

# Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé

## Les charges solide et soluble des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas (1)

Eric J. ROOSE\* et Jean ASSELINE\*\*

\* Pédologue ORSTOM

\*\* Technicien ORSTOM

ORSTOM, Laboratoires de Pédologie et d'Hydrologie,  
Adiopodoumé, BP V. 51, Abidjan, Côte d'Ivoire

adresse actuelle : Laboratoire de Géologie appliquée,  
Université d'Orléans - 45045 Orléans Cedex

avec la collaboration de

J.F. BOIS, A. LAFFORGUE, E. NAAH,  
H. DIALLO, G. MBO BECHO,  
J. SAGOU, T. SANOU

### RÉSUMÉ

Une campagne de 55 averses simulées à l'aide d'un appareil dérivé du rotating boom simulator de Swanson a permis à une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM d'aborder l'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement et de l'érosion dans douze parcelles nues ou soumises à différents modes d'utilisation des résidus de cultures de l'ananas.

Après avoir rappelé le dispositif expérimental et les conclusions des études sur le ruissellement, les auteurs cherchent à classer les facteurs qui influencent la turbidité et les pertes en terre en vue de tirer des conclusions pratiques pour l'intégration des techniques conservatrices de l'eau et du sol dans l'aménagement des plantations d'ananas situées sur les sols ferrallitiques sableux de basse Côte-d'Ivoire.

Les résultats soulignent l'influence prépondérante du couvert végétal et du mode d'utilisation des résidus de culture sur les transports solides. Les liaisons entre la pente et le ruissellement sont complexes ; par contre la turbidité et l'érosion augmentent plus rapidement que

l'inclinaison du terrain. La charge solide peut évoluer brutalement au cours d'une averse si certains seuils sont dépassés ; ces seuils dépendent de l'intensité et de la durée des pluies, de l'état d'humidité préalable du sol et de la cohésion de la pellicule de battance.

Conformément aux observations de terrain, ces expérimentations en petites parcelles montrent que les aménagements antiérosifs doivent porter en priorité sur le réseau de pistes et secondairement sur les techniques favorisant la pérennité du couvert végétal dans les zones les plus pentues.

Enfin, l'étude de la charge en N-K-Ca-Mg dissous dans les eaux de ruissellement au cours des averses encadrant une pulvérisation d'urée et de sulfate de potassium montre que les risques de pertes d'engrais dans le ruissellement sont réduits ; cependant ces engrais risquent d'être entraînés dans les eaux de drainage.

(1) Cet article fait suite à la publication Lafforgue (A.) et Naah (E.) parue in *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 3, 1976.

## ABSTRACT

*Fifty-five rainfalls simulated with an apparatus derived from the rotating boom rainfall simulator of Swanson (Nebraska) allowed to an ORSTOM research team to analyse the factors of runoff and erosion in 12 plots bare or planted in pineapple with various crop residue management.*

*After a brief description of the methodology and a summary of the conclusions about runoff, the authors try to range the factors influencing turbidity and soil losses in view of soil and water management of pineapple plantations of the ferrallitic sandy soils of South Ivory Coast.*

*The data emphasize the major influence of green cover and of crop residue management on soil losses. Although the relations between slope and runoff are complexe, turbidity and erosion are increasing more rapidly than ground gradient. Turbidity can vary considerably during rainfalls if critical levels are overpassed : these critical levels are depending of intensity and duration of rainfall, moisture of the soil and principally of the cohesion and permeability of the splash crust. These data on runoff plots are confirming the field observations : soil and water management approach must be oriented firstly on roads and secondly on technics increasing green cover of steeper slopes.*

*The study of N-K-Ca-Mg solved in runoff water during rainfalls around urea and potassium sulfate pulverisation shows that the potential losses of nutrients in runoff are low but not necessary the leaching in drainage water.*

## INTRODUCTION

Depuis longtemps, les liaisons sont étroites entre la Recherche Scientifique (ORSTOM et GERDAT) et l'industrie de l'ananas en Côte-d'Ivoire. C'est ainsi, qu'après des essais en cases d'érosion (1956 à 58), Dabin et Leneuf ont été amenés à préconiser sur les sables tertiaires une culture de l'ananas sur gros billons isohypses, une alternance sur le terrain de bandes cultivées d'âges différents et des bandes d'arrêt enherbées formant progressivement des banquettes stabilisées tous les 20 m. Grâce à cette stratégie prudente, les problèmes d'érosion sont passés au deuxième plan des préoccupations des planteurs d'ananas.

Cependant, sous les pression du coût croissant de la main-d'œuvre, la Salci fit appel vers 1970 à une méca-

nisation plus poussée des techniques culturales. De Hawaï où il fonctionne sur des terrains plats et résistants, fut introduit un boom-sprayer, sorte de citerne automobile munie d'une flèche latérale capable de répandre les engrais liquides, les herbicides et autres produits phytosanitaires sur des bandes de 17 m de large. Cet énorme engin exige des bandes cultivées de 34 m de large, bordées de routes ainsi que la suppression des banquettes d'arrêt et de la culture en courbe de niveau stricte.

Il s'en est suivi une recrudescence des phénomènes d'érosion (ravines, inondations et ensablement des bas-fonds) au point de gêner temporairement l'exploitation des plantations et de l'usine envahie par les boues et les eaux ruisselantes.

De plus, le coût des engrais et des façons culturales a crû considérablement depuis 1974.

De nombreux échanges eurent lieu tant sur le terrain qu'au Ministère de la Recherche Scientifique entre les chercheurs de l'ORSTOM et de l'IRFA (\*) et les praticiens de la Salci (\*) et de la Socabo (\*) concernant trois domaines principaux :

- la lutte antiérosive dans le cadre de la culture mécanisée de l'ananas ;
- la mise au point de techniques culturales en vue d'assurer un enracinement correct durant le premier cycle et peut-être un second cycle ;
- la rentabilisation des engrais, en particulier par l'utilisation optimale des résidus de la culture de l'ananas et la réduction de la lixiviation des nutriments.

Une convention lie depuis 1975 ces organismes pour l'étude de ces trois problèmes abordés sur petits modèles (pots, lysimètres, parcelles de 50 m<sup>2</sup>) et aux champs.

Dans ce cadre, une série de 55 averses simulées ont été effectuées fin 1975 sur les 12 parcelles d'érosion du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.

L'aspect hydrologique des résultats concernant le ruissellement et ses liaisons avec différents facteurs (couvert végétal, pente du terrain, intensité et hauteur de l'averse, humidité préalable du sol) a été publié par Lafforgue et Naah dans le *cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, Vol. XIII, n° 3, 1976 : 195 à 237.

(\*) IRFA : Institut Français de recherches fruitières en Afrique.  
SALCI : Société de production de l'ananas en Côte-d'Ivoire.  
SOCABO : Société Coopérative de Bonoua.

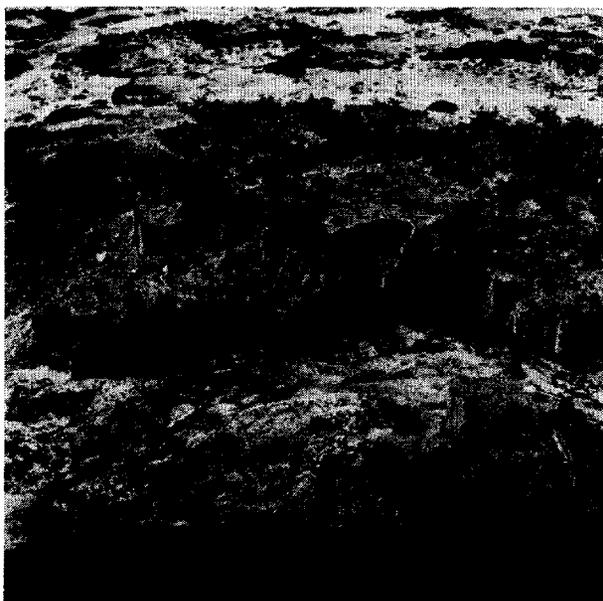
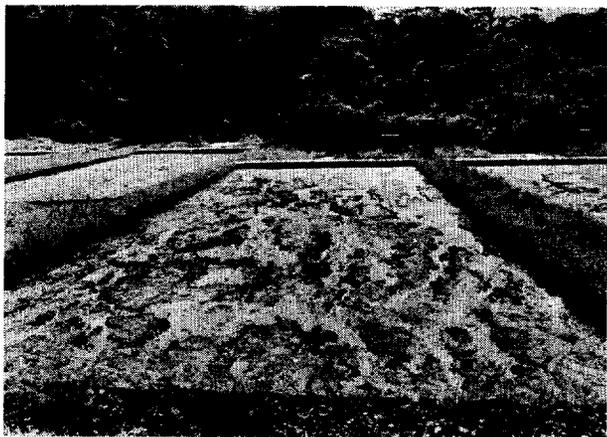


PLANCHE I. — Détails de la pellicule de battance et de son évolution au cours des pluies.

Nous présentons ici une analyse de la charge solide en suspension dans les eaux de ruissellement de ces mêmes essais ; nous mettrons en lumière les liaisons existant entre l'érosion et les facteurs la conditionnant ainsi que les conséquences à en tirer pour la conservation de l'eau et des sols cultivés en ananas. Dans une deuxième partie nous discuterons de l'évolution des charges solubles (en particulier en azote et potasse) dans les eaux de ruissellement, avant et après la pulvérisation d'engrais ainsi que de la nécessité de recommencer la pulvérisation en cas de précipitation postérieure.

## 1. ÉTUDE DE LA CHARGE SOLIDE

### 1.1. Le problème

Il s'agit de montrer comment évoluent les phénomènes d'érosion en fonction de la pente du terrain, du travail du sol et du mode d'utilisation des résidus de la culture de l'ananas sur les sols ferrallitiques très désaturés du bassin sédimentaire de basse Côte d'Ivoire où sont concentrés une bonne partie des plantations d'ananas.

Dans cette région, les sols sont très riches en sables grossiers (50 à 70 %) ; les profils sont homogènes et très perméables mais, sous l'action des pluies, il se forme une pellicule de battance dès qu'ils sont dénudés. En effet, les précipitations sont particulièrement agressives dans cette zone tropicale humide de transition où il pleut environ 2 000 mm par an dont la moitié tombe du 15 mai au 15 juillet.

Chaque année on y enregistre une averse de plus de 150 mm et tous les 4 ans une pluie de plus de 200 mm. Les intensités peuvent dépasser 200 mm/h pendant quelques minutes, 80 à 100 mm/h pendant 30 mn et 60 à 80 mm/h pendant une heure (Brunet-Moret, 1967 ; Roose, 1973).

Dans le cadre des petites plantations traditionnelles dispersées en brousse, l'érosion reste discrète même sur des pentes dépassant 20 %.

Par contre, sur les grands blocs industriels mécanisés voisins, les manifestations de l'érosion sont nombreuses et quelque fois impressionnantes : fonte des billons, rigoles et ravines (atteignant 2 m de profondeur et 3 ou 4 m de large), ensablement des bas-fonds.

Si les pertes par arrachage des plantes ne concernent que 2 % des surfaces cultivées, il est difficile d'évaluer le manque à gagner de la production et le coût total

de l'érosion : traitements herbicides, épandage d'engrais et de produits sanitaires retardés, bris des engins mécaniques, entretien des voies de pénétration (300 km de pistes secondaires à la SALCI), ralentissement des travaux d'exploitation et comblement des ravines gênantes.

Les observations sur le terrain avaient montré que toutes les ravines étaient en relation avec le réseau routier, mais il restait à fixer la part qui revenait aux champs cultivés, part qui peut être modifiée par la mise au point de techniques culturales mieux adaptées aux conditions climatiques régionales. Des aménagements expérimentaux ont été réalisés à l'échelle de bassins versant de plusieurs dizaines d'hectares à la SALCI, mais nous ne rapporterons par la suite que les essais au simulateur de pluie sur petites parcelles.

### 1.2. Méthode

Douze parcelles d'érosion furent aménagées au centre ORSTOM d'Adiopodoumé sur trois pentes typiques (4-7 et 20 %) du paysage sédimentaire ivoirien (Roose, Cheroux : 1966). Trois traitements complexes (travail du sol × résidu de culture) furent comparés à un témoin (sol nu labouré et plané au début du cycle) (voir Protocole Roose, Lacoeyille, 1975) :

- T 1 : enfouissement des résidus par 2 labours profonds = technique classique dans les grandes plantations.
- T 2 : brûlis des résidus et labour superficiel = technique courante dans les petites plantations démunies de moyens mécaniques.
- T 3 : résidus broyés laissés en surface (mulch) et plantation directe des nouveaux rejets : le travail du sol est réduit au minimum.

Cette dernière technique présente certains inconvénients (lutte contre les mauvaises herbes, enracinement moins profond, danger de pourriture) mais économise deux labours, protège parfaitement le sol et permet de planter un mois plus tôt, ce qui laisse espérer une meilleure récupération des éléments nutritifs contenus dans les résidus.

