

ÉROSION ET TRANSPORT SOLIDE SUR UN BASSIN VERSANT FORESTIER TROPICAL (BASSIN DE L'AMITIORO, CÔTE D'IVOIRE)

Ph. MATHIEU

*Géologue ORSTOM
Laboratoire de Géologie et Sédimentologie
Université de Nice*

RÉSUMÉ

Six années d'observation ont permis d'analyser l'action mécanique du ruissellement sur un bassin forestier de la zone intertropicale humide.

Une première partie est consacrée aux facteurs conditionnels de l'érosion : climat, végétation, géomorphologie, pédologie, hydrologie.

Une seconde partie traite de l'action dynamique du ruissellement. Les variations de la charge solide sont examinées en fonction des débits de crue et de décrue. Une relation entre volume ruisselé et transport solide est montrée. Les transports en suspension et par charriage sont étudiés du point de vue de leur composition granulométrique et minéralogique.

Dans une troisième partie sont exposés les bilans d'érosion mécanique. Ils font apparaître de faibles transports dus en grande partie à d'importantes pertes en eau comme en témoignent les faibles coefficients d'écoulement observés.

Il apparaît que l'action mécanique des eaux de ruissellement est faible. La physionomie actuelle du bassin, avec son réseau dense de ravines et ses têtes de talweg rapprochées, traduit une action érosive plus intense héritée de conditions climatiques inactuelles.

ABSTRACT

A six years study in the intertropical humid zone allowed an analysis of the run-off mechanism of erosion on a forest basin.

The first part of this paper is devoted to the conditional factors of erosion i.e. climate, vegetation, geomorphology, pedology, hydrology.

In the second part is studied the dynamic of run-off. The suspended load variations are plotted with the flows. The relation between the run-off volume and the solid discharge is demonstrated. The suspended load and bed load transportations are examined in respect of their granulometric and mineralogical composition.

In the third part are described the mechanical erosion budgets ; the relatively poor solid discharges are due to the great losses of water as shown by the low flow-coefficients observed.

Finally, the mechanical action of the run-off waters is actually of little value. The physiography of the studied basin, with its dense network of gullies and its valleys heads closed one to another, shows the inheritance of a past strong erosive action under other climatic conditions.

ZUSAMMENFASSUNG

Sechs Jahre Beobachtung haben es erlaubt, die Abschwemmung in einem Waldsammelgebiet der feuchten intertropischen Zone zu analysieren.

Ein erster Teil ist bedingten Faktoren der Erosion : wie Klima, Vegetation, Geomorphologie, Pedologie und Hydrologie, gewidmet.

Ein zweiter Teil behandelt die Abschwemmung. Die Veränderungen der Festverfrachtung in Verbindung mit den Hoch- und Niedrigwasserabflussmengen sind untersucht worden. Es wird ein Zusammenhang zwischen dem gerieselten Volumen und der festen Verfrachtung aufgezeigt. Die schwebenden- und die Schubverfrachtungen sind in Hinsicht auf ihre Korngrößenverteilung und mineralogische Zusammensetzung untersucht worden.

In einem dritten Teil sind die Bilanzen der mechanischen Erosion gegeben. Sie zeigen schwache Verfrachtungen, die hauptsächlich durch bedeutende Wasserverluste verschuldet sind, wie es die schwachen Abflusskoeffizienten, die man beobachtete, bezeugen.

Es zeigt sich, dass die Abschwemmung schwach ist. Die gegenwärtige Physionomie des Beckens, mit seinem dichten Netz von Rinnen und seinen dicht nebeneinander befindlichen Talwegköpfen, offenbart eine stärkere Erosionstätigkeit, die von nicht aktuellen klimatischen Bedingungen herrührt.

РЕЗИОМЕ

Шестилетние наблюдения позволили изучить механическое воздействие стока на лесной водоём тропической влажной зоны.

Первая часть посвящена условиям эрозии: климат, растительность, геоморфологические, почвенные и гидрологические факторы.

Вторая часть трактует о динамическом действии стока. Рассматриваются изменения твердых наносов в зависимости от расхода в эпохи паводка и спада воды. Показано отношение между объемом стока и твердыми наносами. Транспорт взвешенных и донных наносов изучается с точки зрения их механического и минералогического состава.

В третьей части приводятся балансы механической эрозии. Последние обнаруживают слабую степень транспортов, большей частью за счет значительных потерь воды, о чем свидетельствуют отмеченные слабые коэффициенты стока.

Оказывается что воды стока имеют слабое механическое воздействие. Современный облик водоёма, с его густой сетью промоин и сближенными верхними частями тальвегов, свидетельствует о более интенсивном эрозионном действии, связанном с несовременными условиями.

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude sur l'érosion, le transport et la sédimentation entreprise en Côte d'Ivoire à l'initiative de J.Ph. MANGIN (1963), deux bassins représentatifs, l'un d'une savane à substratum granitique, l'autre d'une forêt dense sur substratum schisteux, ont été choisis.

Seul le bassin forestier sera envisagé dans cette note.

Le but recherché est de connaître les apports de provinces distributrices bien déterminées à un fleuve collecteur : le Bandama, étudié par ailleurs (LENOIR, MONNET).

Les transports solides seront seuls exposés ici. La nature chimique des eaux de ruissellement sur bassin forestier sera examinée ultérieurement.

Le bassin choisi est le bassin versant de l'Amitiéro entièrement recouvert d'une forêt secondaire. Il est situé entre 5°49' et 5°57' de latitude nord et 4°52' et 5°02' de longitude ouest. Il déborde légèrement vers le nord la route Abidjan-Divo. A la station principale, la superficie du bassin est de 170 km². Une station secondaire établie au nord (station du ravineau) recueille les eaux d'un petit bassin de 2 ha.

LES FACTEURS CONDITIONNELS DE L'ÉROSION

Le climat

Pluviométrie

Le bassin versant de l'Amitiéro appartient au domaine climatique équatorial de transition (climat Attien), type boréal, qui est caractérisé par deux saisons des pluies séparées par deux saisons sèches de durées inégales provoquées par le déplacement du front intertropical.

Le régime pluviométrique est le suivant :

— Pluviométrie en année moyenne	: 1 323 mm
— Pluviométrie en année décennale humide	: 1 648 mm
— Pluviométrie en année décennale sèche :	: 998 mm
— Coefficient de variation	: 0,19
— Coefficient d'irrégularité interannuelle	: 1,80

Les précipitations mensuelles observées de 1963 à 1968 comparées aux moyennes interannuelles sont présentées dans le tableau I (fig. 1).

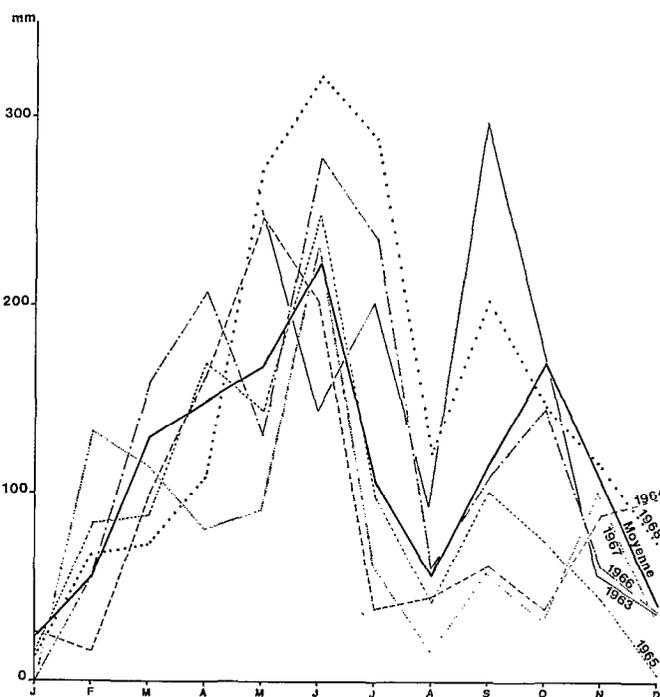


FIG. 1. — Pluviométries mensuelles comparées à la moyenne interannuelle.

TABLEAU I

Pluviométries mensuelles (mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Moyenne	23	56	128	148	166	223	106	56	115	169	106	40	
1963					251	144	202	93	298	181	57	38	(1 264)
1964	28	16	104	163	260	209	39	44	60	45	104	121	1 193
1965	29	97	80	177	155	267	111	42	107	74	42	2	1 183
1966	0	57	165	204	135	305	260	72	121	152	83	38	1 592
1967	0	132	124	81	91	231	61	16	58	33	101	37	965
1968	12	67	73	88	272	322	289	121	203	146	113	75	1 781

Les hauteurs pluviométriques sont généralement peu élevées et les plus fortes fréquences sont observées pour des pluies inférieures à 10 mm qui ne provoquent aucun ruissellement (tabl. II).

TABLEAU II

Classement des averses (d'après les observations pluviométriques de la station du ravineau)

	1964	1965	1966	1967
0-10 mm	71	66	107	56
10-20 mm	15	13	26	16
20-30 mm	9	11	15	10
30-40 mm	9	5	3	2
40-50 mm	1	1	2	3
50-60 mm	1	4	2	0
> 60 mm	0	6	2	1

La hauteur de chaque averse est un facteur important mais qui, pris isolément, n'a aucune signification : à une pluie d'une fréquence donnée ne correspond pas obligatoirement une crue de même fréquence. Pour prévoir l'action érosive d'une précipitation il convient de prendre en considération la répartition pluviométrique la précédant et plus particulièrement le temps séparant le début de l'averse de la fin de l'averse précédente (T_a), et la pluie antérieure cumulée (P_c).

Les valeurs limites de la pluie moyenne pouvant donner un écoulement, calculées sur une portion du bassin de 2,75 km², augmentent rapidement avec le T_a et sont les suivantes (SIRCOULON, 1967) :

- 9 mm après 1 jour sans pluie,
- 12,5 mm après 3 jours sans pluie,

- 20 mm après 8 jours sans pluie,
- 25 mm après 12 jours sans pluie.

Pour illustrer ce facteur important, le 12-2-1965, une pluie moyenne sur le bassin de 54,3 mm provoque un ruissellement de 125 000 m³ soit un coefficient de ruissellement de 1,3 % et une dégradation spécifique de 1,2 kg/ha. Par contre, le 20-6-1965, une pluie d'une hauteur moindre (38,1 mm) donne un ruissellement de 1 394 000 m³, soit un coefficient de 21,5 % et une dégradation spécifique de 15,8 kg/ha.

Les conditions de ruissellement sont donc sévères, et les pluies isolées de début et de fin de saison ont peu de chances de ruisseler.

Température, évaporation

Les températures présentent un maximum principal diurne (35°) et nocturne (24°) en février et mars où se situe également la plus forte amplitude journalière (11°).

Elles diminuent progressivement jusqu'au minimum principal diurne (30°) et nocturne (22°) d'août. L'amplitude journalière est alors la plus faible de l'année.

L'évaporation, mesurée sur bac Colorado, est de 1 100 mm en 1963 et de 1 200 mm en 1964. Elle présente :

- un maximum principal en février et en mars,
- un minimum principal en juin, juillet et août,
- un maximum secondaire en octobre,
- un minimum secondaire en décembre et janvier.

