

**J. COLLINET**

**C. VALENTIN**

**ANALYSE DES DIFFERENTS FACTEURS INTERVENANT  
SUR L'HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE**

**NOUVELLES PERSPECTIVES - APPLICATIONS AGRONOMIQUES**



**PEDOLOGIE EXPERIMENTALE**

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE - MER**

**CENTRE D'ADIOPODOUMÉ - CÔTE D'IVOIRE**

**B.P.V 51 - ABIDJAN**

**COPYRIGHT - ORSTOM 1979**



**AOÛT 1979**

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE D'ADIOPODOUME

B.P. V-51 ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

---

Laboratoire de Pédologie

ANALYSE DES DIFFÉRENTS FACTEURS INTERVENANT  
SUR L'HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE

Nouvelles perspectives - Applications agronomiques

p a r

*Jean COLLINET*

*Christian VALENTIN*

Août 1979

COPYRIGHT-ORSTOM 1979

# SOMMAIRE

## PREAMBULE

## I. LES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

I.1. LE SIMULATEUR DE PLUIES

I.2. L'INFILTROMETRE A ASPERSION

## II. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES PRINCIPAUX PROCESSUS OBSERVÉS

II.1. LES DONNEES DE BASE

II.2 L'ANALYSE DES PROCESSUS ELEMENTAIRES

## III. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE QUELQUES COMPLEXES SOL-VÉGÉTATION SUR L'HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE

III.1. DOMAINE SOUDANO-SAHELIEN

III.1.1. Cadre naturel

a) Climat et végétation

b) Modelés et sols

III.1.2. Comportements hydrodynamiques

a) Pluies d'imbibition

b) Phase du régime transitoire

c) Phase de vidange

d) Les lames d'eau ruissellées

III.1.3. Erodibilité des sols et comportements hydrodynamiques

III.2. DOMAINE SOUDANO-GUINEEN

III.2.1. Cadre naturel

a) Climat et végétation

b) Modelés et sols

III.2.2. Comportements hydrodynamiques

- a) Pluie d'imbibition
- b) Phase du régime permanent
- c) Phase de vidange
- d) Les lames d'eau ruissellée

III.2.3. Erodibilité des sols et comportements hydrodynamiques

III.3. DOMAINE TROPICAL HUMIDE

III.3.1. Cadre naturel

- a) Climat et végétation
- b) Modelés et sols

III.3.2. Comportements hydrodynamiques

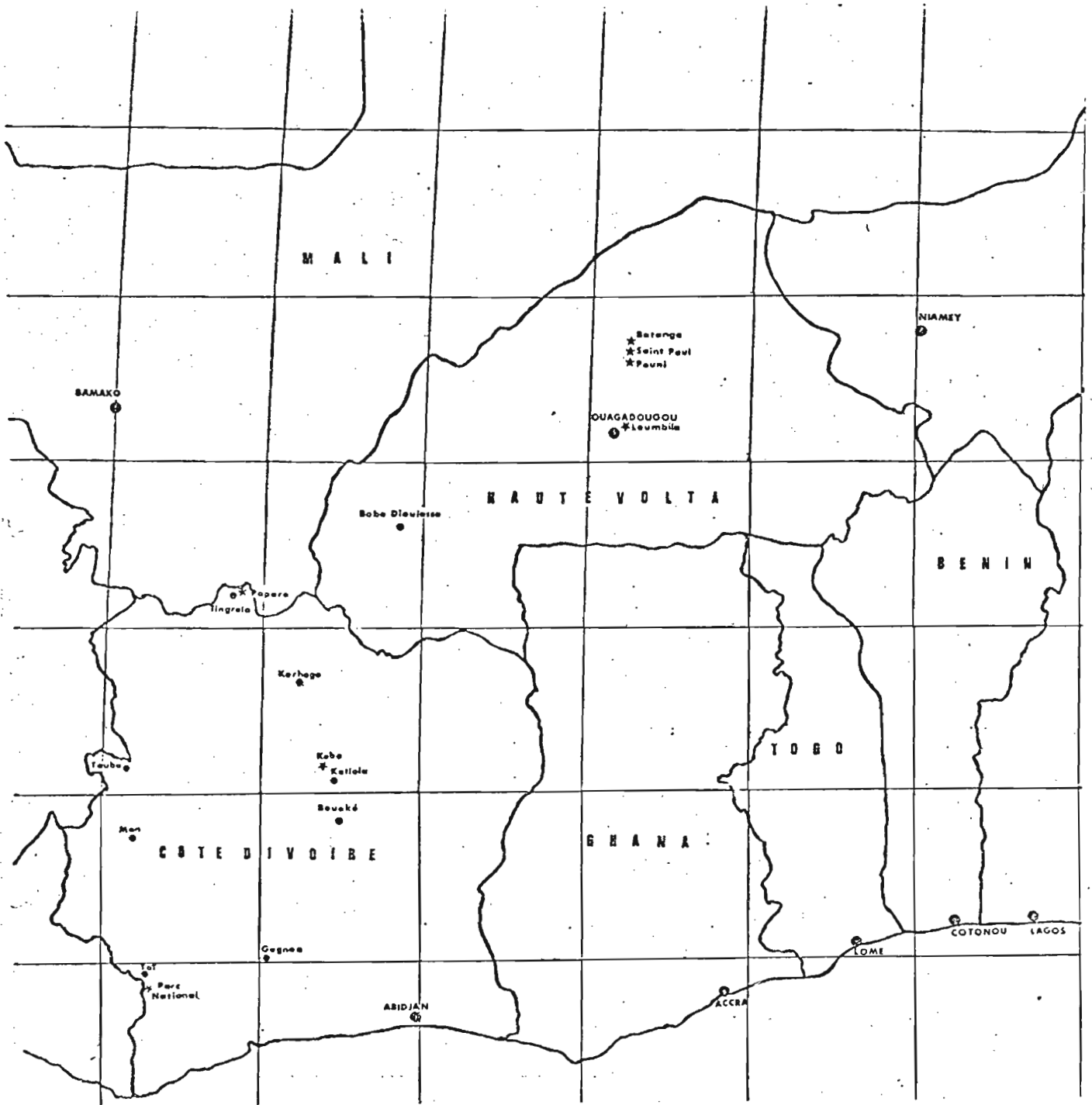
- a) Effets du couvert végétal
- b) Influence des affleurements d'éléments grossiers
- c) Effets de deux techniques culturales : labour, buttage.

III.3.3. Hydrodynamiques comparées de versants sous forêt et sous cultures traditionnelles

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

---



CARTE DE SITUATION

\* SITES EXPERIMENTAUX

## PREAMBULE

Des zones tropicales humides jusqu'aux zones sahéliennes, l'agressivité des pluies est à l'origine de ruissellements excessifs et de pertes en terres souvent considérables exportant simultanément support végétal et éléments fertilisants naturels ou ajoutés. Cette agressivité qui est plus une conséquence des intensités que des hauteurs des précipitations, se traduit par l'apparition d'une énergie cinétique dissipée au niveau du couvert végétal ou de la surface du sol. Dans ce deuxième cas, celle-ci modifie la structure donc la porosité des horizons pédologiques superficiels. Il se constitue plus ou moins rapidement un matériau stable dans des limites de contraintes données et *possédant toujours une conductivité hydraulique nettement plus faible que celle des horizons sous-jacents*. On conçoit dès lors qu'une attention particulière puisse être accordée à la dynamique de constitution de ce "filtre" superficiel qui peut correspondre soit à ce que l'on dénomme couramment des croûtes ou pellicules de battance, soit à des dépôts interstratifiés issus de colluvionnements et décantations successifs résultant plus exclusivement des courants de ruissellement.

Nous nous proposons donc, en parcourant *trois zones climatiques*, de dégager les exemples les plus caractéristiques de comportements hydrodynamiques de cette surface du sol en nous efforçant de comparer, chaque fois que cela est possible, le milieu naturel avec celui qui est remanié par différentes techniques culturales.

Cette multiplication d'exemples de complexes sol-végétation a été rendue possible par l'utilisation fréquente de différentes *techniques de simulation de pluies*. Ceci nous a permis de maîtriser un certain nombre de paramètres difficilement isolables lorsque l'on opère sous précipitations naturelles et en poste fixe.

Après avoir présenté la méthodologie, nous dégagerons les faits saillants provenant d'essais menés sur des toposéquences caractéristiques de la *zone soudano-sahélienne* de Haute-Volta, des *zones soudano-guinéenne* et *tropicale humide* de Côte d'Ivoire.

## I. LES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Ces études ont été menées à l'aide de deux types d'appareil dont les circonstances d'utilisation sont fonction de la nature des problèmes à traiter et de l'ampleur des moyens qu'il est raisonnable de mettre en oeuvre pour obtenir une information exploitable : le *simulateur de pluies* et l'*infiltromètre à aspersion*.

### I.1. LE SIMULATEUR DE PLUIES

Il s'agit d'un appareil dérivé du "rotating boom simulator" de SWANSON (1965). Il est muni de 10 bras horizontaux de 8 m de longueur percés de 30 gicleurs et tournant à la vitesse constante de 4 tours/minute. Le réglage de la pression de l'eau admise à l'appareil et l'orientation des gicleurs permettent de réaliser 4 intensités d'arrosage constantes de 30 - 60 - 90 - et 120 mm/h. La pluie simulée ainsi réalisée est spatialement homogène au niveau du sol et présente par ailleurs une énergie cinétique voisine de celle que l'on rencontre dans les pluies naturelles pour les gammes d'intensité précédentes. (VALENTIN 1978 a).

Le simulateur arrose une couronne circulaire de 200 m<sup>2</sup> à l'intérieur de laquelle on installe deux parcelles expérimentales de 50 m<sup>2</sup> (5 x 10 m).

La hauteur totale des averses et leur intensité sont contrôlées par des pluviomètres linéaires et un pluviographe enregistreur. Le ruissellement est connu sur chaque parcelle par les volumes écoulés enregistrés dans une cuve calibrée au moyen d'un limnigraphe, cette cuve est automatiquement vidée par intermittence.

La prise d'échantillons pour mesures de turbidité et transports en solution est réalisée dans des récipients calibrés par prélèvements directs au niveau du déversoir du canal ; comme l'on se place en amont de la cuve réceptrice, la méthode permet l'enregistrement du prélèvement sur le limnigramme et fournit ainsi un contrôle des temps.

Les protocoles expérimentaux visent à multiplier les états d'humectation initiale du sol, les hauteurs et les intensités des averses, trois facteurs les plus susceptibles d'intervenir sur les caractéristiques du ruissellement et de l'érosion. Pour étudier le rôle de chacun de ces facteurs indépendamment des deux autres, nous avons recours à des déplacements fréquents de l'appareil monté, de parcelles en parcelles, pour pouvoir disposer par exemple de la gamme de temps de ressuyage la plus étendue possible. En ce qui concerne les hauteurs et intensités des averses simulées, nous nous efforçons de réaliser des averses réaliste

en consultant toutes les données climatiques de la zone d'étude, et particulièrement les courbes "intensité-durée" (BRUNET-MORET, 1963-1967).

## I.2. L'INFILTROMETRE A ASPERSION

De conception plus récente (ASSELIN et VALENTIN, 1978), l'infiltromètre se compose d'un bâti démontable en forme de pyramide tronquée, supportant un mécanisme qui fait décrire un mouvement de balancier à un gicleur. Celui-ci arrose suivant l'intensité une surface variant de 3,5 à 14 m<sup>2</sup> ; par rapport au grand simulateur, l'originalité de cet appareil réside dans la possibilité de faire varier l'intensité en cours d'averse par réglages successifs de l'angle de balancement du gicleur. La gamme des intensités s'étend actuellement de 30 à 140 mm/h. Les aspersion à différentes intensités s'effectuent sur une parcelle de 1 m<sup>2</sup> délimitée à l'aide d'un cadre rigide enfoncé dans le sol ; à son aval, une gouttière collecte les eaux de ruissellement vers un limnigraphe enregistrant en continu les variations de régime. Des prélèvements d'échantillons pour étude de la turbidité sont également pratiqués.

Cet appareil permet aussi de réaliser de nombreux protocoles expérimentaux aboutissant à l'analyse du ruissellement et de l'infiltration correspondant à de multiples "événements-pluies" et "situations-sols". Il permet aussi d'étudier certaines modalités de l'érosion. (VALENTIN, 1978 a).

## II. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES PRINCIPAUX PROCESSUS OBSERVÉS

Qu'il s'agisse du simulateur de pluies ou de l'infiltromètre à aspersion, les informations fournies se présentent à deux niveaux :

- celui des *données de base* déjà intéressantes si l'on ne juge pas utile de dépasser le stade des bilans,

- celui de l'*analyse des processus élémentaires*, visant à dégager les lois ou modalités de la circulation de l'eau et de l'érosion pour toute une gamme d'évènements ou de situations.

### II.1. LES DONNEES DE BASE

Après le dépouillement des enregistrements limnigraphiques et le traitement en laboratoire des échantillons d'eau, on est en mesure d'établir pour chaque essai et chaque parcelle des *hydrogrammes* et des *turbidigrammes*.

En ce qui concerne le ruissellement, la figure n°1 représente le type d'hydrogramme que nous avons le plus souvent rencontré dans les trois zones climatiques. En abscisse sont portés les temps tandis qu'en ordonnée figurent les intensités (mm/h) des différents termes du bilan : intensité de l'averse simulée ( $I_t$ ), intensité du ruissellement ( $R_t$ ), intensité de l'infiltration ( $F_t$ ). On distingue schématiquement quatre phases qui sont :



- de l'origine jusqu'à  $t_i$ , la *phase d'imbibition* pendant laquelle, au début, l'intensité de l'infiltration dans le sol est supérieure à l'intensité de l'averse ; ensuite, des flaques d'eau se constituent lorsque localement, à partir du temps  $t_p$  l'intensité d'infiltration diminue suffisamment par rapport à celle de l'averse ; la lame d'eau stockée dès l'apparition du ruissellement correspond à  $S_i$ ,

- de  $t_i$  à  $t_m$ , le ruissellement commence et son intensité croît plus ou moins rapidement, il s'agit de la *phase transitoire* pendant laquelle il faut considérer plusieurs choses : diminution de l'intensité d'infiltration, augmentation de la hauteur de la lame d'eau en mouvement à la surface de la parcelle ( $D_m$ ), fin de remplissage de certaines flaques et débordement au temps  $t_s$  à partir duquel toute la superficie de la parcelle participe au ruissellement,

- de  $t_m$  à  $t_u$ , s'est instauré un *régime permanent du ruissellement*, cette phase permet de déterminer une valeur importante qui est le palier de ruissellement  $R_x$  à quoi correspond évidemment pour une averse d'intensité constante, une intensité minimale de l'infiltration qui est  $F_n$ ,

- dès l'arrêt de l'averse, entre  $t_u$  et  $t_f$ , le ruissellement diminue et s'annule, il s'agit de la *phase de vidange* pendant laquelle se produit une partition des réserves mobilisables ( $D_m$ ) entre ce qui s'infiltre ( $W_f$ ) et ce qui continue à s'écouler ( $D_r$ ) que l'on dénomme détention superficielle récupérable par le ruissellement.

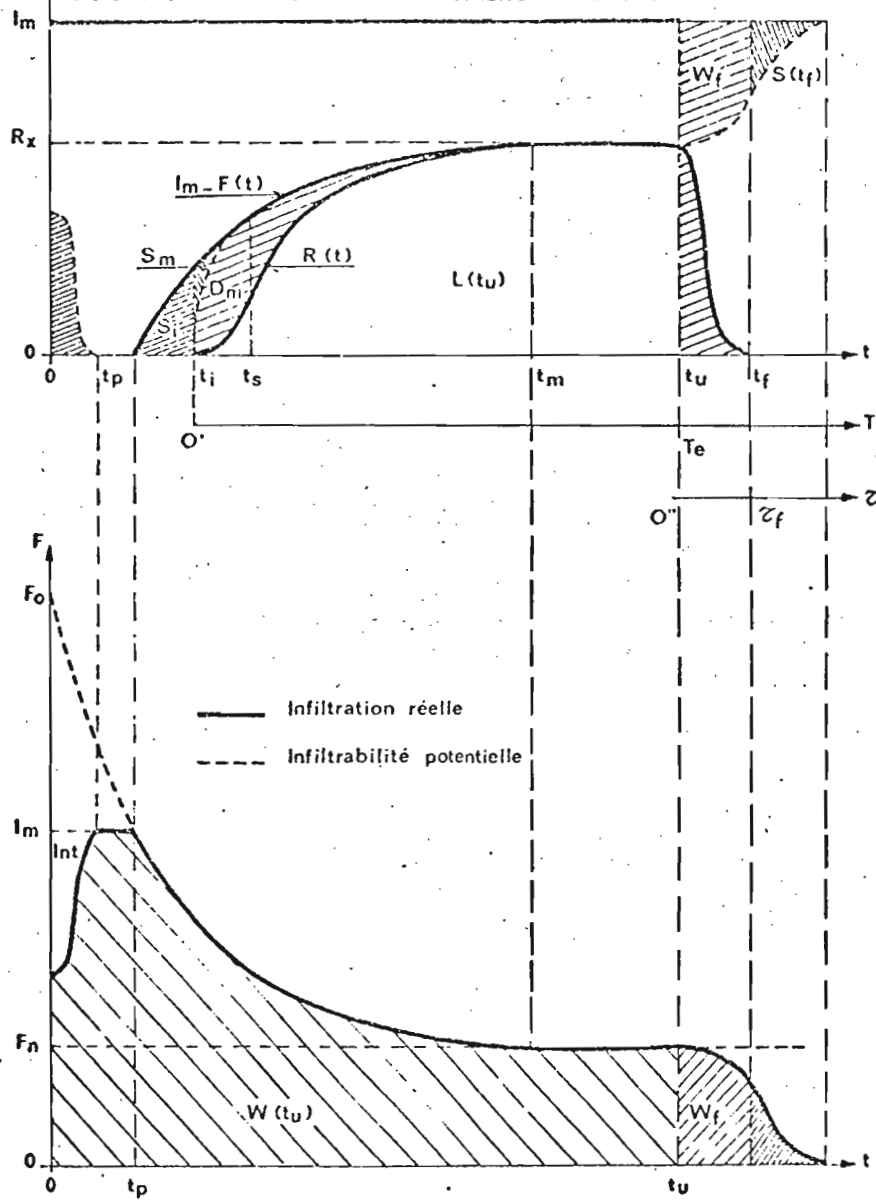
Chacune de ces quatre phases constitue autant de processus élémentaires susceptibles d'une analyse détaillée mais dès ce niveau de présentation il est possible de dégager les données simples suivantes :

- intensités maximales de ruissellement ( $R_x$ ), intensité minimale d'infiltration ( $F_n$ ),
- la détention superficielle récupérable ( $D_r$ ) obtenue par planimétrage ou directement sur le limnigramme,
- la lame ruisselée totale ( $L$ ) obtenue comme précédemment,
- la hauteur de pluie d'imbibition ( $P_i$ ),
- la lame d'eau infiltrée ( $W$ ),
- le coefficient de ruissellement global ( $K_r\%$ ).

En ce qui concerne l'*érosion*, le mode de représentation graphique est sensiblement différent (cf. figure n°2). Car le bilan pondéral de l'érosion ne peut être déterminé que par des observations discontinues par prises d'échantillons tout au long de l'averse. Pour un essai donné, on trace le turbidigramme qui est la courbe représentative de l'évolution de l'érodibilité, la conjugaison du turbidigramme et de l'hydrogramme permet d'obtenir le *solidigramme* qui est la courbe représentative de l'évolution de l'érosion ayant ici la dimension d'un débit solide souvent exprimé en grammes/seconde/hectare.

Le dépouillement d'un grand nombre d'essais (550) fait apparaître, heureusement, un nombre restreint de types de turbidigrammes correspondant à autant de modalités de l'érosion. Le type représenté sur la figure n°2 est le plus fréquent ; nous proposons une interprétation des variations de la turbidité, qui repose sur l'évolution au cours d'une pluie de ses différentes composantes qui la composent. Ces hypothèses s'appuient non seulement sur la forme générale des turbidigrammes mais également sur des observations de la surface des parcelles :

FIG 1



Infiltration sous averse d'intensité constante

- [A] Hyétogramme
- [B] Hydrogramme
- [C] Turbidigramme (lissé)
- [D] Solidigramme
- o Point de prélèvement
- \* Points caractéristiques
- maximum turbidité  $C_s$
- pseudo-palier  $C_x$

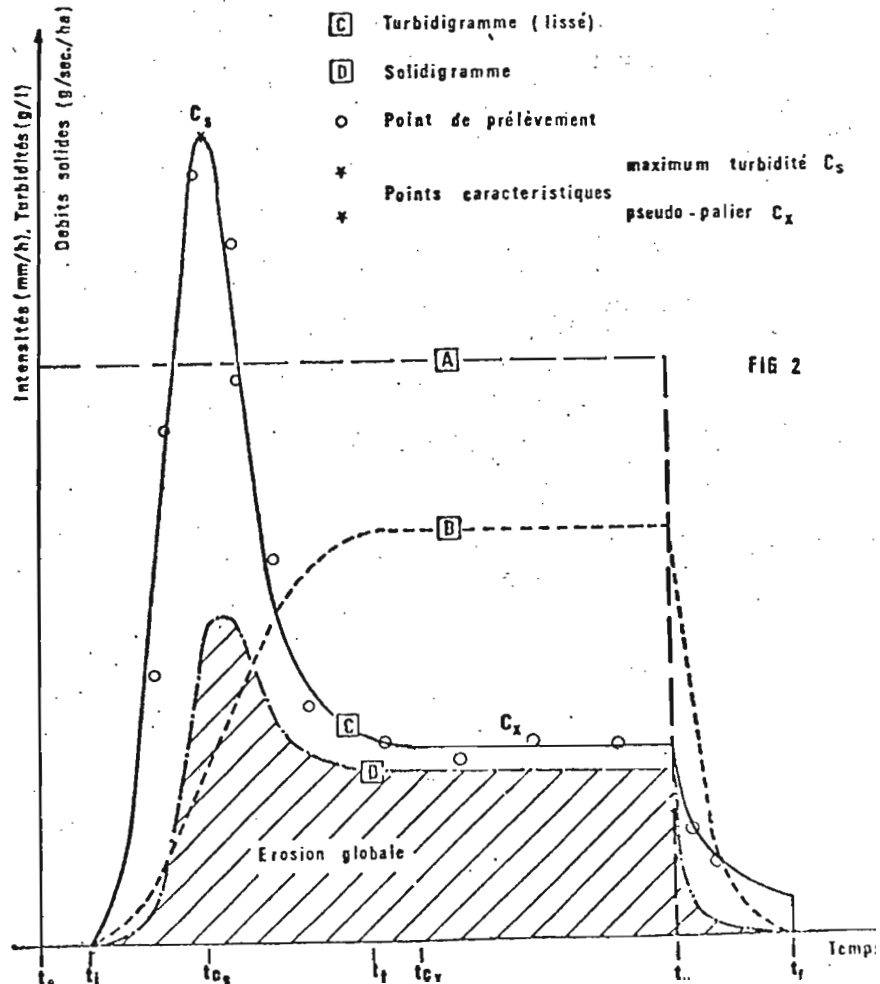


FIG 2

- pendant la phase d'imbibition se produit une mobilisation des éléments meubles ( $C_{st}$ ) disposés à la surface du sol, il s'agit de sédiments encore suffisamment humides de l'averse précédente, de dépôts éoliens, rejets biologiques etc., il s'ajoute une désagrégation par effet "splash" de certaines structures superficielles ( $C_{sp}$ ),

- pendant la phase transitoire du ruissellement, tous les éléments issus des deux composantes précédentes sont rapidement entraînés et il s'ajoute une troisième composante de l'érodibilité qui est due à l'abrasion superficielle du ruissellement, ou érosion en nappe ( $C_n$ ), le cumul de ces trois composantes aboutit au pic de turbidité  $C_s$ ,

- pendant le régime permanent du ruissellement la turbidité décroît et se maintient à un niveau constant ( $C_x$ ), on suppose que cet équilibre résulte de l'absorption de l'énergie cinétique des gouttes par la lame d'eau ruisselante, dès lors, l'érosion en nappe intervient à peu près uniquement, surtout pour des parcelles suffisamment longues (10 m),

- pendant la phase de vidange, la turbidité décroît et le ruissellement perdant sa compétence, de nouveaux sédiments se déposent sur le sol.

Il arrive plus rarement que, lors de la phase du régime permanent la turbidité se mette à augmenter brutalement et dépasse pour des averses suffisamment longues, largement le pic  $C_s$  ; cette modification de l'érodibilité en cours d'averse s'explique par l'apparition d'un cisaillement à la surface du sol, accompagné d'une reprise du "splash" car la hiérarchisation du ruissellement aboutit pour des lames ruisselées constantes à exonder des superficies de sol qui sont de ce fait de nouveau soumises à l'énergie cinétique des gouttes d'eau. Comme dans le cas du ruissellement, la consultation des turbidigrammes et des solidigrammes permet de dégager ou calculer les données simples suivantes :

- pic de turbidité ( $C_s$ ), paliers de turbidité ( $C_x$ ) et débits solides correspondants ( $Q_s$  et  $Q_x$ ),
- équation de la portion de courbe traduisant le ravinement
- érosion partielle ou totale obtenue par planimétrage du solidigramme ( $E$  kg/ha),
- turbidité moyenne par essai ( $C_m$ ).

## II.2. ANALYSE DES PROCESSUS ELEMENTAIRES

Cette analyse sera abordée plus précisément dans l'étude de des facteurs influençant l'hydrodynamique superficielle et nous n'en présenterons ici que les principales orientations. A l'occasion d'un grand nombre de campagnes il est apparu que, pour un site expérimental donné (un type de sol, un couvert végétal, une pente) l'état d'humectation antérieur et l'intensité des arrosages avaient une influence nette sur :

- la hauteur des pluies d'imbibition,
- les caractéristiques de la loi d'infiltration,
- la valeur de la détention superficielle,
- les valeurs caractéristiques de la charge solide.