Les plantations furent effectuées à plat à raison de 280 plants par parcelles en mai 1975 par l'IRFA qui assure le suivi agronomique de ces essais. L'observation du ruissellement et de l'érosion sous pluie naturelle est prévue pour trois cycles de culture couvrant environ quatre années. Cependant, la maîtrise de la succession des pluies, de leur intensité et de leur durée

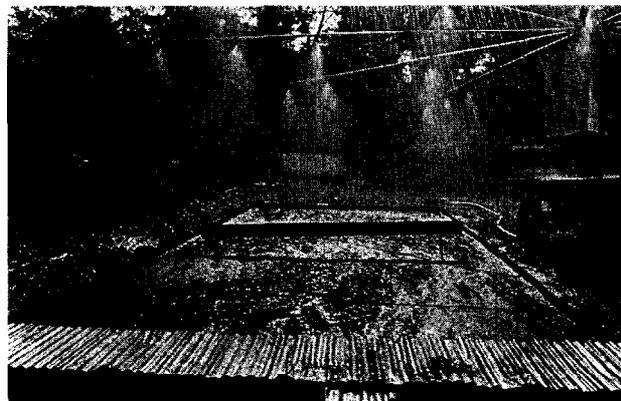
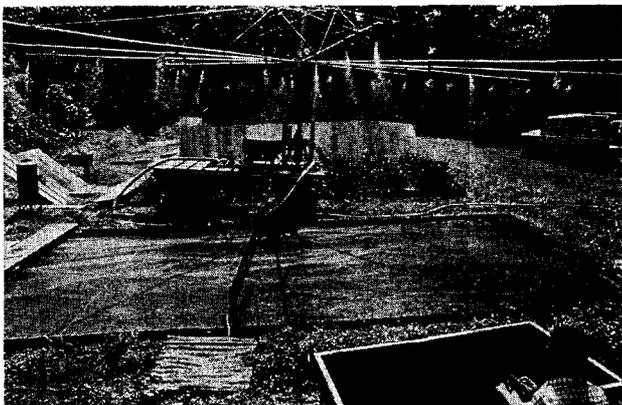


PLANCHE II. — Pluies simulées et organisation du ruissellement en « nappe » sur les parcelles d'Adiopodoumé.

est nécessaire à l'étude systématique des facteurs liés au ruissellement et à l'érosion.

C'est pourquoi l'ORSTOM a construit un simulateur de pluie mobile à bras rotatifs (type Swanson, Nebraska, adapté aux conditions locales) capable de soumettre un couple de deux parcelles ( $5 \times 10$  m) à des pluies d'intensité voisines de 30, 60, 90 et 120 mm/h. D'après les travaux récents de Valentin, l'énergie cinétique dispensée par ces pluies simulées serait voisine de celles qu'il a mesurées localement sous pluie naturelle pour une intensité de 90 mm/h et 1,5 fois supérieures pour les autres intensités (communication personnelle juillet 1977). Ce simulateur comporte :

- un système de stockage et décantation des eaux puisées dans une retenue (pompe 30 CV, camion citerne 10 t, bassins de  $30 \text{ m}^3$ ) ;

- un système de livraison d'eau claire sous pression (pompe 10 CV, 500 m de tuyau d'irrigation, régulateur de pression, manomètres, axe horizontal fixe sur charriot, axe vertical tournant à 4 tours/mn, motoréducteur, boîte à eau) ;

- un système de simulation des pluies (10 bras horizontaux tournant à 4 tours/mn sur lesquels sont fixés 30 vannes et 30 gicleurs veejet réglables, le tout suspendu par des câbles) ;

- un système de mesures ( $2 \times$  cuves de  $1/4 \text{ m}^3$  + limnigraphe à mouvement rapide + échantillonneurs pour la charge solide et soluble, des chronomètres, 2 pluviomètres linéaires et 1 pluviographe, 1 totalisateur de la vitesse du vent, 1 sonde à neutrons) (voir photos).

Le simulateur arrose de façon homogène un cercle de 8 m de rayon (surface =  $200 \text{ m}^2$ ) à l'intérieur duquel peuvent être disposées deux parcelles d'érosion de 5 m de large et 10 m de long.

Le protocole a été établi en vue de réaliser des averses permettant de réaliser les principaux paramètres intervenant sur les phénomènes de ruissellement sur un sol homogène, à savoir l'état initial d'humidité du sol (schématisé par l'indice  $T_a$ , temps en heures entre deux averses) et l'intensité des pluies. Des essais antérieurs avaient en effet montré qu'il était possible de se dispenser de faire varier les hauteurs des averses à condition d'adopter une seule averse suffisamment longue pour atteindre un taux de ruissellement stable. De plus, l'intensité 30 mm/h correspond à un régime d'infiltration totale sur le groupe des traitements « ananas plus résidus enfouis ou en mulch ».

Deux protocoles économiques et souples furent donc adoptés pour tenir compte des pluies naturelles tombant à cette époque (petite saison des pluies) : Groupe des parcelles « sol nu - Ananas + résidus brûlés » :

- 6 pluies de 60 mm/h dans des conditions d'humectation les plus variées possibles ;

- 3 pluies de 120 mm/h sur sol sec, sol très humide et un cas intermédiaire ;

- 2 averses de 90 mm/h sur sol sec ou très humide ;

- 1 averse de 30 mm/h en fin d'essais sur sol très humide.

Groupe des parcelles « ananas + résidus enfouis ou en surface » :

Ces parcelles ne ruisselant pas sous des averses de 30 mm/h et très peu sous 60 mm/h, le nombre des essais a été réduit à six : trois à 60 mm/h, deux à 90 mm/h et une seule à 120 mm/h en fin d'expérimentation pour une très forte humectation initiale.

Les caractéristiques des pluies naturelles et simulées ont été résumées aux tableaux I à VI où sont présentées simultanément les observations concernant le ruissellement et l'érosion.

En colonne 1 se trouve le n° d'ordre chronologique de l'averse précédé de la lettre N lorsqu'il s'agit d'une pluie naturelle.

Colonne 2. Date de l'averse.

Colonne 3.  $P_u$  = hauteur totale de l'averse en mm = moyenne des deux pluviomètres linéaires.

Colonne 4.  $I_m$  = intensité moyenne de l'averse.

Colonne 5.  $T_a$  = le temps en heures qui s'est écoulé depuis la fin de l'averse précédente.

Colonne 6. RUSA = indice d'agressivité de Wischmeier en unités anglaises.

Colonne 7. LR = lame ruisselée en millimètres.

Colonne 8. KRU = coefficient de ruissellement de l'ensemble de l'averse =  $\frac{LR \times 100}{P_u}$

Colonnes 9, 10. R fin = taux de ruissellement en fin d'expérience ou dès lors que le plateau a été atteint (en mm/h ou en % de  $I_m$ ).

Colonne 11. = charge solide observée au déversoir (minimum-maximum et moyenne) exprimée en gr/l ou  $\text{kg/m}^3$ .

Colonne 12. = charge solide totale moyenne = intègre en plus de la charge solide observée au déversoir, les terres restées dans le canal de ruissellement =  $EX_{10}/LR$  en mm.

Enfin, il reste à préciser le couvert végétal (proportion des parcelles couvertes par les plants d'ananas ou par les résidus) qui a été mesuré le 2 octobre 1975,

en début d'expérience par la méthode des points quadrats (400 aiguilles).

Traitement	An. + résidus brûlés			An. + résidus enfouis			An. + résidus mulch		
	4 %	7 %	20 %	4 %	7 %	20 %	4 %	7 %	20 %
Pente .....									
Couvert des ananas	60	66	62	65	70	65	79	75	75
Résidus .....	7	8	1	5	7	6	19	25	25
Total .....	67	74	63	70	77	71	98	100	100
Moyenne .....	68 %			73 %			99 %		

Le sol est complètement couvert dans les parcelles « mulch » ; par contre, il reste 30 % du sol nu lorsque les résidus sont brûlés ou enfouis.

La croissance des ananas entraîne une augmentation du couvert de l'ordre de 10 % par mois.

### 1.3. Présentation et précision des résultats

La hauteur d'une pluie (Pu) et son intensité (Im) sont calculés à partir de la moyenne des mesures (éprouvettes graduées vérifiées) aux pluviomètres linéaires (4 000 cm<sup>2</sup>) : d'une parcelle à l'autre l'écart dépasse rarement 2 %. Hauteur et intensité dépendent de la pression d'eau aux gicleurs, de la disposition et du nombre de gicleurs en fonctionnement, de la durée de l'averse ainsi que de la vitesse du vent. Des variations de plus de 10 % peuvent survenir dès lors que la vitesse du vent dépasse 8 à 10 km/h.

Les parcelles d'Adiopodoumé étant situées dans une clairière, le vent n'a pas joué de rôle important.

Le ruissellement est enregistré par des limnigraphes à rotation rapide, très précis, dans les cuves de stockage où aboutissent également les terres en suspension (erreur négligeable sauf si le sol est nu et la pente forte). Le report des tangentes aux courbes enregistrées permet de construire les limnigrammes (débit liquide en fonction du temps). De faibles variations (2 à 5 %) de débit ont été observées dans certains cas après que le plateau des débits stables eut été atteint (chute de pression accidentelle au niveau des gicleurs ou barrages temporaires dans les canaux encombrés par les terres érodées).

L'érosion est évaluée à partir du débit liquide et de sa charge solide. Dans les cas favorables, toutes les

terres arrachées aux champs par les pluies aboutissent à l'échantillonneur dans des délais relativement courts : il est alors possible de définir l'évolution du débit solide au cours du temps. Ce fut le cas pour les traitements ananas + résidus enfouis, ou en mulch. Par contre, lorsque les eaux ruisselantes sur les parcelles sont très chargées (sol nu ou mal couvert et forte pente), une partie des terres se dépose dans le canal de réception du ruissellement en bas de parcelle (pente plus faible) ce qui fut le cas des anciennes parcelles d'Adiopodoumé pour les traitements « sol nu » et « ananas + résidus brûlés ». L'étude de l'évolution de la charge solide des eaux ruisselantes dans le temps devient alors problématique, raison pour laquelle nous ne pourrions pousser l'étude des charges solides au-delà de la mise en évidence des facteurs principaux qui modifient l'expression de l'érosivité potentielle des averses.

La turbidité (charge solide en g/l) a été mesurée de 5 à 12 fois au cours des averses par pesée en laboratoire climatisé (précision à 0,1 mg près) de la charge solide concentrée par floculation de 2 l d'eau de ruissellement (+2 cc de sulfate d'alumine à 5 %) jusqu'à transparence.

De cette charge solide brute fut soustraite la turbidité des eaux de pluie simulée (5 à 25 mg/l à Adiopodoumé = eau de pompage dans la nappe phréatique). Il faudrait encore soustraire la charge solide de 100 à 200 cc d'eau évaporée dans le bécher (quelques mg).

En dehors des erreurs systématiques très faibles (variation de densité de l'eau et des récipients chauffés à t° ambiante), peuvent se présenter des erreurs accidentelles (étiquetage, béchers ébréchés, etc) qu'il faut écarter avant les calculs d'érosion. Empirique-

ment, il nous est paru raisonnable de garder toutes les irrégularités du turbidigramme sauf les charges solides isolées qui diffèrent de plus de 100 % de ses voisines. En pratique, moins de 10 mesures sur 600 ont dû être écartées pour cette raison.

#### 1.4. Résultats et discussion

Les principales caractéristiques des averses simulées (et naturelles), le ruissellement et l'érosion observés pendant la campagne ont été résumés aux tableaux I à VI. Cependant, l'analyse des résultats d'érosion portera principalement sur les observations effectuées pendant les six averses communes à toutes les parcelles (voir tabl. VII à X).

averses (1)

de 60 mm/h pendant 2 h sur sol sec.

averses (2)

de 60 mm/h pendant 1 h après 1 j sans pluie.

averse (3)

de 60 mm/h pendant 1 h après 1 h sans pluie.

averse (4)

de 90 mm/h pendant 1 h après 3 h sans pluie.

averse (5)

de 90 mm/h pendant 40 mn après  $\pm$  2 j sans pluie (sol ressuyé).

averse (6)

de 120 mm/h pendant 30 mn après 2 h sans pluie.

L'érosion dépendant à la fois du débit liquide et de sa charge solide, nous passerons d'abord brièvement en revue les résultats concernant le ruissellement avant d'aborder la charge solide et l'érosion.

##### 1.4.1. LE RUISSÈLEMENT

Les facteurs du ruissellement ont été analysés en détail par Lafforgue et Naah (1976). Nous nous bornerons donc à reprendre leurs conclusions tout en commentant le tableau VII concernant le ruissellement observé dans les 6 averses simulées communes à tous les traitements.

Au cours des averses, quatre phases peuvent être distinguées (voir fig. 1).

##### 1. *Imbibition*

Aucun ruissellement ne se manifeste au début de l'averse pendant une période plus ou moins longue (to à ti).

##### 2. *Régime transitoire*

L'infiltration diminuant, il se forme des flaques qui finissent par déborder et donner naissance au ruissellement « en nappes et filets plus ou moins hiérarchisés ».

Ce ruissellement va croître et l'hydrogramme prend la forme d'un S $\pm$  redressé.

##### 3. *Régime permanent*

A partir d'un temps « t<sub>1</sub> », le ruissellement atteint un palier horizontal qui se poursuivra jusqu'à la fin de l'averse (= Rx).

##### 4. *Vidange*

Après la fin de la pluie, le ruissellement décroît d'autant plus progressivement que la surface de la parcelle est rugueuse et le pouvoir de rétention élevé.

Une fois atteint le régime permanent la hauteur de la lame ruisselée croît linéairement avec la pluie utile. Il suffit donc de prolonger les averses assez longtemps pour pouvoir évaluer facilement la lame ruisselée en fonction du temps.

