

ORSTOM

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

SUR PETITS BASSINS VERSANTS

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

DEA NATIONAL DE L'EAU

CAMP TERRAIN

UNIVERSITE MONTPELLIER II USTL

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.

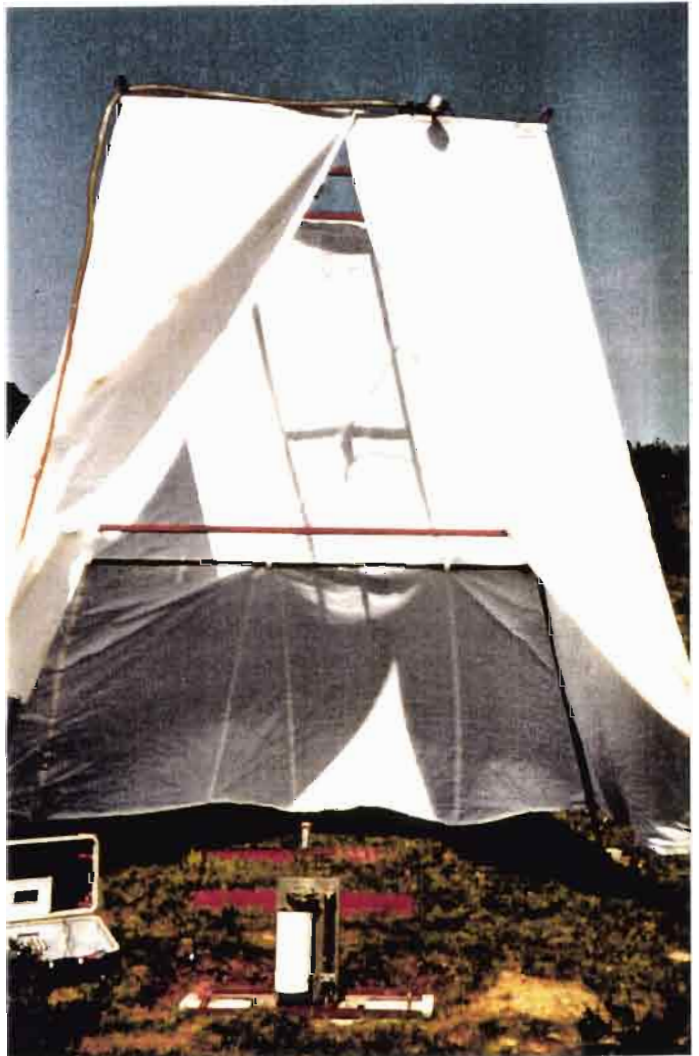
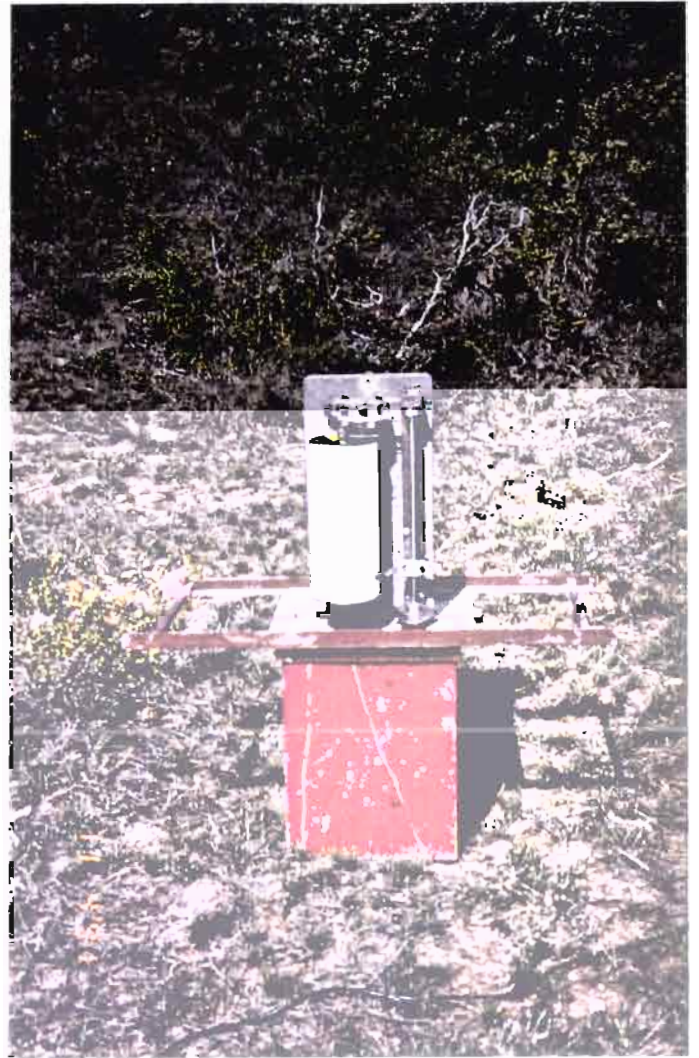
Or, l'utilisation de la méthode nécessite de classer le bassin étudié dans l'une des cinq classes de perméabilité suivantes :