En ce qui concerne par exemple, la *pluie d'imbibition*, dont la hauteur est une partie plus ou moins conséquente de la lame infiltrée, il devient possible de calculer des hauteurs d'imbibition théoriques relatives à différentes averses d'intensité donnée. Différentes approches ont d'autre part permis de définir une *loi de vidange* applicable à de multiples situations (LAFFORGUE, 1978) : il y a égalité des détentions mobilisables ( $D_m$ ) et récupérables ( $D_r$ ) dans le cas de sols plans et peu perméables et proportionnalité de la détention mobilisable au palier de ruissellement à un coefficient de rugosité près. Dans le cas moins théorique de parcelles perméables et non planes, le calcul de cette détention superficielle fait intervenir un coefficient supplémentaire définissant la portion de superficie offerte à l'infiltration. On a constaté que ces deux coefficients sont en relations étroites avec toutes causes susceptibles d'accentuer l'aplanissement du sol (stabilité des structures naturelles et artificielles), avec la pente et la longueur du versant. On a vu que les turbidigrammes permettent de distinguer différentes modalités de l'érosion et, dans une certaine mesure, la mise en relation des valeurs caractéristiques de la turbidité avec différents paramètres pluviométriques (temps de ressuyage, intensité) ou paramètres de situation (couvert végétal, travail du sol etc...) aboutit à une bonne compréhension des processus d'érosion.

### III. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE QUELQUES COMPLEXES SOL-VÉGÉTATION SUR L'HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE

#### III.1. DOMAINE SOUDANO-SAHELIEN

##### III.1.1. Le cadre naturel

En mars, avril et mai 1975, une campagne de simulation de pluies fut menée sur différents bassins versants de la Haute-Volta tributaires de lacs ou de réservoirs artificiels. Il s'agit du *Lac de Bam* près de la localité de Kongoussi ( $13^{\circ} 20' N$  et  $1^{\circ} 30' W$ ) (carte de situation) et de la *réserve de Loumbila* ( $12^{\circ} 30' N$  et  $1^{\circ} 30' W$ ) au nord de Ouagadougou.

##### a) Climat et végétation

Au niveau du Lac de Bam, la pluviométrie moyenne annuelle atteint 665 mm avec un maximum centré sur juillet et août et 7 mois de sécheresse. Les précipitations sont plus élevées sur Loumbila (900 mm/an) et le maximum est plutôt centré sur août et septembre, 6 mois sont écologiquement secs.

Dans les deux cas, on se situe dans le domaine de la savane arborée mais les bassins où se déroulèrent les expérimentations étaient surtout occupés par des jachères de plantation ou des plantations de l'année en mil, sorgho, coton ; à l'époque de notre intervention les récoltes étant faites, le sol se trouvait presque entièrement dénudé du fait du pâturage du bétail abondant près des points d'eau et de la récupération très active de tous déchets de culture utilisés pour le chauffage et la construction.

b) Modelés et sols. (cf. "Toposéquences et sites expérimentaux de Haute-Volta")

La région du lac de Bam est caractérisée par une surface ondulée culminant à environ + 300 m, sur formations birrimiennes, d'où émergent des plateaux cuirassés et petites collines de roches nues. Trois bassins versants y ont été étudiés : Pouni, Saint Paul et Batanga.

Le versant de Pouni (1000 m de demi-interfluve et 40 m de dénivelée) comporte des sols différenciés sur d'anciennes altérations ferrallitiques de schistes, plus ou moins abondamment recouvertes par des épandages gravillonnaires provenant des plateaux cuirassés limitant ce versant à l'amont.

- Le premier site expérimental - Pouni 11 - installé immédiatement au pied du plateau cuirassé, est un "sol peu évolué d'érosion sur matériau gravillonnaire (CPCS 1967). Il est en effet riche en nodules ferrugineux (40% en volume) jusqu'à 50 cm, la matrice rouge argileuse (60% d'argile) est peu poreuse. Vers 90 cm apparaissent les altérations des schistes. Localement la pente atteint 7,5%.

- Le second site - Pouni 12 - situé sur le mi-versant correspond à des sols très fortement gravillonnaires (55%) sur 90 cm avec une matrice meuble argilo-sableuse passant à argileuse (50%) vers 45 cm. On trouve ensuite des altérites irrégulièrement indurées vers 120 cm, puis vers 180 cm des altérites non indurées mais très tachetées. Les 40 premiers centimètres sont très poreux du fait de la faible proportion de terre fine par rapport aux éléments grossiers et aussi parce que ces horizons sont remaniés par des cycles culturels répétés. Il s'agit de "sols bruns eutrophes tropicaux, ferruginisés" (CPCS 1967) occupant des pentes de 2%.

- Le troisième site - Pouni 13 - de bas de versant correspond à une zone activement soumise aux cultures maraichères de décrue. Il s'agit de "sols ferrugineux tropicaux, peu lessivés, hydromorphes" et de "sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley" (CPCS 1967). Par opposition aux sols précédents, ils sont totalement dépourvus d'éléments grossiers, jaunes argilo-sableux sur 120 cm puis de plus en plus abondamment tachetés jusqu'aux altérites de schiste apparaissant vers 175 cm. On note un net appauvrissement en colloïdes argileux (indice d'entraînement = 1/2,5). Localement la pente ne dépasse pas 0,9%.

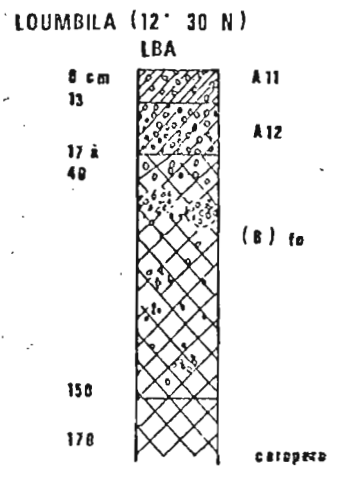
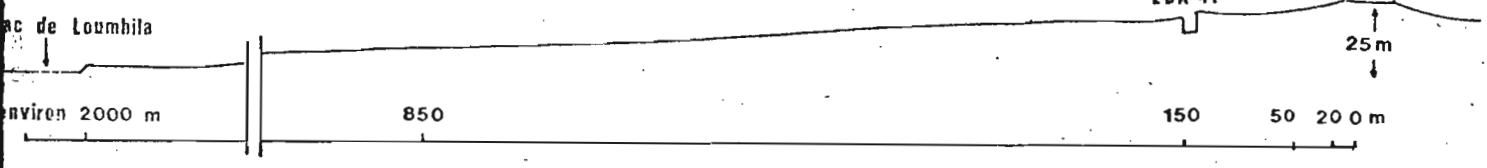
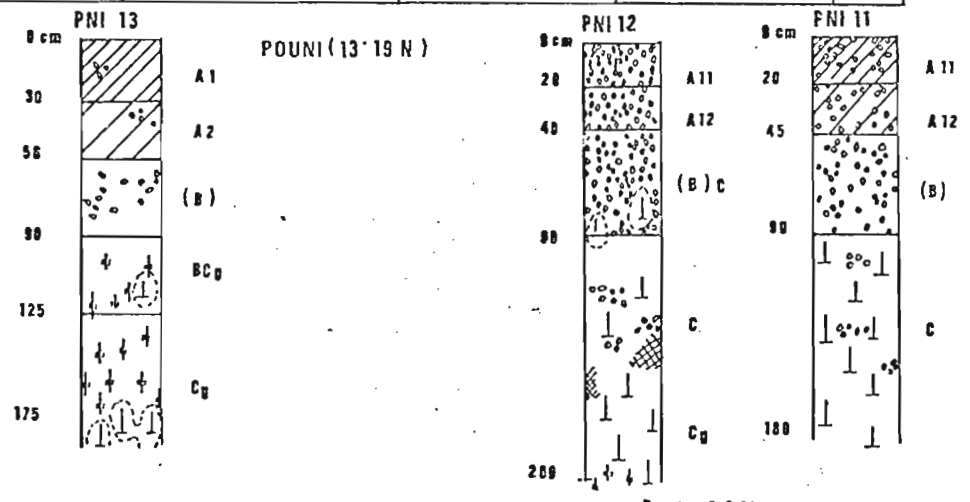
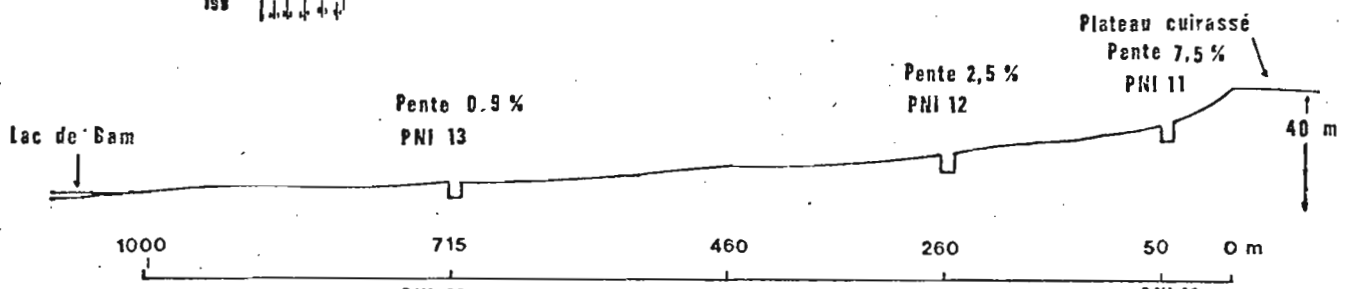
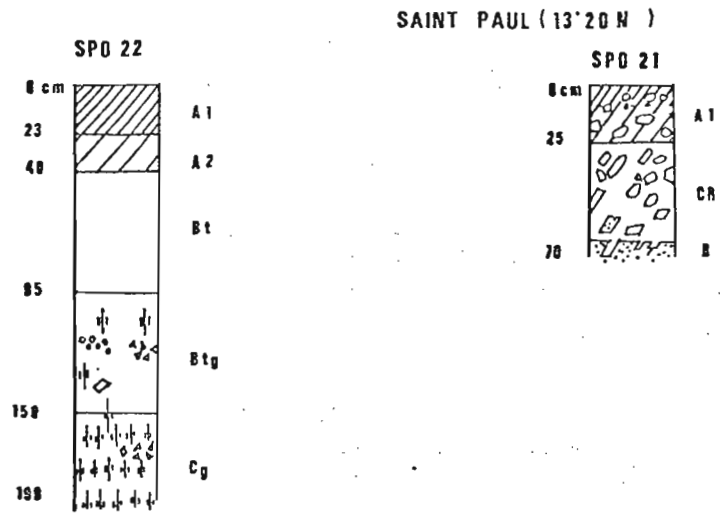
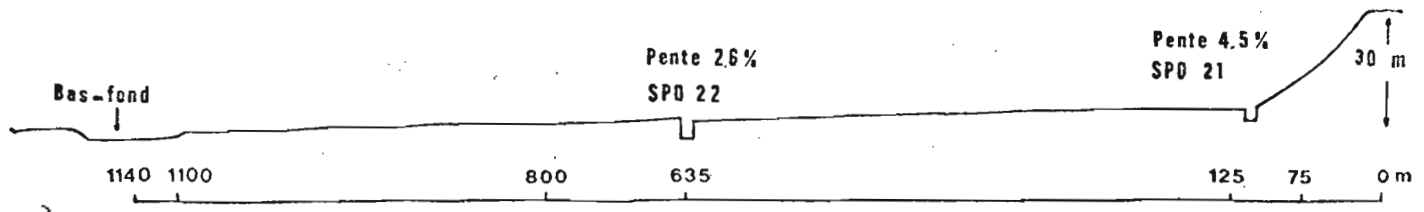
Sur le versant de Saint Paul (1100 m de longueur et 30 m de dénivelée) furent installés deux sites expérimentaux correspondant à deux types de sols développés sur quartzites birrimienne

- Le premier site expérimental - Saint Paul 21 - fut installé tout à fait au pied du chaînon de quartzite, sur un étroit glacis d'épandage peu pentu (4,5%), sur des sols sableux peu épais à nombreux fragments rocheux surmontant vers 50 ou 70 cm la dalle de quartzite non ou peu altérée.

- Le second site - Saint Paul 22 - correspond au milieu du versant rectiligne (pente = 2,6%). Les fragments rocheux disparaissent et les sols s'approfondissent. Ils sont rouge-jaunâtre, sableux puis sablo-argileux (20% d'argile), peu structurés sur 150 cm au delà desquels on trouve un horizon fortement tacheté, non induré largement poreux.

Saint Paul 21 (SPO 21) est un "sol peu évolué d'érosion, lithique"

Saint Paul 22 (SPO 22) est un "sol ferrugineux tropical, lessivé, hydromorphe" (CPCS 1967).



**TOPOSEQUENCES ET  
SITES EXPERIMENTAUX  
DE HAUTE-VOLTA**

Enfin, les derniers sites expérimentaux BTG 31 et BTG 32 furent établis sur le *versant de Batanga* également peu pentu (0,5 à 1%) et présentant une majorité de "sols bruns eutrophes, tropicaux à caractères vertiques" (CPCS 1967). Leur surface est abondamment fissurée et ils présentent une structuration très nette sur les 15 premiers centimètres, ils sont brun-foncé, contiennent 45% d'argile réparties de façon très homogène sur au moins 170 cm.

La région de *Loumbila* est représentative de ce que l'on dénomme localement "le plateau Mossi". Il s'agit en fait d'une surface plane à très largement ondulée sur granites calco-alcalins. Les interfluves atteignent 4,5 km, les dénivelées sont peu importantes (15 à 20 m), les sommets sont plan-convexe et possèdent des affleurements gravillonnaires ou sont, plus rarement, cuirassés.

- Le *site Loumbila 41* (LBA 41) - a été implanté sur la partie haute d'un versant descendant sur le réservoir de Loumbila, la pente atteint localement 1,4%. Le sol est d'abord constitué par un horizon gravillonnaire parfois recouvert sur quelques centimètres d'un voile sableux d'origine éolienne, vers 20 ou 35 cm apparaît une carapace soudant les nodules ferrugineux et se poursuivant au moins jusqu'à 175 cm. La matrice meuble des premiers décimètres est sableuse puis sablo-argileuse.

En résumé nous avons testé dans ce domaine soudano-sahélien le comportement de sols :

- argileux, appauvris à affleurements gravillonnaires : PNI 11 et 12,
- argilo-sableux, meubles, profonds, lessivés : PNI 13,
- sablo-graveleux et caillouteux peu profonds : SPO 21,
- sablo-argileux, meubles, profonds, lessivés : SPO 22,
- argileux, vertiques, homogènes, profonds : BTG 31 et 32,
- sablo-argileux, gravillonnaires, carapacés à faibles profondeurs : LBA 41.

En exceptant certains hauts de versant (SPO 21 et PNI) les pentes sont uniformément faibles (0,5 à 2,5%).

### III.1.2. Comportements hydrodynamiques

Chaque fois que cela sera possible nous comparerons les réactions de sols dans leur état naturel avec celles de sols ayant subi les traitements suivants :

- labour selon les normes de WISCHMEIER (1960)
- buttage cloisonné,
- nouveau labour protégé par un mulch de pailles.

L'analyse des différentes phases du ruissellement permet de dégager progressivement toutes les composantes entrant dans l'étude de l'infiltrabilité des sols ainsi que certaines caractéristiques de la surface du sol la contrôlant fortement. Nous rappellerons dans chaque cas le raisonnement théorique permettant de dégager les résultats pratiques.

a) Pluie d'imbibition

Présentation théorique

Une série de relations dégagées de faits expérimentaux permet de calculer les hauteurs théoriques de pluies d'imbibition relatives à des averses de différentes intensités. En se rapportant à la figure n°1 représentant un hydrogramme théorique, on constate que cette hauteur d'imbibition est la somme de quatre termes (on néglige l'interception quasiment nulle lors de nos essais) (LAFFORGUE 1977):

- la hauteur d'eau infiltrée jusqu'à l'apparition des flaques :  $W_p$  qui est de la forme

$$W_p = C (I) (\theta_s - \theta_0) \quad (1)$$

avec

$I$  = intensité de l'averse

$\theta_s - \theta_0$  = différence de teneur en eau entre la saturation et l'humidité en début d'averse, souvent remplacée en Haute-Volta par le paramètre  $t_a$  qui représente le temps de ressuyage entre deux averses consécutives et qui est d'une utilisation plus commode car peu influencée par les hétérogénéités du sol.  $t_a$  est relié aux déterminations humidimétriques par une équation rendant compte de la diminution exponentielle de l'humidité dans les horizons supérieurs du sol :

$$\theta(t) = \theta_s \cdot e^{-\alpha t} \quad (2)$$

- la lame d'eau immobilisée sous forme de flaques jusqu'au temps  $t_i$  :  $S_i$

- la hauteur d'eau s'infiltrant entre l'instant où se forment les flaques et celui où elles débordent :

$$W_i - W_p$$

$$W_i - W_p = C_2 (I) \cdot (\theta_s - \theta_0) + H_i \quad (3)$$

de la même forme que (1) auquel s'ajoute la hauteur d'eau s'infiltrant dans un sol saturé juste avant le début du ruissellement :  $H_i$

- la hauteur de la lame d'eau ruisselant, en transit, donc fonction des dimensions du dispositif expérimental et qui varie linéairement avec l'intensité de l'averse :  $S_r$  et l'on a

$$P_i = W_p + S_i + (W_i - W_p) + S_r \quad (4)$$

A partir de (2) et (3) la relation devient

$$P_i(t_a) = C \cdot \theta_s (1 - e^{-\alpha t_a}) + H_i \quad (5)$$

Dans cette formulation, on dispose expérimentalement de trois paramètres qui sont :

-  $H_i$  est déterminé en réalisant des pluies très peu espacées sur un sol saturé et l'on a  $P_i(\infty) = P_i(0) = H_i$

- sur sol sec (première averse) on a  $P_i(\infty) = C \cdot \theta_s + H_i$

- pour obtenir  $\alpha$  on utilise les relations précédentes et l'on a :

$$\alpha t_a = \text{Log} \frac{P_i(\infty) - P_i(0)}{P_i(\infty) - P_i(t_a)} = f(t_a)$$

les différents essais permettent d'extraire la pente  $\alpha$  de la droite d'ajustement  $f = \alpha(t_a)$ .



FIG 3

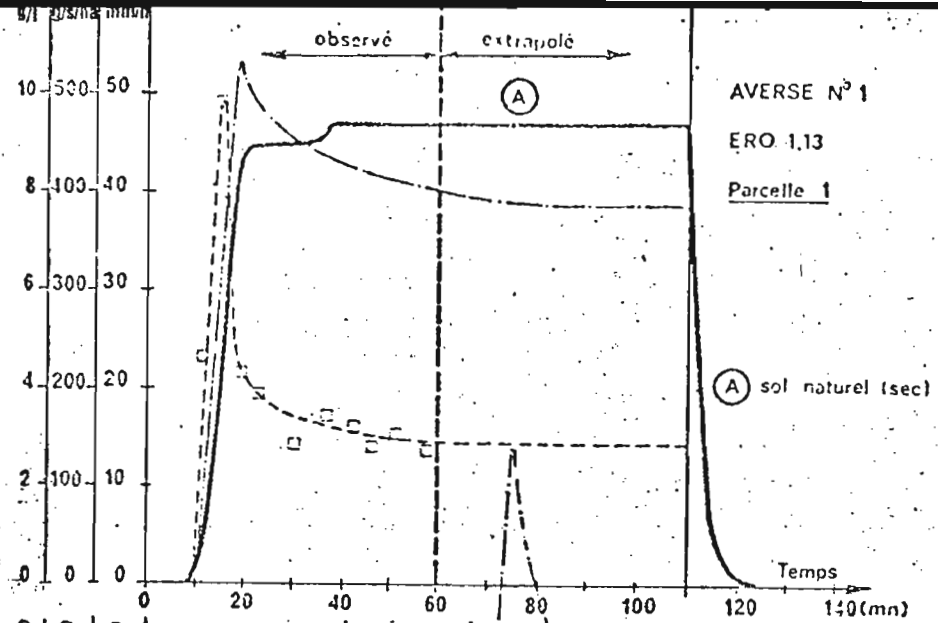
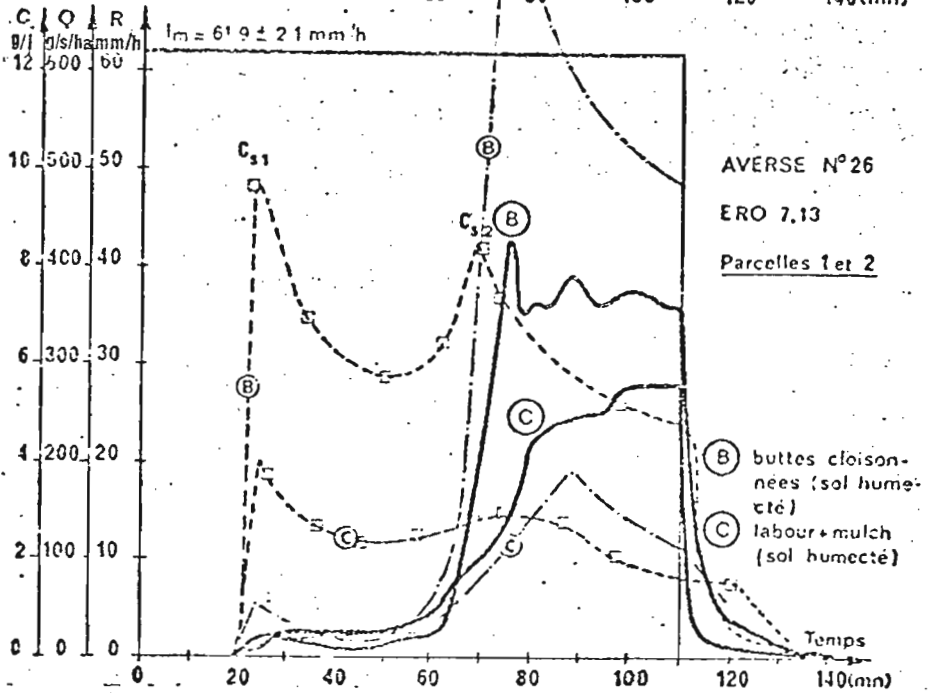


FIG 4



TABEAU I : PLUIE D'IMBIBITION sous 60 mm/H

Nature du traitement	Références	PNI.11	PNI.12	PNI.13	SPO.21	SPO.22	BTG.31	BTG.32	LBA.41
Parcelles à l'état naturel (sol non remanié)	$P_f(\infty)$ (mm)	5,4	11,4	8,4	8,5	12,1	-	8,9	8,7
	$P_f(0)$ (mm)	1,3	2,4	1,13	2,2	1,3	1,28	1,8	1,6
	$P_f(\infty) - P_f(0)$	4,1	10,0	7,3	6,3	10,8	-	7,1	7,1
	$\alpha$ (Heure <sup>-1</sup> × 10 <sup>3</sup> )	(23,3)	12,0	9,1	(9,7)	3,4	-	17,0	7,5
Sol labouré initialement sec	$P_f(\infty)$ (mm)	14,8	>15,0	15,5	15,3	18,8	-	14,3	9,9 (15,2)
	$P_f(0)$ (mm)	1,45	3,00	1,13	1,55	0,90	1,02	1,08	1,70
Sol labouré en humide	$P_f$ (mm)	-	-	-	-	10,1	15,4	-	-
Buttage cloisonné	$P_f$ (mm)	-	12,8	20,1	-	-	-	12,8	15,7
	$P_f$ (mm)	-	66,0	62,0	-	-	-	42,7	>73,0
Simple labour + paille	$P_f$ (mm)	-	16,5	20,5	-	-	-	6,7	6,2
	$P_f$ (mm)	-	51,0	52,0	-	-	-	30,9	>112,0

### Résultats pratiques

Le tableau n° I représente les hauteurs d'imbibition sur sols initialement secs -  $P_i(\infty)$  - et sols saturés -  $P_i(o)$  -, à 60 mm/h d'intensité et pour différentes situations : sol naturel, labour, buttes cloisonnées et labour protégé par un mulch.

On constate que dans leur *état naturel*, des sols morphologiquement très différents présentent des hauteurs d'imbibition faibles et surtout très peu dispersées :

- sur sols initialement sec on a des valeurs voisines de 8 à 9 mm,
- sur sol très humide le regroupement est encore plus flagrant entre 1,5 et 2,5 mm.

Après *labour*, on continue à observer pour des sols très différents, des hauteurs de pluies d'imbibition très regroupées oscillant autour de 15 mm. Le labour a pour effet d'augmenter de 5 à 10 mm la valeur  $P_i(\infty)$  tout au moins au cours de la première averse, car cet effet favorable s'estompe rapidement au cours des averses suivantes et l'on retrouve alors des imbibitions identiques à celles de sols non remaniés. Il semble même qu'à la longue, sur tous sols dépourvus d'éléments grossiers, le labour favorise un glaçage de la surface car les valeurs  $P_i(o)$  relevées ont tendance, en fin de protocole, à se trouver inférieures à celles obtenues sur sol non remanié.

Les *deux autres traitements* ont pour but d'augmenter le stockage superficiel, dans le cas du buttage, ou de limiter la bat-tance des gouttes de pluie, dans le cas du mulch. Les figures n°3 et n°4 présentent trois hydrogrammes correspondant respectivement :

- au témoin naturel - A - (averse ERO 113),
- aux buttes cloisonnées - B - (averse ERO 713),
- au labour mulché - C - (averse ERO )... sur le sol du site PNI 13. Leur confrontation avec les données du tableau n° I montre que le mulching aussi bien que le buttage cloisonné entraînent un gain considérable à l'infiltration pendant la phase d'imbibition. Ce gain est d'autant plus élevé que les mottes de labour résistent mieux à la désagrégation, qu'il s'agisse d'une stabilité structurale correcte ou d'une protection efficace de ces structures créées artificiellement. Dans le cas le plus favorable (paillage d'un labour de sol gravillonnaire de faible pente : LBA 41), le gain à l'infiltration dépasse 100 mm tandis que sur BTG 32 où l'on a pu voir une limite de liquidité atteinte rapidement en surface (moins de 20% d'agrégats stables aux différents tests de stabilité) HENIN et MONNIER (1956), ce gain ne dépasse pas 30 mm. En ne considérant que la vitesse de disparition des effets recherchés sur un simple labour, il apparaît que ceux-ci sont durables lorsque l'on a affaire à des sols gravillonnaires mais qu'inversément, leur existence est éphémère sur sols meubles surtout argileux.