Le ruissellement peut prendre des proportions très variables sur ce type de sol perméable en fonction des circonstances pluviométriques et agronomiques. Il ne dépasse guère 0 à 5 % de la hauteur de l'averse si le sol est bien couvert et peut atteindre 60 à 87 % sur sol nu et jusqu'à 90 % de l'intensité des précipitations en fin de pluies.

*Le couvert végétal* est certainement le facteur le plus important. Ainsi, on observe au tableau VII que le ruissellement atteint 66 % en moyenne sur sol nu et qu'il est réduit de moitié (33 %) sous ananas + résidus brûlés (couvert  $\pm$  70 %) et à moins de 1 % des pluies lorsque le sol est totalement couvert (ananas + mulch).

Lorsque le sol est dénudé, l'énergie cinétique de la pluie est disponible pour constituer et maintenir une pellicule de battance imperméable. Mais lorsqu'un écran végétal s'interpose entre les gouttes et la surface du sol, il dissipe cette énergie et s'oppose à l'imperméabilisation du sol.

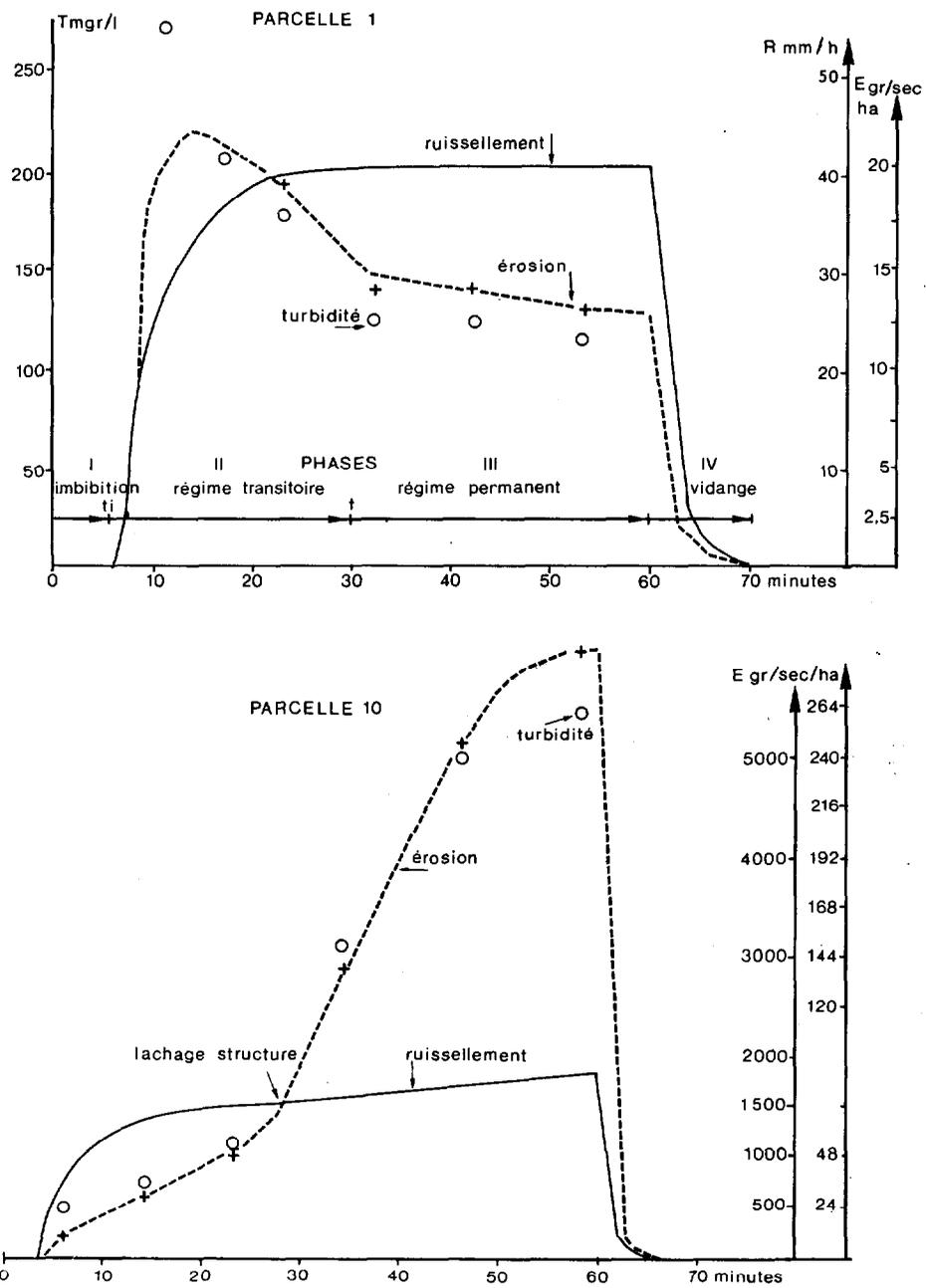


FIG. 1 et 2. — Evolution du ruissellement, de la turbidité et de l'érosion au cours d'une averse.

TABLEAU VII

Ruissellement (mm et % des pluies) moyen observé durant 6 averses simulées

Ruissellement en mm et en % des averses	Sol nu	Ananas Rés. Brûlés	Ananas Rés. Enfouis	Ananas Rés. Mulch	Moyenne par pente
Pente 4 % R	302*	180	11,5	0,4	123 mm
mm .....					
% .....	65 %	39 %	2,5 %	0,1 %	26,7 %
Pente 7 % R	332	124	16,1	0,1	118 mm
mm .....					
% .....	70 %	26 %	3,6 %	0	24,8 %
Pente 20 % R	282	160	67,1	9,3	130 mm
mm .....					
% .....	62 %	35 %	15 %	2,1 %	28,4 %
Moyenne par traitement Ruis.	305 mm	155 mm	32 mm	3,3 mm	124 mm
mm .....					
% .....	66 %	33 %	7 %	< 0,1 %	27 %

\* Approximation car pluie 4 = 60 mm/h et non 90 mm/h comme pour les autres. Les précipitations varient d'un couple à l'autre autour d'une moyenne de 459 mm pour les 6 averses.

Les techniques culturales ont aussi leur importance si le sol n'est pas totalement couvert. Si les résidus de culture sont enfouis par exemple au lieu d'être brûlés, ils sont rapidement transformés par les microorganismes et les matières humiques qui en résultent, réduisent le ruissellement de 33 % (résidus brûlés) à 7 % (résidus enfouis).

Le couvert de l'ananas et des résidus (mulch) ainsi que les matières organiques du sol ont un effet durable sur le ruissellement. Par contre, le labour sur sol nu n'a réduit la lame ruisselée que pendant la première averse (120 mm en 2 h) : ensuite les phénomènes de ruissellement semblent régis par la pellicule de battance et l'état de dessiccation du sol avant l'averse.

La pente du terrain a une influence complexe. Ainsi sur sol nu le ruissellement décroît lorsque la pente passe de 4 à 20 % ; des observations semblables avaient été faites par Roose (1973) et Roose, Lacoëuilhe (1975) sous pluies naturelles.

Par contre sous culture d'ananas avec résidus enfouis ou en mulch, le ruissellement observé sur une pente de 20 %, fut nettement supérieur à celui des parcelles de 4 et 7 %.

Il semble donc bien, que tout comme dans la Grande Plaine Américaine (Wischmeier, 1966), l'influence de la pente sur le ruissellement est profondément modifiée par l'aménagement de la surface du sol

(labour isohypse, résidus de culture et matières organiques du sol).

L'intensité de la pluie influence directement le débit ruisselé. Tant que l'intensité de l'averse ne dépasse pas la limite supérieure de la vitesse d'infiltration, il n'y a pas de ruissellement.

Cette limite varie de 9 à 13 mm/h sur sol nu, 12 à 27 mm/h sur ananas + résidus brûlés, 40 mm/h quelle que soit la pente si les résidus sont enfouis, plus de 120 mm/h sur mulch et pente de 7 % et 48 mm/h sur mulch et pente de 20 %.

On constate aussi que le taux d'infiltration augmente avec l'intensité de l'averse, de même que la hauteur de la lame ruisselée, mais la durée de l'averse diminue. L'état d'humectation préalable du sol, schématisé par le nombre d'heures écoulées depuis la fin de l'averse précédente (Ta) influence à la fois la hauteur de la pluie d'imbibition (Pi) et l'intensité max. de ruissellement (Rx) : cette influence est modifiée par les traitements et par la pente.

Ainsi sur résidus brûlés, les écarts entre les taux de ruissellement max. varient de 35 mm/h (pente 4 %) à 17 mm/h (pente à 20 %). Sur sol nu les écarts atteignent de 20 à 5 mm/h, sur résidus enfouis de 11 mm/h (pente 20 %) à 4 mm/h (pente 4 %) et sur mulch les écarts sont négligeables (moins de 2 mm/h). En ce qui

concerne la pluie d'imbibition ( $P_i$ ), on constate qu'elle varie d'abord rapidement durant les premières heures qui suivent l'arrêt de l'averse antérieure puis se stabilisent sur sol nu vers 5 mm après 4 ou 5 jours. Sous culture, elle est d'autant plus forte que la perméabilité de la parcelle est grande, mais elle décroît si la pente augmente.

*La détention superficielle* augmente avec la résistance du sol au ruissellement (mulch > enfouis > sol nu) mais diminue quand croît la pente surtout en dessous de 7 % de pente.

Enfin si on compare les taux d'infiltration mesurés par la méthode Müntz (doubles anneaux) ou au simulateur de pluie, on constate non seulement que les ordres de grandeur sont très différents (3 à 12 fois plus forts sur Müntz sous culture et 45 fois plus fort sur sol nu) mais également l'ordre de classement. Ceci tient probablement aux perturbations infligées à la pellicule de battance lors de la mise en place des doubles anneaux.

En conclusion, ces expérimentations sous pluies simulées, soulignent l'importance du couvert végétal, des résidus de culture, et des pellicules de battance sur les phénomènes de ruissellement.

Par ailleurs, la pente du terrain a une influence complexe sur la lame ruisselée en rapport avec l'aménagement de la surface du sol.

#### 1.4.2. LA TURBIDITÉ

La turbidité c'est la charge solide par unité de volume d'eau ruisselée exprimée en g/l. Mesurée au déversoir, elle varie de 0,02 à 0,2 g/l dans des conditions de bonne protection du sol (ananas + résidus en surface ou enfouis) à 88 g/l sur sol nu et forte pente (20 %). Il faut cependant noter qu'en réalité la charge solide des eaux ruisselant sur les parcelles peut atteindre des valeurs plus élevées (90 à 117 g/l) si on tient compte des terres érodées déposées dans le canal de réception avant d'atteindre le déversoir.

Dans les raisonnements qui vont suivre, il faudra donc tenir compte du fait qu'il est impossible de répartir sur les turbidigrammes (courbe des charges en fonction du temps), les terres déposées dans les canaux et mesurées en fin d'averse.

Ceci dit, il faut tout de même noter que la répartition des charges solides au cours des averses, n'est pas aléatoire.

##### 1.4.2.1. Variations de la charge solide dans les temps au cours d'une averse

Dans certaines parcelles, comme dans la plupart des bassins versants, la turbidité des eaux monte d'abord rapidement avec les débits liquides (voir fig. 1) puis diminue (par dilution des produits érodés) avant que le ruissellement n'ait atteint son maximum.

Dans une première phase, l'énergie du ruissellement augmente ce qui permet le transport des particules libérées avant la naissance du ruissellement. Puis toutes les particules en transit étant évacuées, la charge solide diminue par dilution. Ce premier schéma de turbidigramme fut observé dans les cas de pente modérée (4 %) et de sol bien couvert (ananas + résidus brûlés pente = 4 et 7 %, enfouis pente = 4 et 7 % et mulch 4, 7, 20 %).

A l'opposé, sur pentes fortes et/ou sur sol découvert la charge solide augmente avec la durée de l'averse. Dans ce cas, l'énergie du ruissellement est telle qu'elle permet à tout moment l'évacuation des débris en transit mais en outre elle incise le sol sur lequel le ruissellement s'organise en rigoles.

Ce fut le cas des parcelles en sol nu sur des pentes de 7 et 20 % et les parcelles ananas + résidus brûlés ou enfouis sur les pentes de 20 %.

Naturellement des cas intermédiaires peuvent se présenter où la turbidité passe par plusieurs maxima soit en début et fin d'averse (ex. sol nu pente 4 %) soit courbe irrégulière en dents de scie (ananas + résidus brûlés ou enfouis pente 7 %) (voir fig. 3) soit décrochage brutal au cours de l'averse (voir fig. 4).

L'interprétation de ces variations doit tenir compte de l'éventualité des phénomènes artificiels (rupture de petits barrages dans les canaux de réception des parcelles en sol nu ou résidus brûlés) mais aussi du lachage brutal de la structure de la pellicule superficielle du sol une fois atteint le point de liquidité.

Les observations de terrain montrent qu'en un point vont se succéder plusieurs phases : formation d'une pellicule de battance par liquéfaction des premiers millimètres du sol puis érosion de cette pellicule (voir microfalaises et microdemoiselles-coiffées des photos) et formation d'une autre pellicule de battance un peu plus basse laquelle sera décapée à son tour ; au contraire elle formera une mince croûte protectrice, si la pellicule de battance a le temps de sécher et durcir entre deux averses.

Les photos prises entre deux averses montrent la même succession mais dans l'espace.