Végétation

Le bassin versant de l'Amitioro est recouvert d'une forêt secondaire appartenant au domaine guinéen qui possède un climax de forêt dense humide semi-décidue. C'est une forêt mésophile à *Celtis* à tendance hygrophile.

Deux aspects édaphiques peuvent être distingués en fonction des conditions de drainage (1).

— Les formations forestières croissant sur interfluves, milieu bien drainé, comportent de nombreuses espèces mésophiles.

Leur structure est assez homogène avec un toit à deux étages comprenant une voûte supérieure discontinue et une voûte inférieure dense et continue.

— Les formations forestières croissant dans les talwegs et les bas-fonds, milieu à engorgement temporaire, sont réduites à quelques espèces ripicoles. Leur structure est hétérogène avec un seul étage très discontinu dominant une strate arbustive.

Géomorphologie. (Fig. 2) (1)

Le substratum du bassin appartient au birrimien flyschoidé formé de schistes et de grauwackes peu métamorphisés. A l'ouest, la ligne de partage des eaux est marquée par un alignement de collines de 120 à 170 m d'altitude orientées suivant la direction tectonique NE-SW, qui séparent le massif granitique de Divo-Lakota de la zone schisteuse. Les sommets de ces collines sont constitués de pointements

(1) Interprétation des photographies aériennes due à P. de la SOUCHÈRE, pédologue de l'ORSTOM.

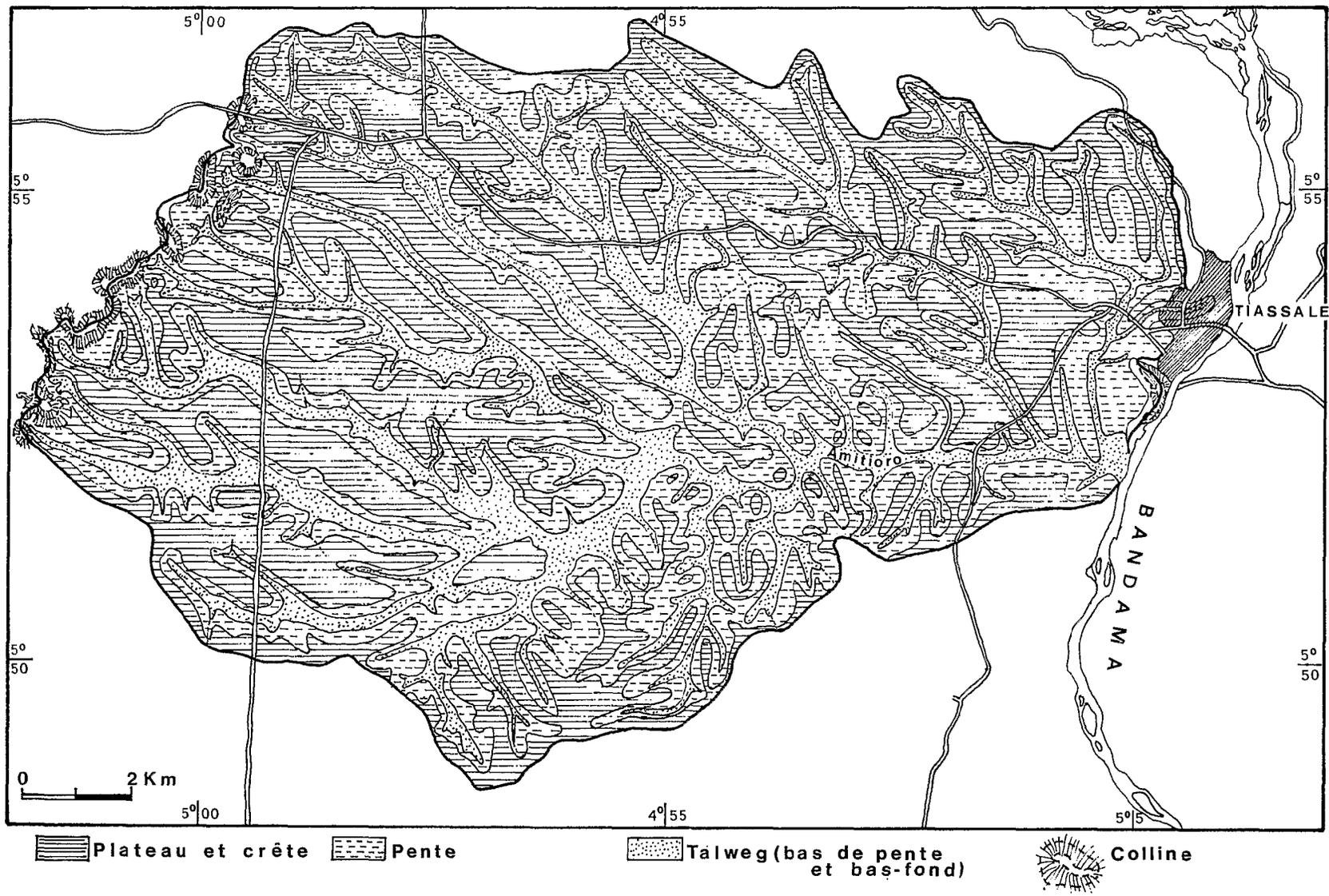


FIG. 2. — Carte physiographique du bassin versant de l'Amitioro (d'après une photointerprétation de P. de La SOUCHÈRE).

de roches vertes. Les croupes convexes dominent des talwegs au profil transversal en auge. La pente des versants varie de 5 à 25 ‰.

Dans la partie centrale du bassin, le relief est peu accusé et se présente sous forme d'ondulations de faible amplitude. Le drainage s'effectue perpendiculairement à la direction tectonique. Les interfluves sont étroits, allongés et lobés. Les profils en auge sont asymétriques et les pentes des versants, de l'ordre de 3 à 8 ‰. Les bas-fonds ont des profils longitudinaux et transversaux réguliers et calibrés.

Le sud de cette zone est constitué d'un plateau digité où le réseau prend une allure plus confuse. Les versants sont plus irréguliers et dissymétriques.

A l'est du bassin, à proximité du fleuve collecteur (Bandama), quelques batholites granitiques entourés de leur auréole de métamorphisme de contact dominant une zone déprimée dans laquelle divague le cours de l'Amitioro.

L'altitude moyenne du bassin est de 65 m. A l'amont du réseau, les pentes sont assez fortes et dépassent 10 ‰. L'indice de pente global est de 3 ‰ (fig. 3 et 4).

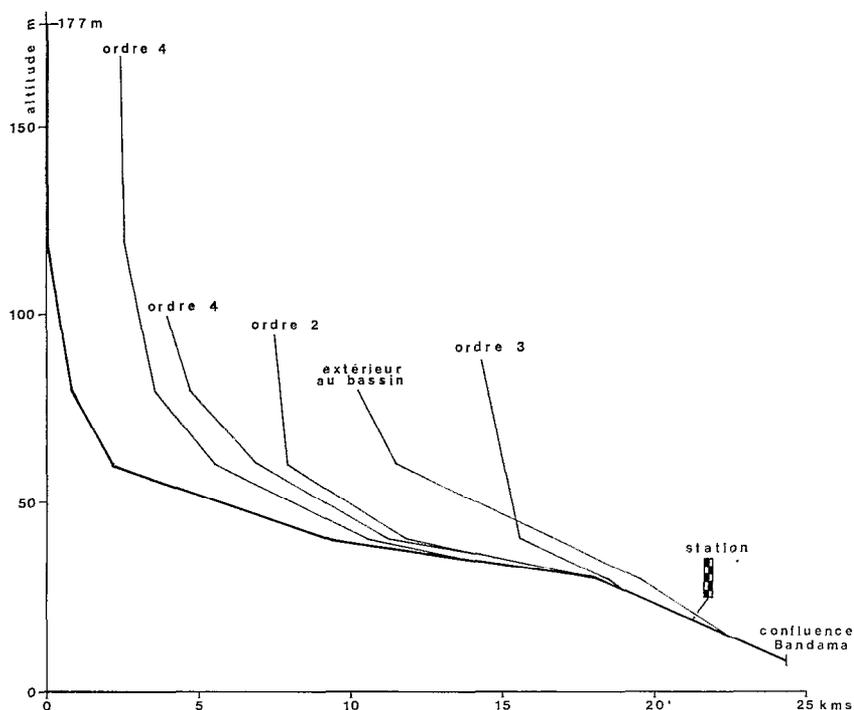


FIG. 3. — Profil en long de l'Amitioro et de ses affluents (d'après le service hydrologique de l'ORSTOM à Abidjan).

Sur l'ensemble du bassin, le réseau hydrographique est dense et bien ramifié avec des têtes de talwegs rapprochées ce qui indique une action intense du ruissellement. Cependant, le colluvionnement important observé dans les vallées semble traduire que le comblement des talwegs par apports latéraux prédomine actuellement sur leur creusement.

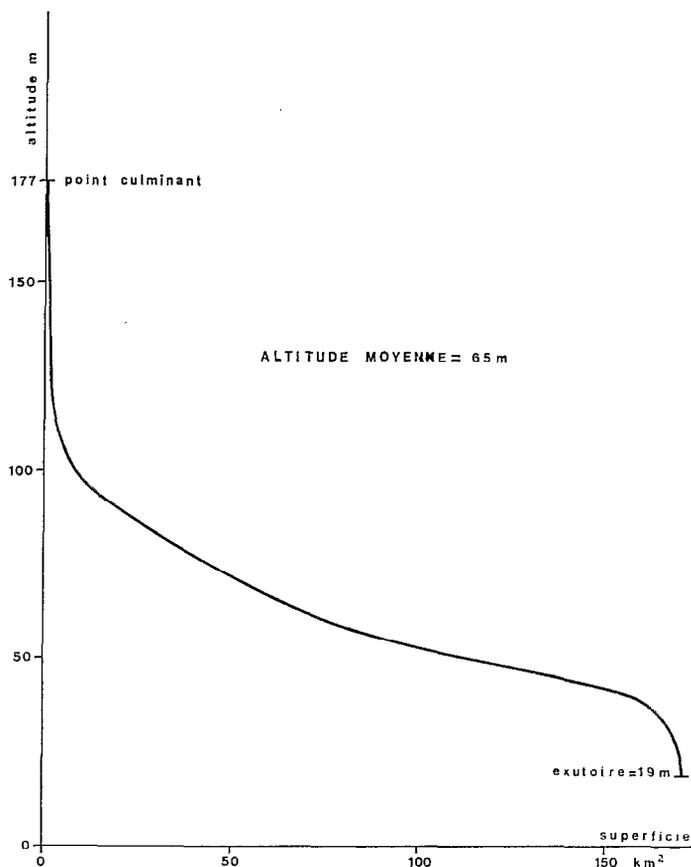


FIG. 4. — Hypsométrie du bassin de l'Amitioro (d'après le service hydrologique de l'ORSTOM à Abidjan).

Les sols

Les altérations se développent sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur à partir d'une roche mère peu résistante. L'évolution correspond à une phase faiblement ferrallitique. Deux groupes de sols ont été reconnus (DE LA SOUCHÈRE, 1963).