Ces premières constatations seront étayées en poussant plus avant cette analyse des processus élémentaires.

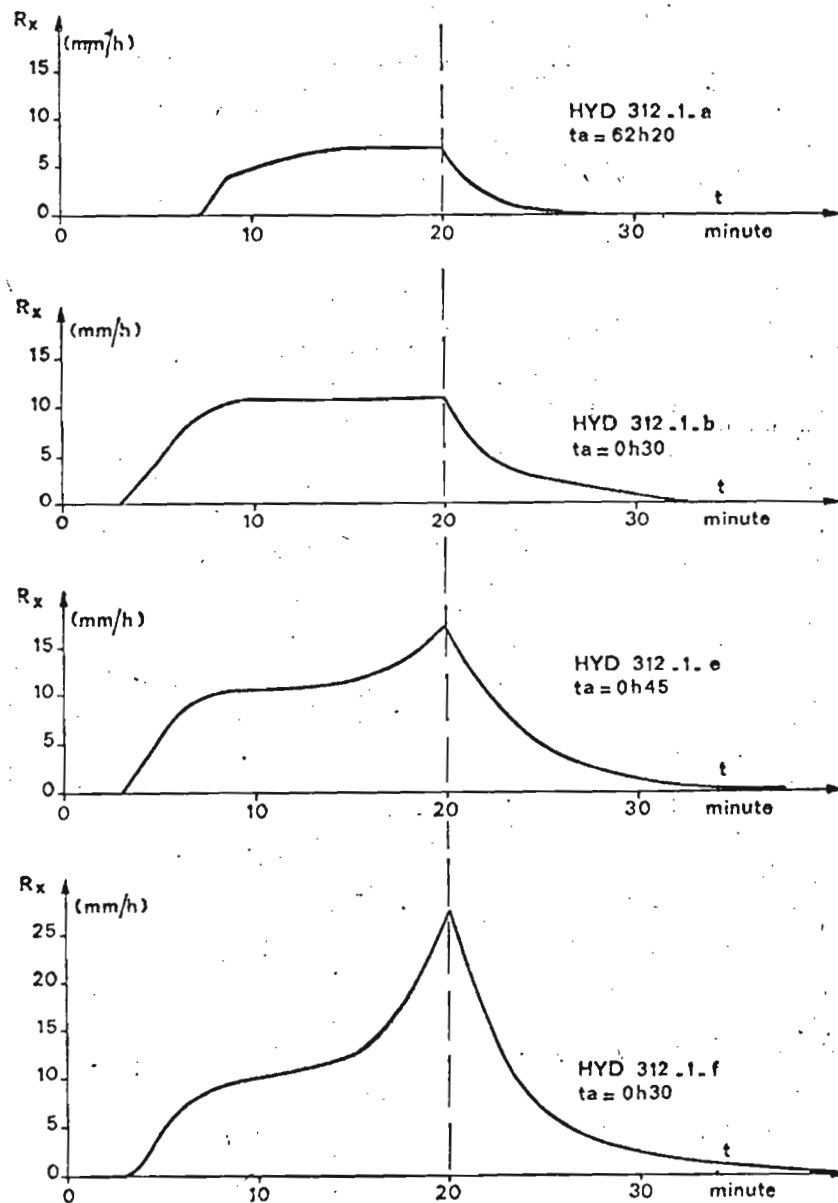
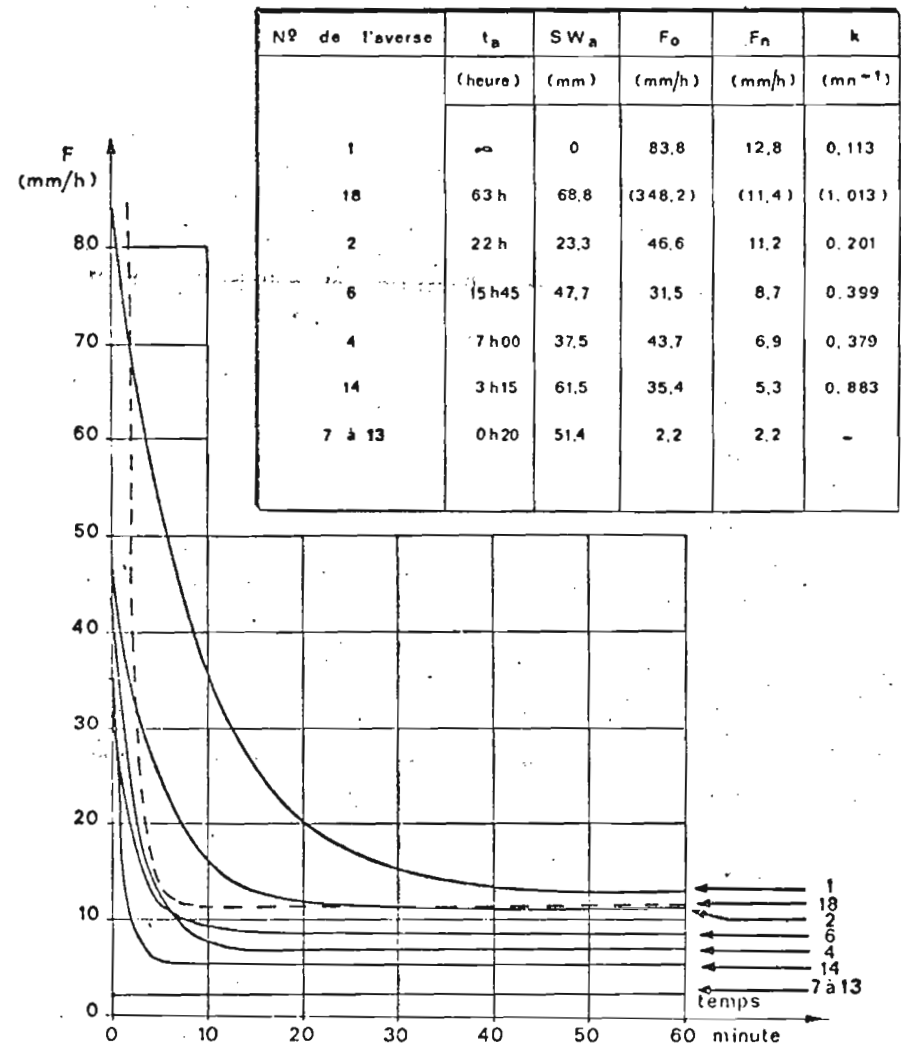


FIG 5 Evolution des hydrogrammes de ruissellement sur PNI12.1 pour des averses identiques mais des profondeurs d'humectation croissantes



Parcelle PNI.13.1

FIG 6 Variation de l'infiltrabilité moyenne du sol de la parcelle selon une loi de la forme  $F = F_N + (F_0 - F_N) e^{-kt}$

## b) Phase du régime transitoire

### Présentation théorique

L'analyse de cette phase est intéressante car elle permet d'établir une loi rendant compte de la diminution de l'infiltration entre l'intensité initiale  $F_0$  relativement élevée et l'intensité minimale  $F_n$  atteinte lors de l'instauration du régime permanent du ruissellement.

La loi exponentielle de HORTON (1938) est celle qui s'ajuste le mieux aux données du terrain, elle est de la forme :

$$F(t) = F_n + (F_0 - F_n) e^{-kt}$$

ou  $k$  est une constante pour des conditions initiales données et  $t$  est le temps écoulé depuis le début de la pluie.

$F_n$  est connu expérimentalement. Deux équations qui ne seront pas développées ici, permettent d'obtenir les valeurs de  $F_0$  et  $k$ . Elles tiennent compte des lames infiltrées  $W_i$  et  $W_u$  aux temps  $t_i$  et  $t_u$  (cf. figure n°1). La détermination de  $W_i$  est également expérimentale car elle représente la différence entre la hauteur de pluie d'imbibition  $P_i$  et la lame d'eau stockée dans les flaques  $S_i$ .

$W_i = P_i - S_i$ , la hauteur  $S_i$  étant déduite d'un hydrogramme issu d'essais successifs à intensité constante sur un sol saturé où l'on a  $F_n = F_0 = F_i$  avec  $F_0 = F_n < I$ .

Des limites à cette méthode se manifestent cependant dans certaines conditions :

- Il n'est pas toujours possible d'atteindre le palier  $R_x$  (donc  $F_n$ ) ce qui s'est par exemple produit sur le site PNI 12 (cf. figure n°5) où l'hétérogénéité du sol se traduit par des modifications du régime d'infiltration. Le pseudo-palier apparaissant entre 10 et 15 minutes correspond à une intensité d'infiltration contrôlée par une conductivité hydraulique homogène dans les quelques 20 premiers centimètres ; le décrochage vers 15 minutes au bout de la 5ème averse (HYD 312. 1.e) correspond au ralentissement de la propagation du front humide lors du passage dans l'horizon sous-jacent moins conducteur.

- Il faut que le volume de stockage de la lame  $S_i$  ne se modifie pas d'un essai à l'autre, or nous savons déjà que la surface des parcelles est métastable ; ces évolutions sont encore plus évidentes sur les parcelles labourées à structure non stabilisée.

### Résultats expérimentaux

Les deux remarques précédentes entraînent l'exclusion des données provenant des parcelles PNI 12, BTG 31 et 32 ainsi que celles des parcelles labourées. Les résultats sont plus cohérents dans tous les autres cas et il est possible d'extraire de la figure n°6 illustrant les variations de l'infiltrabilité sur PNI 13.1 recevant des averses de 60 mm/h, les faits saillants suivants :

- évolution régulière des infiltrabilités avec les différents états d'humectation ( $t_a$ ),

- le paramètre de forme  $k$  est d'autant plus élevé que le sol est initialement plus humide,

- les paramètres de position  $F_0$  et  $F_n$  sont des fonctions décroissantes de cette humidité initiale ( $F_n = F_0 = 2,2$  mm/h avec  $t_a = 0$  h 20 mn).

Ces remarques sont confirmées en général pour les autres parcelles dont les résultats sont regroupés sur le tableau n°II où figurent les paramètres de HORTON (1938) relatifs à différents états d'humectation ( $t_a = 0h\ 20\ mn$ ,  $t_a = 20\ h$ ,  $t_a =$  plusieurs mois). Pour ces sols de Haute-Volta, les valeurs obtenues pour l'infiltrabilité finale  $F_n$  sont peu élevées et voisines les unes des autres (de 12 à 15,5 mm/h sur sols secs et entre 2 et 8 mm/h sur sols très humectés). Les valeurs de l'infiltrabilité initiale sont également relativement faibles (50 à 120 mm/h sur sols secs) mais plus dispersées. Par contre, le paramètre de forme  $k$  prend des valeurs très voisines d'un type de sol à un autre. A l'issue de cette seconde analyse, on trouve encore une convergence du comportement de sols morphologiquement différents. Leur faible perméabilité s'explique par la formation de pellicule de battance à faible conductivité hydraulique contrôlant toute infiltration et l'on se rend compte particulièrement ici que des tests ne considérant que la porosité des horizons profonds pourraient conduire à une forte surestimation des intensités d'infiltration.

### c) Phase de vidange

#### Présentation théorique

Nous venons de voir qu'il est possible de dégager des lois caractérisant l'infiltration, qu'il s'agisse de la part revenant aux hauteurs de pluies d'imbibition ou de celle se produisant pendant le ruissellement. Nous abordons maintenant l'étude de la phase de vidange dont l'intérêt ne réside pas tellement dans les ultimes quantités d'eau ruisselée ( $D_r$ ) qui sont très faibles en regard de la lame ruisselée totale ( $L$ ). Mais surtout dans la forme des relations liant la détention superficielle à l'intensité du ruissellement. En effet des paramètres caractérisant la morphologie de la surface du sol peuvent ainsi être mis en évidence.

Revoyons quelques définitions et les relations reliant  $D_r$  et  $D_m$  :

-  $D_m$  est la détention superficielle mobilisable ; elle correspond à la lame d'eau en mouvement à la surface du sol pendant l'averse,

-  $D_r$  est la détention superficielle récupérable pour le ruissellement, elle correspond à la lame d'eau qui s'écoule après la fin de l'averse.

Dans le cas le plus général des sols perméables, on observe une partition de  $D_r$  en différentes hauteurs d'eau qui sont

$$D_r = D_m + S(t_u) - S(t_f) - W_f \quad (\text{LAFFORGUE 1977})$$

avec  $W_f$  = hauteur d'eau infiltrée entre le temps  $t_u$  et  $t_f$ ,

$S(t_u) - S(t_f)$  - différence de hauteur d'eau stockées dans les flaques entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement.

Plusieurs cas sont à envisager :

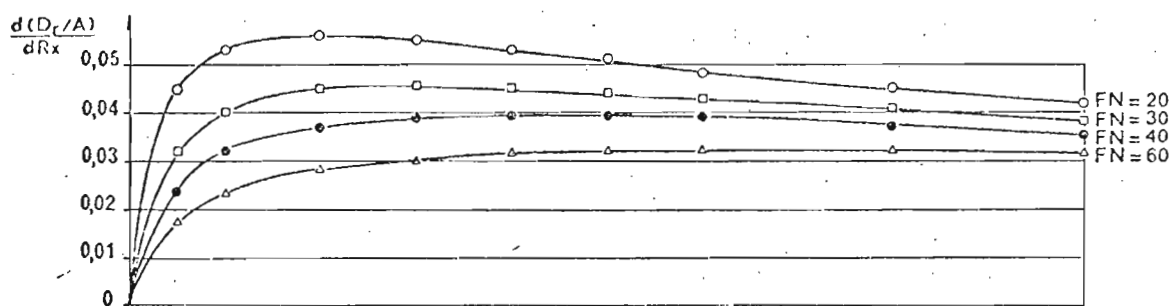
- cas théorique de sols plans et totalement imperméables :  $D_m$  est relié à  $R_x$  par la relation

$$D_m = A \cdot R_x^m$$

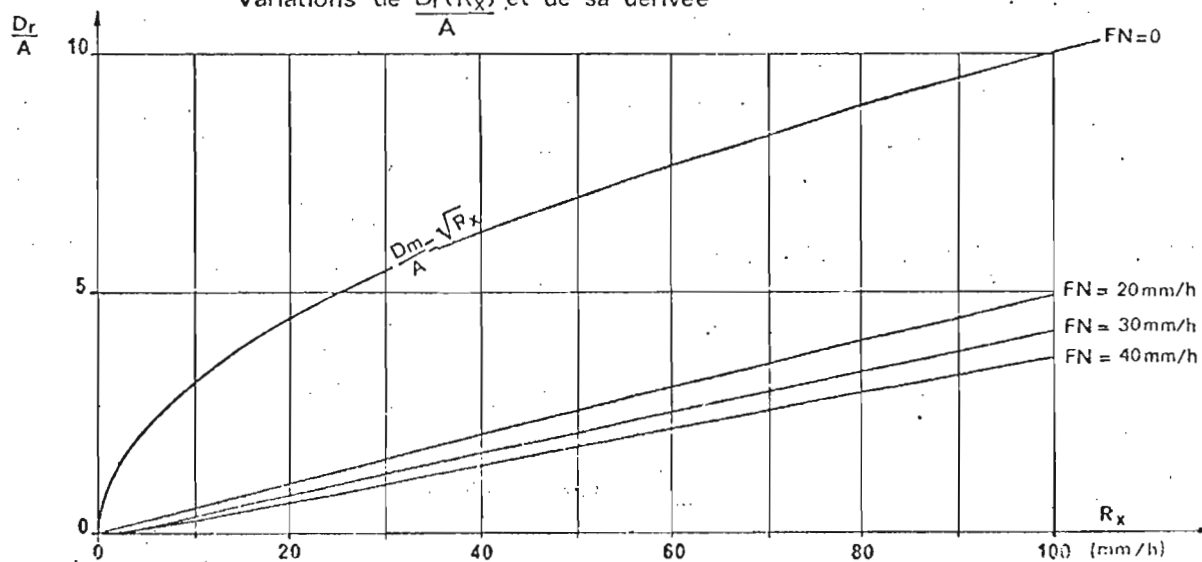
TABLEAU II - Paramètres de la loi de Horton pour des états d'humectation initiale du sol caractéristiques (sol sec, sol ressuyé depuis 22 heures et sol saturé)

Référence parcelle	$t_a$	$S_i$ (mm)	$F_N$ (mm/H)	$F_o$ (mm/H)	$k$ (mm <sup>-1</sup> )	Observations
PNI 11.1	5 mois 22 H O H 20	1,0	16,4 (12,4) 6,3	67,3 6,3	0,186	Palier de ruissellement non atteint
PNI 13.1	5 mois 23 H O H 20	0,8	12,8 11,2 2,2	83,8 46,6 2,2	0,113 0,201	
SPO 21.1	5 mois 23 H O H 20	1,7	26,8 7,7	55,8 7,7	0,079	Palier de ruissellement non atteint
SPO 22.1	5 mois 22 H O H 20	0,6	14,4 6,8 5,9	122,4 35,8 5,9	0,110 0,145	
LBA 41.1	5 mois 22 H O H 20	0,9	11,9 (9,7) 6,8	92,9 42,3 6,8	0,130 0,133	Valeur du palier imprécise

FIG 7



Variations de  $\frac{D_r(R_x)}{A}$  et de sa dérivée



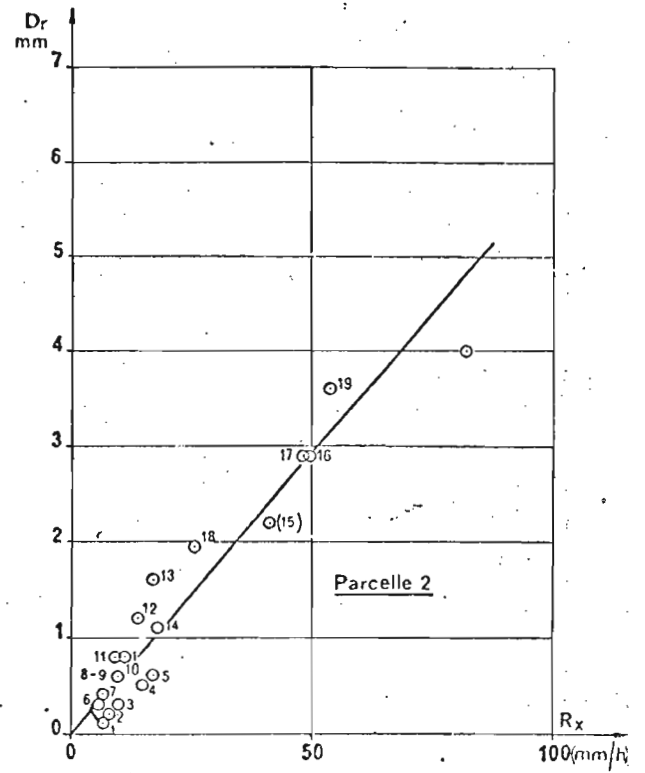
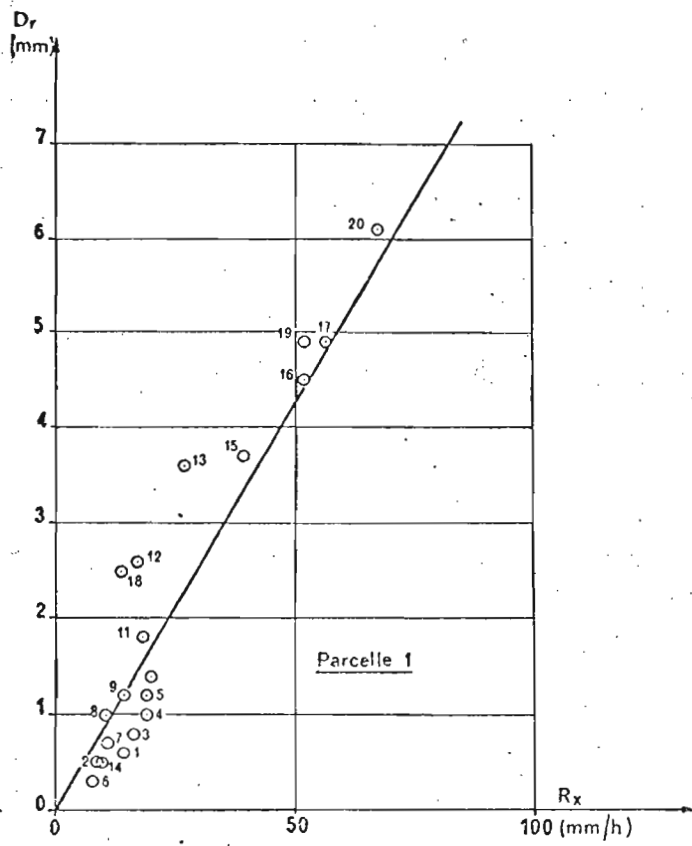


FIG 8 Détection superficielle sur BTG 32

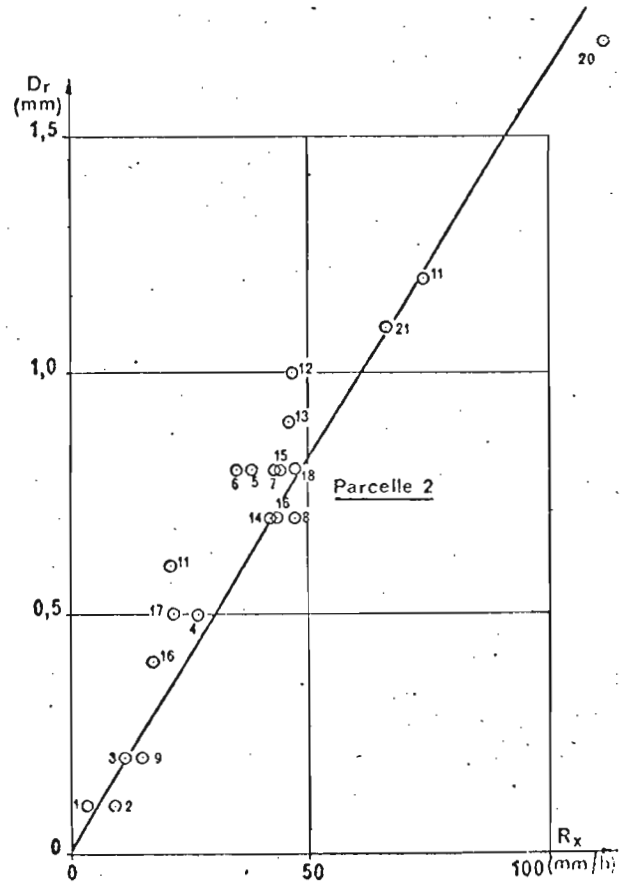
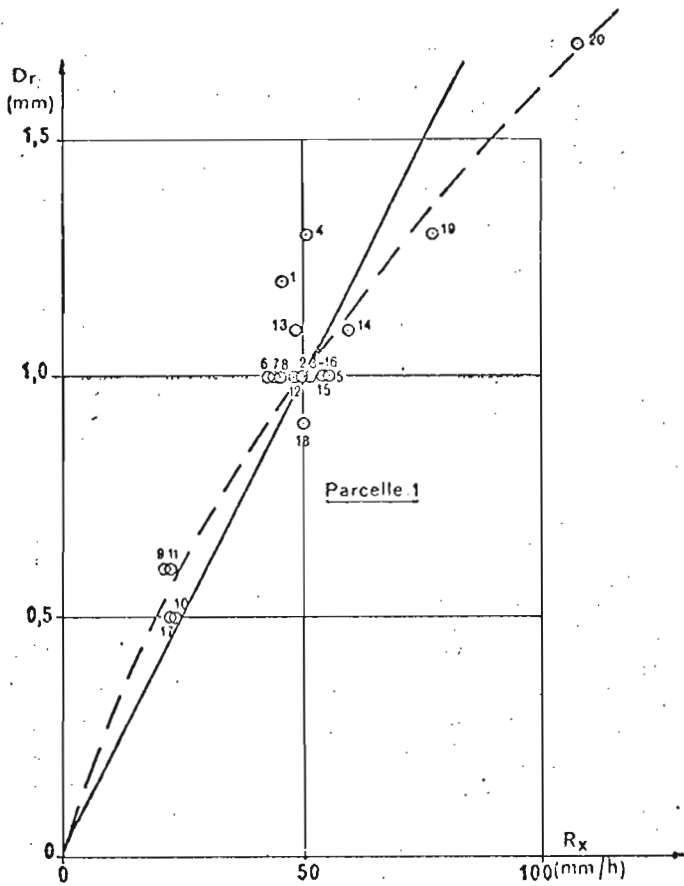


FIG 9 Détection superficielle sur SPO 22

Ceci confirme bien que la résistance s'opposant au ruissellement diminue avec la pente topographique et augmente avec la rugosité. En ce qui concerne ce dernier facteur on constate que la présence d'éléments grossiers sur un sol nu joue le même rôle que celui d'un couvert végétal dense. Au niveau du tableau n°III on constate que les valeurs du paramètre A de Haute-Volta, plus strictement imputables à la rugosité, car les pentes topographiques sont les mêmes, sont peu affectées par le labour dont les effets s'atténuent très rapidement. On constate même des valeurs de A inférieures à celles des parcelles non labourées (PNI 11 et BTG 32).

En ce qui concerne le paramètre  $\omega$  définissant la proportion de sol offerte à l'infiltration après l'arrêt de la pluie, les données sont peu nombreuses. Il apparaît cependant que les sols à éléments grossiers s'opposent à une canalisation du ruissellement (PNI 12 avec 25% et LBA 41 avec 20%).

#### d) Les lames d'eau ruissellée

##### Sols en l'état naturel

La résultante de ces différentes phases a été suivie en établissant les courbes de ruissellements cumulés (SL) en fonction des hauteurs cumulées des précipitations (SP). On s'aperçoit sur la figure n°11 que, sauf pour BTG 32 et PNI 12, la relation SL (SP) est pratiquement linéaire, soit

$$SL = \alpha (SP - \beta)$$

et comme les protocoles expérimentaux adoptés pour traiter les différents sites sont sensiblement les mêmes, il est permis d'utiliser les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  comme base de comparaison, ce qui apparaît sur le tableau n° IV.

