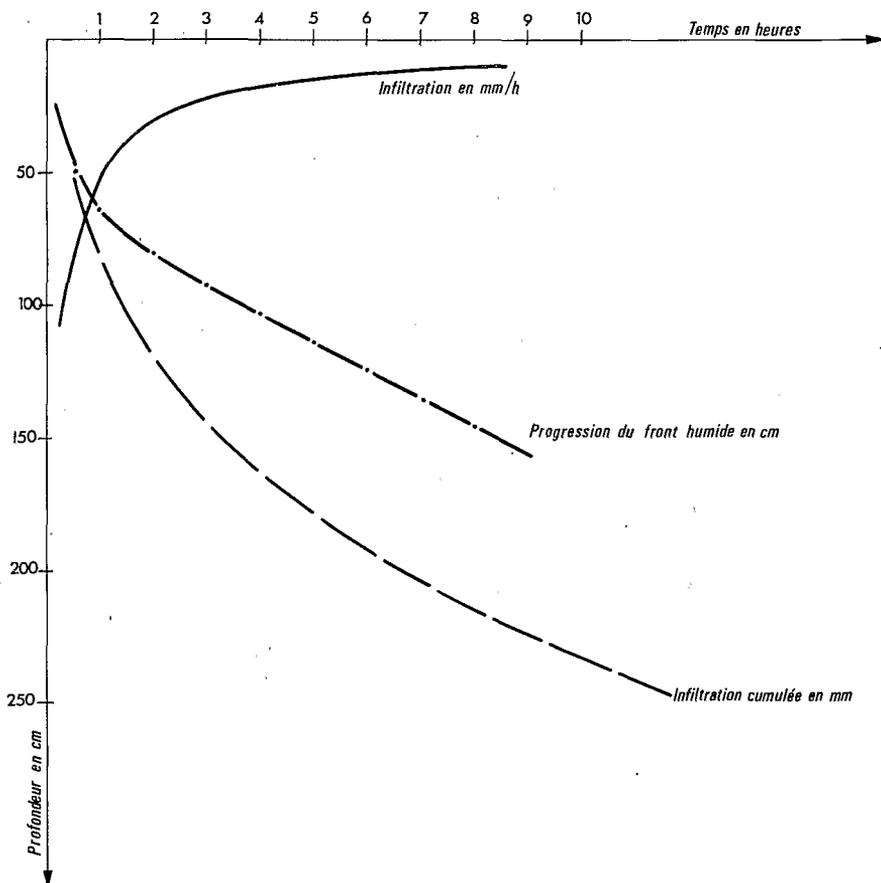


FIGURE 14. Comparaison entre l'infiltration et la progression du front humide.

coïncide avec le profil de flétrissement. D'autre part, après plusieurs heures de maintien d'une charge d'eau constante, on peut admettre, pour les points du profil restant stables, que nous sommes à la saturation. La différence entre profil de flétrissement et profil de saturation nous permet d'obtenir la valeur de la « porosité utile ». Nous prendrons pour exemple les cinquante premiers centimètres du sol :