Les sols faiblement ferrallitiques, fortement gravillonnaires, situés sur interfluves

— Les sols bruns-rouges et ocres sont répartis sur les parties hautes du paysage (crêtes, sommets, plateaux, hauts de pentes). Les premiers présentent dans l'horizon superficiel des teneurs en argile plus élevées (supérieures à 30 %) que les seconds (16 à 28 %). Le pourcentage de gravillons est de 0 à 50 % en surface. Ceux-ci ont un aspect lisse et brillant et sont bien calibrés dans les sols bruns-rouges tandis qu'ils sont plus grossiers et de forme plus irrégulière dans les sols ocres. L'horizon superficiel est relativement pauvre en matière organique (1,5 à 3 %).

— Les sols jaunes occupent les pentes, les bas de pentes et les replats. La présence d'un horizon à pseudo-gley tacheté de profondeur chez les uns ou d'une carapace de nappe chez les autres situés généralement un peu plus haut sur la pente est justifiée par leur position topographique. La texture de l'horizon superficiel (0-15 cm) est finement sableuse et limoneuse. Ces sols sont en général modérément pourvus en matière organique (2 %).

Les sols hydromorphes minéraux de bas-fonds occupent les fonds de vallées et les talwegs.

En période de pluie, ils sont souvent engorgés d'eau et, en profondeur (30-70 cm), se développent parfois des nappes temporaires localisées. Ils se distinguent en deux principaux types :

- les sols à pseudo-gley de profondeur, tachetés.
- les sols à gley et pseudo-gley d'ensemble, également tachetés.

Le pseudo-gley peut être recouvert d'un lit de quartz de 10 à 30 cm d'épaisseur, dont les éléments sont émoussés. L'horizon superficiel présente une texture sableuse plus ou moins riche en limons. La teneur en matière organique est moyenne (2 %).

Le tableau III résume la composition granulométrique des différents types de sols rencontrés sur le bassin.

TABLEAU III

Composition granulométrique des sols (en %)

		Argile < 2 μ	Limons fins 2-20 μ	Limons grossiers 20-50 μ	Sables fins 50-200 μ	Sables grossiers > 200 μ
Sols faiblement ferrallitiques	sols brun-rouges	30	12-16	14-22	16-22	9-13
	sols ocres	16-28	12-16	15-27	21-36	6-17
	sols jaunes	11-17	11-17	20-29	26-39	9-17
Sols hydromorphes minéraux de bas fonds	sols à pseudogley de profondeur	9-17	10-16	19-33	29-42	7-21
	sols à pseudogley d'ensemble	33-36	14-20	13-20	13-17	12-24

Dans l'ensemble, la texture de ces sols, riches en limons, leur confère un fort pouvoir de rétention en eau. Ce facteur est important car il est susceptible d'entraver le ruissellement et, partant, le volume d'eau disponible pour les transports.

MODE OPÉRATOIRE

Équipement du bassin (fig. 5)

Le bassin de l'Amitiéro, de 170 km², a été équipé de deux stations. L'une, située dans sa partie nord, recueille les eaux de ruissellement d'un petit bassin de 2 ha drainé par un ravineau où l'écoulement est temporaire et n'a lieu que tant que dure l'averse. L'autre, à l'aval, reçoit la totalité du ruissellement du bassin. L'écoulement y est semi-permanent, le tarissement n'intervenant qu'après une longue période de sécheresse, c'est-à-dire pendant la grande saison sèche. L'équipement a été réalisé en 1963 et le cours de l'Amitiéro, jaugé par le service hydrologique de l'ORSTOM.

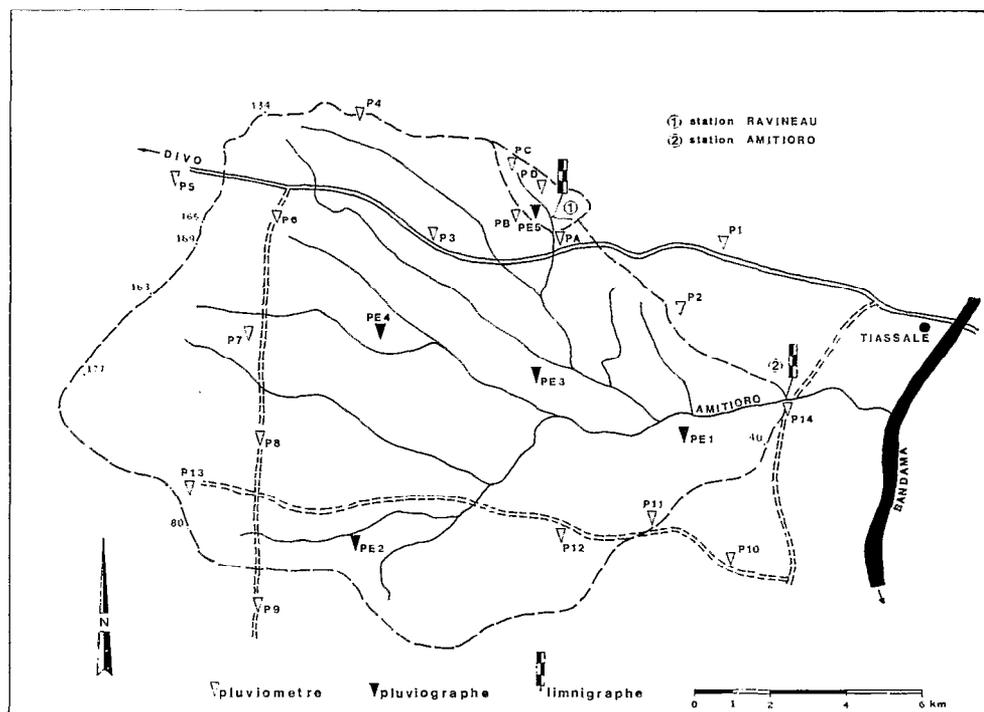


FIG. 5. — Bassin versant de l'Amitiouro : position des stations pluviométriques et limnigraphiques.

Prélèvements

Tous les prélèvements d'eau ont été faits en surface à l'aide d'une bouteille de 12 litres spécialement conçue, en plastique rigide, à section rectangulaire, munie d'une poignée et placée dans l'axe du courant. Dix litres d'eau sont recueillis dans des bidons et transportés au laboratoire. Les suspensions sont récupérées par décantation. Quelques gouttes d'une solution de sulfate d'alumine à 10 % sont ajoutés pour flocculer. Le résidu est séché à 105° pendant 48 heures puis pesé.

A l'aval du jaugeur de la station du ravineau, deux fosses à sédiments ont été creusées de manière à récupérer après chaque crue le charriage. Celui-ci n'a malheureusement pas pu être mesuré à la station de l'Amitiouro où l'écoulement se poursuit entre les crues.

La détermination du transport solide total effectué par chaque crue se fait par planimétrie de la surface limitée par la courbe de débit solide obtenue grâce à des prélèvements aussi rapprochés que possible.

Analyses granulométrique et minéralogique

L'analyse granulométrique a été réalisée sur la totalité de l'échantillon, par tamisage sur colonne de tamis pour la fraction supérieure à 80 microns, et par densimétrie pour la fraction inférieure (méthode de MERIAUX, 1953). Etant donné les faibles charges solides, les différents échantillons d'une même crue ont été groupés. Les analyses portent sur les sols des versants et du talweg du ravineau, sur les suspensions et sur les charriages.

La détermination des minéraux lourds a été faite au laboratoire central de l'ORSTOM à Bondy par M. DELAUNE, sur des échantillons de charriage.

ÉROSION ET TRANSPORT SOLIDE SUR UN BASSIN VERSANT (Côte d'Ivoire)

La fraction argileuse a été étudiée par diffractométrie et par analyse thermique différentielle. Quelques analyses thermodéterminales ont permis de compléter cette étude.

Les teneurs en matière organique des sédiments ont été déterminées à partir des dosages de carbone organique exécutés par le laboratoire central d'analyse du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.

ACTION DYNAMIQUE DES EAUX DE RUISSELLEMENT

Les chiffres qui suivent comprennent suspensions et charriage à la station du ravineau et suspensions seulement à la station de l'Amitioro.

Charges solides des cours d'eau

Les teneurs en matières en suspension sont peu élevées et ne dépassent qu'exceptionnellement 500 g/m³.

A la station du ravineau elles sont comprises entre 100 et 500 g/m³ pour des débits de montée de crue inférieurs à 2 l/s. En pointe de crue, pour des débits supérieurs à 2 l/s., elles sont comprises entre 40 et 90 g/m³. A des débits inférieurs à 2 l/s. en descente de crue correspondent des charges comprises entre 20 et 100 g/m³.

Sur l'Amitioro, les valeurs les plus fréquentes des concentrations en crue sont comprises entre 100 et 300 g/m³ (tableau IV).

TABLEAU IV

Fréquence des charges solides en suspension en période de crues sur l'Amitioro (en %)

g/m ³	1963	1964	1965	1966	1967	1968
< 50			12	18	2	2
50-100		35	35	25	19	17
100-200	46	39	50	32	53	36
200-300	43	17	3	13	22	25
300-400	8	9		7	3	12
400-500				5	1	5
500-600						1
600-700						1
700-800						1
800-900	3					

Les charges solides en suspension sont beaucoup plus élevées sur un bassin versant étudié parallèlement en savane au nord de la Côte d'Ivoire (bassin du Loserigüe, région de Korhogo) où elles sont comprises entre 200 et 7 000 g/m³ (LENOIR, 1968).

Dans le tableau V sont regroupées les valeurs des turbidités spécifiques calculées sur deux bassins et à différentes stations réparties du nord au sud sur le cours du fleuve Bandama (MONNET, 1970).