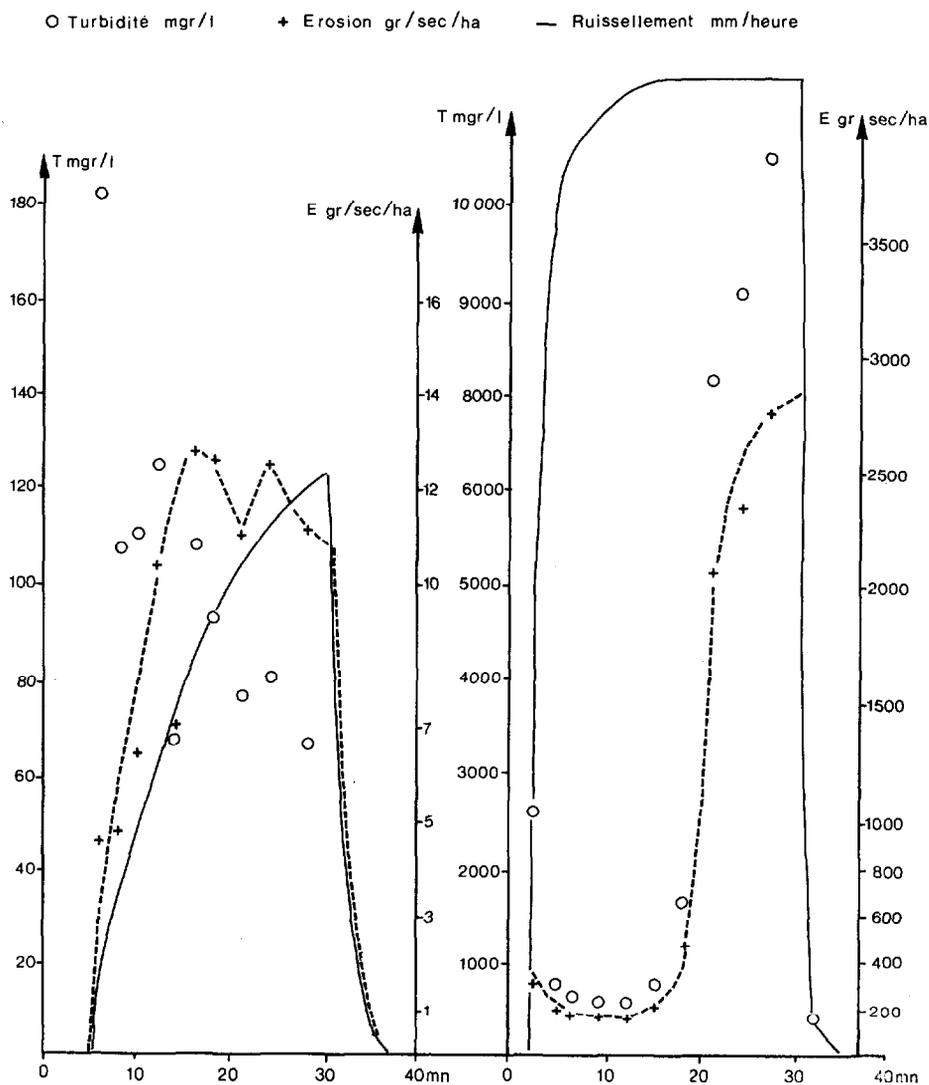


FIG. 3 et 4. — Turbidité irrégulière ou lâchage de structure en fin d'averse. Parcelle 1 à gauche : Ananas + résidus brûlés, pente 4 %, pluie n° 10 = 120 mm pendant 30 mn. Parcelle 2 à droite : sol nu, pente 4 %.

L'observation attentive de la figure 4 permet de conclure que le lâchage n'est pas un phénomène passager compatible avec les perturbations artificielles qui peuvent se produire dans le canal de réception. Il

s'agit d'un phénomène naturel qui ne se produit que pour certains traitements et certaines pentes au-delà de certains seuils soit de durée ou d'intensité de pluie, soit de hauteur cumulée de pluie avant l'averse.

Il apparaît dans le tableau VIII que plus le sol est couvert et la pente faible, plus souvent le maximum de turbidité est situé au début du ruissellement. Au contraire, sur sol nu et pente forte, la charge solide maximale est située en fin d'averse et les lâchages de structure sont nombreux dès que la pente augmente. L'influence de la pente va donc en sens inverse de celle du couvert végétal (et des matières organiques du sol) : plus la pente est forte, plus on observe des lâchages de structure, plus le microrelief est développé (puisque l'énergie cinétique du ruissellement augmente

avec la pente) et plus la charge solide augmente à mesure que l'averse se prolonge (influence, durée des pluies). Le rôle de la végétation serait donc de retarder le lâchage de la structure (par dispersion de l'énergie des gouttes de pluie) et de conserver le taux d'infiltration du sol en évitant la liquéfaction de la surface du sol et la formation de pellicule de battance. On retrouve une de nos conclusions des études antérieures sous pluie naturelle, plus le couvert est intense et moins l'effet pente se fait sentir sur l'érosion (Roose, 1973).

TABLEAU VIII

Analyse quantitative de la turbidité des eaux de ruissellement en fonction de la pente et des traitements

Traitements \ Pente	4 %	7 %	20 %
Sol nu	Max. nombreux début et fin pluies 9-10-11-13. Lâchages après pluie 3-4-7.	Max. final. Lâchages nombreux dès 1 <sup>re</sup> pluie.	Max. final. Lâchages dès pluie 1.
Ananas + résidus brûlés	Max. début ou irrégulier. Un lâchage en pluie 11.	Max. début ou milieu dents de scie, pas de lâchage net.	Max. final. Lâchage dès pluie 2.
Ananas + résidus enfouis	Var. très faibles. Max. pas net. — lente d'une pluie à l'autre, pas de lâchage.	Max. début pas de lâchage net.	Max. final lâchages pluies 3-4-6.
Ananas + résidus mulch.	Var. faible : Max. début. Pas de lâchage.	Pas d'érosion.	Max. turbidité début. Pas de lâchage.

Max. = Maximum de charge solide.

#### 1.4.2.2. Variations de turbidité d'une averse à la suivante : influence de l'humidité préalable du sol ( $T_a$ )

Lafforgue et Naah (1976), ont montré que le nombre d'heures écoulées depuis la dernière averse ( $T_a$ ) suffit pour caractériser l'état d'humectation du sol avant l'averse dans l'analyse des facteurs modifiant le ruissellement. Or, ceci n'est plus vrai pour la charge solide.

Les chiffres notés au-dessus des • ou en dessous des \* sont les valeurs de  $T_a$ . Si on reporte les valeurs de turbidité moyenne par averse (y compris la terre déposée dans le canal de réception) en fonction de l'intensité de l'averse simulée (30 à 120 mm/h) et en notant le nombre d'heures ( $T_a$ ) entre 2 averses successives, on constate à la figure 5 :

1) que la turbidité augmente avec l'intensité de l'averse ;

2) qu'en général, la turbidité augmente lorsque les averses se succèdent rapidement ( $T_a$  petit) ;

3) cependant, il y a des exceptions notables, ainsi la pluie n° 11 (120 mm/h pendant 30 mn,  $T_a = 9$  Turb = 30 g/l) devrait avoir une turbidité supérieure à celle de la pluie 10 (120 mm/h pendant 30 mn,  $T_a = 120$ , Turb = 32 g/l). De même la pluie 7 (60 mm/h pendant 30 mns  $T_a = 0,5$  Turb = 18,1) a une turbidité plus faible que la pluie 5 ( $T_a = 75$ ) et que les pluies 1 ( $T_a = 119$ ) et 2 ( $T_a = 20$ ).

Il semble donc que d'autres phénomènes interviennent tels que la formation d'une croûte durcie entre deux séries d'averses. Si le sol a le temps de se ressuyer

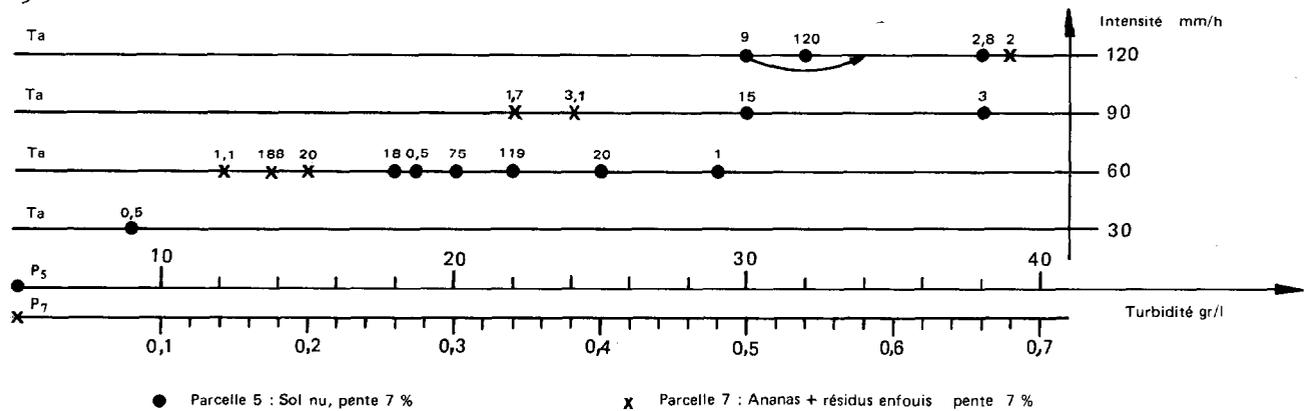


FIG. 5. — Charge solide totale en fonction de  $T_a$  et de l'intensité des pluies.

et la pellicule de battance de sécher et durcir au soleil, le sol résistera mieux à l'énergie des pluies et la turbidité sera plus faible.

Par ailleurs, lors de la 1<sup>re</sup> averse tombant sur sol sec ( $T_a = 119$ ) mais labouré (donc perméable, mais peu cohérent) la turbidité des eaux de ruissellement fut plus forte que celle à laquelle on aurait pu s'attendre en fonction de  $T_a$ .

Donc, la turbidité dépend non seulement de l'intensité des pluies et de l'état d'humectation du sol ( $T_a$ ) mais aussi de l'évolution de la structure du sol (surtout en surface) et de l'état des pellicules de battance qui constituent en quelque sorte la « mémoire » du sol vis-à-vis des averses antérieures.

$T_a$  ne suffit pas comme indice d'humidité du sol avant l'averse pour les phénomènes de transport solide, il faut lui adjoindre un terme correctif qui tient compte de la structure du sol et de sa cohésion.

Si en plus, on fait intervenir le couvert végétal (parcelle 7 dans le tableau précédent) on note une forte influence de l'intensité de l'averse, mais  $T_a$  (inscrit en-dessous de \*) ne suffit plus du tout à caractériser l'évolution de la turbidité (2<sup>e</sup> échelle) qui dépend de dynamique du couvert végétal (en particulier des mauvaises herbes).

#### 1.4.2.3. Conclusions : les facteurs qui influencent la turbidité

Etant données les contraintes imposées par le dispositif (dépôts de terre dans le canal) et l'évolution imprévisible de la charge solide au cours du temps (existence de seuils de lachage de la structure du sol)

il n'est pas possible de pousser l'analyse des facteurs qui modifient la turbidité comme cela a pu être fait pour le ruissellement. Nous nous contenterons donc de classer les facteurs par ordre d'importance en fonction des raisonnements développés aux paragraphes précédents et des résultats exposés au tabl. IX sur les turbidités moyennes sur 6 averses simulées. Les facteurs qui modifient la turbidité sont :

1. Le couvert végétal, les techniques culturales et les matières organiques du sol. Si le couvert est suffisamment dense ( $> 80 \%$ ), il efface l'action de tous les autres facteurs.

2. La pente du terrain.

La turbidité augmente avec l'inclinaison du terrain sauf si le mulch protège entièrement le sol ;

3. L'intensité des pluies. Avec l'intensité des pluies augmentent à la fois l'énergie cinétique des pluies et le débit liquide : par conséquent aussi la charge solide.

4. L'humidité préalable du sol ( $T_a$ ). En général, la turbidité diminue si les averses sont espacées ( $T_a$  grand) et si les pellicules de battance ont l'occasion de sécher et durcir.

Le tableau IX appelle quelques commentaires supplémentaires :

— Lorsque les résidus de culture de l'ananas sont laissés en surface, ils interceptent toute l'énergie des pluies si bien que le ruissellement est très réduit et la charge solide voisine des eaux utilisées pour simuler les averses.

TABLEAU IX

Turbidité moyenne pondérée (g/l) sur 6 averses simulées en fonction du type de couvert, du mode d'utilisation des résidus de culture et de la pente (Adiopodoumé, 1975)

Turbidité moyenne sur 6 averses simulées	Sol nu	Ananas + Rés. Brûlés	Ananas + Rés. enfouis	Ananas + Rés. mulch	Moyenne par pente
Pente 4 % .....	5,016*	0,117	0,252	0,025	3,115
Pente 7 % .....	30,629	3,079	0,380	0,020*	22,369
Pente 20 % .....	89,675	10,409	14,399	0,070	53,874
Moyenne par traitement	40,397	4,464	10,288	0,070	26,977

\* Approximation.