profil sec à 8 h 40 le 1-10-1968, $\Sigma_1 = 672$ i/s

profil saturé à 17 h 00 le 1-10-1968, $\Sigma_2 = 1327$ i/s

$$\frac{\Sigma_2 - \Sigma_1}{a} = 96,3 \text{ mm}$$

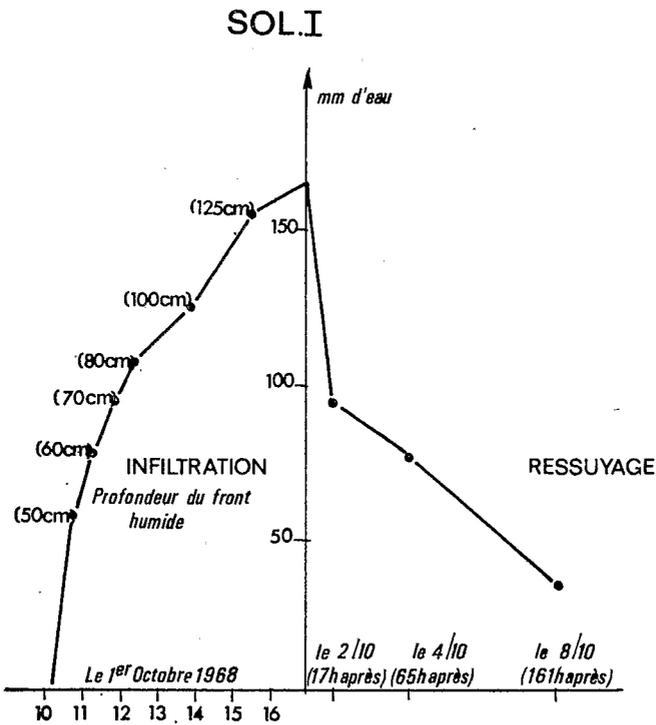
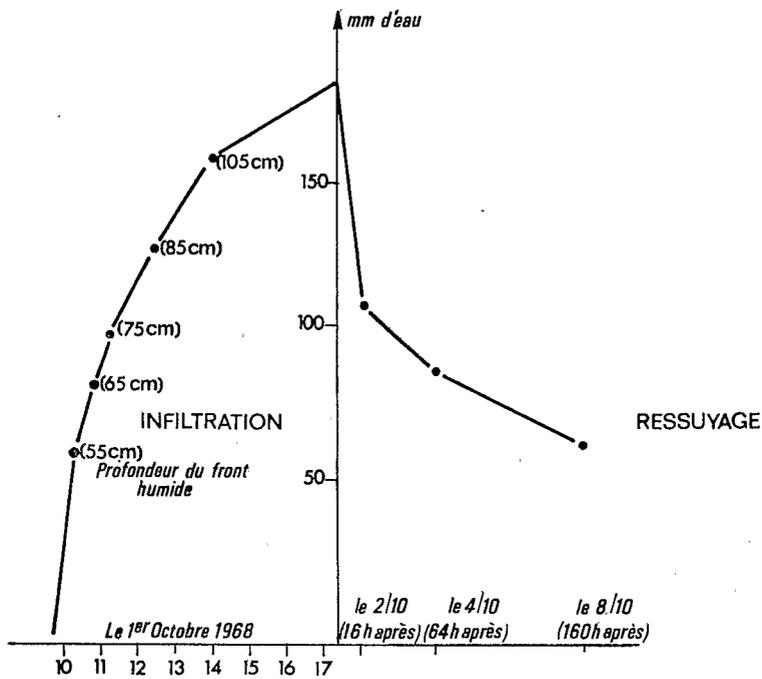


FIGURE 15. Cinétiques de l'infiltration et du ressuyage.

Ce gain total de 96,3 mm sur une tranche de sol de 50 centimètres indique une porosité utile de 19,3 % voisine de 20 %.

Si on ajoute à celle-ci l'humidité de départ sur profil sec, qui est de 18 %, on arrive à une porosité totale de 38 %.

4.3. ÉTUDE DU RESSUYAGE

Après les mesures de cinétique de l'infiltration, on pose sur la couronne un film plastique de façon à éviter au maximum les pertes par évapotranspiration. On fait ensuite plusieurs séries de mesures donnant lieu à des profils d'humidité du sol, assez rapprochées au début puis de plus en plus espacées. Pour un sol de perméabilité moyenne, tel que celui du bassin versant de la TAFALINA, nous préconisons les intervalles de temps suivants : 12 heures, 24 heures, 2 jours, 4 jours, 8 jours et 16 jours. Pour un sol de forte perméabilité les profils devront être plus serrés.

Ces profils nous permettent de connaître les caractéristiques suivantes :

- Pertes en eau en fonction du temps;
- Séparation, au cours du ressuyage, de deux cinétiques : une cinétique rapide correspondant à la macroporosité du sol et une cinétique lente correspondant à la microporosité. Calcul de l'humidité correspondant à la capacité de rétention;
- Approche des valeurs de la macroporosité et de la microporosité.

Les deuxièmes parties du graphique 15 indiquent la perte d'eau entre les divers profils successifs. Le ressuyage des sols I et II est représenté sur la figure 16.

4.3.1. Pertes d'eau par ressuyage

La limite d'exploitation des mesures est liée à la saturation des différents horizons. C'est ainsi qu'on estime la saturation atteinte à 110 cm pour le sol I et à 130 cm pour le sol II. Le dépouillement des données se fait de la même manière que pour la cinétique d'infiltration. Le tableau ci-après indique les pertes d'eau en mm entre les différents profils.