La turbidité spécifique (Ts), exprimée en g/m³, est le quotient du transport solide en suspension (T) sur le volume écoulé (Ve) annuels :

$$T_s = \frac{T}{V_e}$$

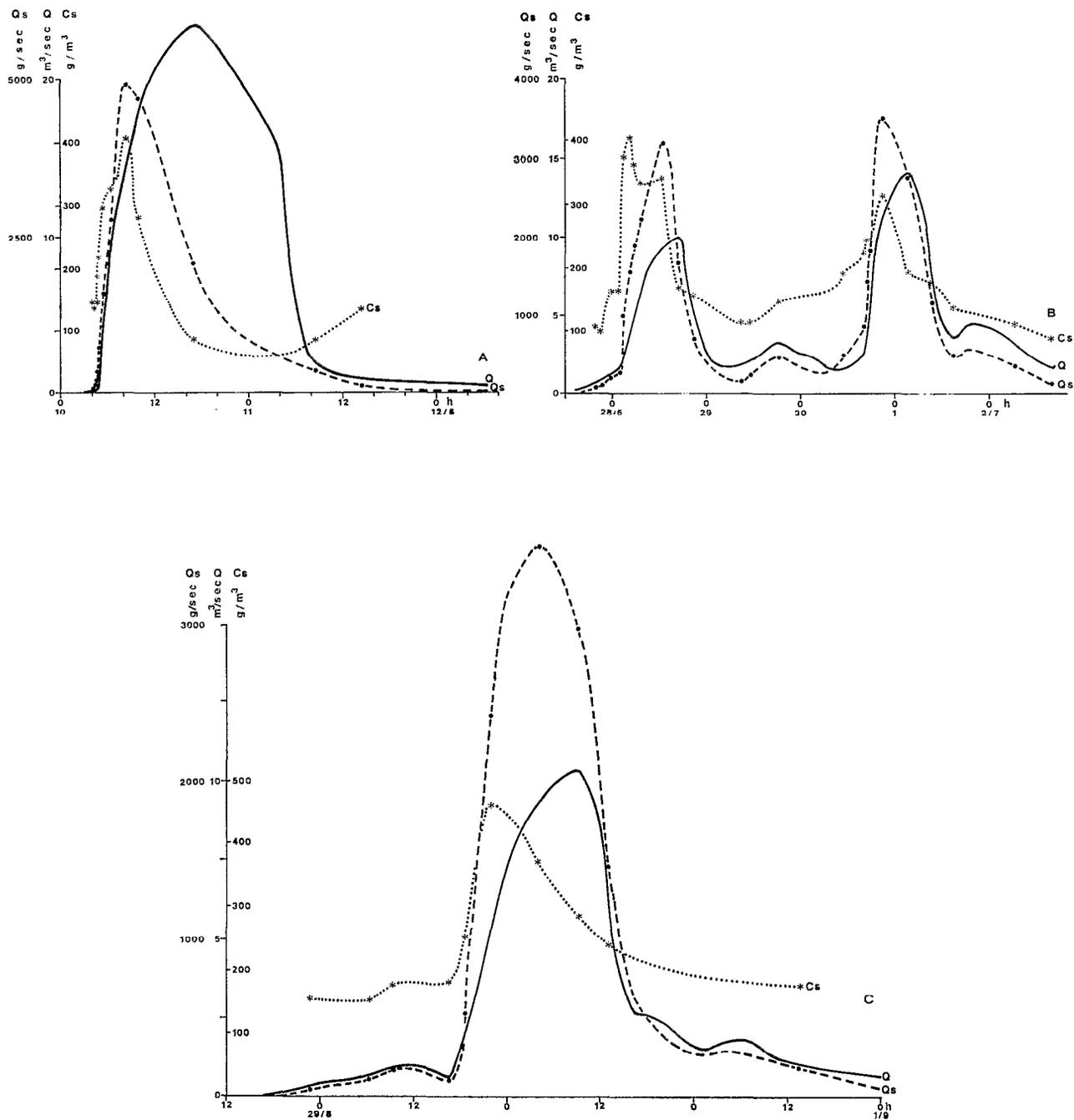


Fig. 6. — Amitiero : variations de la charge solide (Cs) et du débit solide (Qs) en fonction du débit (Q).

- A : crue du 10-12/6/1967
- B : crues du 27/6 au 2/7/1968
- C : crue du 28-31/8/1968.

TABLEAU V

Turbidités spécifiques (Ts) et coefficients d'écoulement (Ce)

	Ts (g/m ³)	Ce (%)
Loserigue	150-340	33 -54
Amitioro	45-180	2,4- 8,9
Bandama : Duibo	75-110	10 -16,5
Bandama : Bafecao	75-110	8 -14
N'zi : Ziénoa	105-195	3 - 9
Bandama : Tiassalé	85-100	6,1-12,9

Les cours d'eau sont donc relativement peu chargés, sauf en savane où les charges solides unitaires atteignent de fortes valeurs. Les bassins de l'Amitioro (forêt) et du Loserigue (savane) sont caractéristiques d'intensités érosives extrêmes (2).

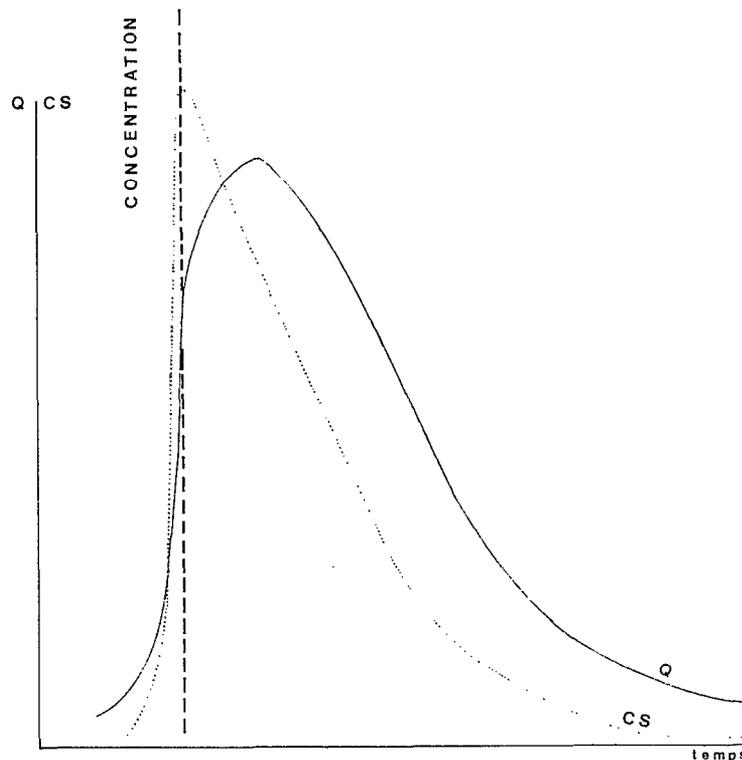


FIG. 7. — Amitioro : schéma de variation de la charge solide (Cs) en fonction du débit (Q).

(2) Il ne faut pas attribuer aux coefficients d'écoulement élevés du bassin du Loserigue une valeur représentative de la partie nord du bassin du Bandama.

Variations de la charge solide pendant les crues

Les charges solides ne sont pas uniformes pendant toute la durée de la crue (fig. 6 : A, B, C).

A partir d'un nombre élevé d'échantillons répartis sur 51 crues, un schéma de variation valable pour les crues simples a pu être établi (fig. 7). L'augmentation de la charge commence dès le début de la montée des eaux. Graphiquement elle se matérialise par une courbe plus redressée que celle du débit correspondant. Le maximum de charge est atteint avant la pointe de crue et il coïncide généralement avec le point le plus haut de la courbe de concentration de l'hydrogramme dont la pente est la plus forte. L'action érosive de la crue est donc limitée à un épisode de courte durée limitée à une partie de la montée de crue pendant laquelle il y a concentration de matériel en suspension. En pointe de crue, la charge solide a déjà fortement diminué pour varier ensuite parallèlement à la courbe de décrue.

Dans le cas de crues plus complexes, les charges solides sont sensibles aux accélérations et aux décélérations des variations de débit qui surviennent en montée ou en descente de crue et qui peuvent se traduire simplement par des changements de pente dans la courbe de débit.

Il n'existe aucune relation entre la charge et le débit en montée de crue. En décrue, la charge décroît régulièrement en fonction du débit mais les variations ne sont pas reproductibles d'une crue à l'autre. Sur la figure 8 sont indiquées les charges en fonction du débit de décrue en utilisant un figuré différent pour

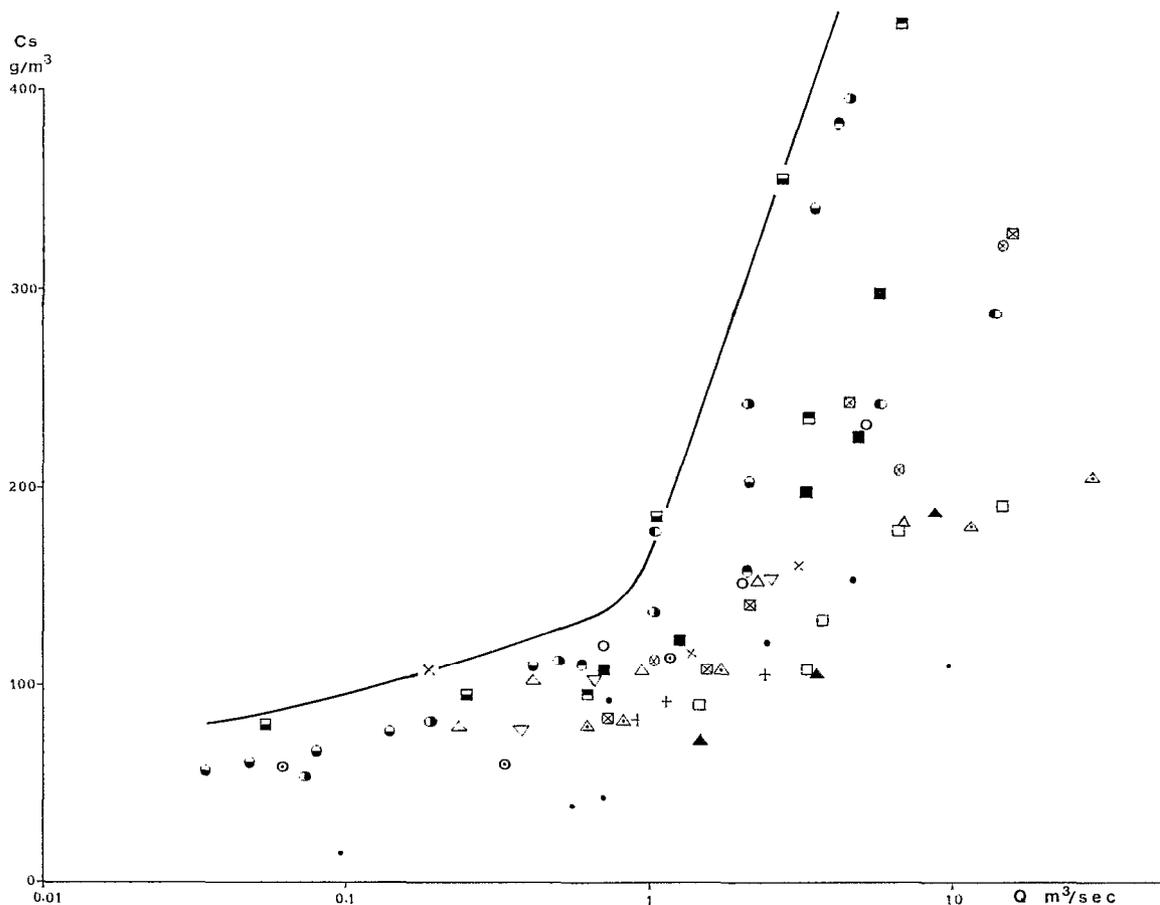


FIG. 8. — Amitiuro : Variations de la charge solide (Cs) en fonction du débit de décrue (Q) (un figuré différent pour chaque crue).

chaque crue. Tout se passe comme si, pour un débit de décrue donné, la charge solide en suspension ne pouvait se situer au-dessus d'un certain seuil. Par exemple, à la station de l'Amitiéro, à un débit en décrue de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, ne peut correspondre une charge supérieure à 180 g/m^3 .