- PNI 13, PNI 11, SPO 22, LBA 41 présentent des susceptibilités au ruissellement voisines et sont très peu perméables ( $\alpha = 0,80$  et  $\beta \neq 20$ ). Ils ont des caractères pédologiques assez différents mais la convergence de leur comportement peut s'expliquer de la façon suivante : préexistence d'une *pellicule de battance* et accentuation de sa constitution lors de la succession des averses sur PNI 13, PNI 11, SPO 22 et présence d'un *horizon induré près de la surface* pour LBA 41 limitant les possibilités de stockage de l'eau.

- SPO 21 est considéré comme moyennement perméable avec  $\alpha = 0,60$ , il faut invoquer dans son cas : la présence d'*éléments grossiers* en surface interceptant l'énergie des pluies, limitant donc la désagrégation des horizons de surface, une *pente plus forte* qu'ailleurs et enfin un *stockage probablement assez important* car la roche mère bien que proche de la surface est fissurée et ne constitue donc pas un "plancher" étanche.

- PNI 12 est resté très perméable ( $\alpha = 0,26$ ) tout au long des essais pour des raisons que nous rappelons : *faible proportion de terre fine* peu à peu épuisée par les cultures répétées, affleurement d'*éléments grossiers* avec les mêmes conséquences que précédemment, *stockage d'eau important* malgré des hétérogénéités de conductivité hydraulique.

- les sols vertiques de BTG 31 et surtout 32 ont un comportement complexe, ils restent perméables en deçà de 300 mm tant que les fissurations parcourant la surface du sol restent ouvertes dès que celles-ci se *colmatent par une boue* provenant de la désagrégation et de la liquéfaction des premiers centimètres du sol, la perméabilité chute nettement ( $\alpha = 0,72$  au delà de 300 mm de SP pour BTG 32).



Tableau III. - Valeur des paramètres caractéristiques de la phase de vidange pour les différentes parcelles testées.

		PNI.11	PNI.12	PNI.13	SPO.21	SPO.22	BTG.31	BTG.32	LBA.41
Sol en l'état naturel (parcelle 1)	pende $i$ (%)	7,5	2,6	0,9	4,2	2,6	0,9	0,6	1,4
	$A$ (mm.H) <sup>1/2</sup>	0,29	0,72	0,28	0,22	0,15	0,50	0,72	0,29
	$\bar{\omega}$ (%)	5	25	2	2	1	10	(10)	20
Sol préalablement labouré (parcelle 2)	$A$	0,21	-	0,25	0,22	0,14	0,59	0,46	0,29
	$\bar{\omega}$ (%)	11	-	0,5	9	4	10	(10)	10

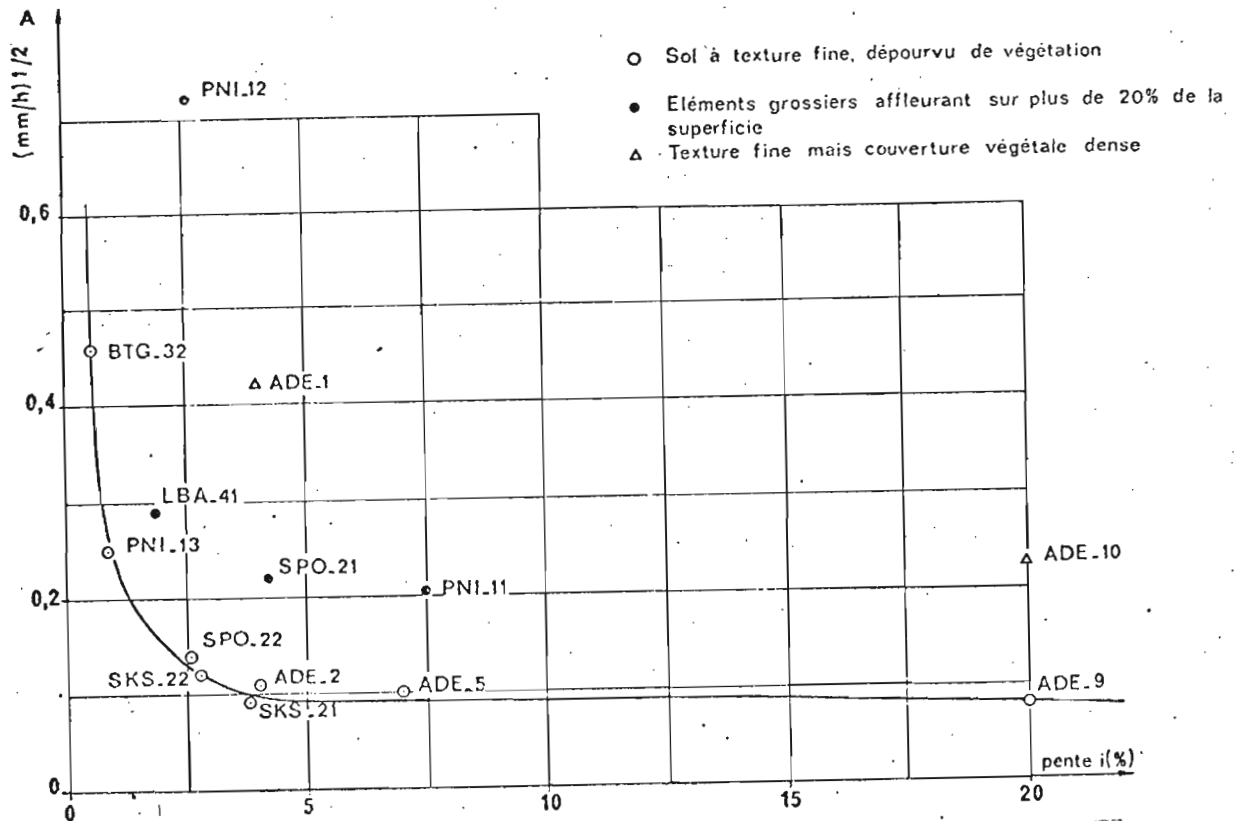


FIG 10 Influence de la pente et de la rugosité sur le paramètre A

### Le labour et son influence

Son effet peut être mis en évidence par l'examen du rapport des lames ruissellées sur labour à celles provenant du même sol remanié exprimé en fonction des hauteurs de pluies cumulées. La figure n°12 regroupe les trois couples de parcelles ayant les comportements les plus typiques :

- sur PNI 13 le labour n'est efficace que lors de la première averse, son effet s'atténue dès la seconde averse et disparaît pratiquement au delà de 170 mm de pluies cumulées. Le gain à l'infiltration est donc très faible (40 mm) et atteint rapidement une valeur plafond. On retrouve illustrée ici l'importante diminution du coefficient A lorsque l'on passe du sol naturel au sol labouré.

- sur PNI 11 l'augmentation du rapport  $L_2/L_1$  dès la seconde averse est plus progressif et il apparaît une stabilisation de la parcelle au delà de 220 mm de pluies cumulées où  $L_2/L_1$  reste égale à 0,7. Le gain à l'infiltration est important (100 mm) et un effet résiduel non négligeable continue à se manifester après cette stabilisation.

- pour PNI 11, le rapport  $L_2/L_1$  garde constamment une valeur faible égale à 0,2 et, pour la durée des essais, l'effet du labour semble permanent.

En ce qui concerne le comportement d'autres sites non représentés ici, on constate que les sols vertiques de Batanga appartiennent à la catégorie de PNI 13 et que les sols de SPO 22 et LBA 41 se rangent dans la même catégorie que PNI 11.

#### III.1.3. Erodibilité des sols et comportements hydrodynamique

Nous avons jusqu'alors surtout considéré les données extraites des analyses des hydrogrammes et il est apparu que les processus évoqués sont toujours très dépendants des modifications structurales de la surface du sol. Dans le cadre de nos essais, ces modifications structurales se sont surtout traduites par des dégradations d'organisations plus ou moins poreuses avec pertes de matière plus ou moins importantes. Il ne faut pas perdre de vue qu'une agradation saisonnière des structures est réalisée par la faune du sol et l'exploration du système racinaire pour ne citer que les principaux agents, mais il n'en sera pas question ici. On dégage le mieux les interrelations entre l'érodibilité et l'hydrodynamisme en suivant l'évolution de sols soumis à différentes techniques culturales.

Le simple labour créant une macroporosité importante dans les premiers horizons, favorise l'infiltration mais la permanence de son effet dépend de la stabilité structurale des mottes créées artificiellement. Il s'est dégagé ainsi trois types de comportements :

- des sols ne résistent pas à plus de 100, 150 mm de pluie cumulées (PNI 13, SPO 21, BTG) au delà desquels les caractéristiques du ruissellement rejoignent rapidement celles des parcelles non labourées ; ces sols se rangent souvent aussi parmi les plus érodibles soit parce que leur érosion en nappe se maintient à un niveau très élevé (PNI 13) soit parce qu'à celle-ci s'adjoint une érosion par cisaillement (SPO 21). Si l'érosion en nappe prédomine son niveau dépendra de la constitution d'une pellicule de battance

FIG 11

Laines ruisselées cumulées en fonction  
du cumul des pluies (sols en l'état naturel)

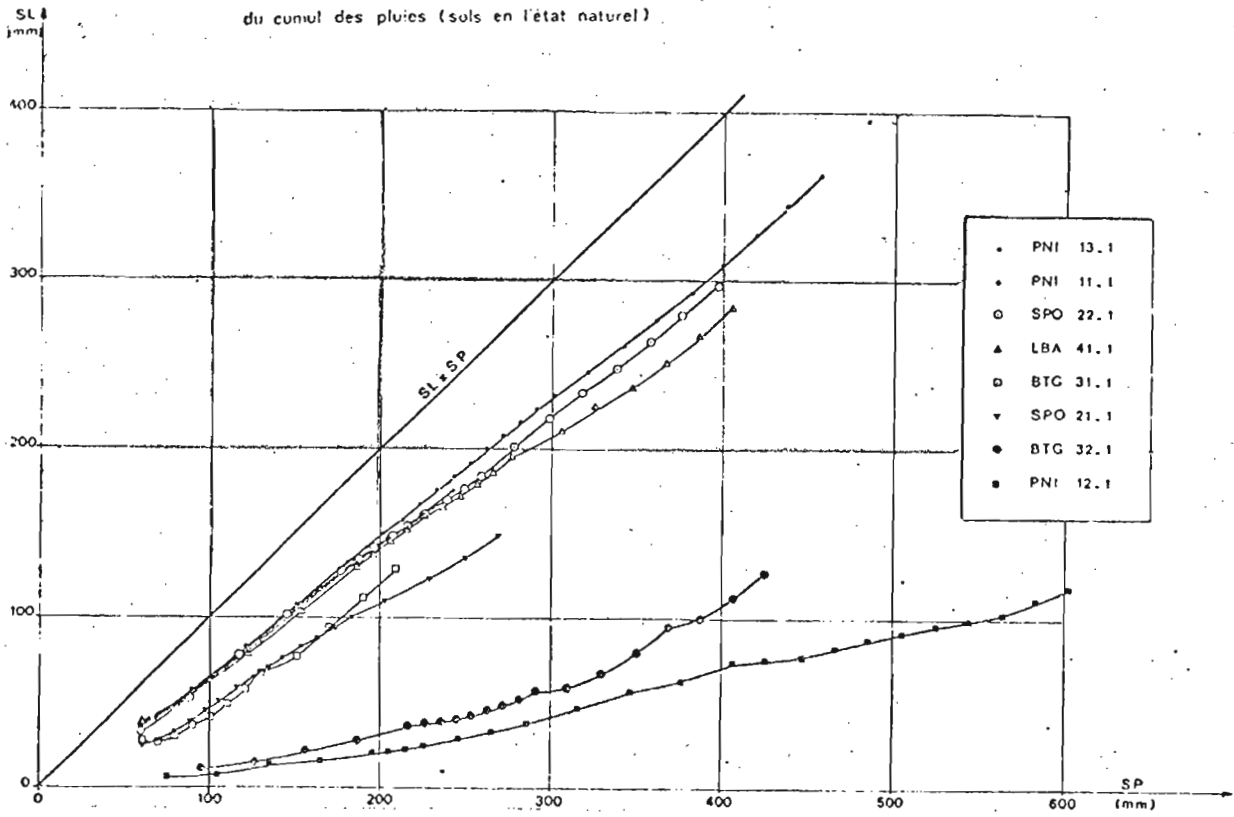


FIG 12 Effets du labour du sol sur le ruissellement

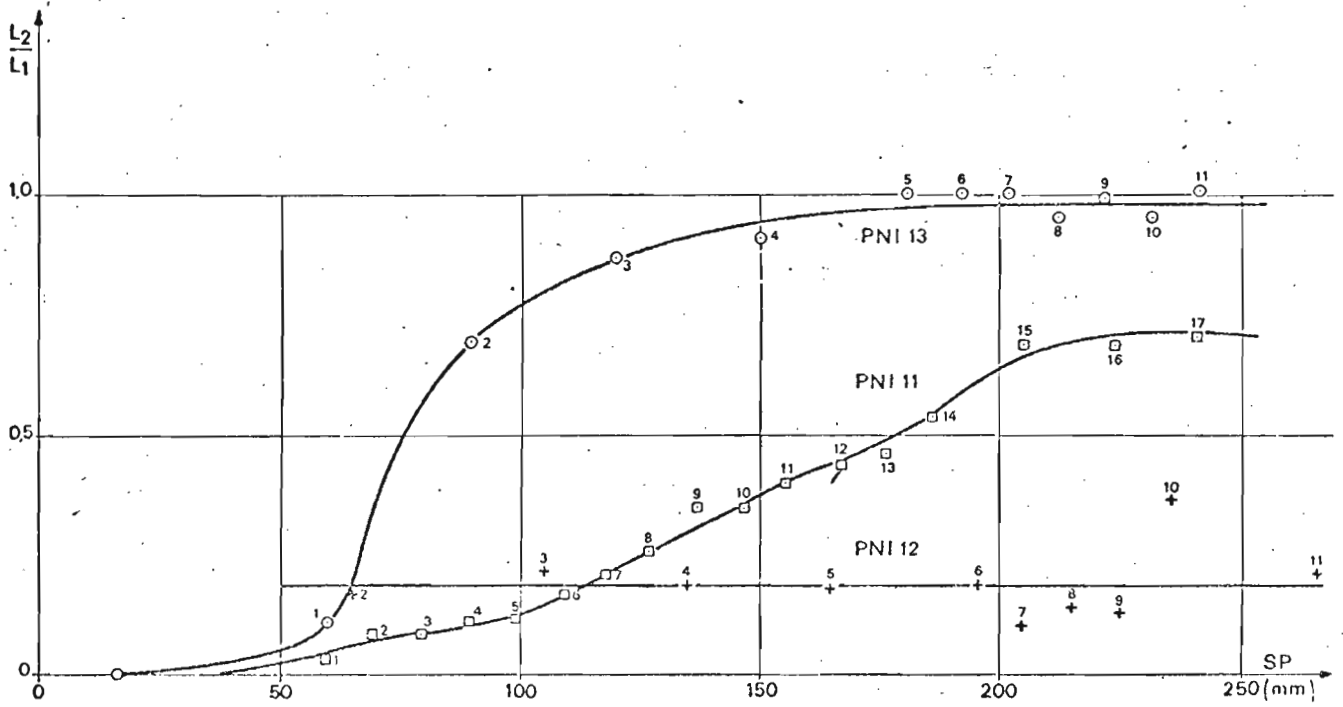


Tableau IV

Parcelle	$\beta$	$\alpha$	observation
PNI.13	22,0	0,83	
PNI.11	20,0	0,80	
SPO.22	20,0	0,79	
LBA.41	17,0	0,75	
BTC.31	42,0	0,74	
SPO.21	19,0	0,60	
BTG.32 (	53,0	0,22	SP < 300 mm
)	228,0	0,72	SP > 300 mm
PNI.12 (	35,0	0,14	SP < 220 mm
)	133,0	0,26	SP > 220 mm

limitant l'infiltration mais heureusement aussi l'érosion. Ceci est dû à une diminution des turbidités tout au long des averses et à la constance des paliers de turbidité Cx quelles que soient les intensités des pluies, ce qui apparait bien sur la figure n°13.

- sur les sites PNI 11, SPO 22, LBA 41, nous avons vu que les gains à l'infiltration sont plus importants en raison de hautes pluies d'imbibition et d'intensités minimales d'infiltration élevées ; toutefois la turbidité sur labour est dans ces trois cas entre 4 et 10 fois plus forte que sur le sol dans son état naturel. L'efficacité du labour sur le plan de la lutte anti-érosive dépend essentiellement du maintien de fortes perméabilités. Dans le cas des sols meubles de cette zone soudano-sahélienne, la comparaison de comportement par cette méthode du couple prouve que l'infiltrabilité des sols est liée à la stabilité structurale des premiers horizons. En effet, à texture équivalente, les mottes à faible stabilité se désagrègent rapidement, les porosités se colmatent, la perméabilité diminue, la rugosité de la parcelle décroît et l'érodibilité atteint rapidement une valeur palier ne dépassant pas celle de la parcelle non labourée. Les mottes à plus forte stabilité vont se désagréger plus lentement et alimenter de ce fait plus longuement le débit solide. L'érosion reste alors en permanence plus forte que celle de la parcelle non remaniée même si le maintien d'une certaine rugosité limite le ruissellement.

- enfin sur PNI 12, le labour remanie un matériau riche en gravillons, la conjonction de faibles ruissellements et de faibles turbidités explique une érosion insignifiante.

Les deux autres techniques culturales (buttage cloisonné et mulching ont permis de voir que le paillage d'un labour constituait généralement la meilleure protection possible. Pour expliquer ceci nous avons retenu l'exemple du site PNI 13 (cf. figures n°3 et 4) : sur un labour paillé (courbe C) les infiltrations sont maximales (forte imbibition et faible palier Rx) et l'érodibilité se maintient à un niveau très faible. Du fait de turbidités moyennes (2,5 à 3 g/l) les débits solides ne dépassent pas les 200 g/s/ha. Le traitement en buttes cloisonnées perd souvent de son efficacité à partir de 50, 60 mm de pluies cumulées car les diguettes retenant l'eau entre les buttes se rompent en chaîne déversant les flaques (Si) et les éléments érodés. L'on se retrouve avec un sol où l'on a indirectement favorisé la canalisation du ruissellement avec les graves inconvenients que cela présente du point de vue érosion. Ce buttage cloisonné peut même devenir à la longue une pratique néfaste sur les sols riches en éléments grossiers car son établissement nécessite une fouille profonde amenant à l'affleurement une terre moins graveleuse qui va s'épuiser plus ou moins rapidement en éléments fins. Nous avons présenté sur le tableau n° V, un résumé des données relatives à ces deux traitements pour les autres sites.

### III.2. DOMAINE SOUDANO-GUINEEN

#### III.2.1. Cadre naturel

Deux campagnes de simulation de pluies (infiltromètre) ont été menées en août-septembre 1977 et en avril-mai 1978 sur deux toposéquences sur schistes du nord de la Côte d'Ivoire à proximité des villes de Tingréla et de Katiola : village de *Papara* (10° 36 N et 6° 16 W) et forêt classée de *Kobo* (8° 23 N et 5° 03 W (cf. carte de situation).

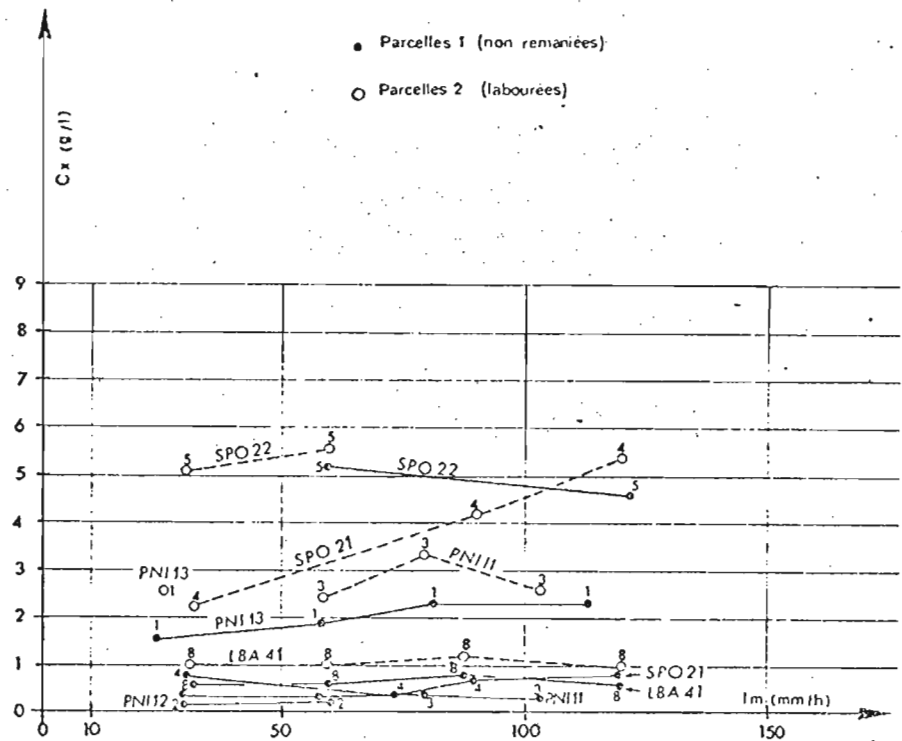


FIG 13 Relation entre les paliers de la turbidité et les intensités des averses simulées pour les deux parcelles des différents sites  $Cx = f(Im)$

TABLEAU V - Données relatives aux traitements culturaux particuliers.

Site	N°	Im averse	Pu mm	ta	Traitement B (buttes cloisonnées)						Traitement C (Mulch)					
					Rx	Pi	L	E	Cs	Cu	Rx	Pi	L	E	Cs	Cu
		mm/H	mm		mm/H	mm	mm	kg/ha	g/l	g/l	mm/H	mm	mm	kg/ha	g/l	g/l
PNI.13	26	61,9	113,4	17H00	36,5	20,1	29,0	1683	9,4	4,8	23,0	20,5	19,0	415	3,6	1,7
PNI.12	27	60,9	182,7	15H13	6,7	12,8	8,4	180	2,6	1,3	11,5	16,5	20,6	135	1,6	0,3
BTG.32	21	93,4	93,4	16H20	70,0	12,8	25,6	452	11,8	7,0	93,4	6,7	20,7	569	3,7	0,6
LBA.41	21	62,4	111,9	15H30	11,2	8,7	9,3	-	-	-	0,2	6,4	0,5	-	-	-

Remarque : les deux valeurs de Cs fournies pour PNI 13 correspondent à deux maximums distincts de turbidité.

Les deux toposéquences étudiées ont été retenues pour leur représentativité des zones cartographiées par les pédologues au 1/200.000e.

a) Climat et végétation

Bien que la pluviométrie moyenne annuelle de Tingréla (1450 mm) soit supérieure à celle de Katiola (1220 mm), la répartition des précipitations détermine un climat plus sec sur la toposéquence de Papara (8 mois de sécheresse) que sur celle de Kobo (6 mois).

Sur l'ensemble de la toposéquence de Papara, la couverture graminéenne était pratiquement inexistante à l'époque des essais (fin de saison sèche). Le tiers supérieur est occupé par une végétation de savane arborée, la partie aval, presque plane, par une savane arbustive.

A Kobo, le couvert graminéen était jointif en amont (sites KOB 1 et 2), les touffes étant discontinues en aval (site KOB 3). La végétation s'éclaircit progressivement de l'amont vers l'aval : forêt claire sèche (KOB 1), savane boisée (KOB 2) et savane arborée (KOB 3).

b) Modelés et sols (cf. "Toposéquences et sites expérimentaux en Côte d'Ivoire")

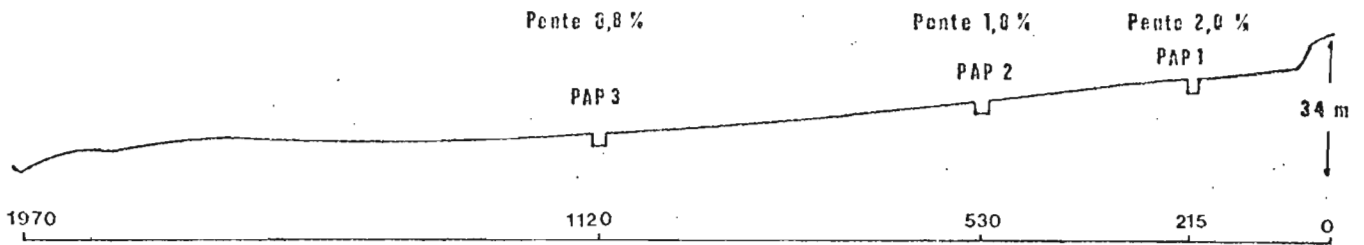
Les deux toposéquences formées sur la même roche (schistes du Birrimien) diffèrent considérablement par leur modelé. Celle de Papara (longueur : 1970 m, dénivelée : 34 m) se rattache aux surfaces d'aplanissement des zones plus septentrionales (forme héritée). La toposéquence de Kobo (longueur : 1035 m, dénivelée 48 m) annonce les reliefs plus marqués de la zone forestière.

Le tiers supérieur de la toposéquence de Papara est constitué de sols ferrallitiques moyennement désaturés remaniés. La profondeur de l'induration diminue de l'amont (site Pap. 1 : 1,5 m) vers l'aval (site Pap. 2 : 0,6 m). Les horizons superficiels limono-sableux\* sont fortement gravillonnaires (53% d'éléments grossiers pour Pap. 1, 27% pour Pap. 2). Les deux tiers inférieurs du versant sont formés de sols hydromorphes peu humifères à pseudogley. La profondeur d'induration diminue également de l'amont (site Pap. 3, 0,70 m) vers l'aval. La pente est extrêmement faible (< 1%), l'horizon superficiel (limon fin) ne contient pas d'éléments grossiers.

La quasi-totalité du versant de Kobo est occupée par des sols ferrallitiques remaniés faiblement désaturés (sites Kob 1 et 3) ou moyennement désaturés (site KOB. 2). Les horizons superficiels limoneux recouvrent des horizons gravillonnaires dont l'épaisseur décroît de l'amont (KOB. 1) vers l'aval (KOB.2). L'horizon d'altération apparaît partout à une profondeur inférieure à deux mètres. Sur le huitième inférieur du versant (site KOB. 3), l'argile reticulée apparaît vers 80 cm et s'indure en aval en cuirasse de bas de pente. L'horizon superficiel limono-sableux (0-10 cm) recouvre un horizon gravillonnaire peu épais (10-25 cm).