— Sur sol nu, la turbidité croît nettement plus vite que la pente : en passant de 4 % à 20 %, la charge est multipliée par 17. Sous le couvert de l'ananas, la turbidité augmente également mais moins régulièrement : c'est ainsi qu'elle passe brutalement de 0,4 g/l sur la pente 7 % à 14,4 g/l sur la pente de 20 % dans le cas des résidus enfouis.

Nous retrouverons encore la notion de seuils au-

delà desquels les phénomènes d'érosion s'aggravent brutalement.

#### 1.4.3. L'ÉROSION

L'érosion est le produit de la turbidité moyenne par le volume ruisselé : le domaine de variation sera donc très large mais les facteurs seront les mêmes.

TABLEAU X

Erosion totale en kg/ha sur six averses simulées

Erosion totale sur 6 averses simulées	Sol nu	Ananas + Rés. brûlés	Ananas + Rés. enfouis	Ananas + Rés. mulch	Moyenne par pente
Pente 4 % .....	15 124*	211*	29	0,1	3 841
Pente 7 % .....	101 718	3 803	61	0	26 396
Pente 20 % .....	253 151	16 675	9 662	6,7	69 874
Moyenne traitement ...	123 331	6 896	3 251	2	33 370

\* Les chiffres en italique représentent le rapport entre l'érosion d'une pente considérée, et l'érosion sur 4 % de pente.

Au tableau X, il apparaît en effet que dans de bonnes conditions de protection du sol, l'érosion varie de 0 à quelques dizaines de kg/ha (pour les six averses simulées), tandis que sur le sol nu elle dépasse 100 t/ha sur une pente de 7 % et 250 t/ha sur une pente de 20 %. Les facteurs principaux qui modifient l'expression de l'érosivité climatique sont donc le couvert

végétal, les techniques culturales et la pente du terrain.

Le couvert végétal est ici le facteur dominant ; si le sol est totalement couvert, l'érosion restera négligeable quelles que soient l'agressivité climatique, la pente, et la fragilité du sol. L'exemple du tableau X est très

démonstratif à cet égard. Les parcelles vues ont perdu en moyenne en 6 averses (totalisant environ 450 mm de pluie) plus de 123 000 kg de terre à l'hectare.

Les parcelles cultivées protégées à 70 % par le feuillage de l'ananas ont perdu moins de 6 900 kg/ha tandis que les parcelles totalement couvertes (ananas + mulch) n'ont pratiquement rien perdu (2 kg).

Les *techniques culturales* n'interviennent que si le sol n'est pas totalement couvert ; elles favorisent le développement du couvert ou augmentent la rugosité et les propriétés physiques de la surface du sol.

C'est ainsi que l'augmentation des matières organiques du sol par enfouissement des résidus de culture a réduit l'érosion à un niveau négligeable tant que la pente ne dépasse pas 7 %.

L'action favorable du labour sur l'infiltration, ne s'est fait sentir que pendant la première pluie (120 mm en deux heures) ; par contre le labour a réduit la cohésion du sol et augmenté la turbidité des eaux ruisselantes. Son action n'est donc positive sur ce type de sol sableux que si elle permet un meilleur enracinement et un meilleur développement du couvert végétal.

Le maintien des résidus de culture à la surface du sol est la meilleure technique du point de vue de la conservation de l'eau et du sol ; malheureusement, elle présente des inconvénients d'ordre agronomique comme la difficulté de travailler le sol sous le paillis, la lutte contre les mauvaises herbes et les maladies (nématodes et pourritures).

L'*inclinaison du terrain* a une influence très nette sur la turbidité, et donc sur l'érosion. Cela ressort clairement du tableau X pour les traitements « sol

nu » et « ananas + résidus brûlés ». Lorsque les résidus sont enfouis, l'érosion ne devient importante que sur la pente de 20 %. Enfin en présence du mulch, l'érosion reste négligeable quelle que soit la pente. Ceci nous semble particulièrement intéressant car si on parvenait à mettre au point la culture de l'ananas en laissant en surface les résidus de culture, il se serait plus indispensable de cultiver parallèlement aux courbes de niveau ce qui faciliterait grandement la mécanisation.

Enfin, les *caractéristiques des averses* interviennent à leur tour. Si on évalue l'érosion provoquée par des averses réduites à 60 mm de hauteur, et qu'on range ces valeurs en fonction de l'intensité des averses (voir fig. 6) et de l'humidité préalable du sol ( $T_a$  noté sur les points), on constate que l'érosion croît nettement avec l'intensité des pluies et augmente lorsque les averses se succèdent rapidement ( $T_a$  faible). Cependant apparaissent un certain nombre d'irrégularités qui montrent que l'érosion ne dépend pas seulement de l'intensité des pluies et de l'humidité du sol ; les observations de terrain nous font penser qu'elle dépend aussi de l'évolution de la structure du sol et en particulier de la formation des pellicules de battance.

Une série d'averses rapprochées sera bien plus destructive que des pluies isolées dans l'intervalle desquelles la pellicule de battance pourra sécher et durcir (cohésion croissante du sol) tandis que la mésos-faune rétablit une certaine macroporosité. C'est à ce niveau qu'intervient également la durée de l'averse qui permet de dépasser certains seuils d'humidité du sol au-delà desquels le point de liquéfaction est atteint, la structure est détruite, la pellicule s'érode, et la turbidité des eaux augmente brutalement.

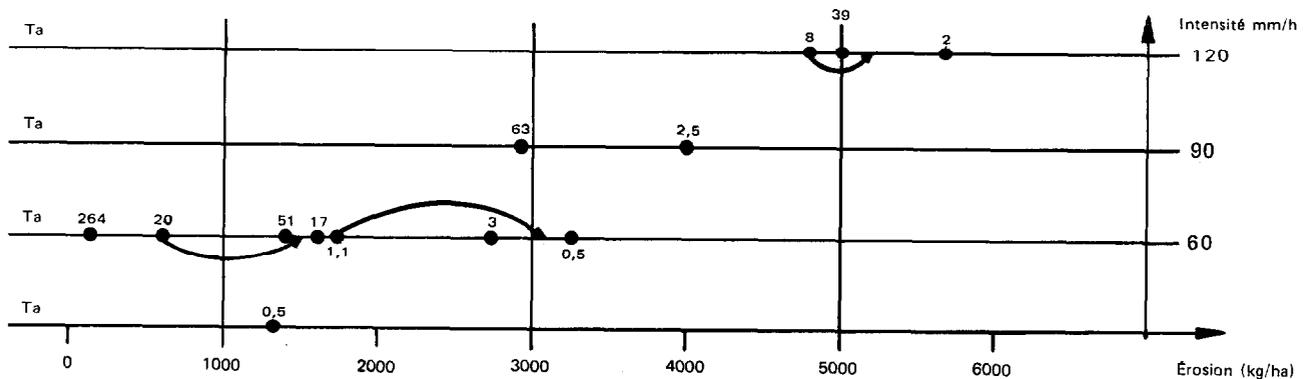


FIG. 6. — Pertes en terre (kg/ha, averse 60 mm) en fonction de l'intensité des averses et de l'humidité préalable du sol ( $T_a$  en heures).

La forme que prend le diagramme du débit solide au cours de l'averse varie évidemment en fonction du ruissellement et des variations brutales de la turbidité (voir fig. 1 à 4).

Il arrive, comme dans le schéma classique des transports solides sur bassin versant, que le débit solide maximal précède le débit liquide maximal. Cependant, dans la plupart des cas, les formes du diagramme sont complexes et traduisent les lachages de structure alors que le ruissellement s'est stabilisé (régime permanent).

#### 1.4.4. LES COEFFICIENTS DE L'ÉQUATION DE WISCHMEIER

Il est intéressant de comparer les phénomènes d'érosion observés sous averses simulées, avec ceux qu'on a mesurés au cours des averses naturelles pour conclure sur la validité des tests au simulateur limités dans l'espace et dans le temps. Cette comparaison n'est pas facile car les conditions expérimentales sont très différentes (sous pluie naturelle, I est variable, H et Ta ne sont pas contrôlés le sol et le couvert végétal évoluent continuellement). Cependant la comparaison des coefficients de l'équation de prévision de l'érosion (Wischmeier et Smith, 1960) permet cette approche.

Suite au dépouillement statistique de plus de 10 000 résultats annuels de mesures des pertes en terre sur parcelles et petits bassins versants, Wischmeier et Smith proposèrent en effet une équation empirique où l'érosion est une fonction du produit de 5 facteurs :

$$E = R.K.SL.C.P. \quad (1)$$

où

E est l'érosion mesurée ou prévisible en t/ha ;

R est un indice d'agressivité climatique tenant compte à la fois de l'énergie cinétique des pluies et de leur intensité max. en 30 mn ;

K est un indice d'érodibilité du sol ;

SL est un indice topographique tenant compte à la fois de l'inclinaison et de la longueur de la pente cultivée ;

C représente la protection du sol par le couvert végétal et les techniques culturales qui lui sont attachées ;

P est un indice traduisant la protection consécutive aux pratiques antiérosives (1).

(1) Cette équation et le mode de calcul des divers coefficients étant bien connus, nous prions le lecteur de se reporter à la bibliographie correspondante (Wischmeier et Smith, 1960 ; Roose, 1973 et 75 et CTFT, 1966).

Connaissant l'agressivité des averses (voir tabl. I à VI) et les pertes en terre sur les parcelles nues standard (où C et P = 1), il est facile de calculer l'indice d'érodibilité du sol (k) d'après la formule

$$K = \frac{E}{R \times SL \times 2,24} \quad (2)$$

où E représente les pertes en terre (t/ha), R l'indice d'agressivité (voir CTFT, 1966). SL représente l'indice topographique, et le coefficient 2,24 est celui qui convient pour transformer les unités métriques en unités anglaises.

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{100} (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2) \quad (3)$$

où

L = la longueur de la parcelle en pieds (1 pied = 0,3048 m),

et

S = inclinaison de la pente en %.

Pour nos parcelles de 10 m de long et 4, 7, 20 % de pente, l'indice SL égale respectivement 0,2346, 0,4693 et 2,3920.

Aux USA, l'indice d'érodibilité des sols passe de 0,70 à 0,05 à mesure que leur résistance augmente. Calculé *sous pluies naturelles* et sur les mêmes parcelles à Adiopodoumé, l'indice d'érodibilité, *annuel moyen* varie de 0,05 à 0,17 autour d'une moyenne de K = 0,10 (Roose, 1973, 1975).

Sous les averses simulées, l'indice calculé *par averse* varie de 0,01 à 0,21 mais la moyenne des 37 valeurs disponibles est voisine de K = 0,084 et la médiane de K = 0,079. On constate donc une faible distorsion de l'indice K qui est sous-estimé de 20 % sous pluie simulée.

Plusieurs sources de variations sont possibles :

a) soit le facteur topographique moyen proposé par Wischmeier pour les sols lessivés de la Grande Plaine américaine ne convient pas à ce sol ferrallitique très désaturé et riche en sable grossier.

K moyen sur 12 averses =  $\begin{cases} 0,06 \text{ sur } 4 \% \text{ de pente.} \\ 0,12 \text{ sur } 7 \% \text{ de pente.} \\ 0,07 \text{ sur } 20 \% \text{ de pente.} \end{cases}$  simulées

Il semble que l'indice soit significativement plus élevé sur la parcelle E5 de 7 % de pente laquelle a été soumise à une érosion sévère depuis plus longtemps que les autres.



marque que l'ordre (érosion croissant si Ta décroissant) est respecté à condition que les pluies qui se suivent aient des Ta de plus en plus faibles ; si les séries d'averses sont interrompues, l'ordre est mélangé. Ce n'est pas seulement l'humidité de la surface du sol qui influence l'érodibilité mais aussi l'évolution de la structure et en particulier l'état de la pellicule superficielle.

Si, entre deux averses la pellicule de battance n'a pas le temps de sécher, K augmente. Par contre si Ta est suffisant, la pellicule de battance se dessèche, durcit et le sol, plus cohérent, oppose une résistance accrue à l'agressivité des pluies : K diminue.

En conclusion, il semble que les tests au simulateur de pluie permettent d'estimer valablement l'influence des facteurs de l'érosion puisque l'énergie des pluies est voisine de celle qu'on observe dans la nature.

Pour estimer l'indice d'érodibilité, il vaut mieux écarter l'intensité de 30 mm/h trop peu énergétique et choisir 60 mm/h assez fréquente en Afrique Tropicale.

Cependant, il ne semble pas possible de limiter les tests à 3 pluies comme aux USA, l'une sur terrain sec (P = 60 mm Ta plus de 3 jours), la suivante le lendemain en humide (Pu = 30 mm Ta = 24 h) et la dernière en milieu détrempé (Pu = 30 mm, Ta = 0,5).

Après labour et planage soigné, il convient de faire un premier essai à blanc pour humecter le sol (Pu = 120 mm en 2 h), puis le lendemain reprendre le schéma américain et tester une dizaine d'averses d'une heure et de Ta varié afin d'intégrer l'évolution de la structure du sol. Les renseignements qu'on peut tirer au point de vue hydrologique (bilan hydrique) et agronomique (érosion et irrigation) justifient ces programmes longs comprenant environ 1 mois d'expérimentation sur des toposéquences composées de 3 à 5 unités de sols étudiés simultanément : cela a d'ores et déjà été réalisé dans la région de Korhogo pour l'étude de la dynamique de l'eau en relation avec les unités pédologiques cartographiées à 1/200 000.

Enfin, il est aisé de calculer le facteur couvert végétal × techniques culturales.