Charriage à la station du ravineau

Au ravineau, la part prise par le charriage dans le transport total est comprise entre 5 et 12 %. Elle peut être beaucoup plus importante, par exemple en zone sahélienne où elle évolue entre 10 et 80 % suivant l'état superficiel du bassin (VUILLAUME, 1969). Sur le bassin versant de Cache Creek en Californie, LUSTIG et BUSCH (1967) l'estiment à 7 % en moyenne.

Il apparaît que les sédiments transportés annuellement par charriage sont proportionnellement moins abondants pendant les années pluvieuses que pendant celles à faible pluviosité. La figure 9 montre nettement, pour le petit bassin du ravineau, la décroissance de la part du charriage dans le transport total en fonction de la pluviosité annuelle. Cette constatation rejoint celle faite par Vuillaume en zone sahélienne. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'abondance des suspensions exportées par un bassin est fonction du volume d'eau disponible. Du point de vue hydraulique, le volume d'eau ruisselé et les suspensions qu'il transporte peuvent théoriquement augmenter de façon proportionnelle indéfiniment tandis que le charriage tend normalement vers une valeur limite qui dépend de la nature du bassin et de son état superficiel.

Dans le cas du bassin versant de l'Amitiéro, la prédominance des suspensions sur le charriage peut être généralisée à la totalité de sa superficie étant donné les faibles pentes, le couvert forestier et les conditions de ruissellement en nappe sur les versants plutôt qu'en ravines ce qui favorise l'entraînement des particules les plus fines.

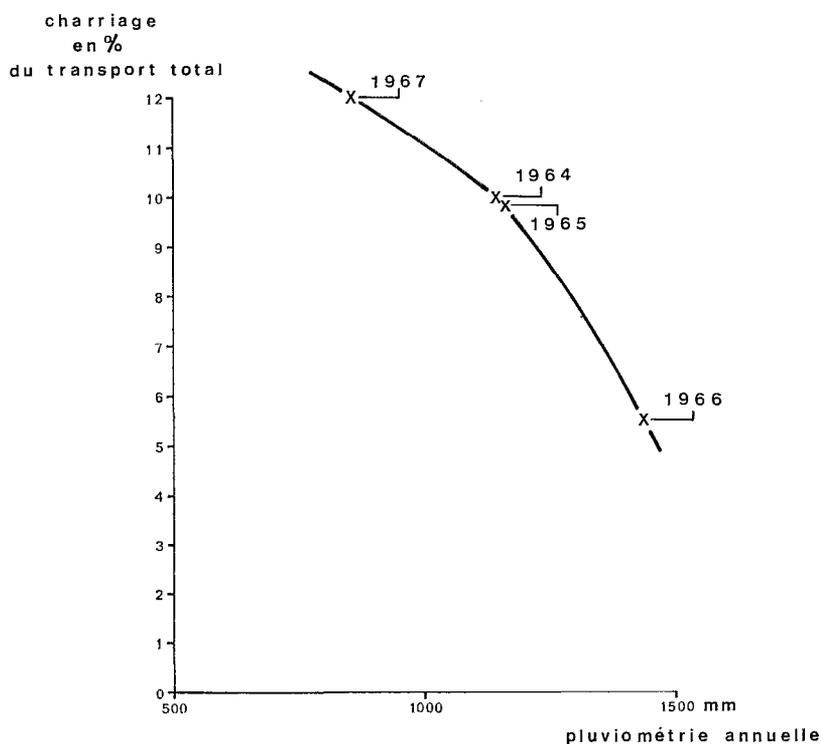


FIG. 9. — Station du ravineau : part du charriage dans le transport total en fonction de la pluviométrie annuelle.

Le tableau VI résume la part prise par le charriage dans l'érosion totale sur un petit bassin de 2 ha.

TABLEAU VI
Part du charriage dans l'érosion totale sur le bassin du ravineau (2 ha)

Année	Pluviosité (mm)	Suspensions (kg/ha)	Charriage (kg/ha)	Erosion totale (kg/ha)	Charriage (%)
1964	1 141	63,8	7,4	71,0	10,0
1965	1 160	56,1	16,1	72,0	9,8
1966	1 435	81,2	4,4	85,6	5,5
1967	858	21,6	7,7	29,3	12,0

Relation entre le volume ruisselé et le transport solide en suspension

Il existe une corrélation hautement significative entre le volume ruisselé et le transport solide en suspension à l'Amitioro ($r = +0,96$). Cette relation permet de déterminer le transport T d'une crue dont on connaît le volume ruisselé V_r (fig. 10).

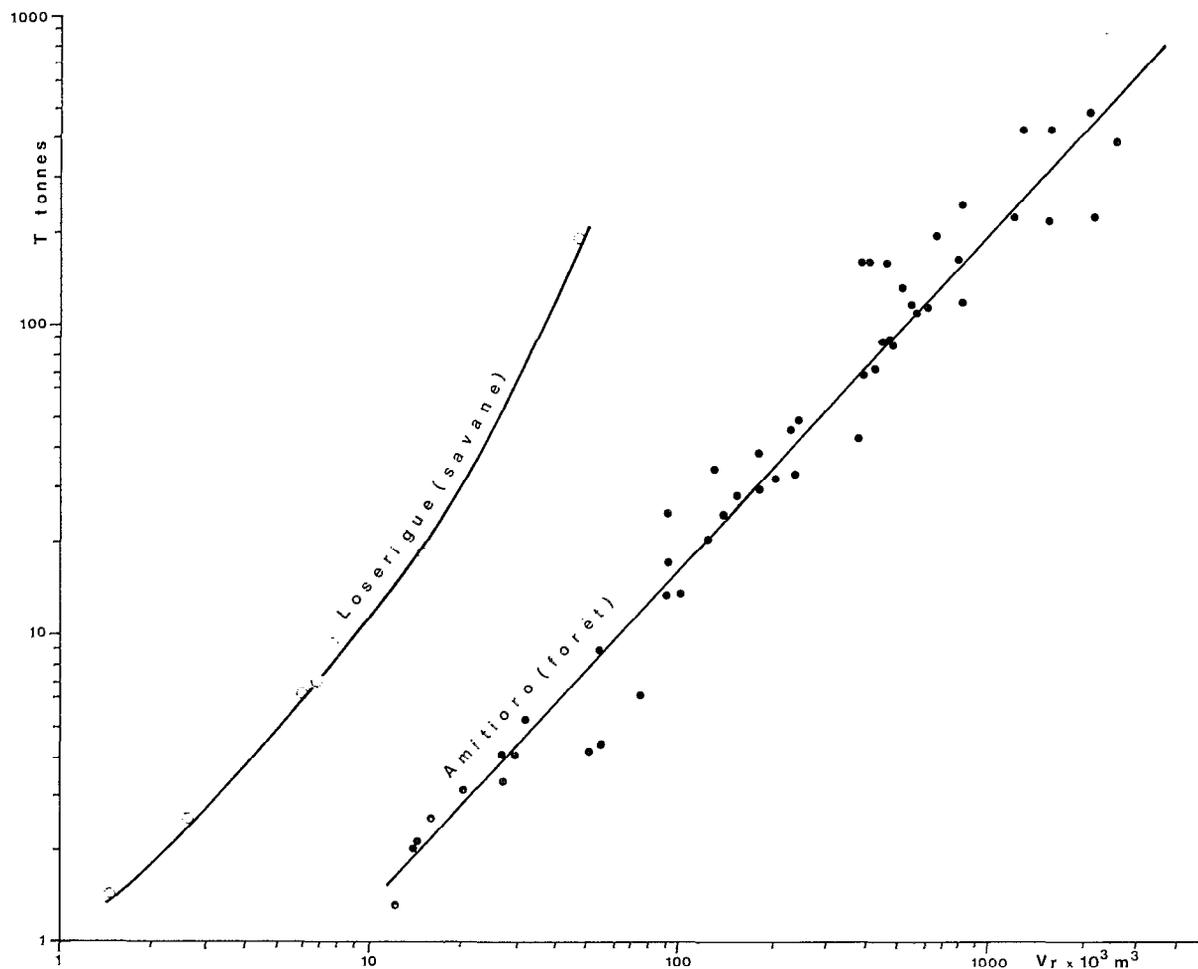


FIG. 10. — Corrélation entre transport solide en suspension (T) et volume ruisselé (V_r).

ÉROSION ET TRANSPORT SOLIDE SUR UN BASSIN VERSANT (Côte d'Ivoire)

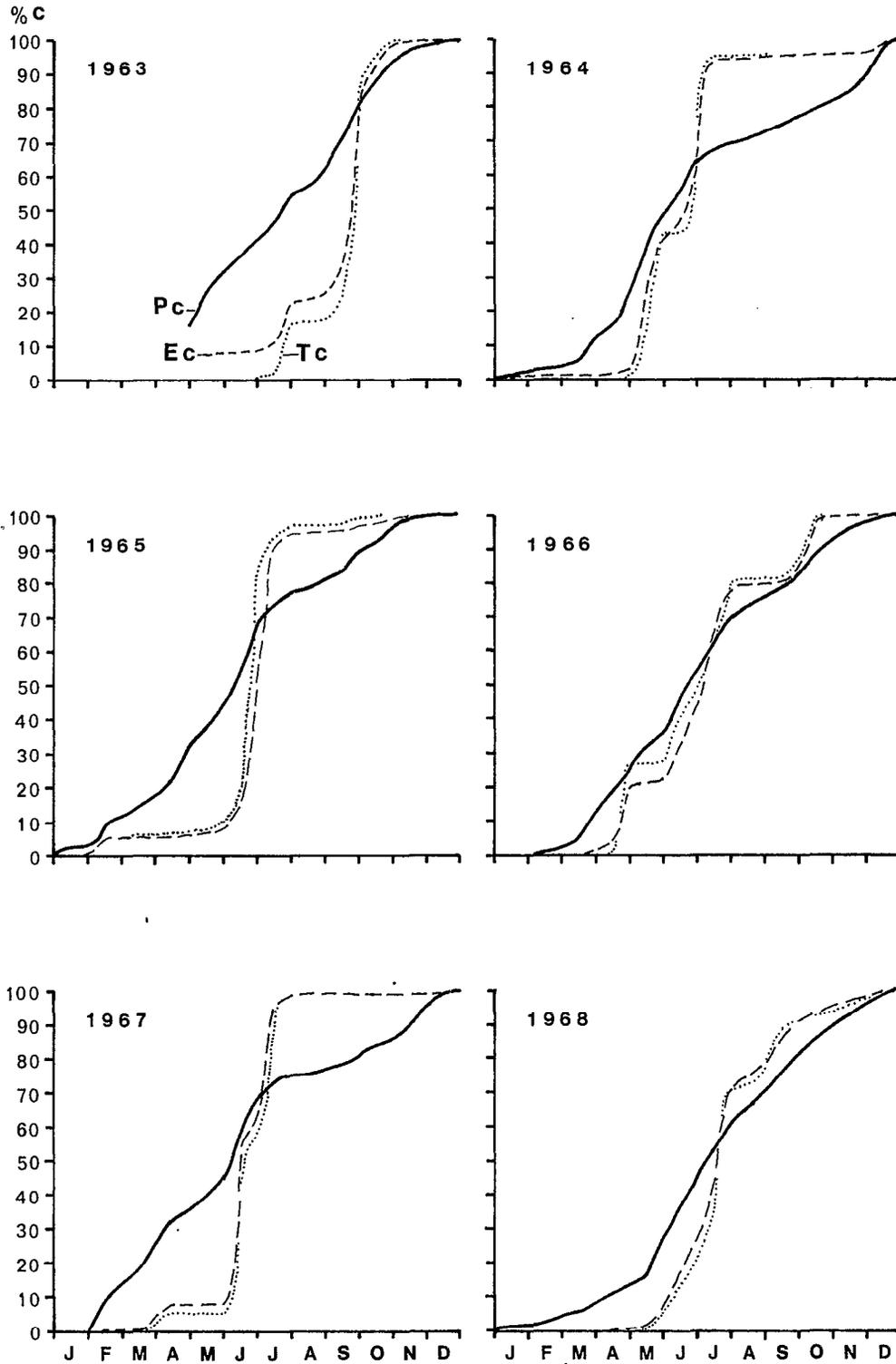


FIG. 11. — Amitiero : pluie (Pc), écoulement (Ec) et transport solide (Tc) cumulés.