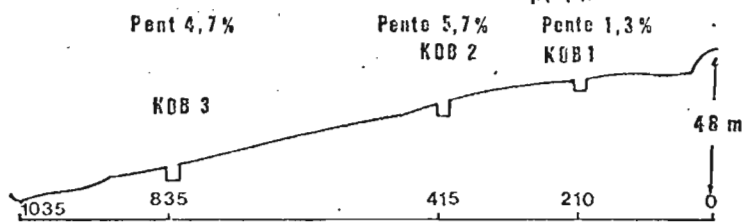
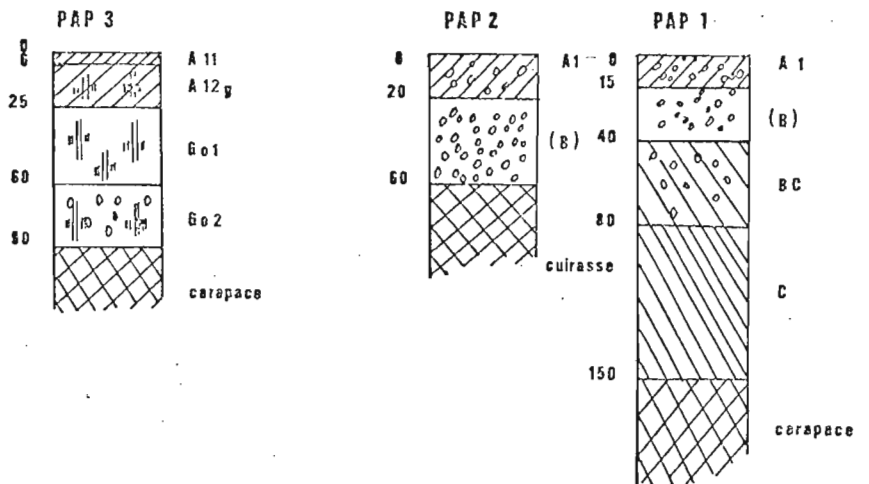
---

\* Triangle de texture USDA.

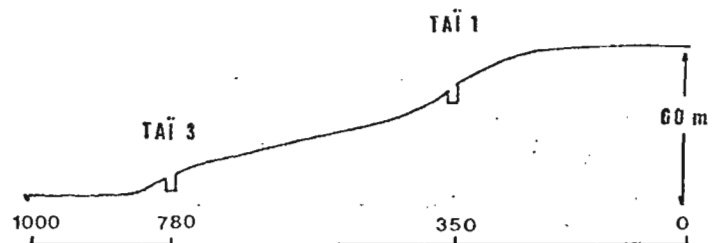
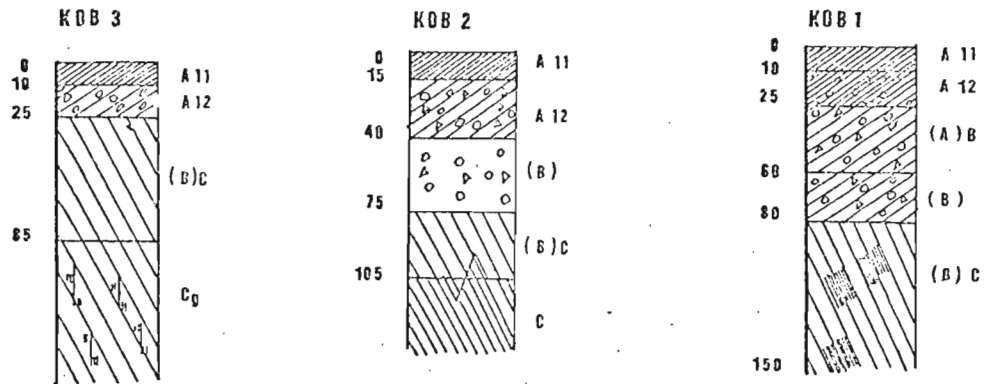


PAPARA ( 10° 36' N )

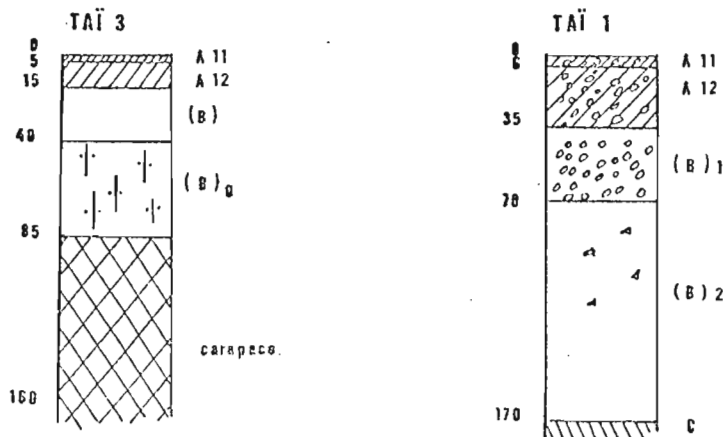
TOPOSEQUENCES ET  
SITES EXPERIMENTAUX  
EN CÔTE D'IVOIRE



KOBBO ( 8° 23' N )



TAÏ ( 5° 50' N )



En résumé, les essais infiltrométriques ont porté sur des sols :

- limono-sableux, gravillonnaires dès la surface, profond (Pap. 1) et peu profond (Pap. 2),
- limoneux, gravillonnaires à faible profondeur, sur faible pente (KOB 1) et pente moyenne (KOB 2),
- limono-sableux à drainage ralenti à moins d'un mètre (KOB 3),
- hydromorphe à limons fins (PAP. 3).

### III.2.2. Comportements hydrodynamiques

Sur chaque site expérimental, deux traitements ont été étudiés :

- état naturel à l'époque des essais,
- sol nu labouré manuellement sur 10 cm de profondeur (labour à la daba) puis aplani.

Le protocole comportait 3 répétitions pour chaque site à Papara, 2 à Kobo. La plupart des phases de ruissellement étudiées sur parcelles de 50 m<sup>2</sup> ont été également analysées sur parcelles de 1 m<sup>2</sup>, exception faite de la phase de régime transitoire souvent de trop courte durée.

#### a) Pluie d'imbibition

Le tableau n° VI présente les hauteurs de pluies d'imbibition, pour des intensités de 120 mm/h sur des sols initialement secs ( $P_i \infty$ ) et des sols dont l'état hydrique est proche de la saturation ( $P_i 0$ ).

TABLEAU n° VI - Pluie d'imbibition sous 120 mm/h (infiltromètre)

Nature du traitement	Références	PAP 1	PAP 2	PAP 3	KOB 1	KOB 2	KOB 3
Parcelles à l'état naturel	$P_i (\infty)$ (mm)	11.2	11.9	4.5	19.5	18.6	16.0
	$P_i (0)$ (mm)	3.1	1.3	1.8	2.7	4.0	4.5
Parcelles nues labourées	$P_i (1-3 \text{ j.})$ (mm)	4.7	10.0	5.8	6.0	11.4	13.2
	$P_i (0)$ (mm)	1.8	0.2	0.5	1.2	1.7	1.5

#### . état naturel :

contrairement aux résultats obtenus dans la zone soudano-sahélienne, la hauteur de la pluie d'imbibition sur parcelle initialement sèche paraît dépendre de la nature du sol étudié. La profondeur d'apparition d'une discontinuité hydrodynamique (horizon nettement moins perméable que l'horizon sus-jacent) semble



déterminer largement la hauteur de la lame infiltrée avant le début du ruissellement.

Pour des sols initialement humides ( $t_a < 1$  heure), la dispersion des résultats obtenus est beaucoup plus faible :  $P_i$  variant de 1.3 mm à 4.5 mm, ces différences pouvant être imputées aux dynamiques de ressuyage rapide (dépendante de la macroporosité et de la pente). L'effet du couvert végétal n'apparaît pas clairement.

• après labour :

la première pluie sur parcelles labourées survient après un temps de ressuyage (de 1 à 3 jours) correspondant à peu près à celui de la capacité au champ.

Dans ces conditions, le labour ne permet pas une augmentation de la durée de la pluie d'imbibition. Lors de la deuxième pluie, pour des états hydriques proches de la saturation, les valeurs de  $P_i(0)$  sont inférieures à celles obtenues avant le labour. Ce résultat peut s'expliquer par la formation d'une croûte à la surface du sol. Le labour fragmente le sol en agrégats plus ou moins résistants à l'effet d'éclatement (splash) dû à l'impact des gouttes de pluies. La proportion d'éléments stables à l'alcool (test de HENIN et MONNIER 1956) déterminée au laboratoire peut ainsi être corrélée à la valeur de  $P_i(0)$  obtenue sur le terrain :

$$n = 6 \cdot r^2 = 0.97$$

$$P_i(0) = 0.07 \text{ Alc.} - 2.75$$

mm

Alc. = % d'agrégats stables à l'alcool.

Ainsi, le comportement des sols de cette zone vis-à-vis de la pluie d'imbibition différerait considérablement suivant les états naturels ou labourés : non perturbé le sol réagirait en fonction de la perméabilité de ses horizons ; une fois labouré, il ne dépendrait plus que de la stabilité de ses agrégats de surface. Notons que l'action de la croûte de battance peut-elle même s'estomper sous l'effet de la mésofaune et qu'un nouvel équilibre doit s'établir. L'intervention ponctuelle de ce type d'essais ne permet pas de suivre une telle dynamique superficielle.

b) Phase du régime permanent

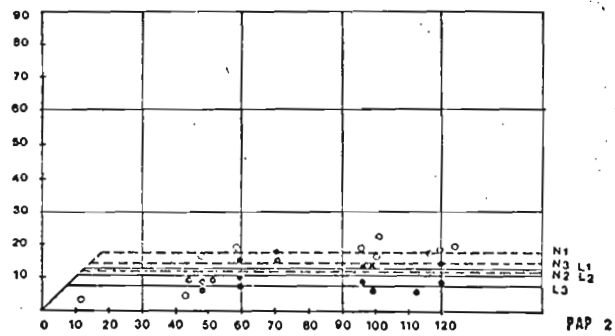
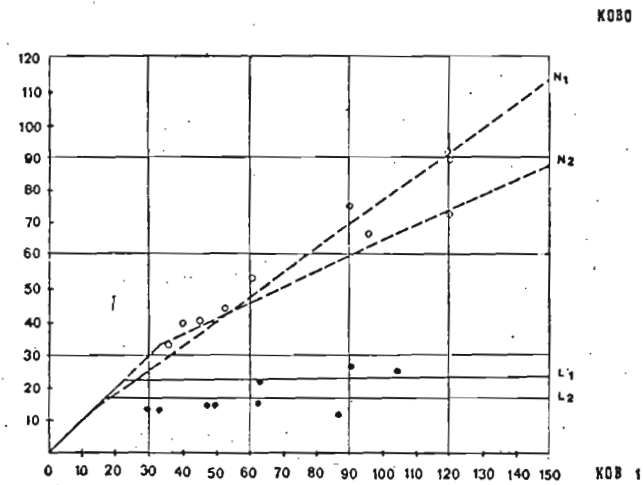
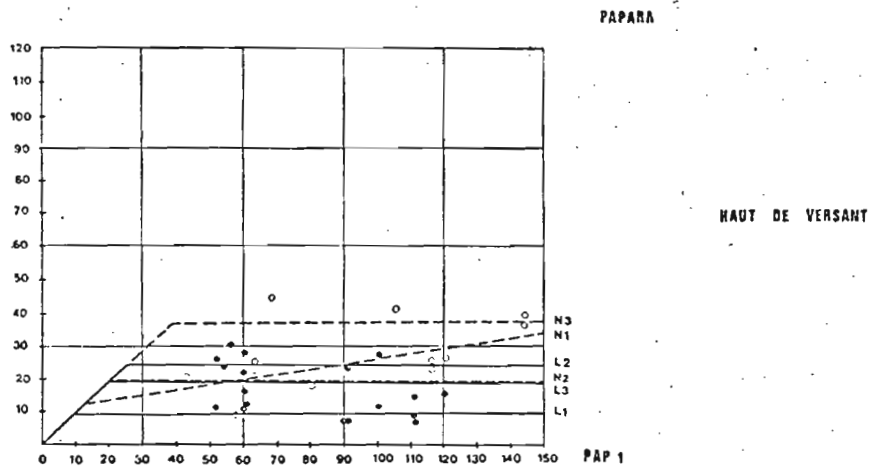
#### Présentation théorique

Nous avons défini précédemment  $R_x$ , valeur maximale d'intensité de ruissellement atteinte lors du régime permanent, et  $F_N$ , valeur de l'intensité d'infiltration correspondante :  $F_N = I - R_x$ .

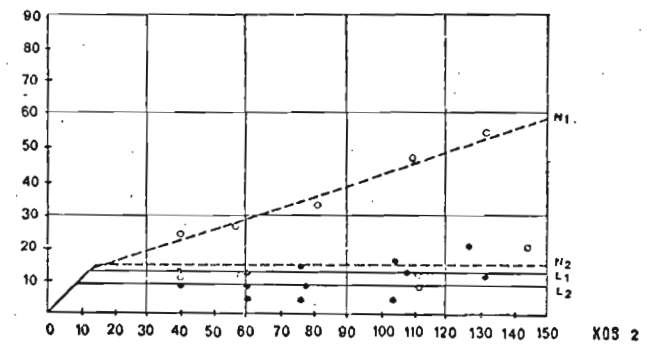
Nous appelons  $I_1$ , intensité limite de ruissellement en dessous de laquelle aucun écoulement n'apparaît à l'exutoire. Les valeurs, de  $R_x$ ,  $F_N$  et de  $I_1$  sont étroitement liées à l'état de saturation du sol, et donc à la valeur de  $t_a$ .

Considérons les variations de  $F_N$  en fonction de l'intensité  $I$  de la pluie, pour des états hydriques initiaux identiques :

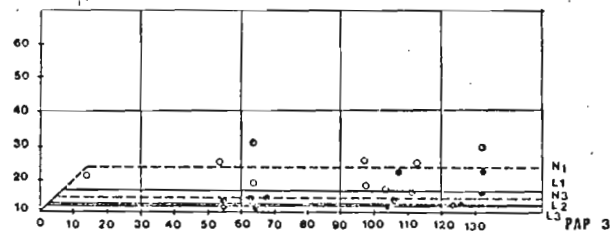
- $I < I_1$  : l'infiltration est totale sur l'ensemble de la parcelle :  $R_x = 0$ ,  $F_N = I$
- $I > I_1$  : deux cas sont à envisager :



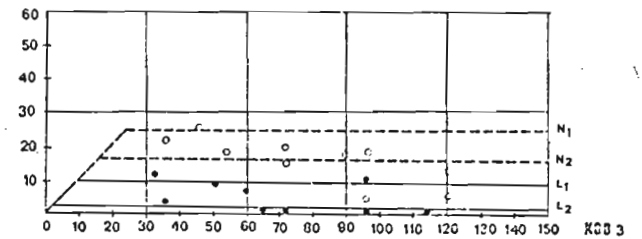
**MILIEU VERSANT**



○ — milieu naturel  
● — milieu cultivé



**BAS DE VERSANT**



**FIGURE:14 INTENSITES MINIMALES D'INFILTRATION**

- 1) la parcelle est hétérogène (cas des parcelles couvertes de végétation) : l'infiltration est totale sur certaines zones tandis que les autres participent au ruissellement. Tant que I reste inférieure à une valeur  $f_2$ , généralement bien supérieure aux intensités de pluie des essais ( $f_2 > 150$  mm/h), LAFFORGUE (1977) propose un modèle mathématique où :

$$F_N = (1-K) I + K I_1$$

K étant le pourcentage de surface qui ruisselle.  
dans ce cas :

$$R_x = K (I - I_1)$$

- 2) la parcelle est homogène (cas des parcelles nues où des parcelles hétérogènes pour  $I > f_2$ ) : l'intensité d'infiltration est alors indépendante de l'intensité de la pluie :

$$F_N = F_1 \forall I, R_x = I - I_1$$

### Résultats expérimentaux

Les résultats présentés ici (fig. 14) concernent les intensités minimales d'infiltration enregistrées lors des pluies simulées d'intensités variables sur des parcelles initialement humides ( $t_a < 1$  heure) (tableau n°VII). La dispersion des résultats obtenus sur un même site et pour des parcelles différentes était prévisible : les différents emplacements ont été choisis en effet pour intégrer la gamme la plus large des états de surface représentatifs du site. Ainsi est-il possible de considérer les valeurs obtenues comme les bornes de l'intervalle de variation.

Suivant le type de fonction  $F_N = f(I)$ , la valeur de l'intensité limite de ruissellement  $F/I_1$  est obtenue :

• par identification de la droite d'ajustement des valeurs expérimentales :

$$F_N = a I + b, \text{ avec l'expression du modèle :}$$

$$F_N = (1 - K) I + K I_1$$

d'où :

$$K = 1 - a, a \neq 0$$

et 
$$I_1 = \frac{b}{1 - a}$$

• par calcul de  $I_1 = \frac{\sum_{i=1}^n F_N}{n}$ , lorsque  $a = 0$  ( $K = 1$ )

### Etat naturel

Les valeurs de  $F_N$  obtenues expérimentalement pour diverses intensités de pluie confirment les hypothèses de LAFFORGUE (1977) : le coefficient  $(1-K)$  est très étroitement lié au couvert végétal de la parcelle (de 0 à 73% - KOB 11). Cependant, les parcelles de bas de pente bien que partiellement couvertes de végétation (environ 15% pour PAP 3 et 40% pour KOB 3) réagissent comme des parcelles homogènes.  $(1-K)$  ne serait donc pas l'expression exacte du taux de couverture végétale, celle-ci intervient, il est vrai, davantage par le nombre de ses tiges (infiltration privilégiée) que par son feuillage. De plus le type de réaction de la

parcelle ne semble pas indépendante du taux d'éléments grossiers en surface : les parcelles PAP 1 et PAP 2 bien que presque nues (mais couvertes d'un mulch gravillonnaire) n'ont pas le strict comportement de "surfaces homogènes". Il est à noter cependant qu'il s'agit surtout pour PAP 2, de cas limites : les valeurs de K sont voisines de 1 (PAP 2) et il en résulte des coefficients de corrélation r très faibles (relations  $F_N = f(I)$  non significatives). Il semble par conséquent légitime, pour ce site de considérer,  $F_N$  indépendante de I, et égale à  $I_1$ .

TABLEAU n° VII - Intensités minimales d'infiltration - sols initialement saturés

Parcelles	n	r	$\sigma$	K	$F_N = f(I) \quad V_i > i_1$
ETAT NATUREL					
PAP 11	9	0.81	-	0.84	$F_N = 0.16 I + 11.4$
PAP 12	3	-	9.1	1.00	$F_N = 19.6 \text{ mm/h}$
PAP 13	7	-	8.0	1.00	$F_N = 37.6 \text{ mm/h}$
PAP 21	7	0.40 <sup>*</sup>	-	0.95	$F_N = 0.05 I + 12.8$
PAP 22	7	0.63 <sup>*</sup>	-	0.91	$F_N = 0.09 I + 4.7$
PAP 23	5	0.47 <sup>*</sup>	-	0.97	$F_N = 0.03 I + 11.8$
PAP 31	7	-	4.6	1.00	$F_N = 13.6 \text{ mm/h}$
PAP 32	2	-	-	-	-
PAP 33	6	-	2.1	1.00	$F_N = 4.3 \text{ mm/h}$
KOB 11	6	0.99	-	0.27	$F_N = 0.73 I + 3.6$
KOB 12	7	0.97	-	0.54	$F_N = 0.46 I + 18.1$
KOB 21	5	0.99	-	0.66	$F_N = 0.34 I + 8.5$
KOB 22	5	-	7.3	1.00	$F_N = 14.0 \text{ mm/h}$
KOB 31	9	-	7.2	1.00	$F_N = 25.4 \text{ mm/h}$
KOB 32	9	-	5.1	1.00	$F_N = 15.8 \text{ mm/h}$
-----					
APRES LABOUR					
PAP 11	7	-	1.9	1.00	$F_N = 9.8 \text{ mm/h}$
PAP 12	4	-	6.5	1.00	$F_N = 24.8 \text{ mm/h}$
PAP 13	7	-	5.9	1.00	$F_N = 19.2 \text{ mm/h}$
PAP 21	7	-	2.5	1.00	$F_N = 12.3 \text{ mm/h}$
PAP 22	7	-	4.1	1.00	$F_N = 10.8 \text{ mm/h}$
PAP 23	7	-	2.4	1.00	$F_N = 7.8 \text{ mm/h}$
PAP 31	7	-	3.8	1.00	$F_N = 6.5 \text{ mm/h}$
PAP 32	6	-	0.4	1.00	$F_N = 2.4 \text{ mm/h}$
PAP 33	7	-	1.3	1.00	$F_N = 2.2 \text{ mm/h}$
KOB 11	7	-	9.5	1.00	$F_N = 22.6 \text{ mm/h}$
KOB 12	5	-	5.5	1.00	$F_N = 17.00 \text{ mm/h}$
KOB 21	5	-	3.3	1.00	$F_N = 8.8 \text{ mm/h}$
KOB 22	9	-	6.0	1.00	$F_N = 12.3 \text{ mm/h}$
KOB 31	6	-	4.9	1.00	$F_N = 9.5 \text{ mm/h}$
KOB 32	5	-	3.1	1.00	$F_N = 2.0 \text{ mm/h}$

n : nombre de mesures

r : coefficient de corrélation, si <sup>\*</sup> non significatif (abaque de FISHER)

$\sigma$  : écart-type

Après labour

Une fois le sol remanié et aplani, toutes les parcelles réagissent comme des surfaces homogènes : *l'intensité d'infiltration est indépendante de l'intensité de pluie*. Les coefficients de dispersion sont plus faibles (26%) pour les perméabilités élevées que pour les valeurs de  $F_N$  de l'ordre de la précision des mesures (2 mm/h). La destruction de la végétation paraît être un facteur secondaire par rapport au remaniement : les plus fortes différences relatives :

$$\Delta = \left( \frac{1 - I_1 \text{ labour}}{I_1 \text{ naturel}} \right) \text{ ne sont pas enregistrées sur}$$

les sites les plus couverts ( $\Delta$  de KOB 1 = 16%) mais, en bas de versant ( $\Delta$  de KOB 3 = 70%,  $\Delta$  de PAP 3 = 59%). Cette diminution de l'intensité d'infiltration après labour peut s'expliquer par la rupture et l'obturation des macropores dont le nombre et la taille déterminent largement l'intensité d'infiltration (HUMBEL, 1975). Cet effet est net pour un labour manuel ; il est à supposer qu'il serait plus marqué encore après un travail du sol à l'aide d'engins lourds (semelle de labour, lissage...). Cependant, comme pour l'étude de la pluie d'imbibition, la prudence conduit à souligner le caractère ponctuel (dans le temps) des mesures. Il n'est pas exclu en effet d'envisager l'ouverture de nouveaux macropores sous l'effet de l'activité biologique.

Bien qu'il soit hasardeux, de tirer des conclusions à partir des mesures effectuées sur six sites (TABLEAU n°VIII), il semble que ce soient les possibilités de drainage interne (pas seulement l'état de surface) qui définissent la perméabilité des sols labourés et saturés de cette zone. La position topographique des sols réglerait pour une très grande part leur régime hydrique ; il serait possible alors de rapprocher ces mesures aux hypothèses attribuant un bon drainage et une pédogénèse particulière "pédoplasation" (FLACH et al. 1968) aux sols rouges et gravillonnaires des hauts de versants. Le mauvais drainage des sols de bas de versants induirait la "rétichromation" (CHATELIN et MARTIN, 1972) (cas du sol KOB 3) où l'hydromorphie (PAP 3).

A saturation, la pente ne semble pas un facteur déterminant de l'intensité d'infiltration : bien que les deux toposéquences diffèrent largement par leur modelé, il est intéressant de noter que les perméabilités sont comparables pour des positions topographiques semblables et apparemment indépendantes de la pente. Le drainage serait cependant légèrement supérieur au sud de la zone, où les dénivelées sont plus marquées (48 m à KOB, 34 m à PAPRA).

c) Phase de vidange

Le paramètre A tel que :

(6)  $D_m = A\sqrt{R_x}$  ( $D_m$ , détention mobilisable) peut être déterminé à partir des mesures des détentions récupérables  $D_r$  obtenues en fin de pluie :

$$A(0) = \frac{D_r}{\sqrt{R_x}} \quad \text{et} \quad A(1) = \frac{D_r}{\sqrt{R_x - \sqrt{F_N}} \arctg \sqrt{\frac{R_x}{F_N}}}$$

La valeur de A est déterminée graphiquement : elle correspond à l'intersection des deux droites de régression  $A(0) = f(F_N)$  et  $A(1) = f(F_N)$ . (LAFFORGUE, 1977).

TABLEAU N° VIII - Intensités limites d'infiltration -  
sols initialement saturés

Parcelles	Nombre de mesures	Intervalle de variation	$I_1$ (mm/h) moyenne pondérée
ETAT NATUREL			
PAP 1	19	13.5 - 37.6	23.3
PAP 2	19	11.9 - 17.2	14.5
PAP 3	13	4.3 - 13.6	9.3
-----			
KOB 1	13	13.5 - 33.6	24.3
KOB 2	14	12.9 - 14.0	13.6
KOB 3	18	15.8 - 25.4	20.6
APRES LABOUR			
PAP 1	18	9.8 - 24.8	16.8
PAP 2	21	7.8 - 13.3	10.3
PAP 3	20	2.2 - 6.5	3.8
-----			
KOB 1	12	17.0 - 22.6	20.3
KOB 2	14	8.8 - 12.3	11.1
KOB 3	11	2.0 - 9.5	6.1

Or, compte tenu des formules de CHEZY et de MANNING, il est possible de calculer les coefficients de rugosité  $n$  à partir des valeurs de  $A$  ainsi déterminées : pour une parcelle de longueur  $l$  (m) :

$$(7) \quad D_m = \frac{(n \ l \ R x \ i^{-1/2})^{3/5}}{1.6}$$

or LAFFORGUE (1978) propose l'utilisation de  $M = 2$  plutôt que  $M = 5/3$  dans la formule de HORTON : (1938)

$R = K D^M$ , pour les mesures réalisées sur parcelles

Par identification de (6) et (7) :

$$n = 2.189 A^{5/3} i^{1/2} l^{-1}$$

TABLEAU IX - Paramètres de la phase de vidange et coefficients de MANNING

	PAP 1	PAP 2	PAP 3	KOB 1	KOB 2	KOB 3
<u>Paramètre A</u> (mm. H) <sup>1/2</sup>						
• état naturel	0.11	0.16	0.14	0.33	0.20	0.21
• après labour	0.09	0.11	0.12	0.10	0.08	0.06
<u>Pente %</u>	2.0	1.8	0.8	1.3	5.7	4.7
<u>Coefficient n</u>						
• état naturel	0.08	0.14	0.08	0.39	0.36	0.34
• après labour	0.05	0.07	0.06	0.06	0.09	0.04

L'influence du couvert végétal sur la valeur du coefficient de MANNING apparait très nettement (tableau N° IX). Le long de la toposéquence de Kobo (KOB 1 à KOB 3), les mesures réalisées pour différentes couvertures herbacées donnent des valeurs voisines de celles obtenues par REE et al. (1977) sur un bassin versant de taille moyenne (37 ha) pour des densités de graminées comparables ( $n = 0.28$  à  $0.31$ ).