- 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.



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 :

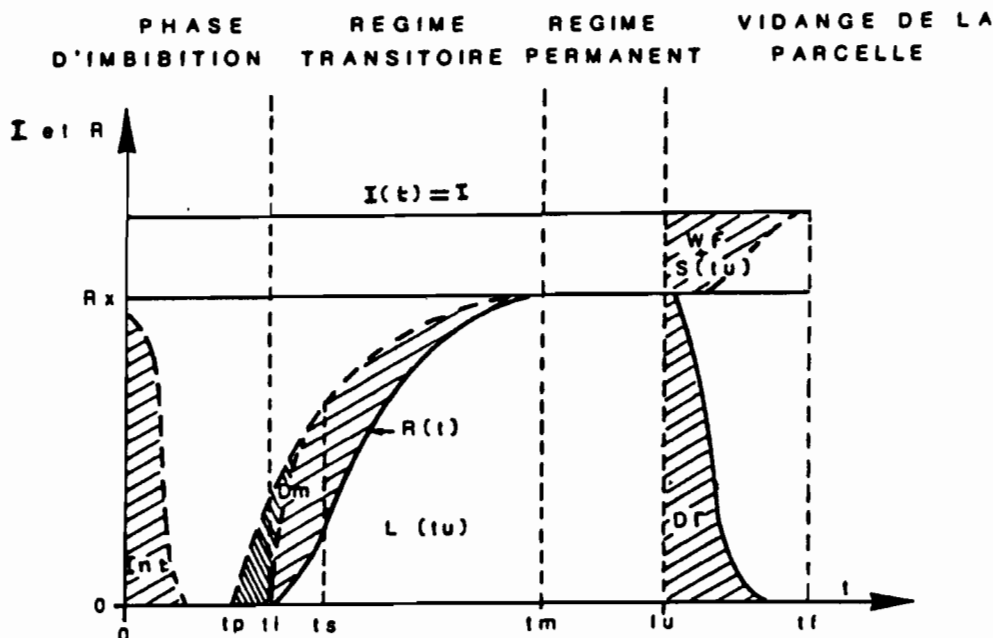


Fig.4 - RUISSellement SOUS INTENSITÉ D'averse CONSTANTE (D'APRES A.LAFFORGUE)

- 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 ponding) 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 :

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

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.

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)