Tubage	Pertes cumulées		
	16 h après	64 h après	160 h après
Sol I	487 i/s	643 i/s	801 i/s
(110 cm)	ou 71,6 mm	ou 94,5 mm	ou 117,7 mm
Sol II	482 i/s	596 i/s	886 i/s
(130 cm)			

Les mesures qui devaient être faites 16 jours après la mise en eau n'ont pu être effectuées, une pluie de 38 mm venant perturber le ressuyage. Bien que les résultats soient positifs puisque nous arrivons à chiffrer les pertes d'eau provenant du ressuyage, nous conseillerons aux futurs utilisateurs de cette méthode la mise en place de tubages plus profonds. En effet ces derniers permettraient de suivre, à partir du profil saturé, l'avancement du front humide et la répartition de l'humidité le long de ce profil. Il serait intéressant de connaître cette vitesse de progression du front humide, plus proche des conditions naturelles que dans le cas d'une charge artificielle en surface. Naturellement il sera nécessaire de faire des profils plus serrés que pour les seules mesures de ressuyage. Il faut également noter que contrairement à l'infiltration, le ressuyage s'effectue parallèlement au profil de départ, les pertes en eau étant sensiblement égales en tous les points du profil.

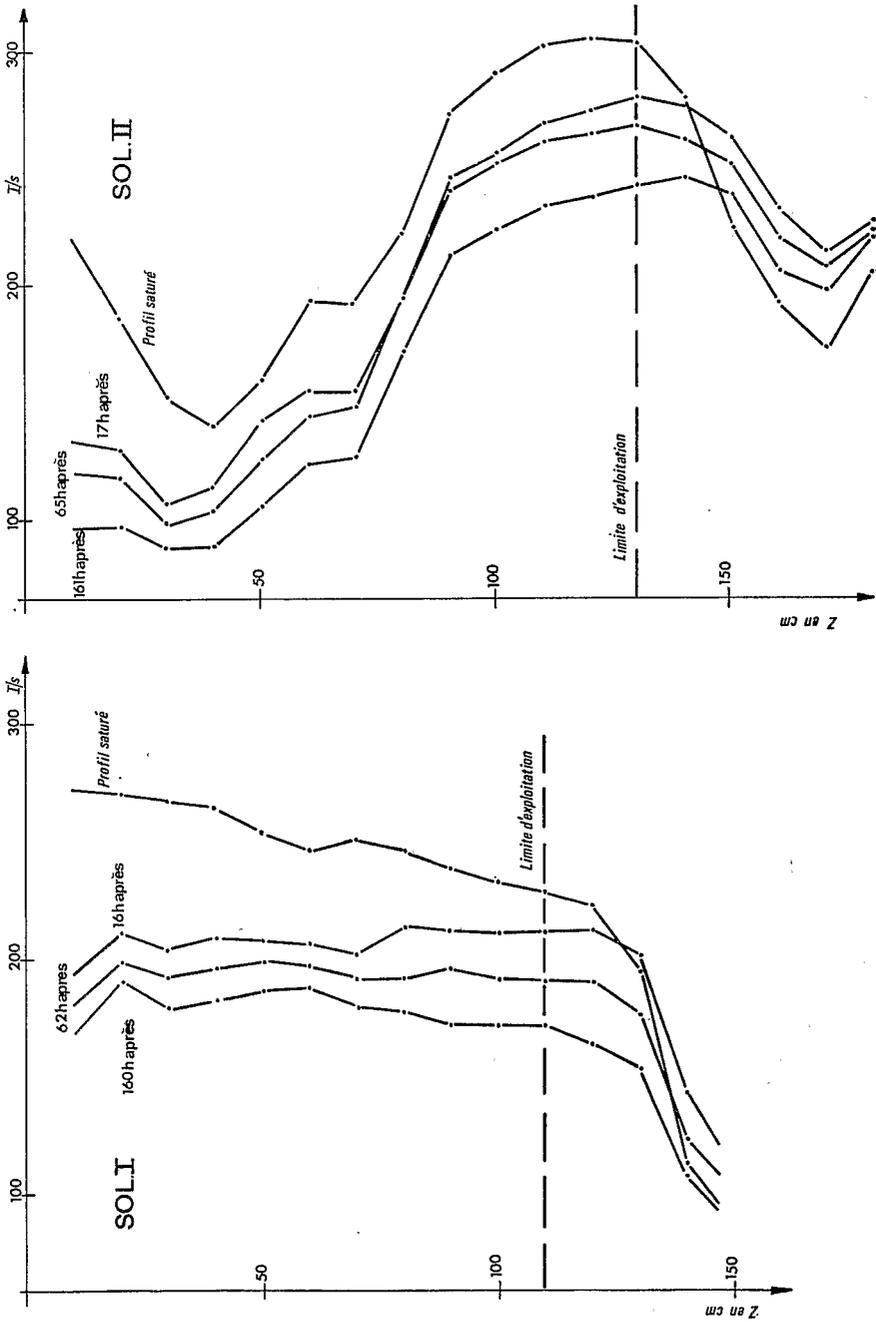


FIGURE 16. Cinétique du ressuyage.