Pour chaque site, le labour suivi d'un planage a pour effet de réduire la rugosité. L'intervalle de variation :  $0.04 - 0.09$  est sensiblement le même que pour les toposéquences de Haute-Volta ( $0.02 - 0.09$ ). Le recouvrement par des éléments grossiers semble majorer légèrement la valeur de  $n$ , également déterminée par la stabilité structurale de l'horizon superficiel :

sols peu évolués :  $n = 0.04$  (SPO 21<sup>\*</sup>, PNI 11<sup>\*</sup>)

sols ferrugineux :  $n =$  de  $0.01$  (SPO 22) à  $0.03$  (LBA 41<sup>\*</sup>)

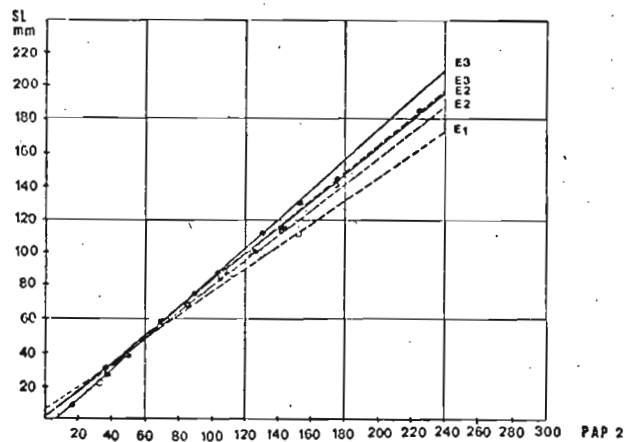
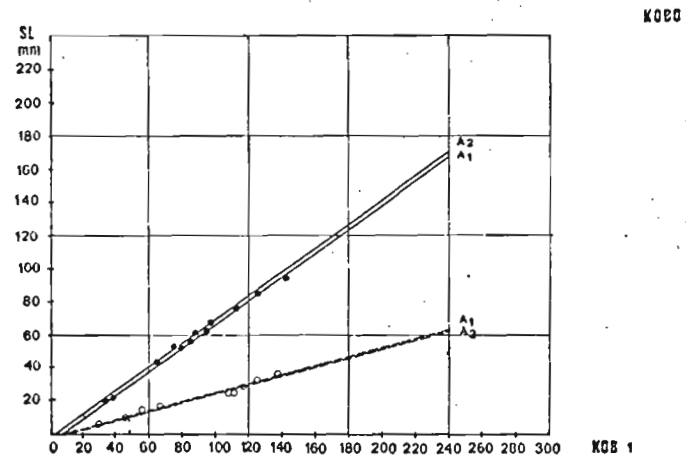
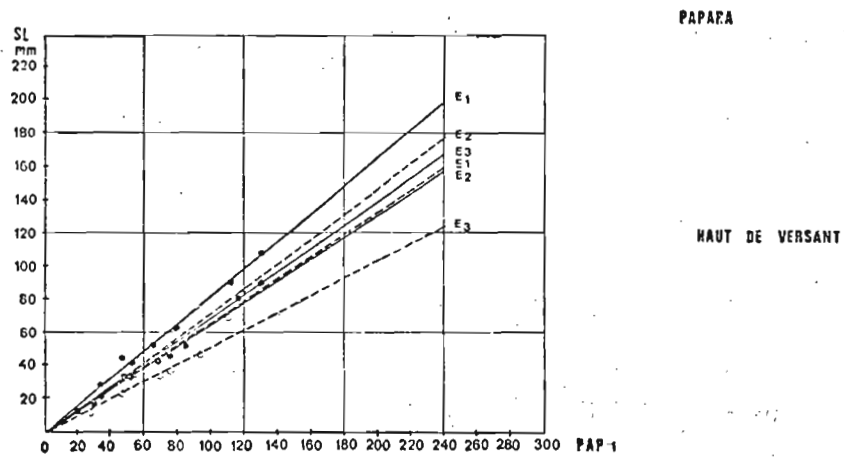
sols hydromorphes:  $n =$  de  $0.02$  (PNI 13) à  $0.06$  (PAP 3)

sols ferrallitiques :  $n =$  de  $0.04$  (KOB 3) à  $0.09$  (KOB 2)

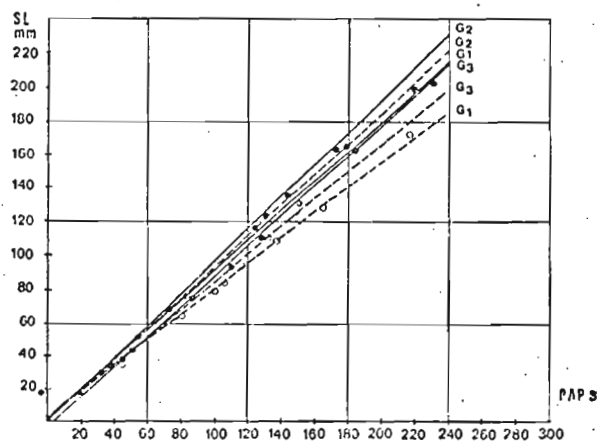
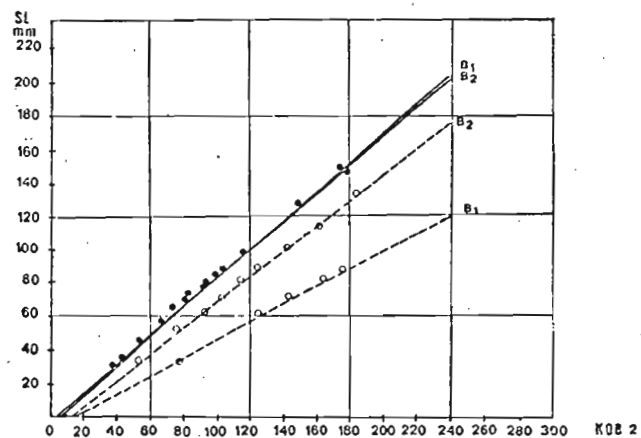
sols bruns eutrophes

à caractères vertiques:  $n =$  de  $0.05$  (BTG 31) à  $0.09$  (BTG 32).

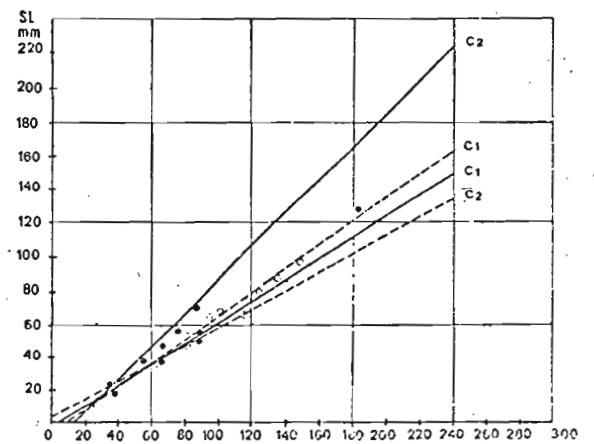
(\* : plus de 20% de la surface est gravillonnaire)



MILIEU VERSANT



BAS DE VERSANT



○ - - - milieu naturel  
● - - - milieu cultivé

FIGURE : 15 LAMES D'EAU RUISSELLEE CUMULEES



Ces valeurs sont sensiblement les mêmes que celles mesurées sur des lits de rivières soit caillouteux (0.03 - 0.08) (SIMONS et al. 1979), soit lisses (0.01-0.03) (Ven Te CHOW 1964). Il est satisfaisant de constater la convergence des résultats obtenus à des échelles très variées à l'aide de techniques très différentes (mesure en laboratoire, sur parcelles et sur bassins versants).

#### d) Les lames d'eau ruisselée

Les protocoles expérimentaux ayant été les mêmes sur les différents sites, il est possible de comparer les coefficients de ruissellements obtenus pour chaque sol. Comme pour la zone soudano-sahélienne, les mesures de la lame d'eau ruisselée cumulée (SL) s'ajustent sur une fonction linéaire de la hauteur de pluie cumulée (SP) : (fig. 15)

$$SL = \alpha(SP - \beta)$$

Le coefficient de ruissellement moyen sur un site est :

$$Kr (\%) = 100 \alpha - \alpha\beta \quad (\text{tableau N}^\circ X)$$

#### Etat naturel

La résultante des différentes phases du ruissellement détermine une augmentation du coefficient de ruissellement de l'amont vers l'aval. Comme nous l'avons montré lors de l'étude des intensités limite de ruissellement, les sols gravillonnaires de haut de versant drainent mieux que les sols situés en aval. Cet effet se trouve amplifié à Kobo du fait des différences de couvert végétal et de pente.

#### Après labour

Au sein d'une même toposéquence, le classement reste inchangé, sauf pour Kob 3 (couvert initial peu dense). Pour comparer l'effet labour sur chaque sol, nous avons calculé le paramètre  $\gamma = 100 - \frac{K_{rn}}{K_{rl}}$  (Tableau N° XI).  $\gamma$  est d'autant plus élevé que la végétation initiale est dense et l'horizon superficiel riche en éléments grossiers. Nous retrouvons ici l'effet favorable sur l'infiltration en sol nu des mulchs gravillonnaires.

Malgré les pentes faibles de la toposéquence Papara, les coefficients de ruissellement  $\gamma$  sont plus élevés qu'à Kobo. Cette différence est accentuée par l'extension relative des sols : Pap 3, sol hydromorphe très peu perméable est représentatif des 2/3 inférieurs de la toposéquence de Papara, alors que les sols rouges gravillonnaires bien drainants occupent les 7/8° du versant de Kobo.

Ces résultats obtenus sur sols saturés pour un nombre limité de pluies sont à rapprocher des coefficients d'écoulement mesurés sur bassins versants. Les trois stations situées non loin de Tingréla sur le bassin de la Bagoé ont des coefficients d'écoulement annuel variant de 12.8 % à 41.3 %, avec une moyenne de 25.7% (9 années de mesures). (SEKOU 1970). Une étude plus complète des coefficients d'écoulement de la zone de savane incluant Katiola (DUBREUIL 1960) apporte des valeurs plus faibles (5-15%).

TABLEAU N° X - Lames ruisselées cumulées

$$SL = \alpha(SP - \beta)$$

$$K_r\% = 100 \alpha - \beta$$

	n	r	$\alpha$	$\beta$	Kr (%)
Etat naturel :					
PAP 11	9	1.00	0.70	4.67	66.7
PAP 12	3	1.00	0.80	4.76	76.2
PAP 13	7	0.99	0.53	5.58	50.0
PAP 21	7	1.00	0.71	- 6.81	75.8
PAP 22	7	1.00	0.78	- 0.66	79.5
PAP 23	7	1.00	0.79	3.17	78.8
PAP 31	7	1.00	0.71	- 5.36	81.1
PAP 32	2	-	-	-	-
PAP 33	6	1.00	0.84	- 0.13	84.1
KOB 11	6	0.97	0.26	0.95	25.8
KOB 12	5	0.98	0.28	7.71	25.8
KOB 21	5	0.99	0.54	13.3	46.9
KOB 22	9	1.00	0.78	11.0	69.4
KOB 31	9	0.98	0.69	10.22	61.9
KOB 32	8	0.99	0.56	- 1.40	55.2
-----					
Après labour :					
PAP 11	7	1.00	0.84	1.80	82.5
PAP 12	4	0.98	0.66	- 0.71	66.5
PAP 13	7	0.99	0.71	2.85	69.0
PAP 21	7	1.00	0.78	- 3.42	81.7
PAP 22	7	1.00	0.83	4.11	79.6
PAP 23	7	1.00	0.89	5.09	84.5
PAP 31	7	1.00	0.90	5.54	85.0
PAP 32	6	1.00	0.95	0.42	94.6
PAP 33	7	1.00	0.92	- 0.21	91.8
KOB 11	7	1.00	0.72	6.48	67.9
KOB 12	5	1.00	0.73	2.62	71.1
KOB 21	5	1.00	0.92	5.98	86.5
KOB 22	8	1.00	0.88	2.38	85.9
KOB 31	6	0.99	0.63	5.14	59.8
KOB 32	5	1.00	1.00	19.08	80.7
-----					
n : nombre de mesures					
r : coefficient de corrélation					

TABLEAU N° XI - Coefficients de ruissellement moyens par site.

	PAP 1	PAP 2	PAP 3	KOB 1	KOB 2	KOB 3
Etat naturel Krn %	64.3	78.0	82.6	25.8	58.2	58.6
Après labour : Kr1 %	72.7	81.9	90.5	69.5	86.2	70.3
$\gamma = 100 - \frac{Krn}{Kr1}$	11.6	4.8	8.7	62.9	32.5	16.6
Couvert végétal initial (% approximatif)	< 5	< 5	15	75	60	40
Taux d'éléments grossiers de l'horizon superficiel (%)	53.2	26.9	0.1	20.3	0.0	1.8

L'hypothèse émise à partir des mesures sur parcelles se voit donc confirmée à une échelle beaucoup plus vaste : le ruissellement atteint des valeurs plus élevées dans les savanes du Nord que du Centre de la Côte d'Ivoire.

Ainsi l'utilisation de l'infiltromètre permettrait l'obtention de données hydrologiques comparative ; elle facilite surtout l'analyse des principaux paramètres intervenant sur le ruissellement : perméabilité des sols, couvert végétal, pente...

### III.2.3. Erodibilité des sols et comportements hydrodynamiques

Des échantillons de turbidité ont été collectés lors des différentes averses. Afin de comparer l'érodibilité des sols, nous avons sélectionné les valeurs obtenues dans des conditions expérimentales identiques :

- première pluie après labour d'intensité 120 mm/h

Seules les turbidités  $C_x$  correspondant au régime permanent de ruissellement ont été retenues. Le tableau N° XII présente les moyennes obtenues.

TABLEAU N° XII - Turbidités moyennes de la phase de régime permanent de ruissellement (I = 120 mm/h)

	PAP 1	PAP 2	PAP 3	KOB 1	FOB 2	KOB 3
$C_x$ (mg/l)	342	625	1993	785	1395	1954
Agrégats stable à l'eau (%)	61.1	38.6	36.4	35.4	43.1	37.4
K (nomogramme)	0.17	0.27	0.43	0.11	0.21	0.25

S'il est bien hasardeux de tirer une relation générale à partir de six mesures, il paraît néanmoins intéressant de signaler, que la valeur de la turbidité semble déterminée par le taux des éléments résistants à la détachabilité : *éléments grossiers + agrégats stables à l'eau* - méthode HENIN -. Les valeurs obtenues s'ajustent en effet sur la fonction :

$$C_x = 618.87 (e.g. + ag.eau)^{-1.61}$$

(g/l)                    n = 6,                    r = 0.98

e.g. : taux d'éléments grossiers (%)

ag. eau : agrégats stables à l'eau (% - HENIN).

Ceci confirme la relation étroite existant entre le taux d'agrégats stables à l'eau et l'érodibilité des sols (BRYAN, 1968 - De VLEESCHAUWER et al. 1978) mais souligne également le rôle très important des gravillons superficiels quant à la protection des sols ferrallitiques. Le nomogramme (WISCHMEIER et al.

1971) ne prend pas en compte ce paramètre très important et péjore de ce fait l'érodibilité des horizons superficiels gravillonnaires : les sols PAP 1 et PAP 2, classés respectivement 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> parmi les sols les moins érodibles après simulation de pluies occupent le 2<sup>e</sup> et le 5<sup>e</sup> rang des valeurs évaluées à l'aide du nomogramme.

Cet élément met en cause l'utilisation du nomogramme dans l'estimation de l'érodibilité de nombreux sols tropicaux. Plusieurs chercheurs étudiant les sols de cette zone (ROOSE 1977, DE VLEESCHAUNER et al. 1978) émettent les mêmes réserves.

Notons que les sols de haut de versant, les mieux drainants (cf. § précédent) sont également ceux qui résistent apparemment le mieux à l'érosion. Hormis le taux de gravillons probablement gênant pour la culture mécanisée, les différentes caractéristiques hydrodynamiques (mais également physiques et biologiques VALENTIN 1978) paraissent indiquer un gradient de contraintes agronomiques croissant de l'amont vers l'aval des toposéquences de cette zone.

### III.3. DOMAINE TROPICALE HUMIDE

#### III.3.1. Cadre naturel

En novembre et décembre 1978 puis en février et mars 1979 deux campagnes de simulation de pluies furent menées sur différents types de sols représentatifs d'un bassin versant de 3,5 ha soumis à des cycles culturels traditionnels dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire, plus précisément dans la région de Taï (environ 5° 50 N et 7° 20 W). (cf. carte de situation).

##### a) Climat et végétation

Dans cette région correspondant à la basse Côte d'Ivoire forestière la pluviométrie moyenne annuelle atteint 1950 mm répartie en deux maxima : juin (300 mm) et septembre (350 mm) encadrant d'abord une saison sèche de décembre à janvier pendant laquelle les précipitations moyennes mensuelles descendent sous 45 mm, puis un ralentissement des précipitations en août (120 mm).

Le couvert végétal naturel est une forêt dense humide sempervirente, appartenant au secteur ombrophile du domaine guinéen (A. AUBREVILLE - 1959). Dans le bassin où furent menées ces expérimentations, cette forêt a été défrichée traditionnellement pour une culture de riz pluvial.

##### b) Modelé et sols

Les interfluves de quelques 900 à 1100 mm d'extension et 40 à 50 m de dénivelée ont un profil convexo-concave. Les sommets peuvent être occasionnellement plans et il y subsiste alors quelques lambeaux de cuirasse très fragmentée. Les bas fonds sont plats, larges de quelques 100, 150 m, marécageux et à pente longitudinale faible.

La roche mère est une migmatite hétérogène correspondant à la granitisation de très anciennes séries métamorphiques et aboutissant le plus souvent à des granites alcalins gris-clair. Des panneaux de schistes peu transformés peuvent subsister.

Dans le bassin étudié la répartition séquentielle des sols se présente de la façon suivante : cf. "Toposéquences et sites expérimentaux en Côte d'Ivoire".

- du *sommet jusqu'à la mi-versant* (pente de 0 à 20%) on trouve sur 70 cm une accumulation gravillonnaire (50% en volume) dans une matrice argileuse rouge de structure bien développée polyédrique fine à moyenne, de 70 à 180 cm on observe des argiles meubles (55 à 60% d'argile) rouges, à structure polyédrique et grenue fine et très fine ; les altérations ferrallitiques du granite apparaissant vers 180, 200 cm et semblent se poursuivre très profondément. Il s'agit de "sols ferrallitiques fortement désaturés, remaniés modaux" (CPCS 1967),

- de la *mi-versant jusqu'au tiers inférieur*, soit sur environ 100, 150 m, et sur des pentes passant de 20 à 5%, on observe une diminution des affleurements gravillonnaires. Ceux-ci se recouvrent de quelques 10, 20 cm de sables argileux passant ensuite à des argiles sableuses jaune. A l'horizon gravillonnaire qui ne fait plus que 20, 30 cm d'épaisseur succède un horizon légèrement tacheté argilo-sableux à argileux (40 à 50% d'argile). Les phases altéritiques n'apparaissent que vers 200 cm. Il s'agit de "sols ferrallitiques fortement désaturés, typiques, remaniés". (C.P.C.S 1967),

- du *tiers inférieur jusqu'en limite du bas-fond*, sur environ 100, 120 m la pente passe de 5 à 7 puis 15 et 0%. L'horizon gravillonnaire disparaît. Depuis la surface jusqu'à 100 cm on découvre des horizons sableux puis argilo-sableux (40% d'argile) jaune pâle, massifs, à faible porosité fine mais traversés par de gros drains d'origine biologique. En limite inférieure on retrouve un horizon fortement tacheté et très souvent induré en carapace à partir de 120 cm. Les altérites sont rarement situées à moins de 200 cm. Il s'agit de "sols ferrallitiques fortement désaturés coluvionnés, indurés" (CPCS 1967),

- les *bas-fonds* sont occupés par des "sols hydromorphes minéraux à gley d'ensemble" (CPCS 1967) souvent de textures très hétérogènes (sables grossiers blancs à intercalations argilo-limoneuses grises).

La surface du sol est plane, à affleurement de gravillons jusqu'à la mi-versant, à partir de là, un micromodelé plus ou moins ample canalise le ruissellement en chenaux anastomosés de quelques 30 à 50 cm de large et de plus en plus encaissés vers l'aval (10 à 30 cm de dénivelée).

### III.3.2. Comportements hydrodynamiques

Lors des deux campagnes de simulation de pluies, nous avons testé les comportements des trois types de sol du versant à l'aide d'un dispositif expérimental déjà présenté antérieurement. Les protocoles expérimentaux diffèrent sensiblement de ceux de la Haute-Volta car nous les avons évidemment adaptés aux caractéristiques climatiques naturelles (BRUNET MORET 1967) : les durées des averses de différentes intensités furent sensiblement allongées, les temps de ressuyage ( $t_a$ ) furent raccourcis. En intervenant à deux périodes de l'année nous avons pu tester les effets du couvert végétal :

- riz à maturité et recru ligneux et herbacé lors de la première campagne de fin de saison des pluies (averses TH..),

- sols dénudés à la suite de la récolte, du désherbage et du brûlis en saison sèche (averses TS..).

Enfin nous avons testé en saison sèche deux pratiques culturales :

- un labour après extirpation partielle du système racinaire de l'ancienne forêt et du champ de riz,

- un buttage non cloisonné identique à celui qui est réalisé par l'ethnie baoulé migrant actuellement dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

Comme ces essais sont relativement récents, nous n'avons dépouillé qu'une partie des données expérimentales aussi n'avons nous pas pu nous livrer à une analyse des processus élémentaires aussi précise que celle de la Haute-Volta. Nous en resterons donc au niveau des bilans globaux avec cependant la possibilité de comparer :

- les effets du couvert végétal en prenant pour témoins le sol partiellement dénudé,

- les modifications apportées par les affleurements d'éléments grossiers du haut des versants,

- les effets d'un simple labour dans deux situations sol,

- les effets d'un buttage non cloisonné également sur deux situations sol.

