

APPROCHE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT SUR PETITS BASSINS VERSANTS

**UTILISATION DE LA METHODE
DU MINI-SIMULATEUR DE PLUIE**

DEA NATIONAL DE L'EAU

CAMP TERRAIN

UNIVERSITE MONTPELLIER II USTL

Du 18 au 22 novembre 1991

I - LA PROBLEMATIQUE

Pourquoi rechercher en Hydrologie à caractériser les paramètres du ruissellement et de l'infiltration sur parcelles ?

Afin de répondre à la nécessité pour les aménageurs de connaître les crues les plus fortes et leur probabilité d'occurrence (crue de projet).

Deux niveaux d'études peuvent être considérés :

- 1) Sur les grands bassins : on a généralement la possibilité d'obtenir des chroniques de débits et de pluviométrie à partir des stations des réseaux nationaux.
- 2) Sur les petits bassins : nécessité d'étudier des Bassins Représentatifs et Expérimentaux dans la région à aménager. Ceci impose de faire des observations pendant une durée minimale de 3 à 5 ans pour obtenir une relation pluie-débit fiable, ce qui entraîne une immobilisation en moyens humains et matériels importante, d'où un coût élevé des études.

La méthode classique d'étude, mise au point par RODIER et AUVRAY à partir de nombreuses études antérieures, consistait à transposer les résultats obtenus sur des bassins connus au bassin que l'on étudie par l'intermédiaire d'une série d'abaques qui classent ce dernier dans des groupes en fonction de ses différents caractères morphologiques et climatologiques.

Certains de ces caractères sont aisément quantifiables :

- climatiques : à partir d'études statistiques sur des séries pluviométriques,
- morphologiques : superficie du bassin versant, indice de compacité, indices de pente (indice global, indice de Roche), densité du réseau de drainage, topographie..., mais l'un de ces caractères reste jusqu'à présent assez subjectif dans son appréciation : LA PERMEABILITE.

Or, l'utilisation de la méthode nécessite de classer le bassin étudié dans l'une des cinq classes de perméabilité suivantes :

- P1 : Bassins rigoureusement imperméables : bassins entièrement rocheux ou argileux.
- P2 : Bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables.
- P3 : Bassins assez imperméables comportant des zones perméables d'étendue notable ou bassins homogènes assez peu perméables.
- P4 : Bassins assez perméables tels qu'on en rencontre en zone de décomposition granitique avec abondance d'arènes.
- P5 : Bassins perméables : sables ou carapace latéritique très fissurée.

Les auteurs de la méthode précisent que la perméabilité est un facteur de première importance :

"La perméabilité du sol d'un bassin est la caractéristique la plus importante d'un sol vis-à-vis du ruissellement ; elle est difficile à chiffrer pour les raisons suivantes : les bassins naturels sont presque toujours plus ou moins hétérogènes. Si un petit bassin est homogène, il risque de ne pas être représentatif."

En outre, ce qui importe ce n'est pas la perméabilité des différents types de sols mesurée en laboratoire, sur des échantillons plus ou moins remaniés, mais la perméabilité "in situ" dans les conditions du début de l'averse.

Sur l'échantillon de bassin-versant, celle-ci a été appréciée de la manière suivante :

La méthode la plus simple pour classer les perméabilités a consisté à utiliser les courbes qui, pour un bassin, définissent l'apparition de l'écoulement en fonction de la hauteur de précipitation et de l'indice d'humidité. On a pris, pour celui-ci, une forme extrêmement simple : l'écart de temps en jours à la pluie précédente, supérieure à une limite donnée, 5 mm par exemple.

Pour un bassin sur lequel aucune mesure n'a été faite il est difficile de se prononcer sinon subjectivement à partir de :

- la carte pédologique,
- carte d'occupation des sols si elle existe,
- ce que l'on connaît de la région avec la topographie.

Devant ce point d'écueil et à la demande du CIEH, l'ORSTOM a décidé en 1976 de mettre en oeuvre une méthode plus fiable pour étudier les caractéristiques hydrodynamiques des sols fondée sur l'utilisation du simulateur de pluie.

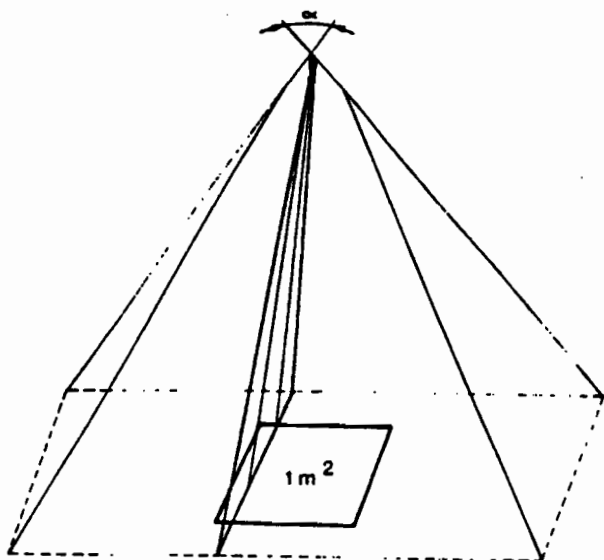
II - LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'ensemble du dispositif peut être décomposé en trois parties :

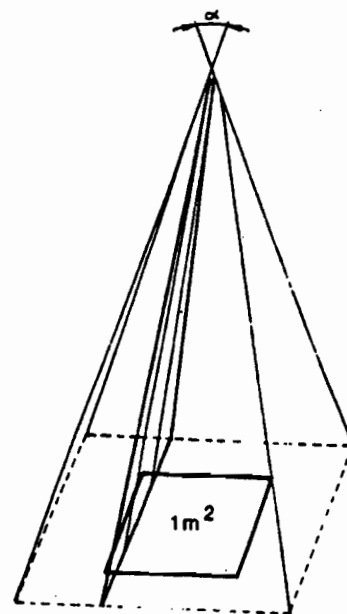
1) Le système d'aspersion :

L'originalité principale de l'appareil utilisé ici, par rapport aux modèles antérieurs utilisés aux États-Unis (type SWANSON, 1965 ; BERTRAND et PARR, 1960 ; ou encore DIXON et PETERSON, 1964) est la possibilité de régler l'intensité de la pluie sans interruption de celle-ci, de manière progressive et continue, dans une gamme d'intensités définie par le rapport des engrenages utilisés. Dans notre cas, la plage d'intensités varie de 25 à 120 mm/h.

Le principe repose sur la variation de l'angle de balancement du gicleur, qui est animé d'un mouvement pendulaire par l'intermédiaire d'un moteur "Hybride" pas à pas piloté par un microprocesseur. Ainsi, on augmente ou diminue la quantité d'eau reçue par la parcelle, la surface mouillée au sol variant en sens inverse. La quantité d'eau consommée reste constante, car on travaille toujours avec la même pression.



- Angle d'oscillation important - Surface arrosée grande
- Intensité de pluie faible



- Angle d'oscillation faible
- Surface arrosée petite
- Intensité de pluie forte

Fig.2 PRINCIPE DE REGLAGE DES INTENSITES DE PLUIE

De nombreux essais ont permis de choisir un gicleur calibré, une hauteur et une pression d'utilisation tels que les gouttes de pluie produites par l'appareil aient sensiblement la même taille et la même énergie cinétique que celles des gouttes de pluie naturelle (ASSELINE et VALENTIN, 1978) cf. graphiques. L'ensemble du dispositif est alimenté en eau et électricité par moto-pompes et batterie 12 V.