Facteur C	Ananas + Rés. brûlés	Ananas + Rés. enfouis	Ananas + Rés. en mulch
pente 4 %	0,014	0,002	< 0,0001
7 %	0,037	0,001	—
20 %	0,066	0,038	< 0,0001
Moyenne	0,056	0,026	< 0,0001

De ce tableau on peut conclure :

- que le mulch est le traitement le plus efficace quelle que soit sa pente,
- que l'enfouissement des résidus est largement suffisant tant que la pente ne dépasse pas 7 %,
- que l'efficacité du couvert de l'ananas diminue lorsque la pente augmente.

### 1.5. Conclusions sur les phénomènes d'érosion

Les manifestations intempestives de l'érosion sont nombreuses dans les plantations d'ananas de basse Côte-d'Ivoire (voir photos de ravines). Les unes ont lieu à l'intérieur des parcelles (fonte des billons), mais les ravines qui griffent les versants ont toutes pour origine le débordement du ruissellement accumulé sur certains tronçons dénudés des pistes. Une fois les ravines développées, l'érosion remonte entre les billons, remet en mouvement des masses de sable issus de la fonte des billons et les dépose en contre-bas dans le paysage (ensablement des bas-fonds).

Or, les tests classiques d'infiltration (Müntz) sous une nappe d'eau peu épaisse indiquent des perméabilités telles (400 à 1 200 mm/h) qu'aucune pluie ne pourrait jamais saturer ce type de sol ni provoquer du ruissellement.

Les tests au simulateur (nappe très mince mais énergie des gouttes) ont montré 3 points importants :

— Tout d'abord, sur *sol dénudé*, l'énergie des pluies est capable de détruire la structure du sol et de modifier totalement les propriétés hydrodynamiques du profil en créant à la surface une pellicule tassée, fondue et peu poreuse de quelques millimètres.

— Ensuite, le *couvert de l'ananas* (70 % après 5 ou 6 mois) réduit considérablement le ruissellement (de 50 %) et l'érosion (de 95 %) : en outre les matières organiques enfouies plutôt que brûlées jouent un rôle important sur la dynamique des propriétés physiques du sol et donc du ruissellement.

— Enfin, les cultures d'ananas dans les conditions classiques des grandes plantations (résidus enfouis) peuvent résister à des conditions climatiques sévères (averses de 120 mm en 1 h et plus de 600 mm de pluie en 1 mois). C'est la preuve évidente qu'il est inutile de chercher à maîtriser le ravinement en modifiant les techniques culturales dans les champs. Le nœud du problème se situe dans l'aménagement du réseau routier (300 km rien qu'à Salci à ONO) en contre pente et suivant tant bien que mal les courbes de niveau



PLANCHE III. — Erosion en ravines dans une plantation d'ananas de basse Côte d'Ivoire.

*Cliché ORSTOM*

*Photographe G. PETIOT*

principales, en augmentant son pouvoir filtrant par l'engazonnement partout où ce sera possible (réseau secondaire peu chargé) et en aménageant des exutoires capables d'évacuer sans érosion les excédents d'eau. Secondairement, l'adoption de techniques conservatrices dans zones pentues les plus exposées (mulching, alternance de bandes d'âge divers, fauchage des plants et conduite d'un second cycle sur les mêmes pieds, travail du sol limité aux lignes de culture ou 1 cycle sur deux) limitera le développement des ravines et des sablières en cas de concentration d'eau accidentelle. D'ores et déjà, l'aménagement d'un versant de plusieurs dizaines d'hectares a montré l'efficacité de cette approche qui permet de pousser la mécanisation des traitements (herbicides, insecticides et engrais).

## 2. ÉVOLUTION DE LA CHARGE SOLUBLE

Les pertes en eau et en terre, ne sont pas les seules conséquences des phénomènes d'érosion. Quantité d'éléments nutritifs migrent adsorbés aux terres érodées ou dissous dans les eaux de ruissellement. Or, si les apports de dolomie et phosphates sont enfouis avant plantation, les engrais azotés et potassiques sont pulvérisés à 4 ou 8 reprises durant le cycle cultural à la surface des feuilles d'ananas ; il est donc à craindre qu'une partie de ces engrais soit perdue s'il advient une grosse averse dans un délai relativement bref après une pulvérisation.

Nous avons profité de ces expérimentations sous averses simulées pour suivre l'évolution des teneurs en N total, K, Ca et Mg des eaux ruisselantes au cours de 2 à 4 averses encadrant une pulvérisation de sulfate de potassium (2,57 g/pied de K20) et d'urée (1 g/pied de N soit 56 kg/ha).

### 2.1. Méthode

Pour évaluer la limite supérieure des risques de pertes en éléments nutritifs dissous dans les eaux de ruissellement, une dose normale d'engrais fut pulvérisée sur chaque parcelle préalablement détrempée par plusieurs averses (au moins 120 + 60 mm en 24 h) ; trente minutes plus tard commence une seconde averse de 60 à 90 mm en 1 h. Les parcelles en sol nu n'ont pas reçu d'engrais afin de servir de témoin. Des échantillons de ruissellement furent prélevés à 5 ou 6 reprises au cours des averses, filtrées rapidement sur filtre plissé (type Pratt R4) et analysés au

laboratoire Central d'Adiopodoumé selon les méthodes courantes d'analyses automatiques pratiquées à l'ORSTOM. Les eaux d'irrigation proviennent d'un forage situé dans la nappe phréatique profonde (vers 40 m) sous le plateau couvert de forêts du Centre ORSTOM.

L'analyse d'un échantillon moyen par pluie donne des résultats comparables à ceux des pluies naturelles.

	Irrigation		Pluies naturelles Moyennes pondérées
	Variations totales	Moyennes	
N total ..	0,01 à 0,6	0,4 ppm	1,34 ppm
K .....	0,01 à 1	0,7 ppm	0,25 ppm
Ca .....	1,3 à 2,1	1,7 ppm	1,90 ppm
Mg .....	0,21 à 0,30	0,26 ppm	0,45 ppm

Les eaux d'irrigation sont claires et plutôt moins minéralisées que les eaux de pluie récoltées au même endroit de 1970 à 1972 (Roose, 1974).

Pour isoler l'augmentation des pertes en nutriments suite à la pulvérisation (à l'exclusion de celles dues à l'eau d'irrigation ou au ruissellement normal sur le sol), nous avons soustrait les teneurs moyennes pondérées observées lors de l'averse avant pulvérisation d'engrais. Le produit de cette différence de teneurs par le volume de la lame ruisselée après pulvérisation donne une idée précise des pertes d'engrais dans les eaux de ruissellement. Pour permettre une meilleure comparaison entre traitements, nous avons calculé la lame d'eau ruisselée si l'averse avait été de 90 mm de hauteur exactement.

### 2.2. Résultats

#### 2.2.1. L'AZOTE TOTAL

se trouve à raison de 0,4 ppm en moyenne dans les eaux d'irrigation.

Dans les eaux de ruissellement sur sol nu les teneurs varient de 1 à 0,4 ppm et les pertes en solution représentent moins de 0,2 kg/ha pour une averse de 90 mm.

Sous culture les teneurs en N total diminuent au cours des pluies de 1,6 à 0,4 ppm entraînant des pertes de 0,01 à 0,6 kg/ha. Les teneurs augmentent avec la pente et sont plus importantes sur les parcelles où les résidus sont brûlés.

TABLEAU XI

Pertes en azote total et potassium dans les eaux de ruissellement lors d'une averse simulée intervenant 30 mn après une pulvérisation d'urée (1 g/pied) et de sulfate de K (2,67 pied de K<sub>2</sub>O)

	Pente 4 %				Pente 7 %				Pente 20 %			
	1 Brûlis	2 Sol nu	3 Enfouis	4 Mulch	5 Brûlis	6 Sol nu	7 Enfouis	8 Mulch	9 Sol nu	10 Brûlis	11 Enfouis	12 Mulch
Pluie avant .. (mm) après ...	64 63,7	64 63,7	63,9 62	63,9 62	67,9 88,1	67,9 88,1	60,7 93,8	60,7 93,8	62,8 89,7	62,8 89,7	61,1 88,8	61,1 88,8
Lame ruisselée (mm) après en réalité après/90 mm	34,4 51,0	45,9 65,6	1,16 2,0	0 0	75,0 76,7	38,8 39,7	6,4 6,0	0 0	64,9 65,1	48,1 48,3	23,8 24,2	3,38 3,43
Teneurs (ppm)	Azote total											
. var. { avant ...	1,2 à 1,4	0,6 - 0,4	~ 0,3	—	0,8 - 0,4	0,8 - 0,4	1,1 \ 0,6	—	1 - 0,4	1,6 - 1,2	0,8 - 0,6	~ 1
{ après ...	72 \ 13	0,8 - 0,4	4 \ 1,3	—	1,2 - 1	98 \ 1,5	37 \ 1	—	~ 0,4	153 \ 2	142 \ 1,8	25 \ 2,4
. mp { avant ...	0,4	0,4	0,8	—	0,6	0,6	0,6	—	0,7	1,2	0,7	1,0
{ après ...	28,1	0,4	2,2	—	1,0	11,4	6,0	—	0,4	15,8	15,6	6,7
{ différ. ....	27,7	0	1,4	—	0,4	10,8	5,4	—	—	14,6	14,9	5,7
Pertes kg/ha/ 90 mm .....	14,13	—	0,03	—	—	4,3	0,32	—	—	7,05	3,61	0,20
Pertes en % des apports .....	25 %	—	< 0,1 %	—	—	7,6 %	0,6 %	—	—	12,6 %	6,4 %	0,3 %
Teneurs (ppm)	Potassium											
. var. { avant ...	4,2 \ 3	2 \ 0,7	1,7 - 1,5	—	~ 0,01	1,3 \ 0,9	2 \ 1	—	1,2 \ 1	3,6 \ 2,4	5 \ 2,5	7,5
{ après ...	180 \ 26	1,8 \ 0,5	10 \ 4,3	—	~ 0,3	240 \ 5	77 \ 44	—	1,2 \ 0,9	326 \ 8,5	338 \ 8	44 \ 11
. mp { avant ...	3,1	0,8	1,6	—	0,01	1,1	1,3	—	1,2	2,9	3,2	7,5
{ après ...	56,1	0,6	6,2	—	0,3	26,9	13,9	—	1,1	37,9	39,9	17,8
{ différ. ....	53,0	—	4,6	—	—	25,8	12,6	—	—	35,0	36,7	10,3
Pertes kg/ha/ 90 mm .....	27,03	—	0,09	0	—	10,24	0,68	0	—	16,91	8,88	0,35
Pertes en % des apports .....	22,6 %	—	< 0,1 %	0	—	8,6 %	0,6 %	0	—	14,2 %	7,4 %	0,3 %

Après pulvérisation d'urée, les teneurs en N total passent brutalement de 1 à 72 et jusqu'à 153 ppm mais baissent ensuite très rapidement jusqu'à rejoindre à peu près le niveau antérieure en fin d'averse. Les teneurs moyennes pondérées en fonction du volume ruisselé (mp) sont supérieures de 5 à 28 ppm par rapport à celles observées avant pulvérisation. Cependant seules les parcelles sur lesquelles le ruissellement fut élevé ont connu des pertes en azote significatives du point de vue économique : ce sont les parcelles où les résidus ont été brûlés (perte de 25, 8 et 13 % des apports) et celle où les résidus furent enfouis sur une pente de 20 % (perte de 6 % des apports).

## 2.2.2. LE POTASSIUM

varie autour de 0,07 ppm dans les eaux d'irrigation. Sur sol nu, les teneurs en potassium soluble dans les eaux de ruissellement varient de 2 à 0,01 ppm (md = 1 ppm) et les pertes pourraient atteindre 0,2 à 0,7 kg/ha pour une averse de 90 ppm. Sous ananas, les teneurs en K diminuent au cours de l'averse de 5 à 1 ppm entraînant des pertes de l'ordre de 0,2 à 1,6 kg/ha de K<sub>2</sub>O), les teneurs en K passent brutalement de 3 à 180 et jusqu'à 338 ppm. Les plus fortes teneurs s'observent en début d'écoulement ; les teneurs baissent ensuite rapidement pendant les 15 premières

minutes du ruissellement, sans pour autant rejoindre le niveau antérieur (4 à 26 ppm) en fin d'averse. Les teneurs moyennes pondérées sont donc largement plus élevées (de 5 à 53 ppm) après qu'avant pulvérisation. Cependant les pertes ne sont significatives que sur les parcelles où le ruissellement est abondant : elles atteignent 23, 9 et 14 % des apports sur brûlis et 7,4 % pour le traitement résidus enfouis sur 20 % de pente.

### 2.2.3. LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM

Une cinquantaine de déterminations de Ca et Mg dissous ont été faites sur les mêmes eaux. Alors qu'aucun apport de ces éléments n'avait été effectué à cette époque, nous avons eu la surprise de constater une légère mais très nette augmentation des teneurs en calcium (variation avant pulvérisation = 3 à 1 et après de 11 à 1 ppm) et en magnésium (var. avant pulv. de 0,3 à 0,1 et après de 3,5 à 0,2 ppm) dans les eaux de ruissellement. A celle-ci correspond une perte maximale de 2 kg/ha averse de calcium et 1 kg/ha de magnésium. Il semble donc que la pulvérisation d'engrais acides puisse chasser certains cations du feuillage ou de la surface du sol. Nous avons observé des phénomènes semblables dans les eaux de drainage lors des épandages d'engrais sous bananeraies (Roose, Godefroy, 1967).