4.3.2. Humidité correspondant à la capacité de rétention

Cette détermination peut se faire graphiquement en reportant sur un diagramme semi-logarithmique les diverses valeurs obtenues pour un point de mesure au cours du ressuyage. On distingue parfaitement les deux cinétiques : la cinétique rapide se rapportant à la

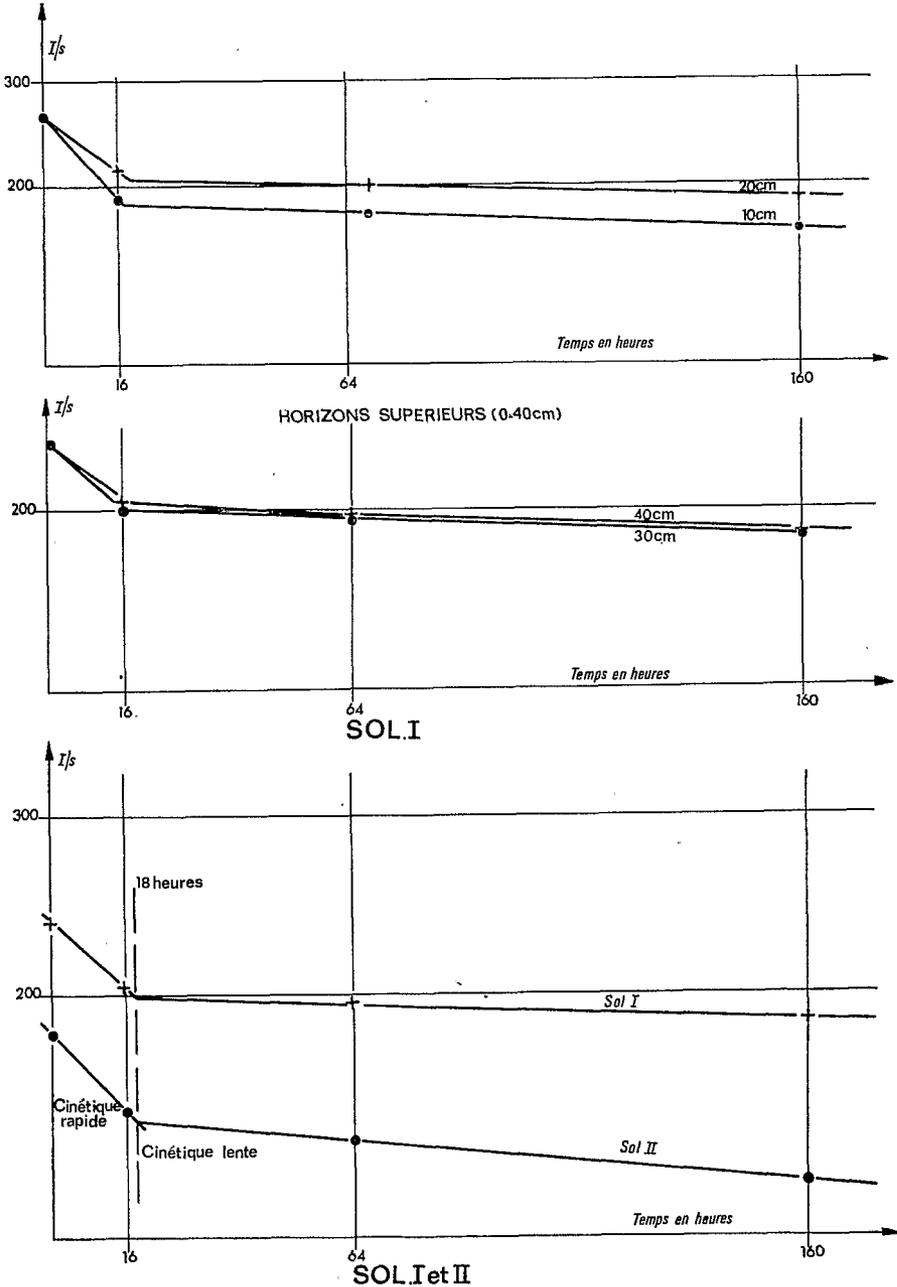


FIGURE 17. Détermination de l'humidité correspondant à la capacité de rétention.