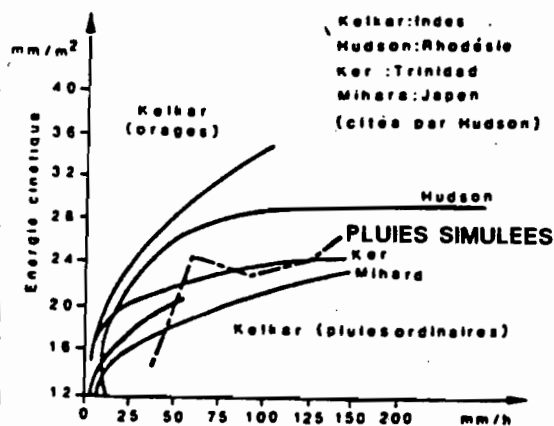


Fig.3a RELATION ENTRE L'ENERGIE CINETIQUE ET L'INTENSITE DES PLUIES NATURELLES ET SIMULEES

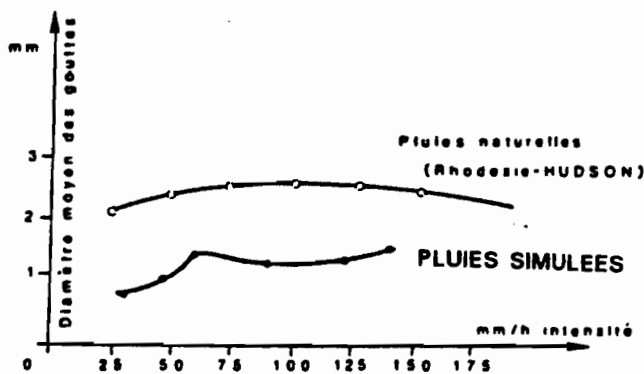
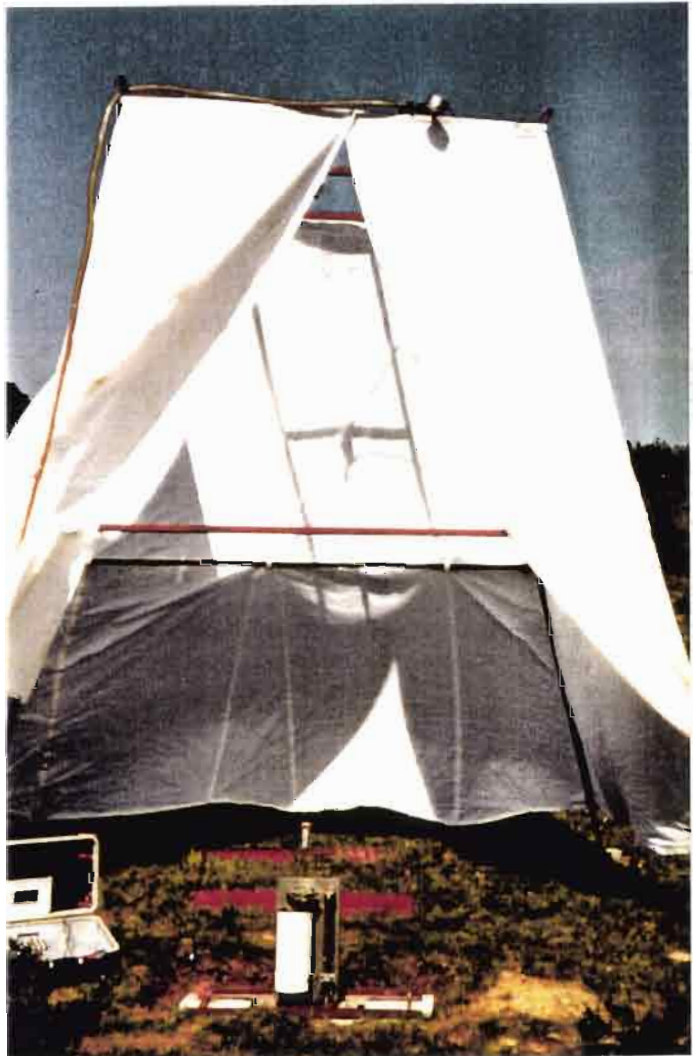
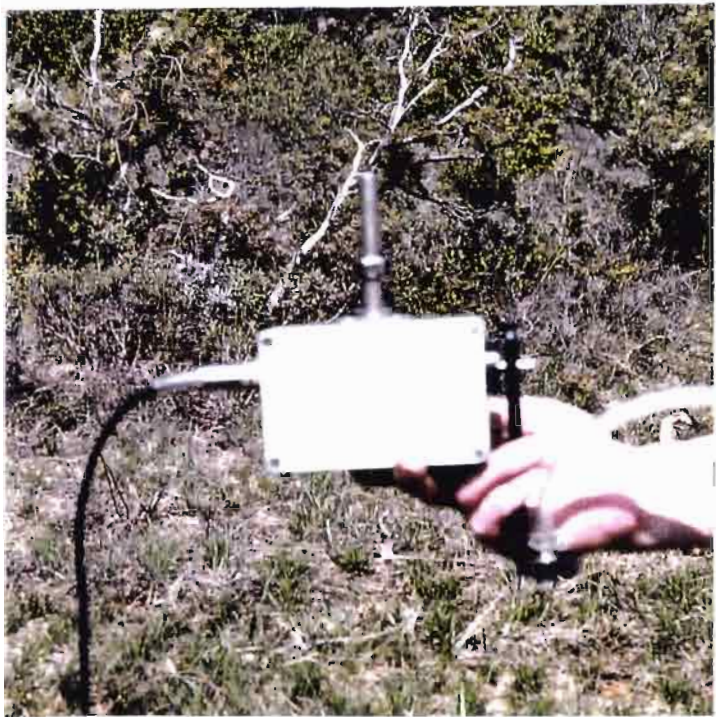


Fig.3b RELATION ENTRE LE DIAMETRE MOYEN DES GOUTTES ET L'INTENSITE (d'après VALENTIN 1978)



2) La parcelle de mesure :

Celle-ci est matérialisée par un cadre métallique de un m², enfoncé dans le sol de cinq cm environ. Sur la face aval du cadre une série de trous permet l'écoulement des eaux de ruissellement dans un canal collecteur.

3) Le dispositif d'enregistrement :

Constitué d'un limnigraphe de laboratoire à mouvement de rotation rapide : 1 h 30 environ, il autorise une précision de l'ordre de 10 secondes en temps et de 1/10 millimètre en hauteur de lame ruisselée. Ce limnigraphe est monté sur la cuve réceptrice des eaux de ruissellement, reliée à la parcelle par un tuyau d'amenée.

III - LA METHODE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

3.1. Intérêts et objectifs des études sous pluie simulée

La mesure des paramètres influant sur les phénomènes de ruissellement, infiltration et érosion, se heurtait jusqu'à présent à plusieurs problèmes :

- 1) En conditions naturelles, l'hydrologue ne possède pas la maîtrise de l'évènement pluvieux, ce qui l'astreint à des périodes d'observations relativement longues (trois années ou plus), s'il veut mesurer des averses exceptionnelles. La maîtrise des caractéristiques des averses (hauteur, intensités, durée) et la diminution de la longueur des études sont résolues en partie grâce au mini simulateur (une campagne de simulation de pluie dure de un à deux mois).
- 2) Par ailleurs, il est difficile, voire impossible, à l'échelle du bassin versant, de déterminer comment les différentes zones du bassin participent à la genèse des crues. L'apport du mini-simulateur, est là aussi très important, puisque de maniement aisé, il permet dans des délais relativement courts, de tester le comportement vis à vis des précipitations des différents types de sols, états de surface, types d'occupation des sols (culture, jachère, végétation naturelle, etc.), et cela, selon les degrés d'humectation du sol que l'on a prédéterminés.

Les objectifs principaux du programme simulation de pluie sont :

- l'analyse fine des facteurs conditionnels du ruissellement et de l'infiltration,
- l'étude de la genèse des crues et la détermination des crues de fréquence rare (crue décennale),
- une meilleure utilisation des modèles mathématiques qui nécessitent souvent un calage sur des valeurs observées in situ,
- l'étude du rôle joué par les différents états de surface, pratiques culturales, etc, afin d'améliorer l'efficacité des pluies pour les réserves en eau des plantes,
- l'étude de l'érodibilité des sols. Bien que l'on ne puisse pas parler d'érosion à l'échelle de la parcelle de un m² (effet de pente inexistant). VALENTIN (1981) propose le terme de "sols susceptibles d'être transportés".

On peut classer les sols selon ce dernier critère.

3.2. La méthodologie

La méthodologie consiste à mesurer sur des groupements de trois parcelles de 1 m² chacune, représentatives des milieux étudiés (type de sol, état de surface, de couvert végétal, etc.) la lame ruisselée (ou infiltrée, par différence avec la hauteur d'eau précipitée) au cours d'une averse, ou d'une série d'averses, dont on maîtrise les caractéristiques (hauteur, durée, intensité, intervalle de temps entre deux averses).

On définit les caractéristiques des averses à simuler et leur succession à partir de l'analyse des données pluviographiques et pluviométriques des postes longue durée de la zone étudiée et ceci constitue la base du protocole expérimental.

Sont également suivies la dynamique d'humectation des sols ainsi que celle de ressuyage et de dessèchement par des mesures de profils d'humidité à la sonde à neutrons avant et après chaque averse (l'évaporation étant considérée négligeable au cours de l'averse).

Des prélèvements d'eau effectués sur chaque volume ruisselé pour mesurer la turbidité, et la collecte du charriage à l'exutoire de la parcelle permettent de quantifier la détachabilité.

3.3. Les protocoles de simulation de pluie

L'établissement du protocole de pluies consiste à définir la chronologie des différentes averses avec leurs caractéristiques, de façon à se rapprocher d'une situation naturelle pré-définie, en apportant le maximum d'enseignements dans un temps relativement court. Il n'est bien sûr pas possible de faire varier en continu les intensités comme c'est le cas pour les pluies naturelles ; nous définirons l'averse par une ou plusieurs séquences d'intensités, sans interruption de la pluie.

Le protocole d'averses pourra également comporter des averses à intensité constante, qui serviront à vérifier les "temps d'installation" du régime permanent de ruissellement. Les temps d'arrêt (ou de ressuyage) entre deux averses pourront varier de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures, de manière à tester différents états d'humectation du sol.

3.4. Les mesures - Les paramètres définis

Les mesures de terrain se divisent en deux groupes :

- l'eau à la surface du sol : pluie-ruissellement-érosion,
- l'eau dans le sol : suivi des profils hydriques.

3.4.1. Mesure de la pluie

La procédure habituelle consiste à placer sur la parcelle de mesure un bac en tôle de un m² (ruissellement 100 %), sur lequel on procède au réglage des intensités de pluie. A condition de conserver pour chaque manipulation et chaque répétition la même hauteur du gicleur et le même centrage de l'appareil sur la parcelle, on peut considérer que les réglages initiaux sont valides, la fidélité de l'appareil étant vérifiée.

3.4.2. Mesure du ruissellement

L'exutoire "naturel" est la bordure aval de la parcelle. La mesure se fait environ un mètre plus loin dans la cuve réceptrice placée dans une fosse, ceci afin d'éviter le phénomène de drainage à l'aval de la parcelle. Nous négligerons le temps de transfert de la partie amont de la parcelle à la cuve. Cette approximation est acceptable étant donné les faibles distances en cause. L'enregistrement obtenu sur le limnigraphe de laboratoire permet de tracer "l'hydrogramme de la crue" sur la parcelle.

3.4.3. Les paramètres définis

La réaction d'une parcelle à une averse donnée est connue par l'analyse de l'hydrogramme de ruissellement pour l'averse considérée. A. LAFFORGUE (1977) a analysé l'hydrogramme-type (fig.4). Il ressort de cette étude que le processus de ruissellement peut se décomposer chronologiquement en quatre phases :

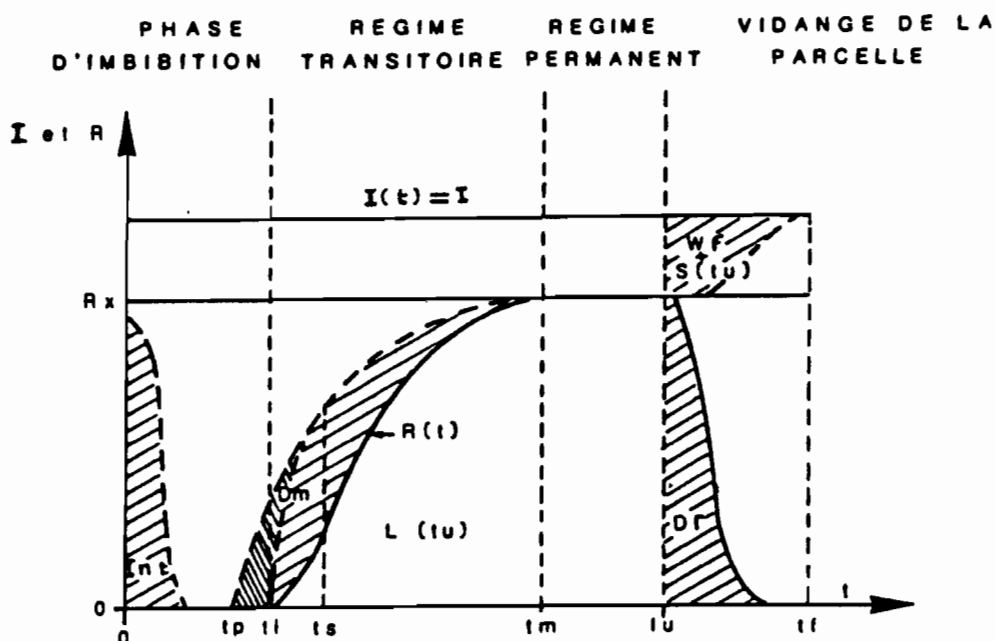


Fig.4 - RUISSellement SOUS INTENSITÉ
D'averse CONSTANTE
(D'APRES A.LAFFORGUE)

- Du début de l'averse au temps t_i on n'observe aucun ruissellement : c'est la phase d'imbibition. Durant cette période l'infiltration est d'abord totale, l'intensité potentielle d'infiltration est en tout point supérieure à l'intensité de la pluie ; puis la capacité d'infiltration diminue à mesure que le sol s'humecte, les dépressions de surface se remplissent.
- Au temps t_i les flaques débordent, le ruissellement apparaît à l'exutoire. L'hydrogramme prend la forme d'un S allongé, l'intensité de ruissellement augmente, donc l'intensité d'infiltration diminue. C'est la phase de régime transitoire.
- A partir du temps t_m , s'établit un palier de ruissellement dont l'intensité a atteint un maximum, l'infiltration est alors minimale.