Elle a été utilisée dans le calcul des bilans annuels d'exportation pour des crues dont l'échantillonnage était nul ou insuffisant. La relation est également étroite pour les crues du bassin versant du Loserigue en savane (LENOIR, 1968). Mais, sur ce bassin, le tonnage exporté par les crues augmente plus vite en fonction du volume ruisselé que sous forêt. Pour transporter 10 tonnes de matières en suspensions sur le Loserigue, le volume ruisselé doit être voisin de 10 000 m³ tandis que sur l'Amitioro il doit atteindre 60 000 m³.

L'érosion résultant du ruissellement dépend donc étroitement de la quantité d'eau reçue par le bassin. Elle peut être importante si, malgré le faible pouvoir érosif des crues qui se traduit par des teneurs en suspensions peu élevées, le volume ruisselé cumulé dans l'année est grand.

Dynamisme de l'érosion

Le transport solide est un phénomène limité dans le temps. Il s'effectue suivant une suite de pulsations dont quelques-unes seulement agissent sur les bilans.

Sur le petit bassin du ravineau, 15 % de la pluviométrie annuelle assurent 50 % de l'écoulement et du transport solide annuels. La plus grande partie du matériel est évacuée en quelques heures (5 à 10 heures par an).

A l'échelle du grand bassin de l'Amitioro, quelques crues seulement ont une action érosive réelle. Les exemples suivants en témoignent (fig. 11).

— 1963 : fin juillet, la pluie cumulée atteint 55,5 % de la pluviosité annuelle alors que 23,7 % de l'écoulement total et 16,6 % du transport annuel se sont effectués. Dans l'année, trois crues réalisent 50 % des exportations. La plus forte, localisée en septembre, avec un volume ruisselé de $2\,496 \cdot 10^3$ m³ assure 23,9 % des exportations annuelles.

— 1964 : 81,2 % de l'érosion annuelle se localise entre le 3 mai et le 1^{er} juillet.

— 1965 : fin avril, la pluie cumulée atteint 32,3 %, l'écoulement : 7,1 % et les exportations 6,6 %. Au mois de juin, 22,6 % de la pluviosité provoquent 59,9 % de l'écoulement et 72,5 % des exportations. Ce mois là, une seule crue de $1\,394 \cdot 10^3$ m³ effectue 39,6 % du transport annuel. La petite saison des pluies n'est responsable que de 2,6 % de l'érosion annuelle.

— 1966 : la crue du 20 avril assure 21,4 % des transports annuels. 53,9 % des exportations sont localisées pendant les mois de juin et de juillet qui reçoivent 35,4 % des précipitations annuelles.

— 1967 : les crues se répartissent en juin et en juillet. Celle du 10 juin représente à elle seule 41,2 % du volume ruisselé et exporte 34,2 % du tonnage annuel.

— 1968 : c'est une année excédentaire (1 781 mm). Sur 32 crues enregistrées, 7 ont un volume ruisselé supérieur à $1\,000 \cdot 10^3$ m³. Elles représentent 57,5 % du volume et 57,6 % du transport solide annuel.

La périodicité des départs en matériaux solides pendant l'année a été soulignée par DOUGLAS (1964). Pour le bassin de l'Amitioro, elle est schématisée par la figure 12 sur laquelle ont été portées les précipitations et la lame d'eau écoulée *Le* en mm/jour. Dans la partie supérieure du graphique est représenté le transport solide en suspension *T* en tonnes/jour. La différence entre la pluviosité et la lame d'eau écoulée correspond au déficit d'écoulement *De*. Cette périodicité tient aux conditions climatiques saisonnières et à la réponse du bassin. Dans le cas du bassin de l'Amitioro, il est clair qu'une grande partie des précipitations ne joue aucun rôle dans le processus érosif.

ÉTUDE DES SÉDIMENTS TRANSPORTÉS

Granulométries

Les indices granulométriques utilisés sont les suivants :

— Coefficient de mauvais tri ou « Sorting Index » de Trask :

$$So = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$$

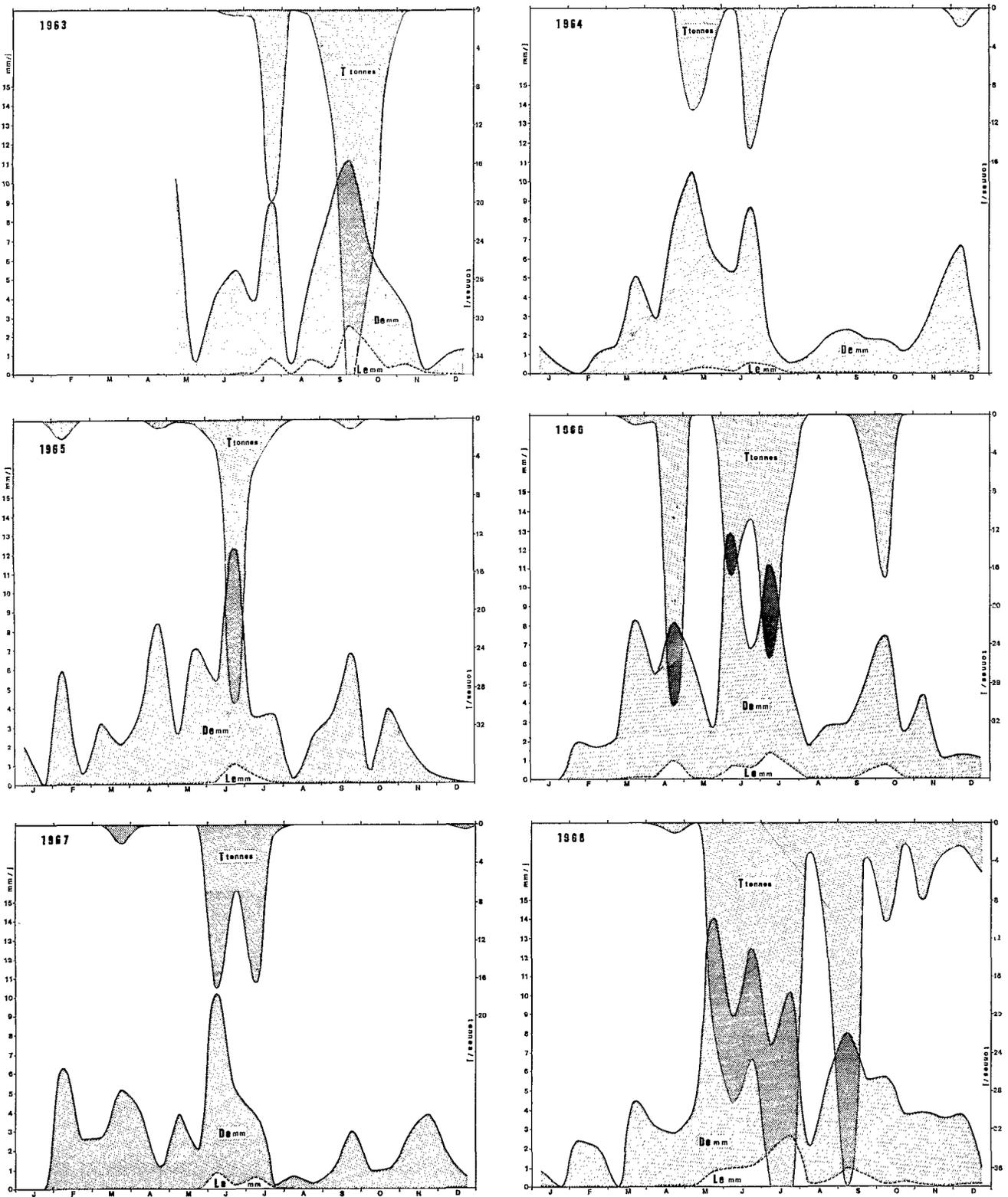


FIG. 12. — Amitioro : Pluie = déficit d'écoulement (De)+lame d'eau écoulée (Le), et transport solide en suspension (T) annuels.

Si $S_o < 2,5$: le sédiment est bien classé.

Si $S_o > 4,5$: le sédiment est mal classé.

— Indice d'asymétrie ou « Skweness coefficient » de Trask :

$$S_k = \frac{Q_1 \cdot Q_3}{Md^2}$$

Si $S_k < 1$: l'étalement de la distribution se fait vers les fractions fines.

Si $S_k > 1$: l'étalement de la distribution se fait vers les fractions grossières.

— Médiane : Md

— Indice d'évolution n de Rivière

— Grain maximum

Caractéristiques granulométriques des sols des versants du ravineau

Les versants du ravineau sont recouverts de sols typiques de bas-fonds à hydromorphie temporaire de surface dont l'horizon superficiel (0 - 5 cm) est gris-beige, sableux fin, limoneux, à structure particulière et à enracinement abondant.

Les principales caractéristiques granulométriques sont les suivantes.

— Coefficient de mauvais tri assez élevé ($1,2 < S_o < 8,4$) donc un calibrage moyen à mauvais.

— Indice d'asymétrie faible ($0,25 < S_k < 0,85$) donc un étalement de la distribution vers les fractions fines.

— Médianes comprises entre 14 et 87 μ ,

— Fraction sableuse grossière ($> 200 \mu$) peu abondante (8,0 à 25,0 %).

— Prédominance des fractions sableuses fines (22,0 à 47,0 %) et limoneuses (19,0 à 41,5 %).

— Fraction argileuse moyenne à faible (8,5 à 28,5 %). Une sensible augmentation de la teneur en sable s'observe dans les échantillons prélevés dans le talweg du ravineau ce qui correspond à une concentration par apports latéraux et par charriage, les sols étant du même type que sur les versants.

Caractéristiques granulométriques des sédiments transportés : suspension et charriage

— Le coefficient de mauvais tri est élevé pour les suspensions ($3 > S_o > 6$), tandis que les particules transportées par charriage sont bien classées ($1,5 > S_o > 4$), les valeurs les plus fréquentes de S_o étant comprises entre 1,5 et 2,5.

— Pour les suspensions comme pour le charriage, l'indice d'asymétrie est plus élevé que celui des sols en place ($0,70 > S_k > 1,60$) ce qui indique une distribution assez symétrique autour de la médiane.