### 2.3. Conclusions

Les risques de pertes d'engrais dans les eaux de ruissellement sont donc faibles puisque, malgré les conditions sévères imposées (sols et plantes détremés, pulvérisation suivie après 30 mn d'une averse de 90 mm), les pertes sont négligeables sauf lorsque les résidus de culture sont brûlés.

Ceci ne veut pas dire que ces engrais ne sont pas lixiviés des plants d'ananas et qu'il n'y a pas de pertes par drainage par exemple.

Cependant il est vraisemblable que les matières organiques, les colloïdes du sol et les racines fixent au passage une fraction des éléments nutritifs dissous dans les eaux de drainage. Les mesures en lysimètres sous pluie naturelles ont montré que la lixiviation en azote est assez grave (250 kg/ha en 1975) tandis que celle de la potasse est réduite en dehors de la période de maturation des fruits.

Cependant la pluie n'est jamais tombée juste après pulvérisation en 1975. Des essais sont en cours en

lysimètres sous pluies simulées pour observer les pertes potentielles par lixiviation au cas où une grosse averse survient juste après pulvérisation sur un sol détremé.

Les premiers résultats montrent que les pertes par lixiviation au-delà de 150 cm de profondeur sont négligeables à court terme (Valentin : communication écrite, décembre 1977).

## 3. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le simulateur de pluie s'est avéré extrêmement efficace pour étudier les facteurs qui modifient les phénomènes d'érosion et ses composantes : le ruissellement, les charges solides et solubles.

En deux mois d'expérimentation, l'influence dominante du couvert végétal a été mise en évidence ainsi que l'importance relative des techniques culturales, de la pente, de l'état préalable de la surface du sol (humidité et pellicule de battance), de l'intensité et de la hauteur des précipitations. L'énergie cinétique et les intensités des averses simulées étant de même ordre de grandeur que dans la nature, il a été possible de retrouver l'indice d'érodibilité du sol qu'on ne peut calculer sous pluie naturelle qu'après 5 à 10 ans d'expérimentation.

Alors que les tests classiques de mesure de la perméabilité laissaient prévoir sur ce type de sol une infiltration largement supérieure à l'intensité des pluies, des phénomènes de ruissellement et d'érosion très importants ont été observés particulièrement sur sol nu et sur les parcelles où les résidus de la culture de l'ananas avaient été brûlés. Ceci souligne le rôle fondamental que joue l'énergie cinétique des pluies sur la formation des pellicules de battance et sur le développement de l'érosion.

L'existence d'un schéma de ruissellement permet de prévoir l'évolution de la lame ruisselée en fonction du temps, une fois atteint le régime permanent. Il n'en va pas de même pour l'érosion car la charge solide varie considérablement en fonction de l'état de la surface du sol. Au-delà de certains seuils (fonction des caractéristiques de l'averse et de la protection du sol), la pellicule superficielle du sol dépasse le point de liquéfaction, la cohésion s'annule, la structure lâche et la pellicule de battance est évacuée.

Les essais au simulateur ont confirmé également la résistance extraordinaire des parcelles d'ananas traitées selon les techniques classiques en grande

plantation (résidus enfouis) lorsqu'elles sont soumises à des séries d'averses peu banales. Les nombreuses ravines observées sur les blocs industriels trouvent donc leur origine en-dehors des champs : elles sont liées aux zones de débordement du ruissellement accumulé sur le réseau routier. La protection des bandes cultivées ne joue donc qu'un rôle secondaire dans le développement des ravines et l'ensablement des bas-fonds.

Des raisons économiques ont amené les planteurs à mettre au point de nouvelles techniques de culture qui impliquent la mécanisation, l'utilisation optimale des résidus de culture, l'économie du travail du sol et le raccourcissement des cycles de production.

C'est dans cette optique d'économie qu'il faut concevoir l'organisation de la conservation des eaux et des sols autour de quelques grands axes :

1. Création d'un réseau routier permanent, parallèle à la courbe de niveau principale située à mi-versant, profilage à contre-pente, enherbement contrôlé (gyrobroyage) partout où c'est possible et création de seuils enherbés là où il n'a pas été possible d'infiltrer toutes les précipitations.

2. Alternance le long des versants de bandes cultivées d'âge et de pouvoir couvrant différents, maximalisation du couvert végétal par l'usage d'engrais et par la rapidité et la densité de la replantation après destruction du couvert du cycle précédent.

3. Sur les pentes fortes (> 10 %) alternance dans le temps et dans l'espace de cycles où les résidus sont enfouis et de cycles où ceux-ci couvrent au moins partiellement le sol. Si les techniques du mulch s'avèrent trop aléatoires sur le plan agronomique, il devrait être possible d'envisager un 2<sup>d</sup> cycle de culture après rabattage des vieux plants comme cela se pratique à Hawaï.

Les essais effectués dans des conditions très sévères, ont montré que les risques de perdre des nutriments azotés et potassiques dans les eaux de ruissellement sont faibles même si l'averse suit de peu une pulvérisation. Cependant, il reste à démontrer que l'engrais n'est pas entraîné hors d'atteinte de la plante par les eaux de drainage.

La nature a ses lois et l'homme a tout intérêt à les respecter.

Ainsi le climat tropical humide est parmi les plus agressifs ; mais pour se protéger de ses méfaits, point n'est besoin de faire appel à des techniques élaborées ou coûteuses (terrassements).

Le couvert végétal et les techniques culturales qui favorisent sa croissance suffisent à assurer une protection efficace contre l'érosion.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 30 janvier 1978.*

#### BIBLIOGRAPHIE

- BARNETT (A.R.), DOOLEY (A.E.), 1972. — Erosion potential of natural and simulated rainfall compared Trans ASAE, USA, 15, 6 : 1112-1114.
- BRUNET-MORET (Y.) 1967. — Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Côte-d'Ivoire. *Rapport ORSTOM - CIEH*, 20 p. *multigr.*
- C.T.F.T., 1966. — L'équation universelle de perte de sols de Wischmeier, C.T.F.T. Madagascar, 15 p. *multigr.*
- DABIN (B.), LENEUF (N.), 1958. — Etude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire : mai 1956 à 58. *Rapport ORSTOM*, Abidjan, 20 p. *multigr.*
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.) 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 3, 1976 : 195-237.
- ROOSE (E.J.), CHEROUX (M.), 1966. — Les sols du bassins sédimentaire de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 2 : 51-92.
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1967. — Lessivage des éléments fertilisants sous bananeraie. Tananarive, *Coll. Fertilité des sols tropicaux : comm.* 114 : 1405-1409.
- ROOSE (E.J.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse Doct. Ing., Faculté des Sciences d'Abidjan, n° 20, 125 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), 1974. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat humide. XIII<sup>es</sup> Journées de l'Hydraulique ; Paris 1974. Question III, rapport 13, 7 p.
- ROOSE (E.J.), 1975. — Application de l'équation de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith en Afrique de l'Ouest. *Coll. Conservation et aménagement du sol dans les tropiques humides*. HTA Ibadan, *Rapport ORSTOM*, 22 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), LACOEUILHE (J.J.), 1975. — Etude du ruissellement de l'érosion et de la lixiviation en fonction du mode d'utilisation des résidus de la culture de l'ananas. (1) Protocole expérimental ; 1975, ORSTOM, Abidjan 17 p. *multigr.* ; (2) Rapport de la campagne 1975 ; 1976, ORSTOM, Abidjan, 18 p. *multigr.*
- SWANSON (N.P.) 1965. — The rotating boom rainfall simulator. *TRANS. Amer. Soc. Agric. Eng.* 8 p. 71-72.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1960. — A universal soil-loss estimating equation to guide conversation farm planning. *VII Intern. Soc. Soil Science. Congrès* ; Madison, vol. 1 : 418-425.
- WISCHMEIER (W.H.), 1966. — Relation of field plot runoff to management and physical factors. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30, 2 : 272-277.
- YOUNG (R.A.), BURWELL (R.E.), 1972. — Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 5 : 827-830.

TABLEAU I

Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>1</sub> ananas, résidus brûlés, E<sub>2</sub> sol nu  
Adiopodoumé : pluies simulées sur une pente de 4 % - 1975

Averses						E <sub>1</sub> : ananas, résidus brûlés							E <sub>2</sub> : sol nu										
N°	date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	R. fin		Charge dév.			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	R. fin		Charg. dév.			Ch. tôt moy.	Eros. kg/l
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	min.	max.	moy.	11	12	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'		
N1	26/9	34,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	8/10	125,9	64,3	264	131,7	14,3	11,3	14	22	0,08	-0,1	-0,1	0,096	14	42,0	33,4	35,5	55	0,4	0,6	0,5	1,1	47
N2	—	23,1	—	—	—	0,7	2,9	—	—	—	—	—	—	—	7,4	32,2	—	—	—	—	—	—	—
2	9/10	64,0	64,0	19,5	66,6	24,0	38,0	32,5	51	0,1	-0,2	-0,1	0,14	33	44,0	68,8	45	70	0,4	0,7	0,5	1,3	60
3	—	63,7	63,7	1,1	65,9	34,4	54,0	40	63	0,1	-0,3	-0,1	0,14	48	45,9	72,0	48	75	0,4	3,4	2,5	3,8	1,73
4*	—	63,9	63,9	3	66,4	38,1	60,0	45	70	0,1	-0,2	-0,1	0,12	46 (70)	46,6	73,0	48,5	76	2,7	4,2	4	6,0*	2,77 (3,67)
N3	19/10	10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N4	20/10	47,5	—	—	—	1,4	2,4	—	—	—	—	—	—	—	15,9	27,6	—	—	—	—	—	—	—
N5	27/10	7,0	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
N6	2/11	25,7	—	—	—	0,7	2,7	—	—	—	—	—	—	—	10,7	41,8	—	—	—	—	—	—	—
5	4/11	61,1	61,1	51	60,3	12,1	20,0	17,5	29	0,05	-0,1	-0,06	0,06	7	41,3	68,0	45	74	0,2	0,7	0,3	3,5	1,4
6	5/11	30,4	60,7	17	29,8	8,6	28,0	29,5	49	0,05	-0,1	-0,06	0,06	5	22,5	74,0	48,5	80	0,2	0,8	0,3	3,6*	8
7	—	29,8	59,6	0,5	28,6	14,8	50,0	36	60	0,1	-0,3	-0,12	0,12	18	23,0	77,0	48,5	81	1,3	3,3	2,6	7,0*	1,60
N7	9/11	30,0	—	—	—	5,0	16,7	—	—	—	—	—	—	—	28,9	96,5	—	—	—	—	—	—	—
N8	10/11	2,5	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
N9	16/11	11,5	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	3,2	27,8	—	—	—	—	—	—	—
N10	18/11	9,5	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	7,2	75,8	—	—	—	—	—	—	—
8	21/11	59,9	89,8	63	91,5	15,1	25,0	32	36	0,1	0,3	0,14	0,14	22	48,3	81,0	79	88	0,3	1,8	1,2	6,2	2,91
9	—	62,0	124	2	136,3	34,4	55,0	82	66	0,05	0,15	0,07	0,07	25	53,7	87,0	111	90	0,5	7,3	4,8	10,6	5,67
N11	24/11	3,1	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
10	26/11	60,1	120,2	39	127,6	18,9	31,0	61,5	51	0,06	0,2	0,08	0,08	16	48,4	80,0	103	86	0,6	9,6	4,6	10,3	4,99
N12	27/11	15,5	—	—	—	1,6	10,1	—	—	—	—	—	—	—	9,0	58,3	—	—	—	—	—	—	—
11	—	60,3	120,6	8	128,5	34,8	58,0	85	70	0,04	0,2	0,09	0,09	30	51,6	86,0	107,3	86	0,7	7,6	4,3	9,3	4,784
12	—	33,9	33,9	0,5	17,1	15,1	45,0	17,5	52	0,08	0,15	0,09	0,09	14	22,8	67,0	24	71	0,2	0,6	0,3	3,4	1,386
13	—	59,3	88,9	2,5	89,5	39,0	66,0	77	87	0,06	0,3	0,17	0,17	38	51,1	86,0	76	85	0,8	7,2	3,8	7,8	3,990
Σ 6 averses :	Pu =	465,4 mm	—	—	—	179,8	38,6	82	70	0,05	0,3	0,12	0,117	212	301,5	64,8	111	90	0,3	7,3	—	4,936	15,1

Notes \* : Si l'averse 4 avait atteint une hauteur de 90 mm, comme pour les autres couples, les valeurs auraient atteint les chiffres ( ).