Il s'est établi un régime permanent. A chaque changement d'intensité ce régime cesse, les intensités de ruissellement et d'infiltration varient jusqu'à trouver une nouvelle situation d'équilibre.

- Au temps t_u (fin de la pluie) le ruissellement décroît rapidement pour s'annuler au temps t_f . C'est la phase de vidange de la parcelle. La quantité d'eau écoulee pendant cette dernière phase est la détention superficielle récupérable D_r .

A chacune de ces phases correspond une équation du bilan entre les grandeurs mesurées à un instant (t) donné. Notations utilisées :

P	hauteur de la pluie	mm
Lr	lame ruisselée	mm
Li	lame infiltrée	mm
S	lame stockée en surface	mm
Dm	détention superficielle mobilisable	mm
Dr	détention superficielle récupérable	mm
I	intensité de la pluie	mm/h
R	intensité de ruissellement	mm/h
F	intensité d'infiltration	mm/h
Rx	intensité maximale du ruissellement	mm/h
Fn	intensité minimale d'infiltration	mm/h
Int	hauteur de précipitation interceptée par la végétation	
ti	temps d'apparition du ruissellement	mn
tm	temps d'installation du régime permanent	mn
tu	temps de fin de la pluie	mn
tf	temps de fin du ruissellement	mn
tp	(time of pounding) instant où la capacité d'infiltration est localement inférieure à l'intensité de la pluie.	
ts	temps de submersion	
wf	lame d'eau infiltrée entre les temps tu et tf	

- Pour la totalité de la pluie l'équation s'écrit :

$$Pu(t) - Lr(t) - Li(t) - Dm(t) - S(t) = 0 \quad (1)$$

- Pendant la phase d'imbibition :

$$\begin{aligned} \text{On a :} \quad & Lr(t) = 0 & Dm(t) = 0 \\ & Pu(t) - Li(t) - S(t) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

- En régime transitoire :

En dérivant l'équation (1), on obtient :

$$I - R(t) - F(t) - \frac{dDm}{dt} - \frac{ds}{dt} = 0 \quad (3)$$

- En régime permanent :

$$\begin{aligned} R(t) = Rx & \quad F(t) = Fn & \frac{dDm}{dt} = 0 & \quad \frac{ds}{dt} = 0 \\ I - Rx - Fn = 0 & & & \end{aligned} \quad (4)$$

- En phase de vidange :

$$Pu(t) = 0$$

$$Lr(tf) - Lr(tu) = Dm(tu) + S(tu) - S(tf) + Li(tu) - Li(tf) \quad (5)$$

Si on appelle D_r (détention superficielle récupérable), la lame d'eau que l'on récupère après l'arrêt de la pluie et $L_i.f$ celle qui s'infiltré, on peut écrire :

$$D_r = D_m + S(tf) - w_f \quad (6)$$

Il nous reste à définir un autre paramètre : l'indice d'humectation des sols, que l'on fait varier tout au long de l'expérimentation. Celui-ci est représenté par un indice d'antécédence des pluies (IK) de type KOHLER (CASENAVE, 1982) qui peut être formulé ainsi :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1})e^{-\omega t}$$

Où : IK_n = indice d'humectation immédiatement avant l'averse (n)

P_{n-1} = hauteur de l'averse précédant l'averse considérée

t = temps séparant la fin de l'averse de rang (n-1) du début de l'averse considérée (t) est exprimé en jours et fractions de jours

ω = coefficient de calage, pris égal à 0,5 (valeur prise par tous les utilisateurs sur l'ensemble des bassins testés au simulateur).

L'indice IK ainsi défini est différent de l'indice API de KOHLER et LINSLEY en ce sens que, au lieu de calculer l'indice pas à pas par itération sur les jours comme pour l'indice API (non différenciation des averses successives au cours d'une même journée), l'indice IK est calculé en continu au début de chaque averse par itération sur les averses et même pour la reconstitution de crues complexes à partir d'un hyétoGramme lui aussi complexe, IK est recalculé au début de chaque averse individualisée.

3.5. Etude de l'infiltration

3.5.1. Les paramètres hydrodynamiques du sol

Les physiciens du sol considèrent le ruissellement comme le "résidu de l'infiltration" (VACHAUD, 1985). Sa genèse, son développement, ne peuvent être abordés sans la connaissance des mécanismes de l'infiltration liés aux caractéristiques du sol. L'infiltration peut être définie comme l'ensemble des processus suivants (MOREL-SEYTOUX, 1981).

- La pénétration de l'eau dans le sol à travers sa surface.
- Le stockage et les mouvements de l'eau dans le sol.

Elle caractérise donc la cinétique d'un fluide dans un espace à trois dimensions faisant intervenir trois phases : l'eau, l'air et le sol.

Par simplification, on ne considère que le mouvement sur sa principale direction : verticale et que les principales forces mises en jeu : la gravité et les forces capillaires. "Entre deux fluides en contact ou un fluide au contact d'un solide, il existe une énergie superficielle engendrée par la différence entre la force d'attraction des molécules vers l'intérieur de chaque phase et la force d'attraction des molécules à travers la surface de contact. Cette énergie superficielle se manifeste par une tension superficielle définie par la quantité de travail nécessaire pour séparer l'unité de surface des deux substances" (DE MARSILY, 1981).

L'infiltration est classiquement décrite par trois paramètres :

- L'intensité d'infiltration $f(t)$ qui est définie comme un flux d'eau traversant une unité de surface de sol, elle est fonction de la conductivité hydraulique du sol et de son gradient hydraulique et a pour unité celle d'une vitesse (LT^{-1}). Elle décroît asymptotiquement avec le temps (HILLEL, 1974).
- La capacité d'infiltration, qui a également comme unité celle d'une vitesse (LT^{-1}) est suivant HORTON (1933), la vitesse maximale d'infiltration avec laquelle un sol donné sous des conditions données absorbe la pluie au fur et à mesure qu'elle tombe. Le mot "capacité" se référant plutôt à un volume qu'à une vitesse les auteurs modernes (RICHARDS, 1965) lui préfèrent le terme de perméabilité. Lorsque cette capacité d'infiltration atteint un minimum, on la considère comme voisine de la conductivité hydraulique à saturation du sol dans les conditions naturelles (CHILDS, 1969).
- La hauteur d'eau infiltrée $Li(t)$ exprimée en mm, c'est le cumul de la lame d'eau entrée dans le sol à l'instant t . Lorsque l'intensité de la pluie est plus petite que la capacité d'infiltration ou durant les arrêts de la pluie, l'eau gravifique descend le long du profil et la surface se dessèche. Cette dessiccation de surface engendre une circulation ascendante sous l'effet des forces capillaires, renforcées par la succion des racines des végétaux et de l'évaporation. Suivant que l'on assèche ou que l'on humidifie le sol, la pression capillaire présente des phénomènes d'hystérésis ; la forme que prennent les interfaces à une saturation donnée n'est pas la même suivant que l'on imbibe un sol sec ou que l'on draine un sol humide (VACHAUD et THONY, 1971 ; MUALEM, 1974 ; PARLANGE, 1976 ; VAUCLIN, 1982).

3.5.2. Interprétation des observations

La théorie classique de l'infiltration et du ruissellement suggère que le ruissellement n'apparaît que lorsque l'une des deux conditions suivantes est remplie :

- l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol "HORTON overland flow".
- l'état de saturation du sol est tel que la nappe affleure la surface "saturated overland flow". Il peut s'agir de la nappe elle-même ou d'accumulation d'eau dans un horizon imperméable peu profond du sol.

Dans le cas simple de la première hypothèse, RUBIN (1966) définit trois formes d'infiltration :

- infiltration sans submersion : l'intensité de la pluie n'est pas suffisante pour créer un ruissellement, la totalité de l'eau précipitée s'infiltré ;
- infiltration précédant la submersion : l'intensité de la pluie est suffisante pour créer des flaques pluviales à la surface du sol, mais celles-ci n'apparaissent que progressivement : c'est "la pluie d'imbibition" ;
- infiltration avec submersion : des flaques pluviales se forment à la surface du sol et le ruissellement a lieu mais une partie de l'eau précipitée continue à s'infiltrer.

Si l'averse est assez intense et assez longue, l'infiltration "avec submersion" suit l'infiltration "présubmergeante", une phase transitoire sépare les deux.

HILLEL (1974) donne le schéma suivant pour décrire cet ensemble de phénomènes.

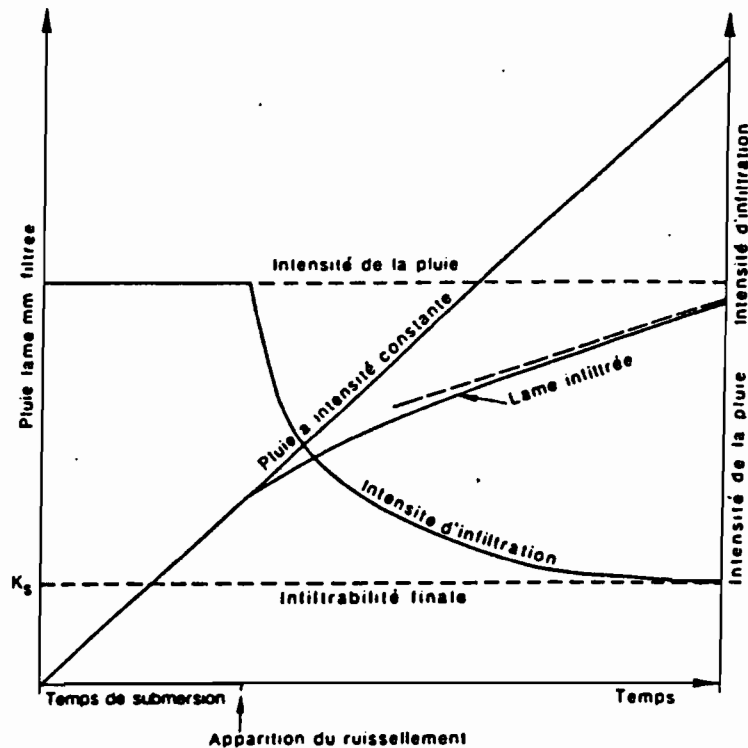


Fig.5 INFILTRATION : variation de la lame infiltrée et de l'intensité d'infiltration en fonction du temps HILLEL (1974)

3.6 Etude des paramètres du ruissellement

L'analyse de l'hydrogramme enregistré à l'exutoire de la parcelle permet l'étude des différentes phases du bilan d'eau à la surface du sol.