#### a) Les effets du couvert végétal

Les figures n<sup>os</sup> 16 à 18 et le tableau N<sup>o</sup> 13 résument les données obtenues, sous intensité de 60 mm/h, pour les situations suivantes :

Sol de haut de versant (affleurement de gravillons, matrice argileuse, pente 17%,

Somé en riz (80% de recouvrement végétal sur 120 cm)

Sol faiblement humecté : TH 1.3.1

Sol fortement humecté : TH 1.19.2

Dénudé (15% de couvert végétal sous la forme d'îlots de jeunes pousses

Sol faiblement humecté : TS 1.3.1

Sol fortement humecté : TS 1.14.1

Sol de bas de versant (sables argileux en surface, pente : 8%)

Somé en riz (95% de recouvrement végétal sur 120 cm)

Sol faiblement humecté : TH 3.2.1

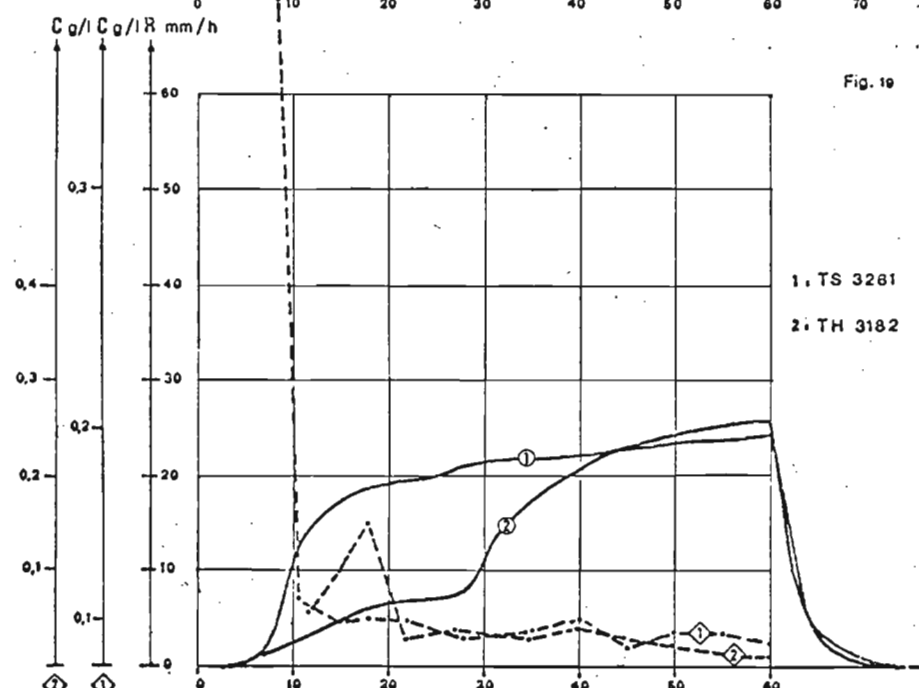
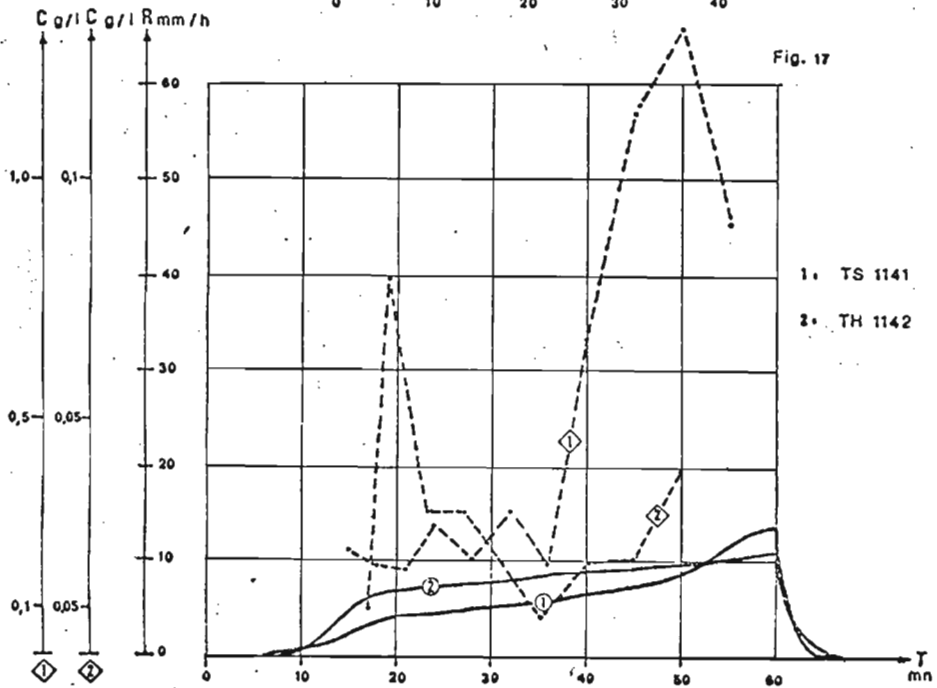
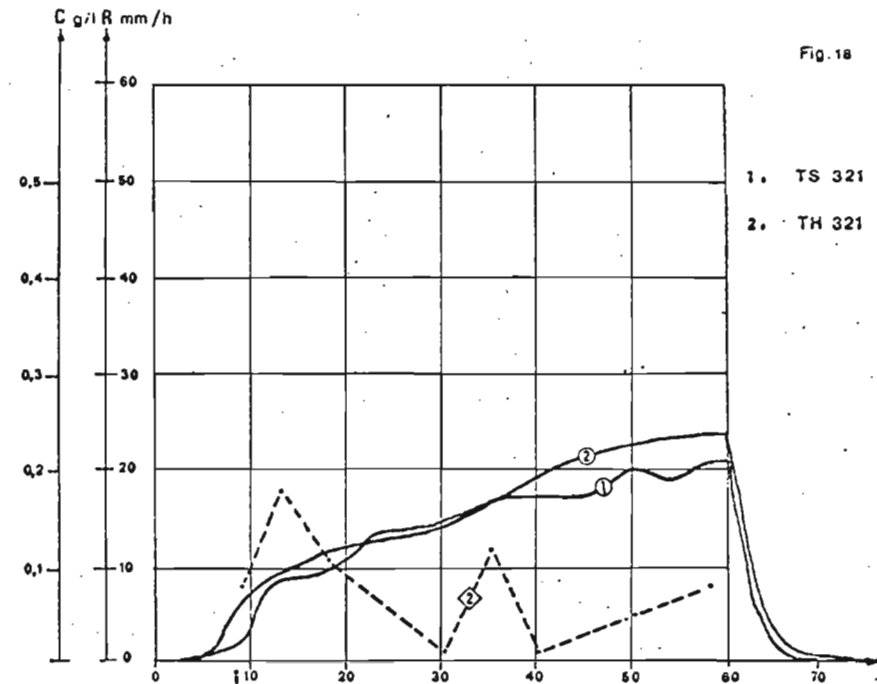
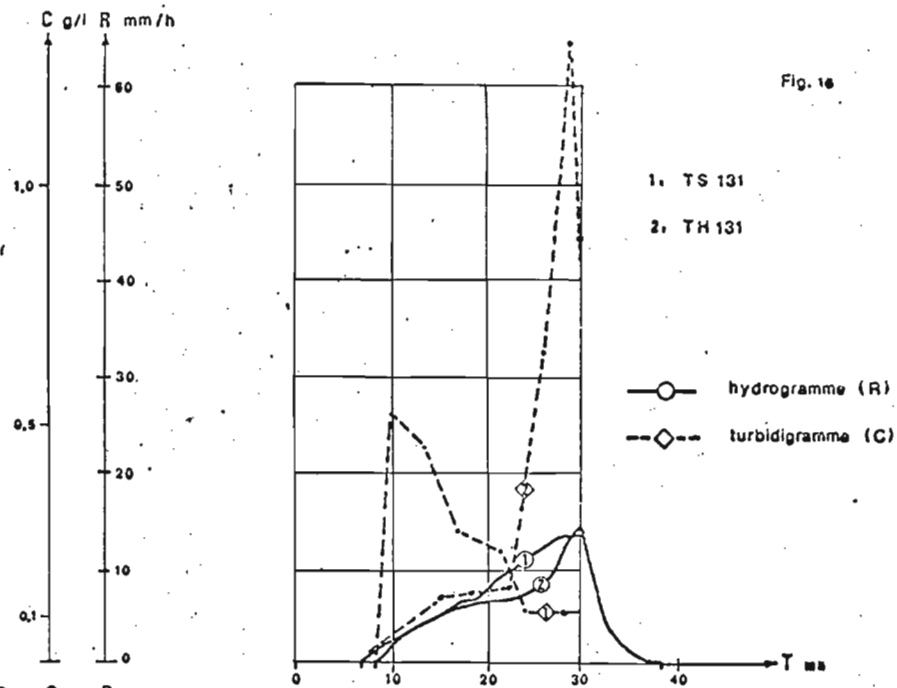
Sol fortement humecté : TH 3.18.2

Dénudé (15% de couvert végétal sous la forme d'îlots d'adventices herbacées

Sol faiblement humecté : TS 3.2.1

Sol fortement humecté : TS 3.26.1

les temps de ressuyage oscillent entre 18 et 20 heures.





• Sols à affleurements gravillonnaires de haut de versant

Dans des conditions de *faible humectation*, (comparaison TH 1.3.1/ TS 1.3.1) on constate que le couvert végétal modifie peu la hauteur de la lame ruisselée qui reste d'ailleurs faible dans les deux cas :  $L =$  environ 3 mm et  $L2/L1 = 1,1$ . Celle-ci résulte de hauteurs d'imbibitions voisines et d'intensités d'infiltration à l'arrêt de l'averse respectivement égales à 47,2 (nu) et 44,5 mm/h (riz). Bien que les paliers de ruissellement n'aient pas été atteints, on constate, sur les hydrogrammes, une évolution remarquablement similaire des deux phases transitoires. En ce qui concerne l'érosion, on note cette fois une influence nette du couvert végétal puisque les pertes en terres sont environ 2 fois plus fortes sur sol dénudé ( $E2/E1 = 0,46$ ). Mais pour une pluie utile de 30 mm, cette érosion reste insignifiante dans les deux cas. D'une façon générale on peut retenir que sur le sol planté, l'énergie des gouttes se dissipe à deux niveaux : celui du couvert végétal et celui des affleurements d'éléments grossiers, cette seconde forme d'interception agissant seule sur le sol dénudé. Ceci est illustré par le rapport des pics de turbidité  $Cs2/Cs1 = 0,40$  qui rend bien compte de ces deux niveaux de dissipation de l'énergie.

Dans des conditions de plus *forte humectation* (comparaison TH 1.19.2/TS 1.14.1) : peu de changement par rapport au cas précédent, on note simplement une légère augmentation de l'infiltrabilité sur la parcelle riz ( $Kr = 8,9\%$  au lieu de 9,6% dans le cas précédent. On observe par contre une accentuation de la différence des érodibilités ( $E2/E1 = 0,05$ ) qui est liée essentiellement aux différences de turbidité et au décalage de leurs pics Cs. Une protection accrue sur la parcelle semée en riz a probablement été assurée par la verse des nombreux plants détremés, protégeant dès lors la surface du sol à la façon d'un mulch.

En *résumé*, les lames infiltrées restent importantes, l'érosion est très faible mais malgré cela l'effet favorable du couvert se manifeste déjà.

• Sols meubles de bas de versant

Dans des conditions de *faible humectation* (comparaison TH 3.2.1/TS 3.2.1) les infiltrations sont remarquablement voisines, tant au niveau des hauteurs de pluies d'imbibition ( $Pi2/Pi1 = 1,07$ ) que celui des intensités minimales d'infiltration en fin de pluies ( $Ftu\ 2/Ftu\ 1 = 1,06$ ). En valeur absolue ces sols sont moyennement perméables. A ce niveau d'humectation leur identité de comportement peut s'expliquer par une influence prépondérante de la pellicule de battance constituée avant la levaison du riz et peu remaniée par une technique culturale fruste (semis en poquet tous les 30, 40 cm). Nous ne disposons pas de données concernant l'érosion.

Dans des conditions d'*humectation plus importantes* (comparaison TH 3.18.2/TS 3.26.1), les infiltrations sous riz sont devenues légèrement plus importantes pas tellement du fait de différences dans les hauteurs de pluies d'imbibition (les 4 minutes de ruissellement parasites sur TH 3.18.1 ne sont pas à prendre en compte) mais surtout à cause d'une phase transitoire beaucoup plus longue sous le riz. Pour ces fortes humectations il faut considérer l'ameublement du sol dû au développement du système racinaire du riz augmentant la capacité de stockage sur les premiers horizons

La pellicule de battance continue cependant à contrôler fortement l'infiltrabilité dans les deux cas. En ce qui concerne l'érosion la structure interceptrice du riz intervient nettement au niveau des turbidités pour ce type de sol, d'où un rapport  $E2/E1 = 0,25$ . Comme en sommet de versant, les modifications portent sur des niveaux d'érosion faibles dans les deux cas.

En résumé, les lames infiltrées sont moyennes, les différences de stockage peuvent être attribuées au développement du système racinaire lorsqu'au bout d'un certain nombre d'averse le front d'humectation le dépasse. La pellicule de battance favorise le ruissellement mais fixe un seuil à l'érodibilité de la parcelle dénudée.

b) L'influence des affleurements d'éléments grossiers

Considérons maintenant plus strictement les effets des affleurements de gravillons sur les sols de sommet comparés aux sols de bas de versant, *identiquement dénudés*, et toujours arrosés par des averses à 60 mm/h.

Les situations testées sont les suivantes (cf. figures n°s 20-21 et tableau n° 14) :

Sol fortement humecté (14<sup>ème</sup> averse, 800 mm de pluies cumulées (SPu)

Gravillonnaire et argileux de haut de versant : TS 1.14  
Meuble argilo-sableux de bas de versant : TS : 3.14.1

Sol très fortement humecté (26<sup>ème</sup> averse, SPu = 1000 mm)

Gravillonnaire et argileux de haut de versant : TS: 1.26  
Meuble argilo-sableux de bas de versant : TS : 3.26.1

a) La *quatorzième averse* a duré 25 minutes dans les deux cas (comparaison TS 3.14.1/TS 1.14.1). Les infiltrations sont nettement plus importantes sur le sol gravillonnaire tant au point de vue d'une augmentation de la pluie d'imbibition :  $Pi2/Pi1 = 0,44$  que par une intensité d'infiltration plus forte en fin d'averse  $Ftu2/Ftu1 = 0,8$ . Il en résulte un rapport  $Kr2/Kr1 = 4,8$  mais on remarquera, qu'à ce stade des essais et pour une pluie utile de 25 mm, les coefficients de ruissellement restent modérés. La différence s'explique par une conductivité hydraulique nettement plus faible en bas de versant. L'érosion reste faible dans les deux cas et les différences, peu significatives, sont uniquement dues aux deux niveaux des ruissellements car les turbidités semblent identiques.

b) La *vingt sixième averse* a duré 65 minutes (comparaison TS 3.26.1/TS 1.26.1). L'infiltration dans les deux types de sol est plus faible que précédemment ( $Kr1 = 32,0$  et  $21,8\%$ ). Les différences entre les deux sols s'atténuent surtout à cause d'une diminution de l'infiltrabilité des sols de sommet. Les niveaux d'érosion restent faibles mais curieusement, les érosions sont inversées ( $E2/E1 = 0,48$ ) en liaison avec une inversion des paliers de turbidité. Bien qu'il s'agisse de valeurs très faibles, la pellicule de battance constituée sur les sols meubles de bas de versant serait devenue moins érodible que la surface des sols gravillonnaires de sommet.

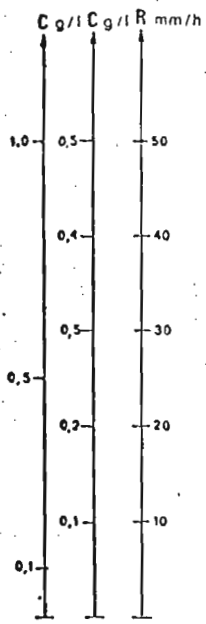
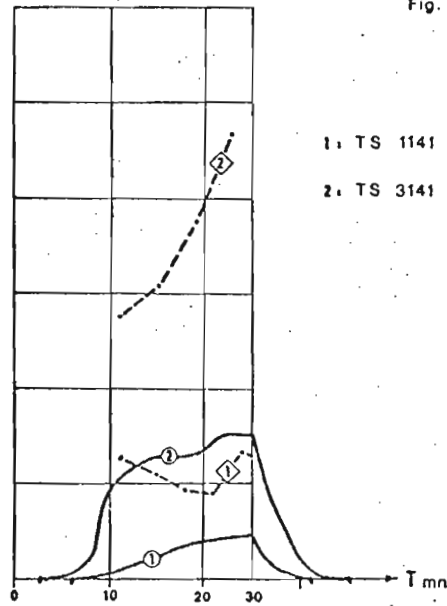


Fig. 20



- 1: TS 1141
- 2: TS 3141

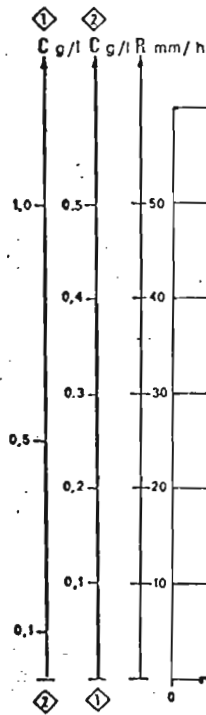
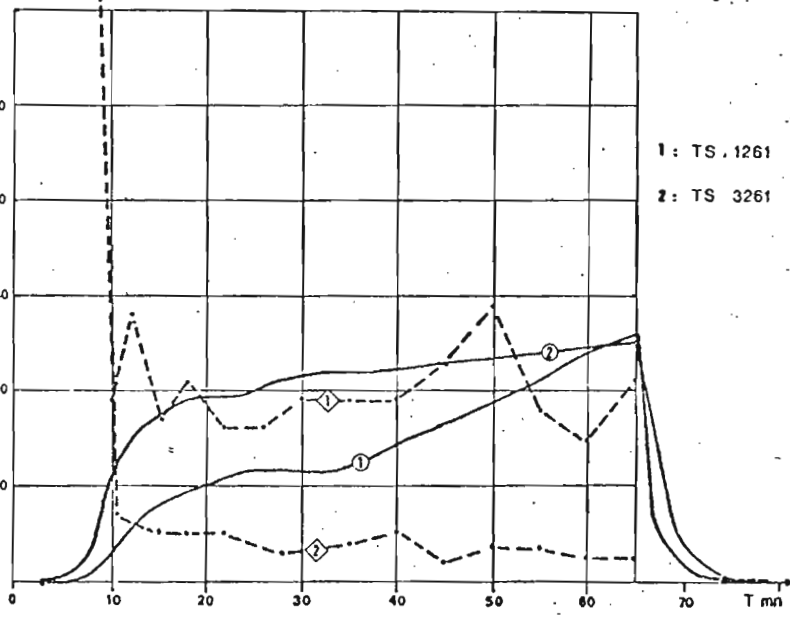


Fig. 21



- 1: TS 1261
- 2: TS 3261

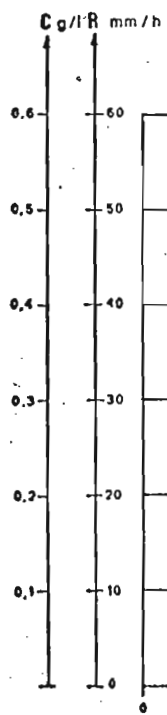
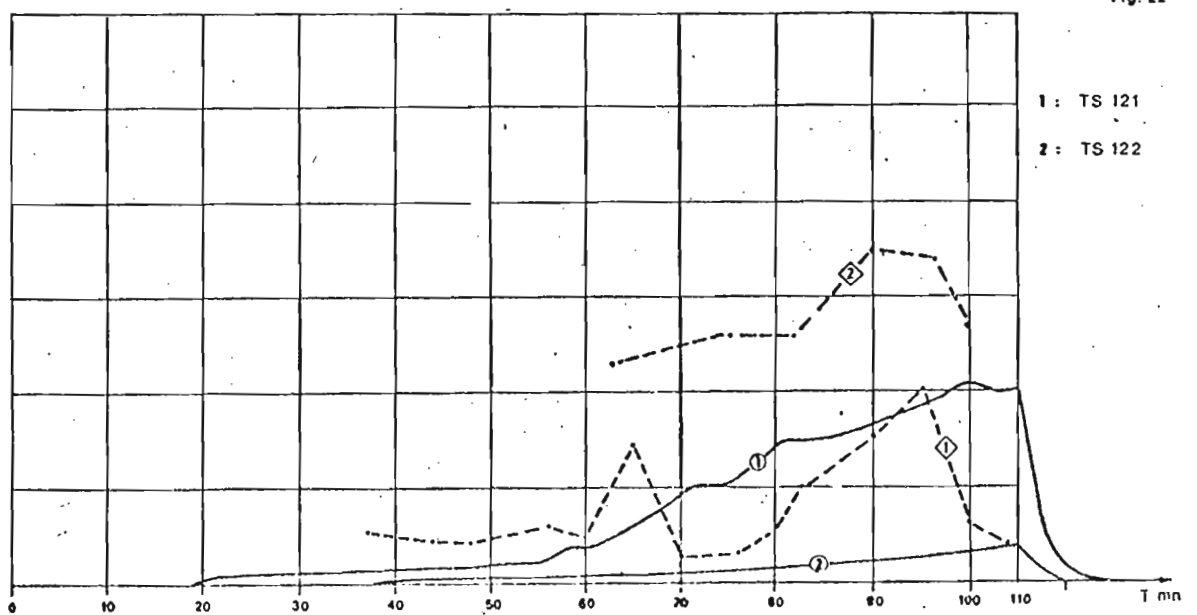


Fig. 22



- 1: TS 121
- 2: TS 122

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Réf.	Traitement	ta	Im	Pu	SPu	Pi	L	Dr	W	Kr	Rx	FN	E	Cs	Cx
TS.1.3.1. TH.1.3.1.	1. nat. 2. riz 2/1	18H	60	30	200	7,0 8,5 1,18	2,9 3,4 1,1	0,6 0,6	27,7 25,9	9,6 11,6 1,2	(14) (14)	(47,2) (44,5)	13,9 6,4 0,46	1,29 0,52 0,40	0,1 0,1 0,9
TS.1.14.1 TH.1.19.2	1. nat 2. riz 2/1	20H	60	60	800	6,3 7,7 1,22	5,4 7,1 1,3	0,3 0,3	55,6 53,4	8,9 11,7 1,3	(13,5) 10,5	(47,5) 50,0	37,5 2,0 0,05	1,32 0,08 0,06	? 0,0 0,0
TS.3.2.1 TH.3.2.1	1. nat 2. riz 2/1	20H	60	60	200	2,7 2,9 1,07	13,7 15,7 1,1	0,8 1,0	44,8 48,1	23,5 24,6 1,0	(20,0) (23,7)	(38,0) (40,5) 1,06	- -	- 0,18	- (0,0)
TS.3.26.1 TH.3.18.2	1. nat 2. riz 2/1	20H	60	60	1000 800	3,2 2,7 0,84	19,3 14,3 0,7	1,1 1,1	42,3 47,0	31,5 23,3 0,7	24,5 25,5	36,6 35,3	17,1 4,2 0,25	1,40 0,15 0,11	0,0 0,0 0,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Réf.	Traitement	ta	Im	Pu	SPu	Pi	L	Dr	W	Kr	Rx	FN	E	Cs	Cx
TS.1.14.1 TS.3.14.1	1. grav. 2. meuble 2/1	20H	60	25	800	6,3 2,8 0,44	0,9 4,2 4,8	0,3 0,7	24,5 21,3	3,4 16,5 4,8	(4,5) (15,5)	(56,5) (45,7) 0,8	2,0 12,0 5,9	- 0,47	0,2 0,2
TS.1.26.1 TS.3.26.1	1. grav. 2. meuble 2/1	20H	60	65	1000	3,3 3,2 0,98	14,3 21,3 1,5	1,4 1,1	51,0 45,4	21,8 32,0 1,5	(26) (25)	(20,3) (36,6)	38,0 18,2 0,48	? 1,4	0,2 0,0 0,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Réf.	Traitement	ta	Im	Pu	SPu	Pi	L	Dr	W	Kr	Rx	FN	E	Cs	Cx
TS.1.2.1 TS.1.2.2	1. nat 2. lab. 2/1	90H	60	105	200	19,6 38,5 1,96	12,2 1,6 0,1	0,8 0,08	98,6 109,2 1,1	11,0 1,5 0,1	(21,0) (4,0)	(42,3) (59,3) 1,4	11,1 4,1 0,37	0,21 0,35 1,7	0,05 0,25 5,0
TS.1.14.1 TS.1.14.2	1. nat 2. lab. 2/1	20H	60	60	800	6,3 2,1 0,33	5,4 21,3 3,9	0,3 0,6	55,6 39,7 0,7	8,9 35,0 3,9	(13,5) 25,0 1,8	47,5 36,0 0,8	37,5 252,4 6,73	1,3 1,7 1,3	? 1,2
TS.3.20.1 TS.3.20.2	1. nat 2. lab. 2/1	15H	60	25	850	2,4 0,9 0,37	6,9 18,7 2,7	0,9 0,7 0,8	19,1 7,3 0,4	26,5 70,8 2,7	(23,0) 48,5	(39,4) 13,9	9,9 15,03	0,9 12,1	0,6 8,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Réf.	Traitement	ta	Im	Pu	SPu	Pi	L	Dr	W	Kr	Rx	FN	E	Cs	Cx
TS.1.26.1 TS.1.26.2	1. nat 2. buttes 2/1	20H	60	120	1000	3,3 23,0 7,0	45,1 34,5 0,8	1,4 0,8 0,6	75,5 86,1 1,1	37,4 28,6 0,8	(40,0) 31,5	(20,3) 28,8	112,7 806,1 7,15	0,3 4,6 15,3	? 2,5
TS.3.26.1 TS.3.26.2	1. nat 2. buttes 2/1	20H	60	65	1000	3,2 15,9 4,9	21,3 26,4 1,2	1,1 1,9 1,7	45,4 40,3 1,1	32,0 39,7 1,2	(25,0) 46,2	(36,6) 15,4	18,2 871,7 47,9	1,4 5,8 4,1	0,0 3,0 60

1. Réf : numéro de référence de la parcelle
2. Traitement subi par la parcelle
3. ta : temps de ressuyage entre deux averses (heures)
4. Im : intensité de l'averse (mm/h)
5. Pu : hauteur de la pluie utile (mm)
6. SPu : hauteur cumulée des pluies depuis le début des essais (mm)
7. Pi : hauteur de la pluie d'imbibition (mm)
8. L : hauteur de la lame ruisselée (mm)

9. Dr : hauteur de la détention superficielle récupérable (mm)
10. W : hauteur de la lame infiltrée (mm)
11. Kr : coefficient de ruissellement (%) =  $\frac{100L}{Pu}$
12. Rx : intensité maximum du ruissellement en palier (mm/h)
13. FN : intensité minimale de l'infiltration en palier (mm/h)
14. E : érosion globale (kg/ha)
15. Cs : maximum de turbidité (g/l)
16. Cx : palier de la turbidité (g/l).

En résumé, les affleurements gravillonnaires favorisent l'infiltration mais leur taux semble ici insuffisant pour que cet effet soit durable.

c) Les effets de deux techniques culturales

α) Le labour

Nous avons reproduit sur le tableau N° 15 les données permettant la comparaison des situations suivantes :

Sol de haut de versant, gravillonnaire et argileux

Sol peu humecté (SPu = 200 mm et 90 h. de ressuyage)

Sol dénudé non labouré (témoin) : TS 1.2.1

Sol dénudé labouré : TS 1.2.2

Sol fortement humecté (SPu = 800 mm, 20 h. de ressuyage)

Sol dénudé non labouré : TS 1.14.1

Sol dénudé labouré : TS 1.14.2

Sol de bas de versant, meuble, argilo-sableux

Sol fortement humecté (SPu = 850 mm et 15 h. de ressuyage)

Sol dénudé non labouré : TS 3.20.1

Sol dénudé labouré : TS 3.20.2

les intensités d'averse sont toujours de 60 mm/h.

• Labour sur sol gravillonnaire de haut de versant

A l'issue de la *seconde averse* (comparaison TS 1.2.2/TS 1.2.1) les infiltrations restent importantes sur les deux sols (cf. figure n° 22). Les gains à l'infiltration consécutifs au labour apparaissent nettement, tant au niveau des pluies d'imbibition :  $Pi2/Pi1 = 1,9$ , que des intensités d'infiltration finales :  $Ftu\ 2/Ftu\ 1 = 1,4$ . Cependant, étant donné les fortes hauteurs de pluies utiles, les lames infiltrées restent comparables :  $W2/W1 = 1,1$ . On note que les turbidités moyennes sont nettement plus fortes sur le labour où l'érosion n'est limitée que par la faiblesse des ruissellements.