— Les médianes sont comprises entre 40 et 400 microns pour le charriage et entre 2 et 18 microns pour les suspensions.

— Le grain maximum peut dépasser 10 000 microns dans les sédiments charriés, alors qu'il est toujours inférieur à 1 400 microns dans les suspensions.

— La fraction sableuse peut constituer la presque totalité du sédiment dans les charriages (24 à 98,5 % dont 5 à 74,5 % de sables grossiers) alors que les suspensions ne contiennent que 8 à 44 % de sable fin.

— Les teneurs en limons sont comprises entre 20,0 et 62,5 % dans les suspensions et entre 2,5 et 58 % dans les charriages.

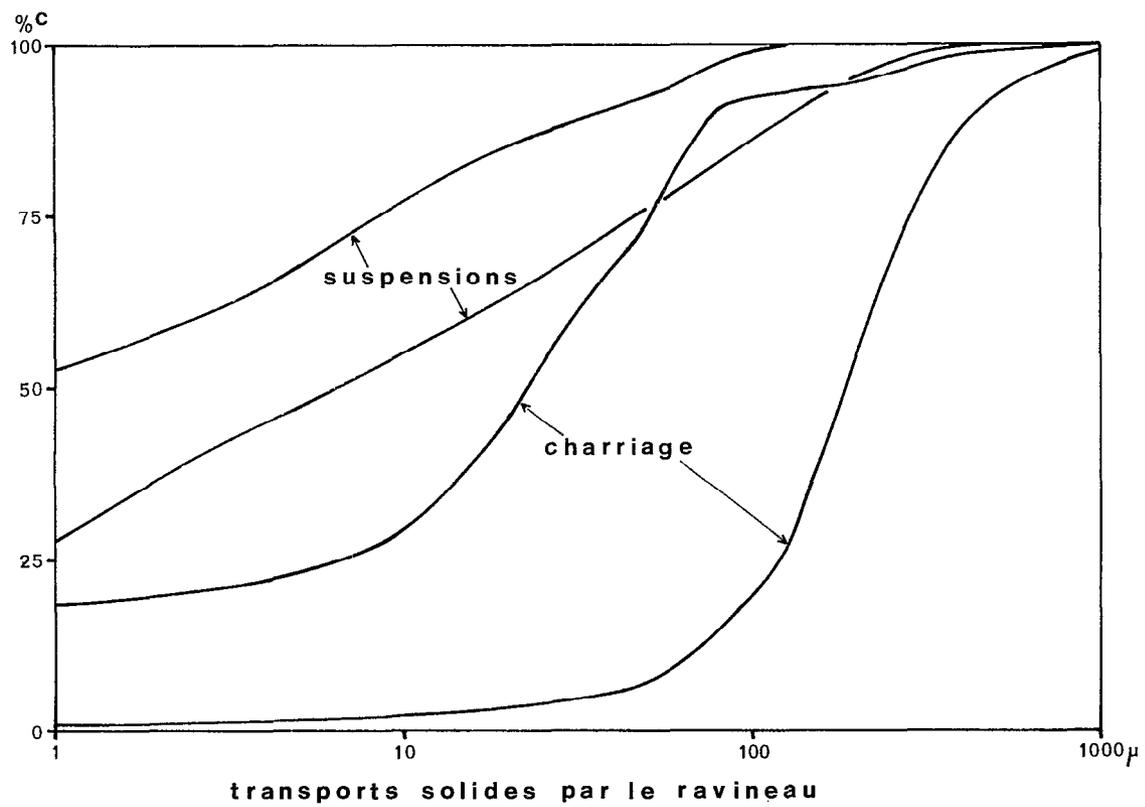
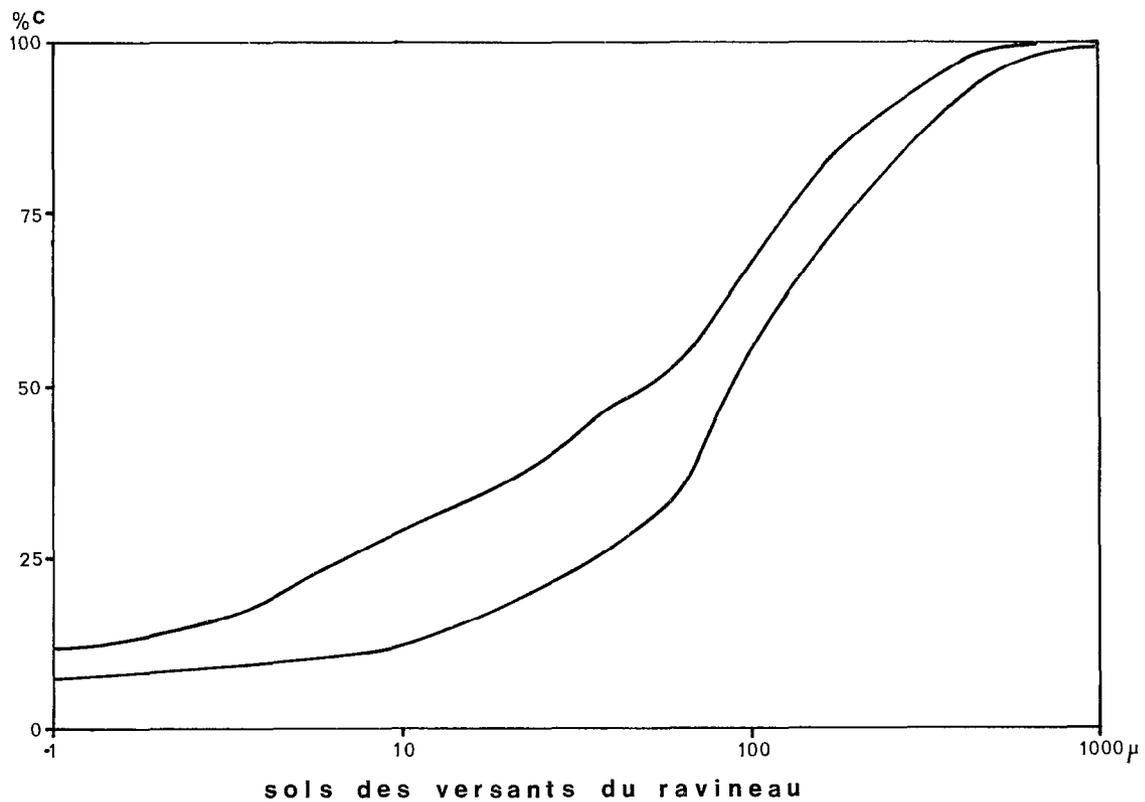


FIG. 13. — Courbes granulométriques des sols et des sédiments du bassin du ravineau.

— Les argiles représentent 11,5 à 64,5 % du sédiment dans les suspensions contre 0 à 20 % dans le charriage.

Discussion

Par comparaison des courbes granulométriques (fig. 13 et 14), il apparaît clairement que deux familles peuvent être distinguées suivant le mode de transport.

— Les courbes de type suspension se caractérisent par l'absence de point d'inflexion donc d'un maximum de fréquence. Elles correspondent à des sédiments fins dans lesquels aucune taille n'est entraînée préférentiellement.

— Les courbes de type charriage appartiennent par contre à des sédiments bien classés.

Ces deux familles, qui ont été différenciées par DÆGLAS (1946) et DÆGLAS (dans VATAN, 1967) en « type suspension » et « type lit de fleuve » en utilisant une échelle de probabilité, sont surtout distinguées par leur Sorting. Sur le diagramme sorting/skewness de la figure 5, on observe le groupement des points représentant les échantillons de charriage et la dispersion de ceux qui représentent les échantillons de suspensions.

Dans l'un et l'autre cas, les courbes ont le même faciès d'évolution logarithmique et présentent le même indice d'évolution ($n \approx -1$) puisqu'il s'agit de sédiments en cours de transport (RIVIERE, 1952).

Minéralogie

Minéraux lourds

La fraction lourde des sédiments charriés par l'Amitiuro est dominée par des minéraux d'altération : épidotes (80 à 90 %), et hornblende (2 à 7 %).

Les minéraux de métamorphisme sont représentés par de faibles pourcentages d'andalousite, de sillimanite, de staurotide et de grenat.

Le reste est constitué de minéraux résistants ubiquistes : tourmaline (1 à 9 %), zircon (1 à 3 %) et quelques rutiles (tableau VII).

TABLEAU VII

Minéraux lourds (en %). Echantillons de charriage

Numéros	2074	2472	9076	9556	9557
Epidote	83	92	84	83	83
Hornblende	7	6	3	2	3
Andalousite	2		1	2	5
Sillimanite			1		
Staurotide	1		+	2	
Grenat	1		1	+	1
Tourmaline	4	1	9	8	5
Zircon	2	1	1	3	3
Rutile					+
% pondéral	0,43	0,45	0,27	0,42	0,41

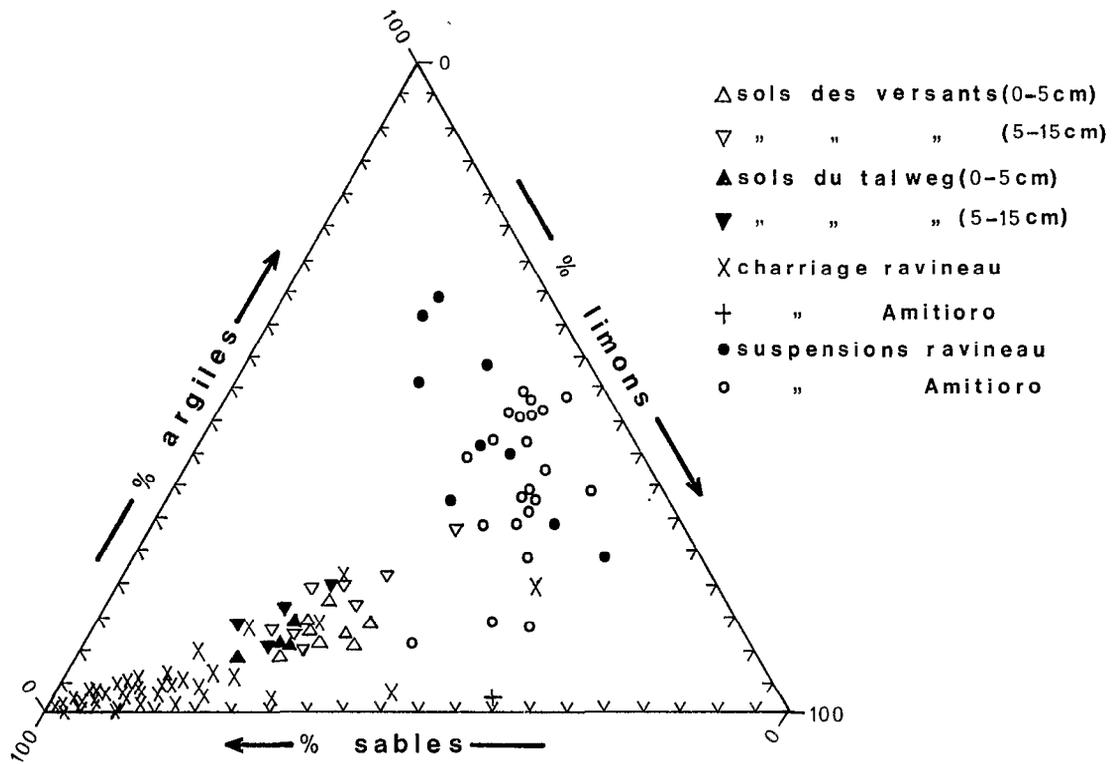


FIG. 14. — Compositions granulométriques.