Ainsi peut on étudier, pour divers états d'humectation du sol et de types d'occupation, les paramètres caractéristiques de l'écoulement tels que :

- la pluie d'imbibition (P_i) ;
- l'intensité maximale de ruissellement (R_x) déterminée graphiquement sur l'hydrogramme, à laquelle correspond une intensité minimale d'infiltration (F_n) en fonction de l'intensité de la pluie.

3.6.1 Etude de la pluie d'imbibition

Les facteurs principaux communément retenus, agissant sur la pluie d'imbibition sont : l'état d'humectation du sol, les différents états de surface et de la végétation et l'intensité de la pluie.

Nous allons étudier les deux premiers facteurs à partir d'une étude menée au Cameroun. fig.6

Divers états de surface et de la végétation ont été testés :

- sol nu après labour manuel
- couvert végétal peu dense (<30% de recouvrement au sol)
- couvert végétal dense (>30% de recouvrement au sol)

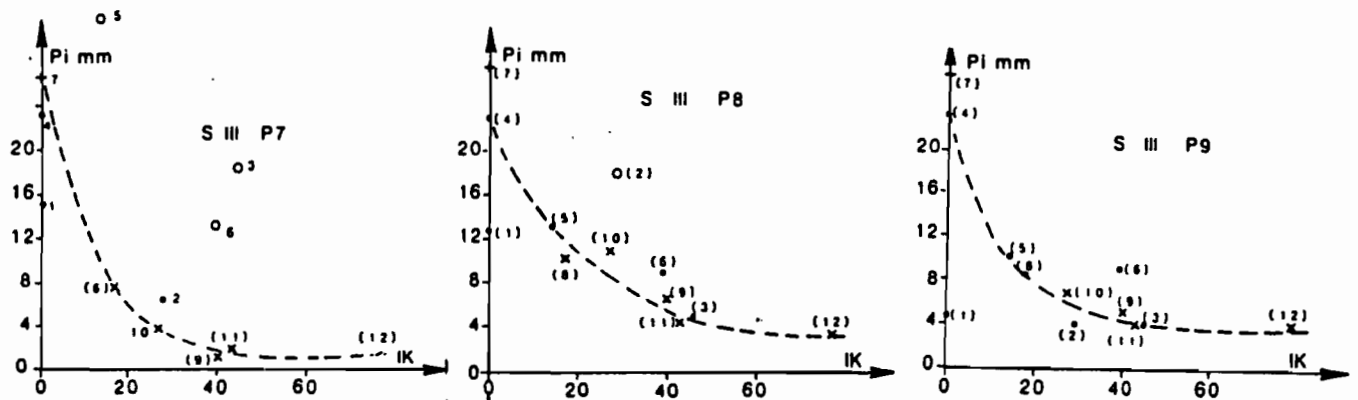


Fig.6 RELATION PLUIE D'IMBIBITION-INDICE IK

Trois enseignements peuvent être tirés de la lecture de ces graphes :

- 1) Le peu d'effet, au moins sur la pluie d'imbibition et le coefficient de ruissellement, d'un couvert végétal faible à moyen (<30%) par rapport au sol nu. Ceci est vérifié sur les parcelles P4 et P5 dont les résultats, sous ces conditions, sont assez proches de ceux de la parcelle P6 sur sol nu.
- 2) Un couvert dense, de l'ordre de 80%, a une influence certaine sur la pluie d'imbibition, mais moindre que le travail du sol.
- 3) la valeur de la pluie d'imbibition est dans tous les cas très liée à l'indice (IK) d'antécédence des pluies. Elle décroît en fonction de IK suivant une branche d'hyperbole dont la courbure dépend de l'état de surface et l'asymptote de l'état de la végétation.

Remarque :

Nous avons vu qu'à l'échelle de la parcelle le temps de transfert peut-être compté pour négligeable. La pluie d'imbibition peut-être alors assimilée à la notion de "précipitation limite de ruissellement".

3.6.2 Etude de l'intensité limite de ruissellement

Nous avons défini précédemment la variable (Rx) comme étant l'intensité maximale de ruissellement. Celle-ci est déterminée graphiquement, le régime permanent de ruissellement étant atteint.

La détermination des intensités limites de ruissellement se fait à partir des graphes (Rx, I), établis pour chaque site d'étude. fig. 7.

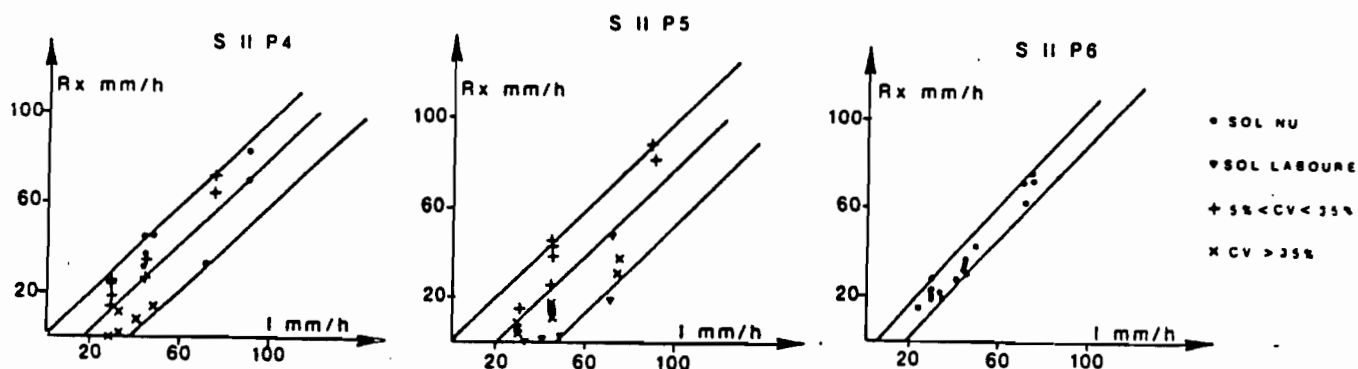


Fig.7 RELATION INTENSITE MAXIMALE DE RUISSellement-INTENSITE DE LA PLUIE

On remarque que pour chaque parcelle les points représentant les couples (Rx, I) peuvent être compris entre deux droites parallèles, dont les intersections avec l'axe des abscisses déterminent les valeurs IL1 et IL2, telles que $0 \leq IL1 < IL2$, qui représentent :

IL1 : intensité limite au-dessous de laquelle la parcelle ne ruisselle jamais

IL2 : intensité limite au-dessus de laquelle la parcelle ruisselle toujours.

(Dans la mesure où Rx représente l'intensité maximum en régime permanent, ce que nous supposons vérifié).

Ces deux données sont très intéressantes, IL2 permet en particulier une approche de la "pluie utile", définie par ROCHE (1963) comme étant : "la partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement".

IV - LE MODELE "PLUIE-LAME RUISSLEE" SUR PARCELLE

4.1 Le modèle "pluie-lame ruisselée" sur parcelle.

Le modèle généralement retenu est de type simple, à régression linéaire multiple. Sa mise au point comporte généralement trois étapes :

- homogénéisation des données observées sur les x parcelles d'un site.
- test de signification des coefficients de régression.
- expression sous forme de fonction linéaire de la lame ruisselée en fonction des variables les plus significatives pour chacun des sites.

Les variables explicatives de la lame ruisselée peuvent varier en fonction du type de sol, des états de la surface etc.... Nous retiendrons principalement :

- La pluie totale : P
- L'indice des pluies antérieures : IK
- L'indice de couvert végétal : cv

Ainsi seront déterminées des fonctions de production du ruissellement sur chaque site. Ces fonctions sont de la forme :

$$Lr = aP + b IK + c cv + d$$

dans lesquelles a, b, c, d sont des paramètres sans dimension.

V - TRANSFERT DES RESULTATS DE LA PARCELLE AU BASSIN

5.1 La cartographie du bassin

Lors de l'aménagement d'un bassin versant représentatif, l'objectif principal est l'étude fine des mécanismes de l'infiltration et du ruissellement, plus généralement du cycle de l'eau.

L'hydrogramme global de crue, déduit du limnigramme enregistré à l'exutoire du bassin permet de connaître les apports en eaux de ruissellement à la station de mesure et d'étudier les caractéristiques de forme des crues.

Les résultats sur mini-parcelles sous pluie simulée ont permis l'analyse des caractéristiques hydrodynamiques des différents types de sols rencontrés sur les bassins et de connaître les apports en eaux de ruissellement de chaque aire contributive.

La base de la méthode de transfert des résultats obtenus sur parcelles repose sur une cartographie thématique du bassin sur lequel on veut étendre ces résultats. Cette méthodologie cartographique a été mise au point par les pédologues de l'ORSTOM, en particulier J. COLLINET et C. VALENTIN (1979 a.b - 1981) C. VALENTIN (1981 - 1982 - 1983 - 1985), pour répondre en particulier aux besoins des hydrologues.

Cette cartographie thématique est maintenant assez connue et répond à des critères bien définis pour sa mise en oeuvre. Selon la région climatique dans laquelle est situé le bassin à étudier, les composantes du milieu à prendre en compte seront différentes.

Ainsi, ressort-il des travaux antérieurs menés sous pluies simulées que dans la région climatique concernée (sahélienne), la cartographie des sols du bassin devra être basée principalement sur le type d'occupation des terres et les différents états de surface, ce terme regroupant deux composantes principales :

- les organisations pédologiques superficielles,
- le couvert végétal.

Les organisations pédologiques internes n'influencent que très peu le ruissellement sur ces sols. La dimension des surfaces prises en compte lors des descriptions de ce type varie avec le milieu étudié. D'une manière générale le "point d'observation" est défini par le champ de vision. Or même à cette échelle, il est fréquent que les états de surface soient hétérogènes, aussi définit-on des "surfaces élémentaires", constituées d'unités homogènes, dont le comportement serait uniforme sous pluie simulée.