TABLEAU II

Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>3</sub> ananas, résidus enfouis, E<sub>4</sub> ananas, résidus mulch  
Adiopodoumé : pluies simulées sur une pente de 4 % - 1975

Averses					E <sub>3</sub> : ananas, résidus enfouis								E <sub>4</sub> : ananas, résidus en surface										
date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	Rfin mm/h %		Charge dév. min. max. moy. g/l			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	Rfin m/h %		Charge dév. min max moy			Ch. tot moy.	Eros. kg/ha	
8/10	23,1	—	288	—	1,28	5,5	—	—	—	—	—	—	—	1,2	5	—	—	—	—	—	—	—	—
—	125,8	62,9	2	128,3	1,16	0,9	1,5	2	0,13	0,14	—	0,138	1,6	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10/10	63,9	63,9	39	66,4	1,31	2,1	1,5	2	0,17	0,17	—	0,177	1,8	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	62,0	62,0	1	62,2	1,16	1,9	2,0	3	0,2	0,3	—	0,276	3,2	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	90,8	90,8	3	140,5	4,75	5,2	5,0	5,5	0,3	0,4	—	0,326	15,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19/10	10,0	—	203	—	0,38	0,7	—	—	—	—	—	—	—	0,54	0,9	—	—	—	—	—	—	—	—
20/10	47,5	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27/10	7,0	—	162	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2/11	25,7	—	154	—	0,28	1,1	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9/11	30,0	—	162	—	0,54	1,8	—	—	—	—	—	—	—	0,32	1,1	—	—	—	—	—	—	—	—
10/11	2,5	—	41	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—
14/11	58,8	88,2	81,7	88,0	1,04	1,8	2,2	2,5	0,11	0,15	—	0,144	1,5	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—
—	58,2	116,4	2	119,2	2,08	3,6	4,9	4	0,2	0,3	—	0,255	5,3	0,35	0,3	1,3	—	—	0,01	0,07	—	0,02	0,07
Σ 6 averses : Pu = 459,5 mm					11,50	2,5	5	5	0,1 à 0,4 + T.C.			0,250	28,9	0,35	0,08	1,3	0,1	0,01	0,07	—	0,02	0,1	

**TABLEAU III**  
*Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>5</sub> sol nu, E<sub>6</sub> ananas, rés. brûlés*  
*Adiopodoumé : pluies simulées sur une pente de 7 % - 1975*

Averses					E <sub>5</sub> : sol nu							E <sub>6</sub> : ananas, résidus brûlés										
Date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	R. mm/h	fin %	Charge dév. g/l			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	R. m/h	fin %	Charge dév.			Ch. tot moy.	Eros. kg/ha
									min.	max.	moy.							min	max	moy		
26/9	34,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/10	23,1	—	—	—	0,4	1,6	—	—	—	—	—	—	—	0,1	0,6	—	—	—	—	—	—	—
13/10	130,0	65	119	137,7	62,1	48	45	69	0,8	9,7	5,8	22,1	13 726	4,17	3,2	5,5	8,5	—	—	—	—	—
14/10	69,4	69,4	20	79,2	49,3	71	50,8	73	1,3	12,6	8,7	24,9	12 283	15,4	22	18,5	27	—	—	—	—	8
—	67,9	67,9	1	75,5	50,5	74	52,5	77	6,4	14,9	11,9	29,1	14 689	20,7	30	22,9	34	—	—	—	—	1 059
—	88,1	88,1	3	127,2	75,0	85	79,3*	90*	3,1	26,4	19,3	38,5	28 843	38,8	44	42,0	48	—	—	—	—	1 484
19/10	10,0	—	83	—	17,6	30,6	—	—	—	—	—	—	—	2,54	4,4	—	—	—	—	—	—	—
20/10	47,5	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27/10	7,0	—	162	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
2/11	25,7	—	154	—	13,8	53,7	—	—	—	—	—	—	—	1,22	4,7	—	—	—	—	—	—	—
5/11	62,1	62,1	75	62,4	27,9	45	30	48	0,3	5,3	4,3	20	5 581	8,1	13	10,5	17	—	—	—	—	131
6/11	30,8	61,6	18	30,7	18,1	59	38,5	63	0,6	3,8	2,8	17,5	3 161	8,5	28	20	32	—	—	—	—	92
—	30,0	60,0	0,5	29,0	19,0	63	40	67	1,1	5,5	3	18,1	3 433	10,8	36	25	42	—	—	—	—	261
9/11	30,0	—	68	—	20,0	66,7	—	—	—	—	—	—	—	8,74	29	—	—	—	—	—	—	—
10/11	2,5	—	41	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
16/11	11,5	—	138	—	1,9	16,5	—	—	—	—	—	—	—	0,08	0,7	—	—	—	—	—	—	—
18/11	9,5	—	51	—	5,1	53,3	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
19/11	61,1	91,7	15	95,6	47,0	77	72	79	2	14,7	11,3	29,5	13 844	16,4	27,0	28,5	31	0,2	0,5	0,3	0,4	65
—	59,7	119,3	2,8	125,7	48,2	81	99	83	3,4	21,3	14,7	38,0	18 333	28,0	47	61	51	0,2	0,4	0,3	1	288
24/11	61,4	122,8	120	133,5	37,7	61	80,5	66	2	17,8	11	32,3	12 193	15,6	25	39	32	0,2	0,4	0,2	0,7	114
—	3,1	—	2,5	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—
25/11	61,5	122,9	9	133,9	43,7	71	92	75	1,6	16	10	30,3	13 248	26,9	44	60,6	49	0,2	0,4	0,3	0,8	230
—	32,8	32,8	0,5	15,9	9,8	30	11,6	35	0,4	2,4	0,6	9,1	895	2,5	8	3	9	0,08	0,15	—	0,1	3
Σ 6 averses : Pu = 476,2 mm					332,1	69,7	99	83	0,8 à 26,4 + T.C.			30,6	101718	123,5	25,9	61	51	0,1 à 2,1 + TC			3,079	3 803

Note \* : Plateau irrégulier

TABLEAU IV

Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>7</sub> ananas, rés. enfouis, E<sub>8</sub> ananas, rés. mulch  
Adiopodoumé : pluies simulées sur une pente de 7 % - 1975

Averses					E <sub>7</sub> : ananas, résidus enfouis							E <sub>8</sub> : ananas, résidus en surface											
Date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	R.fin mm/h %		Charge dév. g/l			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	R.fin m/h %		Charge dév. min max moy			Ch. tot moy.	Eros. kg/ha	
26/9	34,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8/10	23,1	—	—	—	0,034	0,2	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16/10	124,6	62,3	188	125,7	1,5	1,2	1,3	2	0,13	0,17	→	0,18	2,8	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17/10	59,0	59	20	56,0	1,35	2,3	1,7	3	0,16	0,23	→	0,19	2,6	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	60,7	60,7	1	59,5	1,7	2,8	2,4	4	0,13	0,2	→	0,16	2,7	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	93,8	93,8	3	150,5	6,4	6,8	9,6	10	0,3	0,75	→	0,39	25,2	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19/10	10,0	—	34	—	2,0	3,5	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20/10	47,5	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27/10	7,0	—	162	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2/11	25,7	—	154	—	0,96	3,7	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9/11	30,0	—	162	—	1,06	3,5	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10/11	2,5	—	41	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16/11	11,5	—	138	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17/11	55,4	83,1	1,7	77,5	1,7	3,0	3	4	0,2	0,5	→	0,35	4,1	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	57,9	115,8	2	117,8	3,4	6,0	8,7	8	0,4	1,2	→	0,69	23,6	0,075	0,1	0,3	0,5	—	—	—	0,1	—	—
Σ 6 averses : Pu = 451,4 mm					16,05 mm	3,6 %	9 mm/h	10 %	0,3 à 1,2 g/l			0,380 g/l	61 kg/ha	0,075 mm	0 %	0,3 m/h	0,3 %	—	—	—	0,1 g/l	0,1 kg/ha	

TABLEAU V  
 Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>9</sub> sol nu, E<sub>10</sub> ananas, rés. brûlés  
 Adiopodoumé : pluies simulées sur une pente de 20% - 1975

Averses				E <sub>9</sub> : Sol nu									E <sub>10</sub> : ananas, résidus brûlés										
Date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	R. mm/h	fin %	Charge dév. g/l			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	R. m/h	fin %	Charge dév. min max moy			Ch. tot moy.	Eros. kg/ha	
19/10	10	—	—	—	6,4	11,1	—	—	—	—	—	—	—	0,42	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—
20/10	47,5	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27/10	7,0	—	162	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
—	124,4	62,2	8	125,3	63,1	51	39,4	63	7,1	87,5	60	90	56 682	12,0	9,6	9,7	16	0,3	2,3	1	8,1	976	
28/10	62,0	62,0	21	62,2	39,7	64	40,5	65	8,8	44,1	34	79	31 308	15,1	24,4	19	31	0,5	5,4	3,7	8,4	1 262	
—	62,8	62,8	1	63,9	40,4	64	42,5	68	7,6	48,2	36	70	28 383	23,5	37,4	25,1	40	0,9	8,2	10,2	6,3	2 391	
—	89,7	89,7	3	136,9	64,9	72	65	72	22,1	78,9	53	89	57 927	48,1	53,6	53,3	59	2,8	14,6	13,2	15,6	7 489	
2/11	25,7	—	116	—	6,8	26,5	—	—	—	—	—	—	—	6,0	23,3	—	—	—	—	—	—	—	—
6/11	60,9	60,9	99	59,9	23,9	39,2	30,5	50	1,8	45,2	29	83	19 901	15,6	25,6	20,4	33	0,9	7	5,5	10,6	1 657	
7/11	30,8	61,6	16,5	30,7	16,0	52	36	58	4,1	24,5	19	66	10 522	11,7	38	27,9	45	0,7	5,2	4,1	8	936	
—	30,0	60,0	0,5	29,0	17,6	59	37,5	63	5,2	24,5	20	63	11 063	13,8	46	30,9	52	0,7	7,2	5,8	9,8	1 353	
9/11	30,0	—	44	—	18,3	61	—	—	—	—	—	—	—	15,9	53	—	—	—	—	—	—	—	—
10/11	2,5	—	41	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
16/11	11,5	—	138	—	0,36	3	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
18/11	9,5	—	51	—	4,8	50,5	—	—	—	—	—	—	—	2,2	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—
20/11	59,3	89,0	40	89,7	34,3	58	60	67	39,5	77,2	59	117	40 183	25,6	43	46,5	52	3,6	6,4	5,6	7,2	1 951	
—	58,1	116,2	2	118,7	39,9	69	88	76	13,8	60,6	52	97	38 669	35,9	62	80	69	2,8	6,7	6,2	7,3	2 606	
24/11	3,1	—	100	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
25/11	59,8	119,6	21	126,2	33,2	55,5	79	66	8,6	55	41	98	32 366	28,3	47	64,5	54	1,6	9,5	7,8	9,2	2 603	
26/11	57,8	115,6	17	117,4	38,8	67	82,5	71	9,8	55,3	41	81	31 398	37,0	64	81	70	1,7	6,4	5,8	6,5	2 396	
—	32,9	32,9	0,5	16,0	13,4	41	16,5	50	1,6	13,4	8,5	47	6 288	9,9	30	11	33	0,4	0,9	0,4	2,1	209	
Σ 6 averses : Pu = 456,3 mm					282,3	62 %	88	76 %	7,1 à 8,7 + T.C.			89,7	253151	160,2	35 %	80	69 %	0,3 à 14,6 + T.C.			10,4	16 675	

TABLEAU VI

Caractéristiques des averses, du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles E<sub>11</sub> ananas, rés. enfouis, E<sub>12</sub> ananas, rés. mulch  
Adiopodoumé : pluies simulées, sur une pente de 20 % - 1975

Averses					E <sub>11</sub> : ananas, résidus enfouis							E <sub>12</sub> : ananas, résidus en surface											
Date 1975	Pu mm	Im mm/h	Ta h	Rusa	Lr mm	Kru %	R. fin		Charge dév.			Ch. tot moy. g/l	Eros. kg/ha	Lr mm	Kru %	R. fin		Charge dév.			Ch. tot moy.	Eros. kg/ha	
							mm/h	%	min.	max.	moy.					m/h	%	min	max	moy			
19/10	10	—	—	—	1,0	1,7	—	—	—	—	—	—	—	0,68	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—
20/10	47,5	—	24	—			—	—	—	—	—	—	—			—	—	—	—	—	—	—	—
27/10	7,0	—	162	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
29/10	119,6	59,8	57	115,2	2,7	2,2	3,0	5	0,3	0,4	→	0,3	9	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
30/10	59,6	59,6	20	57,2	5,4	9,1	7,3	12	0,1	0,5	0,5	16,1	873	0,5	0,8	0,8	1,3	—	—	—	—	—	0
—	61,1	61,1	1	60,3	9,1	14,9	10,2	17	0,8	2,1	1,2	16,1	1 467	1,2	2	1,5	2,5	0,07	→	0,07	→	0,07	0,8
—	88,8	88,8	3	133,9	23,8	26,8	27,3	30	1,8	13,3	9,3	18,6	4 434	3,4	3,8	4	4,5	0,06	0,15	→	0,06	→	2,1
2/11	25,7	—	92	—	1,0	3,9	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
9/11	30,0	—	162	—	3,0	10	—	—	—	—	—	—	—	0,8	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—
10/11	2,5	—	41	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
16/11	11,5	—	138	—	0,8	7	—	—	—	—	—	—	—	0,34	3	—	—	—	—	—	—	—	—
18/11	57,1	85,7	41	82,8	8,1	14,1	14,3	17	0,6	0,9	0,8	10,9	885	1,1	1,9	2,3	2,7	0,1	0,2	→	0,1	→	1,2
—	58,8	117,6	2	121,8	18	30,7	39	33	1,2	7,3	5,3	11,1	1 994	3,1	5,3	7,5	6,4	0,08	0,1	→	0,08	→	2,6
Σ 6 averses : Pu = 445 mm					67,1	15 %	39	33 %	0,3 à 13,3 + T.C.			14,4	9 662	9,3	2,1 %	7,5	6 %	0,06 à 0,2			0,072	6,7	