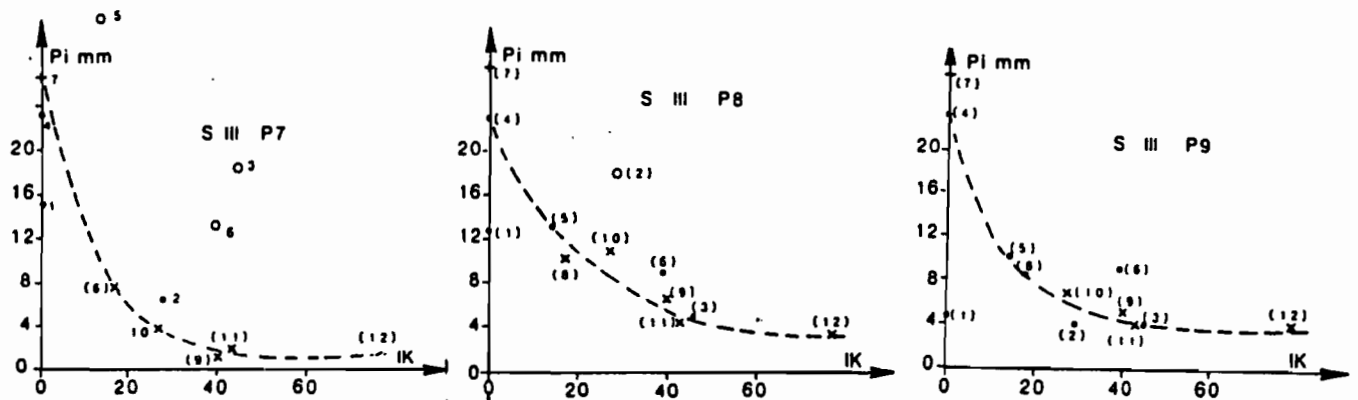


Fig.6 RELATION PLUIE D'IMBIBITION-INDICE IK

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.

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)

l é d rf o s , t e e r s e n .

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 :

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

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

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

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

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

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.

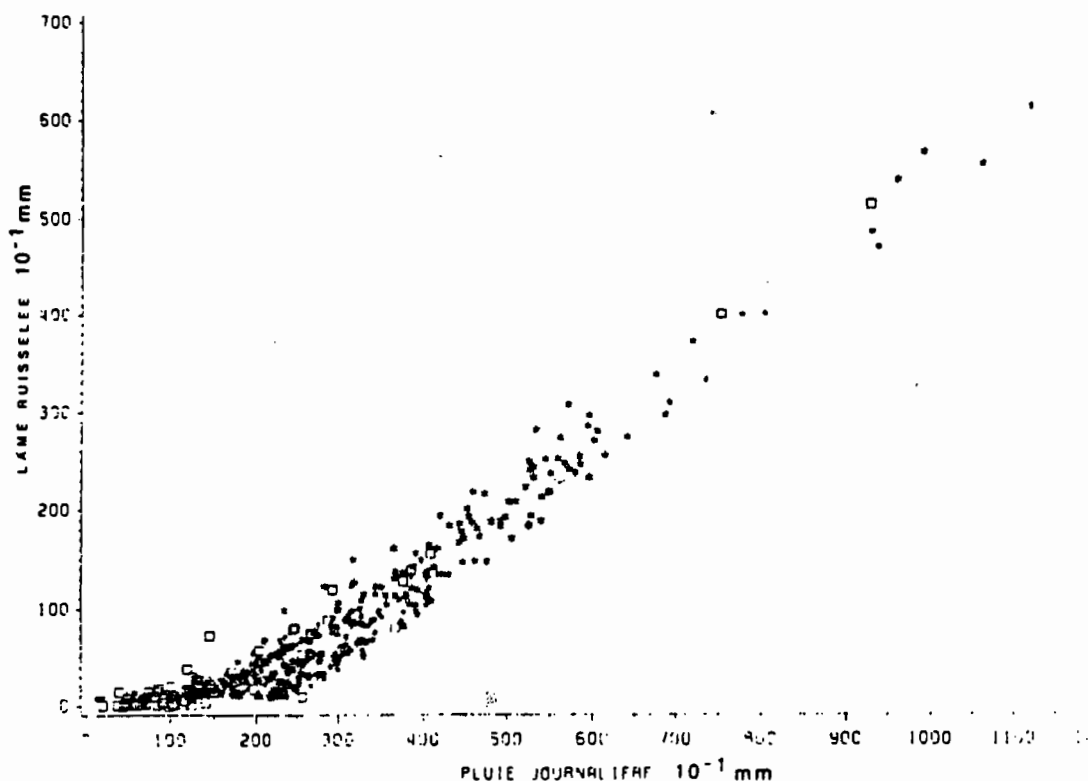


Fig.10 - B.V. MOUDA 1 LAMES RUISSLEES RECONSTITUEES

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.

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 connecteur à l'arrière et deux à l'avant.

- 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 qui compare le nombre de chances à la valeur de la mesure. 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.

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.