VALENTIN a dressé un premier "check-list" des descripteurs de ces surfaces élémentaires :

Pour les organisations pédologiques superficielles on retiendra :

- la litière, (en savane on inclue dans cette rubrique les éventuels chevelus racinaires affleurants),
- l'activité faunique : termitières, turicules de vers, etc.,
- le micro-relief (buttes, billons...),
- les indices de migration des constituants (érosion hydrique, dépôts éoliens...),
- le micro-horizon, caractérisé par : couleur, humidité, continuité, taille des constituants des organisations pelliculaires.

Le couvert végétal sera décrit par :

- le couvert arboré : densité, pourcentage de recouvrement...
- le tapis herbacé (mêmes critères)
- la végétation de surface : mousses, lichens, jeunes pousses...
- les résidus végétaux: restes de végétation naturelle, ou de cultures.

5.2 Du m² au km² - De la parcelle au bassin -

La méthode de transposition des résultats de la parcelle au bassin se fait en deux étapes :

- Détermination d'une fonction de production du bassin. Elle résulte de la somme pondérée des fonctions de production de chaque unité cartographique (représentées par un site de simulation) et est du type :

$$Lr_b = aLr_1 + bLr_2 + \dots + xLr_n$$

a, b, ..., x représentent les fractions de superficies occupées par les unités 1, 2, ..., n.

- Détermination d'une fonction de calage. A l'échelle de la parcelle, un certain nombre de paramètres ne sont pas pris en considération et ceci implique le passage par une fonction de calage des lames ruisselées calculées sur les lames ruisselées observées.

Cette fonction de calage représente en particulier les paramètres non pris en compte suivants:

- l'effet de pente quasi-inexistant à l'échelle de la parcelle.
- l'état phytionomique de la végétation : sèche pendant les expérimentations sous pluie simulée, active en saison des pluies pendant le suivi du bassin versant.
- la répartition spatiale des sols représentés par les parcelles, par rapport au réseau de drainage. Les eaux qui ruissellent en amont peuvent s'infiltrer à l'aval, ou inversement, de l'eau infiltrée dans une unité située en amont, peut après un cheminement hypodermique participer au ruissellement sur une unité de sol en aval.
- l'hétérogénéité spatiale de l'averse sur le bassin. En effet, on utilise comme variable d'entrée du modèle la pluie moyenne sur le bassin, le but à atteindre étant entre autres d'utiliser la pluviométrie à un poste de référence, pas forcément situé sur le bassin étudié, mais à proximité.

La fonction de calage du bassin est la droite moyenne entre les droites de régression

$$Lr_c = f(Lr_o) \quad \text{et} \quad Lr_o = f(Lr_c)$$

5.3 Application de la méthode au cas d'un bassin versant du Nord-Cameroun.

La cartographie de ce bassin fait ressortir six unités homogènes du point de vue du ruissellement. (cf. carte fig.8).

Sur l'une de ces unités (S VII) il a été impossible d'établir une relation pluie-lame ruisselée sous simulation de pluie, le ruissellement étant toujours nul. Ce phénomène a été identique en conditions naturelles durant les deux saisons des pluies que nous avons suivies. En conséquence, dans la fonction de production globale du bassin, cette unité n'apparaîtra pas.

Les fonction de production des cinq "unités participatives" sont :

$$Lr_2 = 0,758 Pu + 0,146 IK - 0,207 cv - 4,57$$

$$Lr_3 = 0,575 Pu + 0,264 IK - 17,0$$

$$Lr_4 = 0,403 Pu + 0,139 IK - 0,230 cv - 6,13$$

$$Lr_5 = 0,583 Pu + 0,205 IK - 0,135 cv - 8,17$$

$$Lr_6 = 0,661 Pu + 0,197 IK - 0,292 cv - 5,47$$

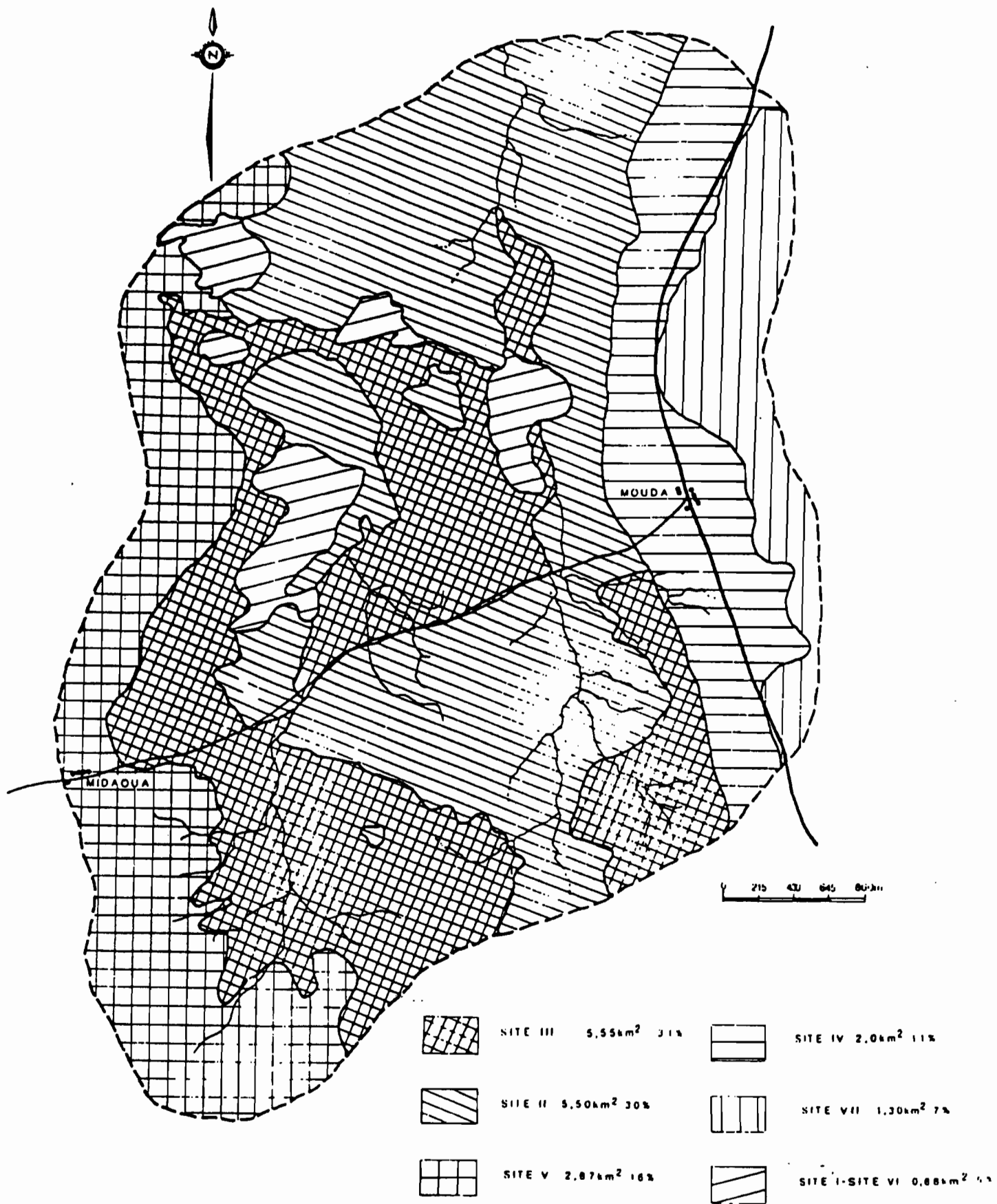


Fig.8 CARTE DES ETATS DE SURFACE B.V.1

REPRESENTATIVITE DES SITES DE SIMULATION DE PLUIE

Ces unités, homogènes vis à vis du ruissellement, représentent respectivement en pourcentage de la superficie globale du bassin :

Unité 2 : 30%
Unité 3 : 31%
Unité 4 : 11%

Unité 5 : 16%
Unité 6 : 5%
Unité 7 : 7

La fonction de production globale du bassin s'écrit donc :

$$L_{rb} = 0,30 L_{r2} + 0,31 L_{r3} + 0,11 L_{r4} + 0,16 L_{r5} + 0,05 L_{r6} + 0,07 L_{r7}$$

Les résultats de la reconstitution des lames ruisselées observées pendant les campagnes 1984-1985 sont présentés dans le tableau ci-après :

La fonction de calage sur le bassin est :

$$L_{r0} = 1,16 L_{rc} - 0,691 \quad r^2 = 0,96$$

Cette relation est représentée graphiquement sur la figure N°9.

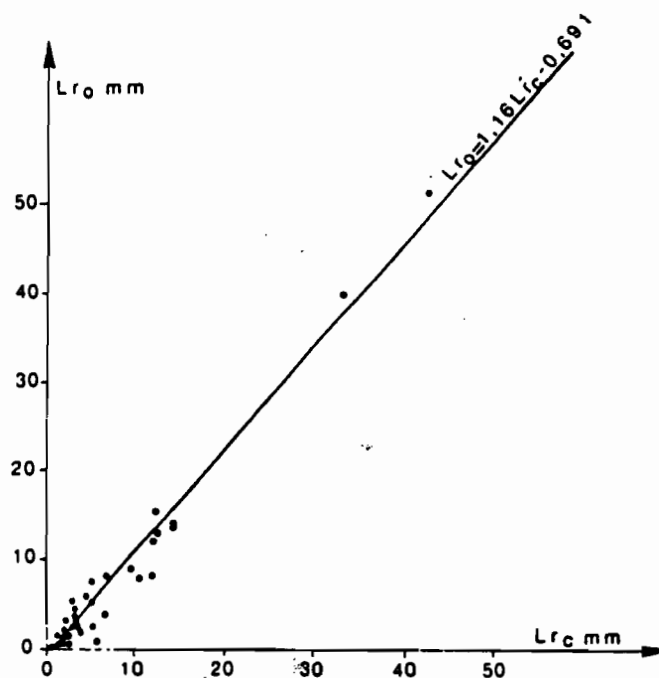


Fig.9 - BV1 MOUDA FONCTION DE CALAGE

VI - VALIDITE DU MODELE SIMULATEUR

Pour vérifier la validité du modèle, on peut procéder de deux manières :

- 1) Si l'on a réservé une partie de l'échantillon de lames ruisselées observées lors du calage du modèle, on teste le modèle sur cette partie de l'échantillon.
- 2) Si l'ensemble de la population de l'échantillon a été utilisé pour caler le modèle, (c'est notre cas), on va générer une chronique de lames ruisselées sur le bassin à partir d'une série pluviométrique observée à un poste de référence voisin du bassin étudié.