A partir de 650 mm de pluies cumulées, (12<sup>ème</sup> averse), on assiste à une inversion des processus : les infiltrations sur le sol labouré finissent par devenir nettement inférieures à celles du sol témoin, c'est particulièrement ce qui se confirme pour la 14<sup>ème</sup> averse (comparaison : TS 1.14.2/TS 1.14.1) où l'on a :  $Pi2/Pi1 = 0,3$  et  $Ftu\ 2/Ftu\ 1 = 0,8$ . Il en résulte un ruissellement 4 fois plus important sur le labour mais on remarque aussi que le palier de ruissellement s'établit à un niveau modeste :  $Rx = 25\text{mm/h}$  (d'où  $F_n = 36\text{ mm/h}$ ), alors que sur le témoin non labouré il se manifeste vers 50 minutes de pluie une nouvelle inflexion des intensités de ruissellement. Les érosions sont 7 fois plus importantes sur le labour du fait de la conjonction de fortes turbidités et d'un ruissellement devenu plus important qu'en début d'essai (cf. figure n° 23).

• Labour sur sol meuble, argilo-sableux, de bas de versant

Alors que le labour du sol gravillonnaire amène un gain d'infiltration jusqu'à environ 650 mm de pluies cumulées, on observe ici et dès la première averse des ruissellements 3,5 fois plus importants sur le labour que sur le témoin dont les mottes se désagrègent presque totalement au bout de 30 mm de hauteur de pluie utile (observation de terrain). Au bout de 850 mm de pluies cumulées, la situation n'a pas changé (cf. les hydrogrammes TS 3.20.1 et 2 de la figure n° 24), et  $Kr2/Kr1 = 2,7$ , l'on note une érosion 150 fois plus importante sur le labour qui cède pour seulement 25 mm de pluie utile : 1500 kg/ha de terre. On ne peut donc plus invoquer dans ce cas une action protectrice de la pellicule de battance. La faible hauteur d'imbibition ( $P_i = 0,9$  mm) est une preuve de la saturation immédiate de toute l'épaisseur du sol remanié par le labour (15 à 18 cm) et de l'entraînement incessant des éléments de surface ayant perdu toute cohésion. Cette explication est vérifiée aussi par la très faible détention superficielle ( $D_r = 0,7$  mm) qui implique la prédominance d'un ruissellement hypodermique non collecté par le canal de ruissellement. A ce stade, le sol n'est donc que peu protégé par la lame d'eau ruisselante et l'effet "splash" peut s'y exercer de façon continue.

En résumé, le labour est favorable aux sols gravillonnaires en ce qui concerne l'infiltration. Si le couvert végétal ne s'installe pas rapidement les risques d'érosion sont sérieux. Le labour a des effets catastrophiques sur les sols de bas de versant par la conjonction rapide de forts ruissellements et de fortes turbidités, sa protection par le couvert végétal est impossible à réaliser car les pertes en terres sont immédiates.

β) Le buttage

En fin de campagne, après ressuyage du sol un buttage traditionnel, non cloisonné (1 butte au m<sup>2</sup>) a été réalisé sur les sols de haut et de bas de versant. Nous proposons comme précédemment d'évaluer son effet par comparaison avec le témoin non remanié. Les situations expérimentales sont donc les suivantes :

Sol de haut de versant gravillonnaire et argileux, fortement humecté (SPu = 1000 mm, 20 h. de ressuyage, averse à 60 mm/h)

Sol dénudé non labouré (témoin) : TS 1.26.1

Sol dénudé butté : TS 1.26.2

Sol de bas de versant, meuble, argilo-sableux, fortement humecté (SPu = 1000 mm, 20 h de ressuyage, averse à 60 mm/h)

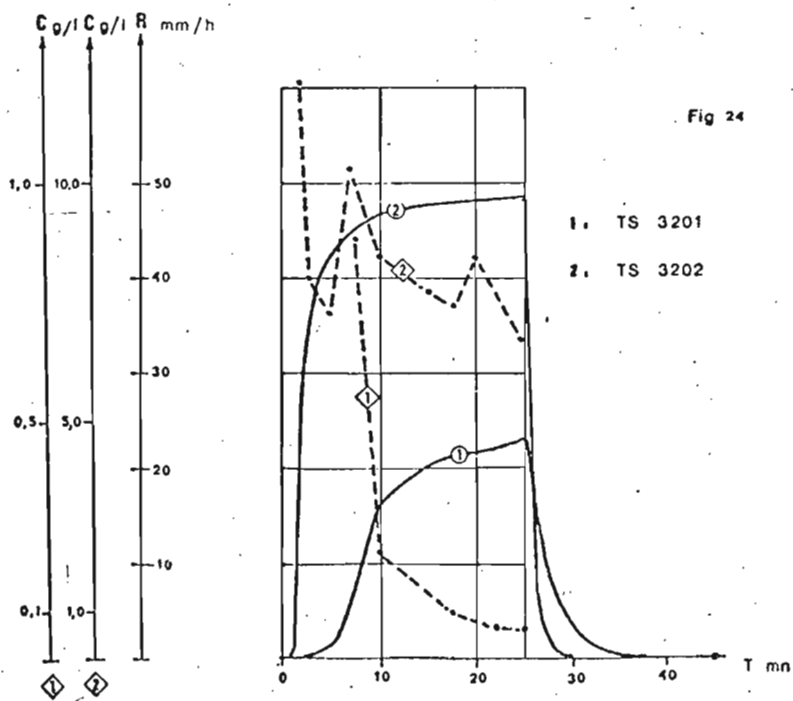
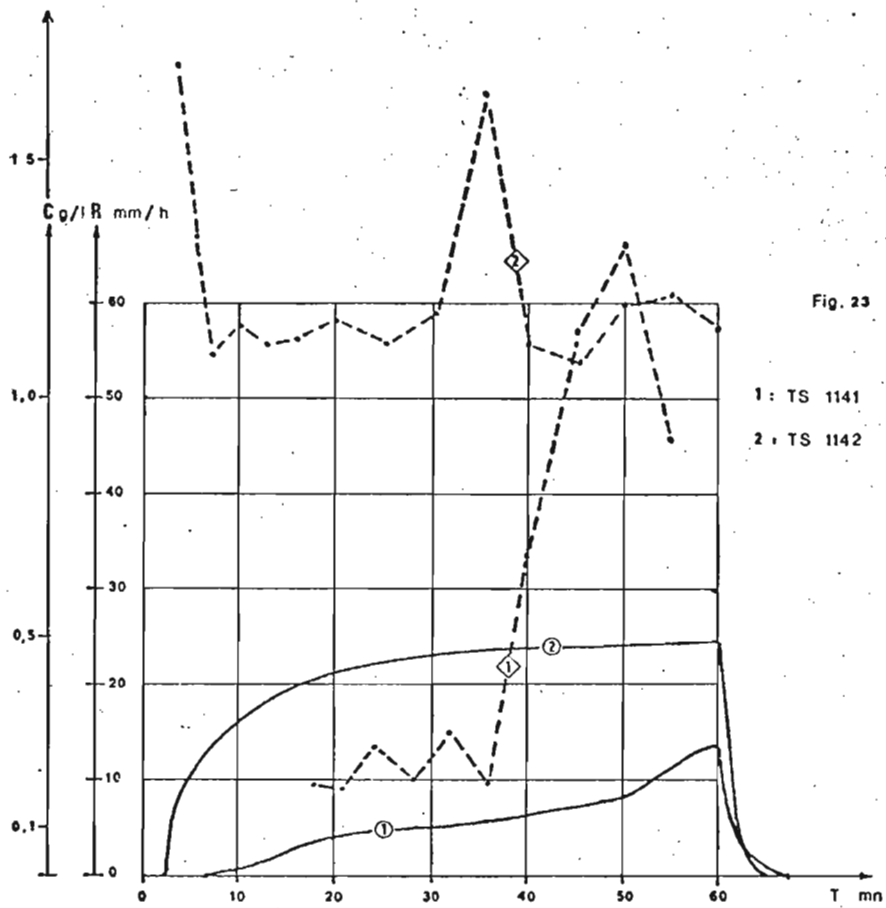
Sol dénudé non labouré (témoin) : TS 3.26.1

Sol dénudé, butté : TS 3.26.2

a) Buttage sur sol gravillonnaire de haut de versant

La comparaison des deux hydrogrammes (cf. figure n° 25) amène les constatations suivantes :

- les comportements des deux sols sont différents jusqu'à environ 35 mm de pluies utiles ; sur le témoin, après 3,3 mm de pluies d'imbibition, s'est instauré un régime permanent du ruissellement correspondant au pseudo-palier  $R_x 1 = 11,5$  mm/h. Sur le sol butté, après une imbibition plus importante ( $P_i 2 = 23$  mm) ce court palier du régime de ruissellement n'apparaît pas (cf. tableau n° 16),



- Au-delà de 35 mm de pluie utile, les comportements deviennent remarquablement voisins. On observe des phases de transition identiquement longues et des paliers réels de ruissellement atteints dans les deux cas vers 115 minutes (115 mm de pluie utile) avec  $R_x$  (butte) = 30 mm/h et  $R_x$  (témoin) = 40 mm/h.

Le buttage amène donc un léger gain au niveau de l'imbibition et de l'intensité minimale d'infiltration, il en résulte un rapport  $K_r 2/K_r 1 = 0,8$ . En ce qui concerne l'érosion, ses effets sont négatifs du fait de turbidités moyennes environ 10 fois plus importantes que celles du témoin, alimentant un débit solide suffisant pour exporter 7 fois plus de terres ( $E_2 = 806$  kg/ha pour 120 mm de pluies utiles). Ces fortes turbidités sont dues à l'épuisement en terre fine, des 50 buttes sans possibilité de stockage de ces sédiments sur la parcelle du fait de l'immédiate canalisation du ruissellement entre les rangées de buttes. On décèle également sur le turbidigramme un début de cisaillement à partir de 85 minutes.

b) Buttage sur sols meubles de bas de versant  
(cf. figure n° 26)

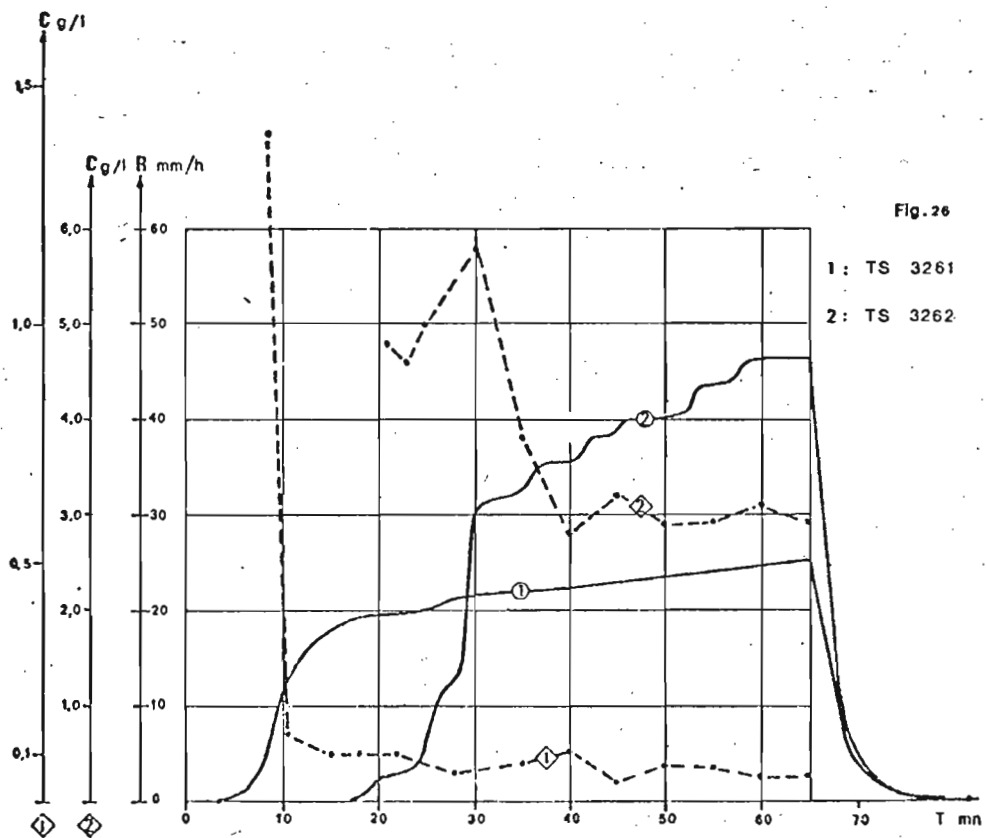
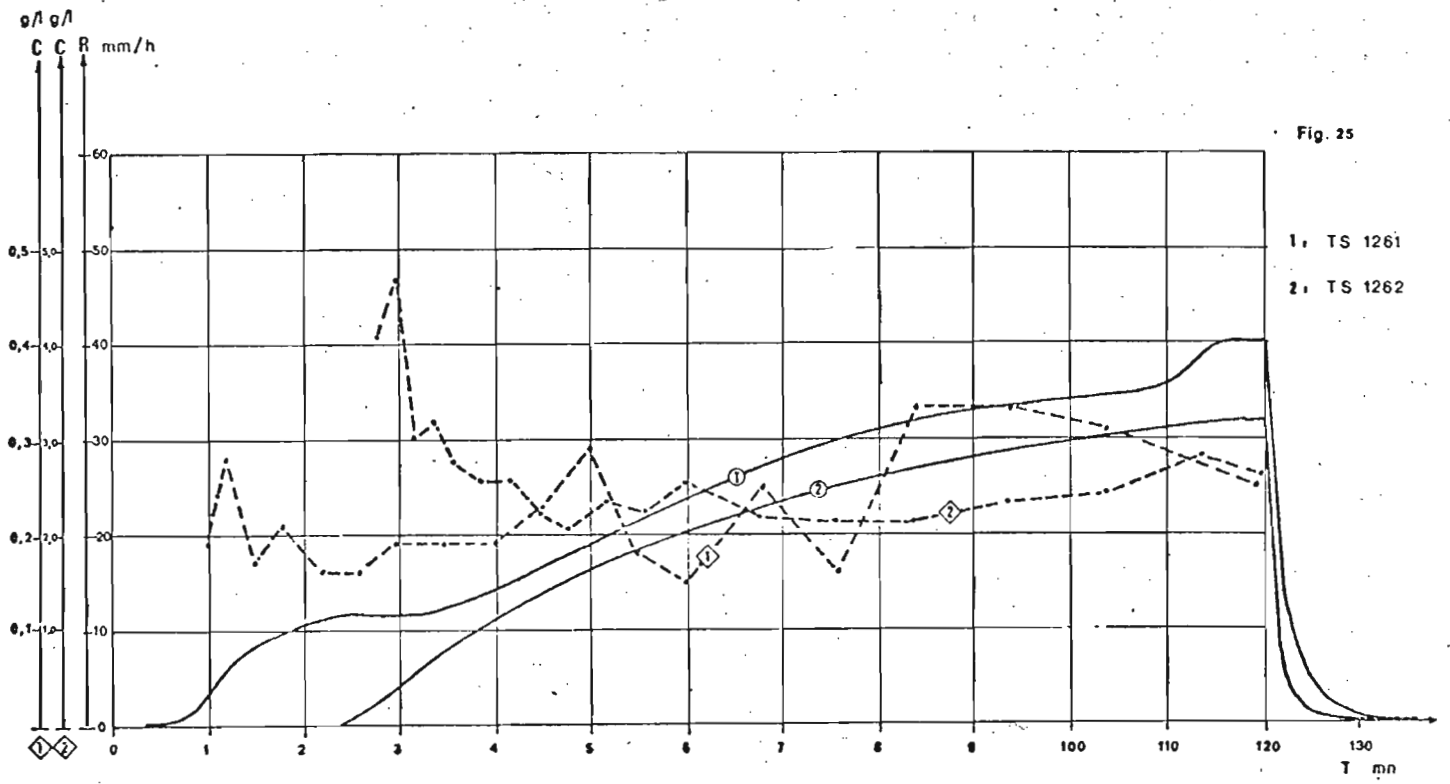
On retrouve, comme pour les sols de haut de versant un gain intéressant au niveau des pluies d'imbibitions :  $P_i 2/P_i 1 = 5$ . Par contre après une montée rapide du régime de ruissellement on atteint vers 30 minutes des paliers (ou pseudo-paliers d'infiltration) très défavorables à l'utilisation de cette technique culturale :  $F_n 2/F_n 1 = 0,4$ . Pour des averses de courtes durées les différences d'infiltrabilité ne sont pas encore considérables :  $K_r 2/K_r 1 = 1,2$  mais il est évident que des averses ultérieures confirmeraient cet effet négatif. Ceci est encore plus flagrant en ce qui concerne les érosions considérablement plus importantes sur buttes :  $E_2/E_1 = 48$  avec des causes recevant les mêmes explications que précédemment : maintien de fortes turbidités :  $C_s = 6$  g/l et  $C_x = 3$  g/l et débits solides importants du fait de fortes intensités de ruissellement.

Au bilan, le buttage est une pratique inefficace dans l'amélioration des infiltrations et dangereuse pour l'érosion. Le stockage de l'eau n'est pas sensiblement amélioré par rapport au sol non travaillé. Les pertes en terres sont très élevées, identique en cela à celles du simple labour, pour des averses similaires, sur les sols de bas de versants et supérieures à celle des sols labourés en haut de versant. Tout dépendra de la vitesse d'installation du couvert végétal et de la nature des précipitations naturelles la précédant. Nous ne pensons pas, d'autre part que le développement des organes aériens peu denses et lianescentes de l'igname généralement plantée sur ces buttes puisse améliorer significativement cette situation d'autant plus que le paillage des buttes est peu utilisé dans le sud-ouest ivoirien.

III.3.3. Les hydrodynamismes comparés de versants sous forêt et sous cultures traditionnelles.

Par comparaison avec la forêt, où un bassin versant identique fut également étudié, on constate qu'au bout d'une année de cultures traditionnelles, les comportements sont nettement plus influencés par des différences de couvertures pédologiques que par les différences pourtant considérables des couvertures végétales (forêt puis champ de riz). On peut supposer qu'au bout de 5





peu de temps l'abondance des débits et recrues forestiers, peu éliminés par les paysans de la région, est à l'origine de niveaux d'érosion qui sont restés faibles et similaires (150 à 300 kg/ha/an). Par contre les ruissellements apparaissent en moyenne deux à trois fois plus élevés sous culture que sous forêt sur les sites médians et avals. Les sites amonts où prédominent une composante verticale du drainage restent identiquement perméables. Si, sous culture traditionnelle, l'érosion ne suit pas l'augmentation du ruissellement c'est parce que la turbidité des eaux reste faible (maximums de 1,5 g/l) ou le plus souvent insignifiante (0,25 g/l). Pour expliquer ceci il faut invoquer deux raisons principales :

- nous avons vu que le couvert végétal reste suffisamment épais pour intercepter l'énergie des gouttes de pluies,

- le système racinaire de la forêt est pour le moment resté en place et continue ainsi à s'opposer à une hiérarchisation excessive du ruissellement donc à une deuxième forme autrement plus dangereuse de l'érosion ; ce sera d'ailleurs un point à suivre dans les années à venir au fur et à mesure que ces racines dépériront ou seront extirpées.

Pour en revenir à l'augmentation du ruissellement sous culture qui est surtout nette dès le mi-versant, il semble qu'il faille principalement l'attribuer au colmatage d'un grand nombre de porosités qui débouchaient à la surface du sol sous forêt. De nombreuses observations détaillées de cette surface ont montré que cette modification était surtout due à de grands bouleversements dans l'activité de la faune (principalement vers et termites) imposés par d'importants changements dans l'hygroperiodisme, les amplitudes thermiques et probablement aussi les éclaircissements. Il semble bien là qu'un seuil peu réversible ait été franchi et que dans ce domaine il est primordial de relier tous comportements dynamiques avec les données fournies par d'autres naturalistes, donc d'intégrer le plus possible les connaissances.

## CONCLUSION

L'influence de la nature du sol sur les paramètres du ruissellement paraît très faible dans la zone soudano-sahélienne où presque seules interviennent les caractéristiques de surface. La répartition des différents types de sols ferrallitiques le long des versants conditionne par contre pour une grande part l'hydrodynamique superficielle en zone soudano-guinéenne et tropicale humide. Dans tous les cas la présence d'un mulch gravillonnaire limite le ruissellement et l'érosion. L'évolution de la structure et de la porosité sous l'effet de l'activité biologique paraît être un facteur essentiel surtout dans la zone forestière.

La mise en culture intervient à trois niveaux : modification du couvert végétal, remaniement de l'horizon superficiel et création d'une discontinuité hydraulique dans le profil. Elle a pour effet d'augmenter le rôle des caractéristiques de l'horizon superficiel, principalement les taux en éléments grossiers et en agrégats stables (eau et alcool). Ces données conditionnent en effet la durée de résistance du labour à l'agressivité des pluies.

au delà de laquelle le ruissellement atteint des valeurs bien supérieures à celles enregistrées en milieu naturel. Ce type de comportement se voit amplifié dans le cas du buttage (cloisonné ou non) : coefficient d'infiltration élevé jusqu'à un seuil (hauteur de pluie cumulée) puis apparition d'un ruissellement à caractère catastrophique. Parmi les techniques testées, seul le paillage exerce une action efficace et surtout durable vis-à-vis de l'infiltration.

Ces mesures sur parcelles, réalisées à des échelles différentes (1 m<sup>2</sup> et 50 m<sup>2</sup>) apportent des résultats convergents et semblent pouvoir fournir des données intéressantes sur l'hydrodynamique des versants. Voilà pourquoi des études sont actuellement en cours pour mettre en évidence les possibilités de relations entre ces tests infiltrométriques sous pluies simulées et les résultats obtenus sur bassins versants (CASENAVE et GUIGUEN 1978, CASENAVE et al. 1979). Il apparaît déjà que cette technique permet une analyse fine des facteurs intervenant sur le ruissellement et l'érosion, et de leur évolution au cours des pluies.

#### BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.) et VALENTIN (C.), 1978.-  
Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion.  
Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XV, N° 4, pp. 321-349.
- AUBREVILLE (A.), 1959.-  
Flore forestière de la Côte d'Ivoire.  
2<sup>e</sup> éd. Centre Techn. For. trop., Nogent-sur-Marne,  
3 vol., 372p., 342p., 334p.
- BRUNET-MORET (N.), 1963.-  
Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Haute-Volta.  
ORSTOM-CIEH, 23p., multigr.
- BRUNET-MORET (N.), 1967.-  
Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Côte d'Ivoire.  
ORSTOM-CIEH, 20p., multigr.
- BRYAN (R.B.), 1968.-  
The development use and efficiency of indices of soil erodibility.  
Geoderma, 2, pp. 5-26.

CASENAVE (A.), et GUIGUEN (N.), 1978.-

Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers. Campagne 1977. ORSTOM-CIEH, 60p., multigr. + annexes.

CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.) et SIMON (J.M.), 1979.-

Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Campagne 1978, 51p., multigr. + annexes. ORSTOM-CIEH

CHATELIN (Y.) et MARTIN (D.), 1972.-

Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, n°1, pp. 25-44.

CHOW, (V.T.), 1964.-

Handbook of applied hydrology.

McGraw-hill book Company, New-York, 1418pp., 614 illustrations.

C.P.C.S. 1967.-

Classification française des sols (édition provisoire) ENSA - Grignon, 87p., multigr.

DE VLEESCHAUWER (D.), LAL (R.) et DE BOODT (M.), 1978.-

Comparison of detachability indices in relation to soil erodibility for some important nigerian soil. Pedologie - XXVIII, 1, pp. 5-20, 2 fig., 6 tabl.

DUBREUIL (P.), 1960.-

Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire. Rapport général Tome 2 : zone de savane ORSTOM - Service de l'Hydraulique - République de Côte d'Ivoire, 141 p., multigr.

FLACH (K.W.), CADY (J.G.) et NETTLETON (W.D.), 1968.-

Pedogenetic alteration of highly weathered parent materials.

Intern. Congr. Soil 9, 1968, Adelaïde, Vol., 4, pp. 343-351.

HENIN (J.) et MONNIER (G.), 1956.-

Evolution de la stabilité structurale du sol.

C.R. VI-Congrès intern. Science du Sol, Paris, Vol. 49-52.

HUMBEL (F.X.), 1975.-

Etude de la macroporosité des sols par des tests de perméabilité : application d'un modèle de filtration aux sols ferrallitiques du Cameroun.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XIII, N° 2, pp. 93-111

HORTON (R.E.), 1938.-

The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. Proc. Soil. Sci. Soc. Am., 3.

LAFFORGUE (A.), 1977.-

Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. 14, n° 4, pp. 299-344.

LAFFORGUE (A.), 1978.-

Détermination des variations de la capacité d'absorption d'un sol en place sous averses simulées. Bull. des Sc. Hydrol., 23, 3, pp. 355-372.

MANNING (R.), 1891.-

On the flow of water in open channels and pipes. Trans. Inst. Civil Egrs., Dublin, Vol. 20, pp. 161-207

REE (W.O.), WIMBERLEY (F.L.) et CROW (F.R.), 1977.-

Manning and the overland flow equation. Tr. of the ASAE Vol. 20, N° 1, pp. 89-95.

ROOSE (E.), 1977.-

Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Tr. et Doc. ORSTOM, Paris, 108p.

SEKOU (S.), 1970.-

Etude hydrologique du bassin du Niger en Côte d'Ivoire. ORSTOM-ENSTP, République de Côte d'Ivoire, 70p., multigr.

SIMONS (D.B.), AL-SHAIKH-ALI (K.S.) et LI (R.M.), 1979.-

Flow resistance in Cobble and loulder River beds. Journ. of the Hydraul. Div., Vol. 105, N° HY 5, pp. 477-488.

VALENTIN (C.), 1978 a.-

Problèmes méthodologiques de la simulation de pluie. Colloque sur l'érosion agricole des sols. Strasbourg et Colmar 20-23 Septembre 1978, 11p.

VALENTIN (C.), 1978 b.-

Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire.  
Recherches méthodologiques - Résultats et interprétations agronomiques.  
ORSTOM, 141p., multigr, + annexes.

WISCHMEIER (W.M.), 1960.-

Cropping management factor evolutions for a universal soil loss equation.  
Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., 244, pp. 322-326.

WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.) et CROSS (B.V.), 1971.-

A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.  
J. of Soil and Water Conservation, 26, 5, pp. 189-191