macroporosité et la cinétique lente liée à la microporosité. Le point de jonction entre ces deux cinétiques nous donne l'humidité correspondant à la capacité de rétention grâce à la courbe d'étalonnage. On trouvera dans le tableau ci-après les capacités de rétention obtenues sur le sol I entre 0 et 50 cm (voir également la figure 17).

Sol I						
Z cm	i/s	Valeur étui	R	R corrigé	Hv %	T heures
10	186	153	1,215	1,337	26,9	18
20	205	153	1,339		26,9	18
30	200	153	1,307		26,3	18
40	205	153	1,339		26,9	18

Il faut remarquer que cette méthode permet d'obtenir non seulement la valeur de l'humidité à la capacité de rétention, mais également le temps nécessaire pour y parvenir à partir de la saturation, notion qui peut être très importante lors d'applications agronomiques éventuelles.

Le calcul a également été fait globalement pour les cinquante premiers centimètres du Sol I et du Sol II (voir fig. 17), horizon directement relié à l'évapotranspiration puisque c'est la limite de pénétration des racines des graminées caractéristiques de la végétation du bassin. La capacité de rétention est atteinte au bout de 18 heures sur les deux tubages et est voisine de 27% pour le Sol I.

Si au lieu de prendre le rapport des volumes H_v , on considère le rapport des poids H_p , $H_p = 19,3\%$ pour une densité de 1,4.

La mesure directe au laboratoire de la capacité de rétention sur échantillons prélevés à la tarière pour le sol I à 30 cm conduit à $H_p = 20\%$ au lieu de 19,3.

On peut enfin, en raisonnant comme dans le chapitre 2.3.2, séparer les valeurs de la macroporosité et de la microporosité sur ces cinquante premiers centimètres.

Profil sec : 672 i/s
 Profil à la C.R. : 1 000 i/s
 Profil saturé : 1 327 i/s

soit pour une porosité utile de 19,3%

9,7% en macroporosité
 et 9,6% en microporosité.

5. BILAN HYDROLOGIQUE SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT

Les bilans annuels sont établis sans trop de difficulté, le stock d'eau en pleine saison sèche étant à peu près le même tous les ans, mais pour les bilans à l'échelle hebdomadaire, nous attendons sur les deux bassins de disposer de deux années complètes de mesure à l'humidimètre sur l'ensemble de chaque bassin pour présenter les résultats.

CONCLUSION

L'humidimètre à neutrons avait fait naître beaucoup d'espoir dans les régions tropicales où son emploi avait été envisagé comme une solution de facilité. Remis parfois entre des mains inexpertes avec un soin insuffisant pour les opérations de terrain, il a déçu d'abord tous les chercheurs qui ont bien voulu se donner la peine de contrôler ses résultats. Mais notre expérience prouve que si le chercheur hydrologue se met au courant des techniques

de cet appareil et dirige lui-même les mesures sur le terrain, il obtient d'excellents résultats. Des perspectives nouvelles s'offrent non seulement pour les mesures in situ de la quantité d'eau contenue dans la zone d'aération et de l'évapotranspiration réelle, c'est-à-dire pour l'étude fine du bilan hydrique, mais également pour la compréhension générale de phénomènes tels que le mécanisme de la pénétration de l'eau dans les horizons de surface et pour la détermination des caractéristiques propres au sol des bassins versants, caractéristiques conditionnant le ruissellement et l'infiltration.

REFERENCES

1. MOUTONNET, M. (1969) : Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols en surface *I.J.A.R.I.*, n° 23.
2. MERCESE, J. (1967) : Détermination « in situ » des capacités de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons, *Isotop and Radiation Technics in soil physics and irrigation studies*, *A.I.E.A.* Vienne.
3. POURRUT, P. (1968) : Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques — Premiers résultats obtenus sur le bassin versant représentatif de la TAFAINA (République Malgache), *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol V, n° 2.*
4. POURRUT, P. et ZEBROWSKI, C. (1970) : Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques en République Malgache, *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol VII, n° 1.*