Nous avons vu que le modèle simulateur comporte deux étapes :

- 1) Détermination des valeurs des variables d'entrée de la fonction de production : Pu, IK, cv
- 2) Application de la fonction de calage aux lames ruisselées calculées à l'étape précédente :

La première étape consiste à chercher le coefficient d'abattement à appliquer à la pluie journalière du poste de référence choisi pour passer à la pluie moyenne sur le bassin.

On calcule ensuite les valeurs de l'indice des précipitations antérieures IK, en considérant par exemple que les pluies surviennent à 12 h, donc 24 heures séparent l'averse n de l'averse n+1 tombée le lendemain.

L'indice de recouvrement au sol de la végétation a été déterminée, dans notre cas, en considérant une valeur moyenne mensuelle, valable pour toute la chronique, à partir des observations des deux années de mesure.

Les variables ainsi définies, le modèle a pu être appliqué. Les résultats sont représentés sur la figure 10, où les couples pluies-lames ruisselées ont été reportés, ainsi que les lames ruisselées observées.

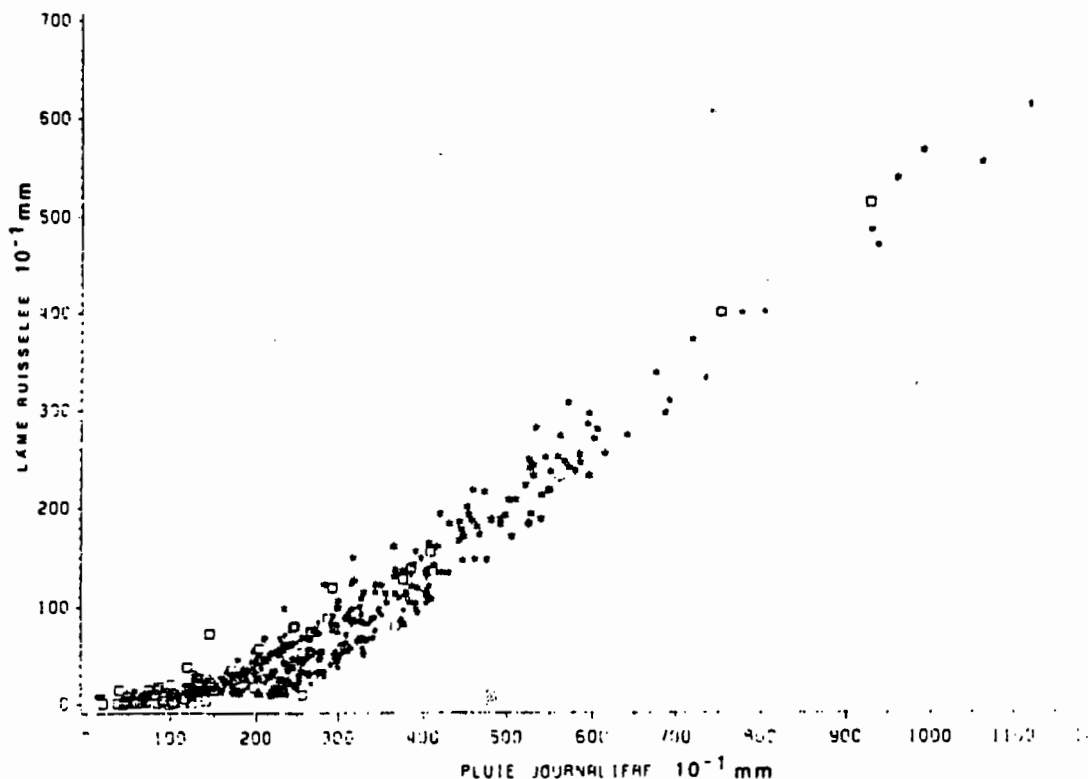


Fig.10 - B.V. MOUDA 1 LAMES RUISSLEES RECONSTITUEES

On pourra, à partir de cette chronique de lames ruisselées reconstituées, ajuster l'échantillon des lames ruisselées maximales annuelles et celui des lames ruisselées annuelles à une série de lois statistiques, afin de déterminer les valeurs de récurrence annuelle et décennale nécessaires dans tous les projets d'aménagement.

- BIBLIOGRAPHIE -

ASSELIN J., VALENTIN C. (1978) - *Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion.*
Cah. ORSTOM - Sér. hydrol. Vol. XX n°4 - 1978, PP. 321-349.

BERNARD A. (1987) - *Le simulateur de pluie - 2ème génération.*
Note technique, ORSTOM - Laboratoire d'Hydrologie - Montpellier.

BERTRAND R.B., PAAR J.F. (1960) - *Development of a portable sprinkling infiltrometer Tr. of the VII th int. conf. of soils science.*
MADISON, VI, 4, pp. 433-440.

CASENAVE A. (1982) - *Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures.*
Cah. ORSTOM Sér. hydrol., Vol.XIX, 4, pp. 207-227.

CHILDS E.L. (1969) - *An introduction to the physical basis of soil water phenomena.*
Wiley Interscience NEW YORK, NY. 493 p.

COLLINET J., VALENTIN C. (1979) - *Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques.*
Cah. ORSTOM Sér. Pédol. Vol. XVII, n°4, pp 283-328.

COLLINET J., VALENTIN C. (1979 b) - *Un schéma des inter-relations hydrodynamiques dans les milieux naturels et cultivés, valorisation des données morphologiques in : Informatique et Biosphère : actes du colloque d'ABIDJAN, pp. 155-177.*

DE MARSILY G. (1981) - *Hydrologie quantitative, MASSON*
edi. PARIS, NEW YORK, BARCELONE, MILAN, MEXICO, RIO DE JANEIRO. 214 p.

DIXON R.M., PETERSON A.E.E. (1964) - *Construction and Operation of a modified spray infiltrometer and a flood infiltrometer.*
University of WISCONSIN. Research réport n°15, 31p.

HILLEL D. (1974) - *L'eau et le sol, principes et processus physiques.* Dept. of soil sc. The Hebrew University of JERUSALEM.
Trad. de l'anglais par Louis W. DE BACKER, WANDER ed. LOUVAINS : 288p.

HORTON R.E. (1933) - *The role of infiltration in the hydrological cycle.*
Trans. Amer. Geophys. Un. 14 : pp. 446-460.

LAFFORGUE A. (1977) - *Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées.* Cah. ORSTOM Sér. hydrol. Vol. XIV n°4, pp. 229-344.

MOREL-SEYTOUX H.J. (1981) - *Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph*. Water resources bulletin pp. 1012-1022.

MUALEM Y. (1974) - *A conceptual model of hysteresis*. Water resources res. pp. 514-520.

PARLANGE J.Y.(1976) - *Capillary hysteresis and relations ship between drying and wetting curves*. Water Res. Vol. 12 (2) : pp.224-228.

RICHARDS S.J. (1965) - *Physical condition of water in soil*, chap. 8. In C.A. BACK et al. (eds). *Methods of soil analysis, Part. I*, Academic press, NEW YORK, 770 p.

ROCHE M. (1963) - *Hydrologie de surface*. GAUTHIER-VILARS. Ed. PARIS, p. 383.

RUBIN M. (1963) - *Theory of rainfall uptake by soils initially dryer than their field capacity and its applications*, Water resources res. V.2 : pp. 739-749.

SWANSON N.P. (1965) - *Rotating boom rainfall simulator*. Amer. Soc. Agr. Engineers n°8, pp.71-72. MICHIGAN.

THEBE B. (1987) - *Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de MOUDA. Contribution à l'étude des transferts d'échelles*. Thèse d'Université - USTL, Montpellier, 238 p. + annexes.

VACHAUD G. (1985) - *Intervention orale. Journées hydrologiques de MONTPELLIER. Colloques et séminaires*. Editions de l'ORSTOM. p. 200.

VACHAUD G., THONY J.L. (1978) - *Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents*. Water resources Res. pp. 111-127.

VALENTIN C. (1985) - *Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques*. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à MONTPELLIER. (17-18 septembre 1985. Coll. colloques et séminaires. Ed. ORSTOM, pp. 50-74.

VAUCLIN M. (1982) - *Infiltration in unsaturated soils*. Lecture at NATO Advances Study Institute on "University of DELAWARE, 50p.

ANNEXE 1

BORDEREAUX DE DEPOUILLEMENT

ANNEXE 2

L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

1. GENERALITES

La sonde SOLO est destinée à mesurer l'humidité des sols. Le procédé mis en oeuvre utilise le ralentissement des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau. L'application de ce procédé n'est pas très récent, divers modèles d'humidimètre l'utilisent déjà depuis plusieurs années, mais la sonde SOLO étudiée au Commissariat à l'Energie Atomique est originale par :

- l'emploi d'un détecteur ayant une grande efficacité, ce qui permet d'utiliser une source de neutrons de faible activité (10 milli-curie) qui ne nécessite aucune protection biologique particulière.
- Sa grande simplicité et sa grande commodité d'utilisation qui proviennent de l'application des plus récents progrès de la technologie électronique.

2. PRINCIPE

La détermination du taux d'humidité du sol par un humidimètre à neutrons* utilise le phénomène de la "diffusion élastique" des neutrons, qui peut être brièvement décrit ici de la façon suivante : lorsqu'un neutron de grande énergie est émis dans le sol par la source incluse dans la sonde (il s'agit d'une source radioactive constituée d'un mélange d'Amercium et de Beryllium) il se propage en perdant peu à peu son énergie. Ce ralentissement est causé par les chocs subits avec les noyaux des atomes constituant le sol. Le neutron parvient de cette façon à l'énergie correspondant à l'agitation thermique : on dit qu'il est "thermalisé". Au cours du processus de ralentissement, la distance parcourue en moyenne par un neutron animé au départ d'une énergie donnée, dépend de la masse des noyaux atomiques qu'il rencontre. Ceux qui contribuent le plus efficacement à la thermalisation sont les noyaux de même masse que lui, c'est-à-dire, les noyaux d'hydrogène.

Or, dans le sol, l'hydrogène est essentiellement présent sous forme d' H_2O : on comprend donc que l'on puisse déterminer le taux d'humidité en mesurant le flux** de neutrons thermalisés à proximité d'une source de neutrons de forte énergie.

* Particule nucléaire élémentaire dépourvue de charge électrique.

** Nombre de neutrons traversant l'unité de surface par unité de temps.

Dans la pratique, cependant, les choses ne sont pas aussi simples :

- D'une part, en effet, le sol possède une certaine teneur en eau de constitution, liée à la présence d'argile ou de matières organiques. Cette eau a, bien sûr, le même pouvoir ralentisseur que l'eau libre.
- D'autre part, certains corps absorbent les neutrons, et leur présence dans le sol, même en très petite quantité, entraîne, pour une même teneur en eau, une baisse du flux de neutrons thermiques.

On se prémunit contre ces deux sources d'erreurs en effectuant un étalonnage préalable du milieu.

3. DESCRIPTION

L'ensemble SOLO 20 comprend les éléments suivants :

- Une sonde à neutrons contenant le détecteur et une source d'Am-Be, destinée à être introduite dans le sol, contenue dans un boîtier de protection qui comporte :
 - . Un mesureur de cote à friction avec affichage,
 - . Un dispositif de verrouillage automatique de la sonde dans le boîtier,
 - . Une protection mécanique et biologique constituée par un cylindre de polyéthylène qui permet d'effectuer des mesures de contrôle et autorise l'utilisation de source d'une activité de 40 mCi.
- Un câble coaxial solidaire de la sonde par une extrémité, l'autre étant équipée d'un connecteur haute tension à encliquetage.
- Un boîtier en acier inox peint abritant les circuits électroniques et la batterie d'accumulateurs.

Les accessoires suivants sont fournis avec l'ensemble SOLO 20 :

- Un réflecteur neutronique permettant d'effectuer des mesures à proximité de la surface,
- Une sangle de manutention,
- Une sacoche de portage,
- Un chargeur de batterie.

Ces éléments constituent la version de base.

3.1. Sonde à neutrons

3.1.1. Source de neutrons

La source de neutrons, du type SNA 2 (fournisseur : Service des Radioéléments Artificiels du CEA), est constituée d'un mélange Americium-Beryllium. Ayant la forme d'un tore de section rectangulaire, elle encercle le détecteur dans le plan médian de sa zone active.

L'activité de la source est de 10 mCi ou sur option 40 mCi.

3.1.2. Détecteur

La détection des neutrons thermiques est effectuée par un tube compteur à Hélium 3 du type 9319 Texlum ou équivalent. Ses principales caractéristiques sont :

- Diamètre : 25,4 mm (1pouce),
- Longueur active : 150 mm (6 pouces),
- Longueur totale : 225 mm (9 pouces),
- Pression de remplissage : 4 atmosphères.

3.1.3. Corps de sonde et câble

La source et le détecteur sont inclus dans un tube cylindrique étanche de 300 mm de longueur et 39 mm de diamètre. De ce tube part le câble coaxial qui apporte au détecteur la haute tension nécessaire et véhicule vers le boîtier d'électronique les impulsions de tension représentatives de la détection des neutrons.

L'ensemble SOLO 20 est livré avec un câble de 5 m. On peut, à la demande, l'équiper d'un câble de longueur différente (30 m. au maximum).

On rappelle que le démontage de la sonde est interdit.

3.2. Boîtier électronique

3.2.1. Le boîtier

Il est constitué de deux demi-coques en acier inox, réunies par un système de six fixations en acier inoxydable. Chaque fixation est évidée pour permettre l'accrochage du boîtier de protection, ou le passage de la courroie de manutention dans le cas de l'utilisation en version de base.

Le boîtier renferme le circuit électronique et la batterie d'accumulateurs. Sur la face supérieure, on trouve :

- Trois embases de connecteurs à encliquetage :
 - . une coaxiale, haute tension, sur laquelle on branche le câble de liaison avec la sonde,
 - . une multicontacts, utilisée pour la sortie des résultats de comptage vers un système d'impression,
 - . une embase deux contacts, utilisée pour la recharge de la batterie ou l'alimentation par batterie extérieure 12 volts.
- Un fusible de sécurité pour la batterie interne
- Trois leviers de commande :
 - . un poussoir (à contact fugitif) marqué "Marche" servant à déclencher l'exécution d'une mesure,
 - . un inverseur marqué "Long" permettant la sélection du temps de comptage court ou long,
 - . un poussoir (à contact fugitif) marqué "Affichage" pour rappeler la visualisation de la dernière mesure.

- Une lucarne munie d'un écran transparent derrière lequel sont visibles les afficheurs électroluminescents.

Les dimensions externes du boîtier électronique sont 130 x 290 x 100 mm.

3.2.2. Le circuit électronique

Le circuit imprimé en verre époxy sur lequel sont rassemblés tous les éléments de l'électronique est fixé dans l'une des deux demi-coques qui constituent le boîtier, l'autre supportant la batterie.

3.2.3. La batterie d'accumulateurs

La batterie de marque S.A.F.T., référence 120.212, comprend 10 éléments au Nickel-Cadmium du type VR 4. Elle a une capacité de 4 Ah, sa tension nominale est 12 V. Les qualités générales de ces éléments sont :

- étanchéité,
- insensibilité aux surcharges,
- fiabilité et durée de vie exceptionnelles,
- gamme de température de stockage allant de -40 à +50°C.

3.3. Boîtier de protection

Le boîtier de protection à un triple rôle :

- Faciliter la mesure de la cote de la sonde dans le tubage, grâce à un indicateur à friction placé à la face supérieure,
- Simplifier l'introduction de la sonde dans le tubage. A sa partie inférieure, le boîtier de protection s'emboîte sur le tubage et cette action efface automatiquement un dispositif de maintien de la sonde,
- Assurer une protection mécanique et biologique supplémentaire de la sonde par un cylindre de polyéthylène qui, en outre, permet d'effectuer des mesures de contrôle.

Cette protection pourrait autoriser éventuellement l'utilisation d'une source d'activité plus élevée.

Ce boîtier est réalisé dans la même matière que le boîtier électronique. Il est fait également de deux demi-coques assemblées d'un côté par trois fixations, et de l'autre par deux pièces mâles qui peuvent s'emboîter dans les fixations évidées du boîtier électronique. Un blocage par vis pointeau rend alors solidaires les deux boîtiers. La poignée située à la partie supérieure du boîtier de protection peut alors être utilisée pour la manutention de l'ensemble.

Dans sa partie centrale, le fourreau de la sonde contient une pièce en matériau fortement hydrogéné qui fait office de milieu de référence et de protection biologique.

Les dimensions externes du boîtier de protection sont : 380 x 95 x 95 mm.

3.4. Réflecteur neutronique

Il est constitué d'une calotte de sypsarène percée en son centre d'un trou permettant le passage du tubage. Il est muni de deux crochets en acier inoxydable. Il doit être placé au pied de la partie aérienne du tubage si l'on doit effectuer des mesures entre la surface du sol et la cote -25 cm.

4. CARACTERISTIQUES

- Source Am-Be de 10 mCi, ne nécessitant aucune protection biologique.
- Détecteur à Hélium 3.
- Deux cycles de comptage possibles au choix de l'utilisateur :
Long (~ 80 s) et Court (~ 20 s).
- Visualisation du résultat de la mesure par trois digits plus une indication du dépassement, sur des afficheurs à LED ("Light Emitting Diodes").
- L'étalonnage réalisé par le constructeur donne 1000 pour un comptage dans l'eau quel que soit le cycle de comptage choisi (court ou long).
- Coefficient de température : variation relative de la mesure de $3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

- Alimentation autonome par batteries au Cadmium-Nickel permettant 2000 mesures en cycles longs ou 6000 en cycles courts.
- Il est possible d'alimenter l'appareil par une batterie externe de 12 V.
- L'ensemble est étanche au ruissellement, à condition que le connecteur HT du câble de liaison avec la sonde soit en place (ou son bouchon), et que l'embase de la prise multibroche soit fermée par son bouchon.
- La sonde est étanche sous 1 m d'eau.
- Il est recommandé que la température à l'intérieur du boîtier électronique n'excède pas 50°C. Une température plus élevée est nuisible à la batterie d'accumulateurs.
- Dimensions :
 - . boîtier électronique : 130 x 290 x 100 mm
 - . boîtier de protection : 380 x 95 x 95 mm
 - . encombrement hors-tout de la version complète : 380 x 240 x 95 mm.
- Poids de l'ensemble : inférieur à 7 kg.

5. FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DE L'ENSEMBLE SOLO 20

5.1. Exécution d'une mesure

La partie inférieure du boîtier de protection étant emboîtée à la partie supérieure du tubage, l'utilisateur descend la sonde dans le tubage. Pour ce faire, il met en position intermédiaire le levier de l'indicateur de profondeur placé sous la poignée, et il fait défiler le câble jusqu'à ce que la cote souhaitée, indiquée en centimètres sur le compte-tours, soit atteinte ; puis il repousse le levier en position de repos (blocage).

Agissant ensuite sur le levier de commande marqué "LONG" sur le boîtier électronique, l'utilisateur choisit un temps de comptage court ou long suivant la précision recherchée pour la mesure. Il manoeuvre ensuite le levier marqué "ON" ce qui déclenche l'exécution d'une séquence de mesure qui comporte :

- La mise en tension du détecteur qui prend environ six secondes,

- Le comptage des impulsions issues du détecteur pendant le temps choisi. Pendant le déroulement du comptage, les points décimaux de l'affichage sont allumés,
- L'apparition du résultat sur l'affichage pendant trois secondes, à la suite de quoi l'afficheur s'éteint.

Une séquence de mesure dure environ 20 ou 80 secondes suivant que l'on a choisi un temps de comptage court ou long.

En agissant sur le poussoir à levier marqué "AFFICHAGE", l'utilisateur a la possibilité de rappeler sur la visualisation le résultat de la dernière mesure effectuée, qui est automatiquement mémorisé. Cette possibilité subsiste pendant au moins 24 heures après la dernière mesure.

La persistance de la mémoire est obtenue parce que le circuit électronique est alimenté en permanence. La très faible consommation électrique du circuit (réalisé en technologie "C MOS") en dehors des séquences de comptage et de visualisation de la mesure a permis de concevoir un appareil qui est dépourvu d'un commutateur "Marche-Arrêt". Cette simplification apporte une aisance très appréciable dans l'utilisation de l'ensemble SOLO 20.

5.2. Précision des mesures

L'utilisateur doit savoir que deux mesures successives effectuées à la même position donneront toujours des résultats plus ou moins différents. Ceci est inhérent à la méthode nucléaire utilisée, qui fait appel au comptage d'événements (détection des neutrons thermiques) dont la réalisation est aléatoire. Par suite, l'erreur de mesure est aussi aléatoire et doit être exprimée en termes de probabilité : nombre de chances sur 100, par exemple, pour qu'elle soit inférieure à telle valeur.

La théorie et l'expérience montrent que dans le domaine de la radioactivité, les résultats de comptages obéissent à une loi de probabilité connue sous le nom de loi de Poisson. Suivant cette loi, et compte tenu des conditions dans lesquelles sont réalisées les mesures dans l'ensemble SOLO 20, on devra considérer, pour un résultat affiché N, que l'erreur relative est inférieure à :

$$\pm \frac{1}{\sqrt{10 N}} \quad \text{pour un temps de comptage court}$$

ou

$$\pm \frac{1}{\sqrt{40 N}} \quad \text{pour un temps de comptage long}$$

avec une probabilité de 68 %.

Ou bien, on pourra admettre, si l'on préfère, que l'erreur relative a une probabilité de 95 % d'être inférieure à deux fois les valeurs ci-dessus.

Par exemple, pour un résultat affiché de 250, la vraie valeur se trouve, avec une probabilité de 68 %, dans un intervalle de $\pm \frac{1}{\sqrt{2\,500}} = \pm 2\%$ autour de 250 si le comptage est effectué en temps court, et de $\pm \frac{1}{\sqrt{10\,000}} = \pm 1\%$ s'il est effectué en temps long.

Enfin il faut noter, si l'on effectue un certain nombre n de mesures au même point et dans des conditions de durée identiques, que l'on doit prendre pour valeur de la mesure, la moyenne arithmétique des n résultats, et que l'erreur relative définie ci-dessus est à diviser par \sqrt{n} .

6. PRATIQUE D'EMPLOI

6.1. Site de mesure

6.1.1. Choix

L'emplacement du tubage doit être représentatif du site à étudier (infiltration de l'eau, évapotranspiration, ...). On tiendra compte du microrelief, de la densité et de la répartition du couvert végétal, des voies d'accès.

6.1.2. Protection

L'opérateur doit absolument éviter de marcher ou de piétiner autour du tubage pendant les mesures, sinon le lieu n'est plus représentatif.

Il est conseillé de placer quatre piquets autour du tube et de les relier par un fil métallique, délimitant ainsi une zone d'exclusion de 40 cm de côté environ.

La végétation doit être protégée de toute meurtrissure.

6.2. Tubage

6.2.1. Choix du tubage

Le tubage devra avoir un diamètre extérieur de 45 mm pour respecter les conditions d'étalonnage de la sonde.

Deux types de matériaux sont proposés :

- Aluminium AG3 (Ø 41-45 mm) qui représente le meilleur matériau, transparent aux neutrons mais dont le prix est élevé,
- Plastique PVC (Ø 42-43-45 mm) qui représente le matériau de moindre coût, surtout en version gaine téléphonique, mais qui absorbe 20 % du flux neutronique.

Le bout du tube doit être, soit muni d'un embout conique soudé, soit chanfreiné pour permettre une introduction sans accrochage de la paroi du sol. Il est recommandé que le fond du tube soit étanche quand il y a risque de remontée de nappe.

6.2.2. Forage du trou

A l'aide d'une tarière manuelle ou mécanique de diamètre 44-45 mm, on fore un trou jusqu'à la profondeur d'investigation désirée.

L'opération est délicate, il faut éviter toute excavation dans la paroi qui entraînerait par la suite, soit un défaut de comptage en milieu non saturé, soit un excès en zone noyée.

La présence de cailloux est une cause de difficulté. La tarière, en forçant, a tendance à agrandir le diamètre du trou ; il est alors préférable de choisir un autre trou. Au cas où le sol serait trop caillouteux, il n'existe pas d'autre solution que de creuser une fosse et de reconstituer le sol autour du tube.

6.2.3. Pose du tubage

Le tubage est introduit en force dans le trou. On prend la précaution, lorsqu'il ne reste plus qu'un mètre à enfoncer, de placer autour et contre le tube un tas de sol sec réduit en poudre. Cette poudre pénètre entre la paroi du trou et le tube à la faveur des vibrations et colmate les vides éventuels.

On dispose ainsi d'un tubage en contact étroit avec le sol, sans risque d'infiltration préférentielle le long de la paroi du tube en cas de pluies ou d'irrigations.

6.2.4. Hauteur aérienne du tubage

La partie aérienne du tubage doit être supérieure à 20 cm pour permettre d'effectuer la mesure à la cote -10 cm, sans ôter l'indicateur de profondeur. En effet, la longueur de la sonde située au-dessus de la source est d'environ 30 cm.

6.2.5. Protection du tubage

Contre la pluie le tubage est coiffé d'un bouchon ou d'un capuchon.

6.3. Mesures

6.3.1. Climat

L'appareil ne doit pas être laissé en plein soleil.

Le boîtier est étanche à la pluie seulement. La sonde à neutrons, pour sa part, peut être noyée sous 1 m d'eau.

6.3.2. Premières mesures

En début de journée, il convient d'effectuer 3 à 5 mesures à vide pour stabiliser l'appareil.

6.3.3. Mesure de référence

Une ou plusieurs fois au cours des séries de mesures, la sonde sera introduite dans un fût de 200 l rempli d'eau. Cette mesure de référence doit donner un résultat se tenant dans les limites de tolérance des fluctuations statistiques du comptage (Cf. paragraphe 5.2.). Sinon, c'est signe que la batterie n'est plus assez chargée, ou qu'il y a une défectuosité dans l'appareillage.

6.3.4. Relevé d'un profil neutronique

La sonde est introduite dans le tubage de telle manière que la source se trouve au niveau de la mesure la moins profonde.

L'opérateur choisit son prétemps long ou court, et effectue la mesure.

Après avoir noté le résultat, il descend la sonde à la cote de la 2ème mesure et renouvelle le comptage.

Ainsi de suite jusqu'à la dernière cote.

Généralement les mesures sont espacées de 10 cm ou de multiples de 10 cm.

Certains utilisateurs préfèrent à chaque profondeur effectuer deux comptages en temps court et réalisent un 3ème comptage de contrôle au cas où l'écart entre les deux premières mesures serait supérieur à la fluctuation statistique attendue (Cf. paragraphe 5.2.).

6.3.5. Mesure de surface

La mesure la plus proche de la surface sera effectuée à -15 cm, avec la mise en place du réflecteur neutronique (calotte sphérique en polyéthylène corrigeant les mesures dans la zone 15-25 cm).

La cote -15 cm est choisie de telle sorte que la mesure soit encore valable si la surface du sol s'affaisse de 2-3 cm (tassement) au cours du temps.

6.3.6. Programme de relevé sur un tubage

Les mesures neutroniques seront répétées à des fréquences variables sur un même tubage, plusieurs fois par jour dans le cas d'analyse hydrodynamique du sol, plusieurs fois par an en suivant l'alimentation en eau d'une culture.

Il est important d'effectuer les mesures toujours aux mêmes cotes par rapport au tubage et non pas par rapport à la surface du sol qui est une variable. On note lors du premier relevé, les cotes des mesures par rapport au haut du tube, le compteur indiquant zéro à la position hauteur maximale de la sonde à neutrons. On maintient ces cotes pendant toute la durée de la campagne de mesure.

6.3.7. Cas particulier des tubes horizontaux

Plusieurs organismes (ITCF, ORSTOM, BRL, ...) préfèrent mettre en place dans le sol des tubages horizontaux de 30 m de long. L'inconvénient d'avoir à reconstituer le sol dans la tranchée, est largement compensé par la plus grande précision de mesures (meilleur échantillonnage) et l'absence de perturbation au niveau de la surface du sol.

6.4. Etalonnage

6.4.1. Equation de la droite d'étalonnage

1°) - A densité sèche constante : $N = a H_v + b$

N = Comptage donné par la sonde

H_v = Humidité volumique en pour cent

a et b = Coefficients spécifiques du sol étudié.

2°) - A densité sèche variable : $N = (\alpha \rho_s + \beta) H_v + \gamma \rho_s + \delta$

ρ_s = Densité sèche du sol

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = Coefficients spécifiques du sol.

Les coefficients sont variables suivant les sols (a varie ainsi de 9 pour les sols argileux contenant des éléments à forte absorption neutronique, à 14 pour des sols sableux siliceux).

En effet le sol contient non seulement de l'eau libre mais aussi :

- de l'eau de constitution (14 % dans le cas du kaolin),
- des éléments absorbants (Cl, Mn, terres rares, ...) en teneur variable.

Il est à noter que la courbe d'étalonnage n'est plus linéaire en dessous de 5 % d'humidité volumique totale.

N.B. : La sonde SOLO 20 peut être munie sur demande d'un câble de 30 m.

6.4.2. Etalonnage sur le terrain

Il s'agit de comparer les mesures neutroniques aux mesures gravimétriques.

$$N = f(Hv) = f(\rho_s \cdot H)$$

H = Humidité pondérale mesurée par séchage à l'étuve.

On place un ou deux tubages dans un sol relativement sec recueillant les carottes qui fournissent l'humidité pondérale. Dans l'heure qui suit, on relève les mesures neutroniques. Ainsi à chaque cote on a un comptage neutronique N1 et une humidité pondérale H1.

Lorsque le sol est humide (48 h après un fort apport d'eau), on relève le profil neutronique, on prélève des échantillons de sols à la tarière pour déterminer les humidités pondérales, enfin en creusant une fosse on mesure les densités.

Ainsi à chaque cote on a un comptage neutronique N2, une humidité pondérale H2 et une densité sèche.

Ces valeurs sont portées sur graphique (N sur l'axe des ordonnées, H. sur l'axe des abscisses). On trace les droites de corrélations qui donnent les droites d'étalonnages par tranches pédologiques de sol.

L'opérateur devra s'assurer qu'aux mesures neutroniques correspond une même mesure de référence dans l'eau ; il rapportera sinon toutes les mesures à une valeur eau de 1000.

6.4.3. Etalonnage sur bloc d'analyse neutronique

Un mode plus simple d'analyse consiste pour l'utilisateur à adresser au C.E.N. Cadarache* des échantillons de sol (pour chacun 500 g de terre broyée à 2 mm et séchée à 105°C). Ces échantillons sont soumis à divers flux de neutrons pour déterminer leurs propriétés de diffusion et d'absorption et fournir les coefficients α , β , γ , δ de la courbe d'étalonnage.

Il convient, de préférence, de prendre des échantillons sur une tranche de 10 à 20 cm, dans des horizons caractérisés. Si les écarts sont élevés dans un même profil, on procèdera à des analyses intermédiaires complémentaires.

* DB/SRA - M. MARCESSE - B.P. 1 - 13115 St-Paul-Lez-Durance
Prix de l'analyse app. 1975 : 180 F/un, 150 F/un si série de 10 échantillons et plus.