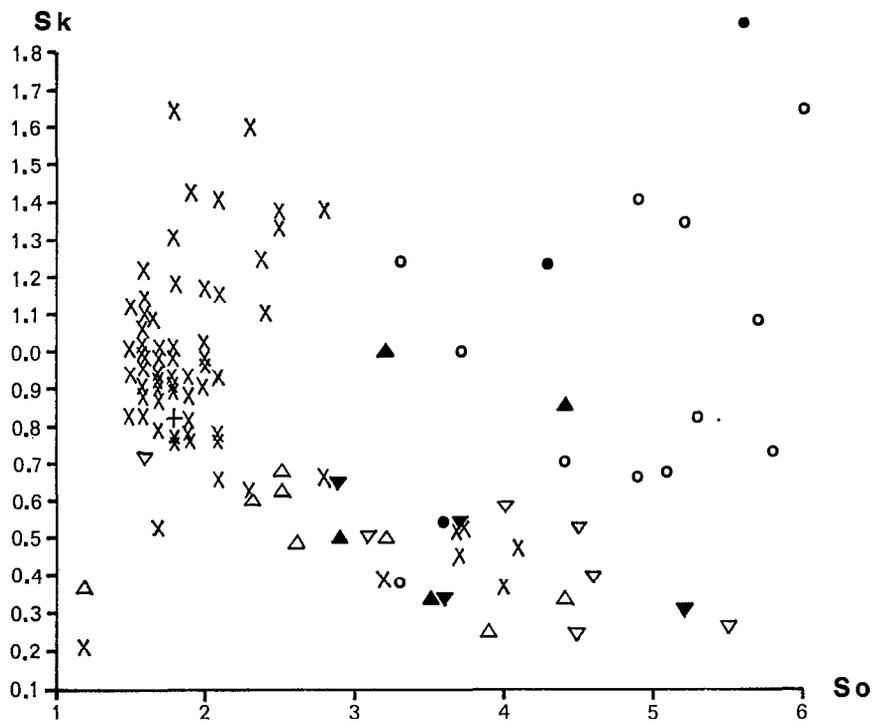


FIG. 15. — Diagramme Sorting/Skewness.

Minéraux argileux

Les sols sont généralement pauvres en argile. Ceux des versants du ravineau contiennent de 6 à 9 % de kaolinite. Celle-ci est toujours associée à de l'illite. Certains échantillons présentent un pic flou à 12,5 Å attribué à la présence de vermiculite.

En plus de la fraction cristallisée, des départs d'eau observables à l'analyse thermique différentielle entre 100° et 200° laissent prévoir la présence en quantité non négligeable de produits amorphes. Des dosages ont révélé 5 à 7 % de silice, et d'hydroxydes de fer et d'alumine amorphes.

Dans les sédiments transportés en suspension, il y a concentration d'éléments fins. La teneur en argile augmente et la kaolinite peut représenter, d'après l'analyse thermopondérale, 20 % de l'échantillon brut. Elle est bien cristallisée et semble plus abondante dans les suspensions de l'Amitiéro que dans celles des eaux de ravineau. On retrouve également de l'illite. Certains échantillons contiennent de la vermiculite et probablement un peu de chlorite (fig. 16).

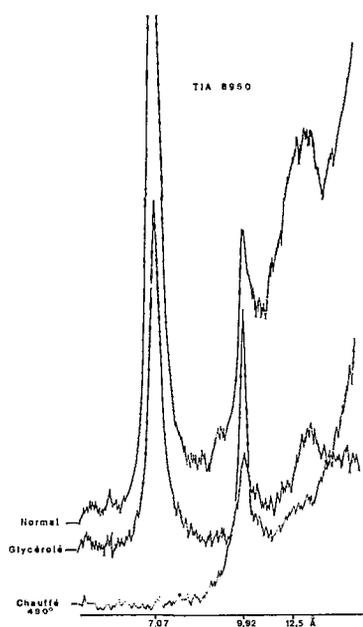


FIG. 16. — Diffractogramme de rayons X (fraction inférieure à 2 microns).

La fraction amorphe est également plus abondante dans les suspensions (11 à 27 % dont 2,3 à 13,4 % de silice). Mais comme d'après SEGALÉN (1968), seuls les sols à allophanes, dans lesquels une partie de la silice se combine à du fer et à de l'alumine pour former un produit non cristallisé, seraient susceptibles de contenir une phase amorphe, il est possible que l'on doive attribuer une partie de la silice extraite à l'attaque des cristallites.

Matière organique dans les sols et dans les sédiments charriés par le ravineau

Matière organique dans les sols

Les sols des versants du ravineau sont pauvres en matière organique. Les prélèvements effectués avant et après chaque saison des pluies ne révèlent pas de variations caractéristiques. De plus, les teneurs sont semblables de l'amont à l'aval du bassin du ravineau.

L'observation à l'œil nu de l'horizon superficiel (0 - 5 cm), gris-beige, révèle la présence de taches blanches dues au fait que matières organique et minérale sont mal mélangées. On observe à ce niveau la prolifération de racines fines qui donnent au sol une structure particulière à tendance grumeleuse. En surface, le sol est recouvert d'une litière très peu épaisse, presque continue sur les versants, mais beaucoup plus discontinue dans l'axe du ravineau et ceci, malgré l'importance de l'approvisionnement en débris végétaux sous couverture forestière dense. Des accumulations de feuilles s'observent à l'amont des obstacles.

Les teneurs moyennes en matière organique (observations d'avril 1968) sont de 4,06 % en surface (0 - 5 cm). Elles décroissent rapidement en profondeur. Entre 5 et 15 cm, elles ne sont plus que de 2,19 %.

Les teneurs moyennes en azote sont respectivement de 0,19 % et de 0,12 %. Le rapport C/N évolue parallèlement de 12,37 en surface à 10,58 en profondeur.

TABLEAU VIII

Matière organique dans les sols du bassin du ravineau

r.g. : rive gauche ; t : talweg ; r.d. : rive droite

		Aval									Amont		
Profil		I			III			V			VII		
Position		r.g.	t	r.d.	r.g.	t	r.d.	r.g.	t	r.d.	r.g.	t	r.d.
C (%)	0-5	2,15	1,86	3,04	1,06	2,04	1,65	3,11	3,26	2,11	3,15	2,54	2,27
	5-15	1,24	1,00	1,25	0,69	1,42	1,19	1,74	1,86	1,06	1,37	1,11	1,28
N (%)	0-5	0,17	0,15	0,22	0,10	0,15	0,13	0,26	0,28	0,18	0,22	0,19	0,19
	5-15	0,11	0,10	0,11	0,08	0,14	0,10	0,16	0,19	0,10	0,12	0,10	0,10
MO (%)	0-5	3,70	3,21	5,24	1,83	3,52	2,85	5,37	5,63	3,63	5,43	4,37	3,92
	5-15	2,15	1,72	2,15	1,19	2,45	2,06	3,00	3,21	1,82	2,37	1,91	2,21
C/N	0-5	13,1	12,8	13,6	10,3	14,1	12,4	12,0	11,6	11,7	14,3	13,1	11,8
	5-15	11,8	10,1	11,1	9,1	10,4	11,8	11,0	9,7	11,2	11,7	7,11	12,3

Ces chiffres sont faibles par rapport à ceux qui sont rapportés par SEGALIN (1957) pour des sols malgaches de roches volcaniques basiques sous végétation forestière, mais généralement situés en altitude. En fait l'auteur précise que sous des conditions de température et d'humidité telles qu'on les rencontre sous forêt tropicale de basse altitude, la décomposition de la matière organique est beaucoup plus rapide. Les faibles rapports C/N traduisent d'ailleurs ici que la vitesse de minéralisation est élevée.

Le tableau VIII donne les résultats des dosages effectués sur des sols prélevés sur quatre profils transversaux au ravineau.

Matière organique dans les échantillons de charriage

Des analyses ont été effectuées sur des échantillons de charriage prélevés dans les fosses à sédiments du ravineau pendant la saison des pluies en 1968. Les résultats sont rassemblés dans le tableau IX. La figure 17 montre les variations saisonnières des teneurs en matière organique transportée avec le charriage ainsi que celles du rapport C/N.

Il apparaît que pendant les mois d'avril, de mai et le début du mois de juin, la concentration en matière organique reste faible (moins de 2 %). Elle augmente ensuite au moment de la forte densité plu-

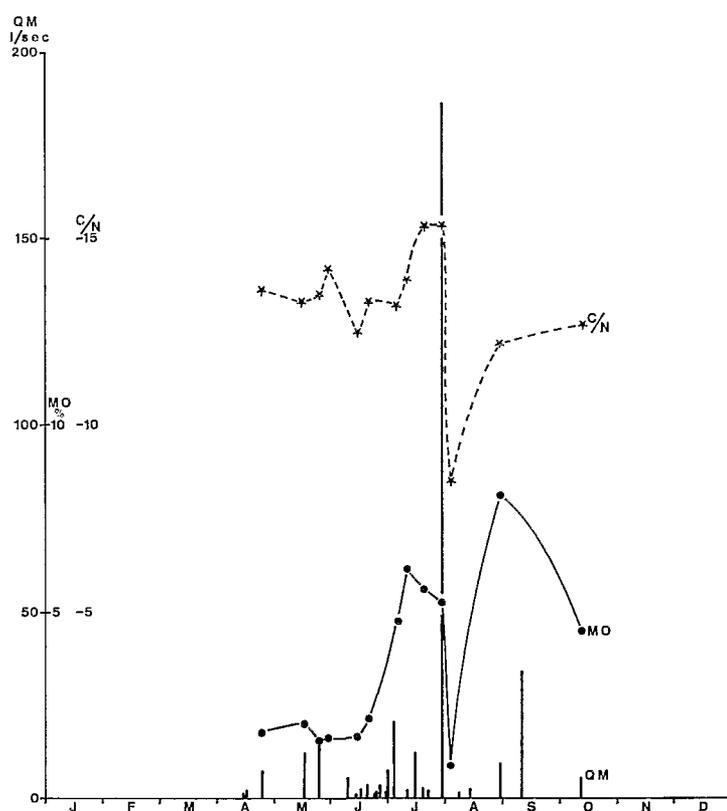


FIG. 17. — Variations saisonnières de la teneur en matière organique (MO) dans les sédiments charriés par le ravineau (QM = débit maximum de la crue).

viométrique de fin juin, début juillet pendant laquelle les ruissellements sont fréquents, pour atteindre 6,13 % le 10 juillet. Elle accuse ensuite une sensible décroissance pour descendre à une très faible valeur (0,86 %) dans le charriage d'une forte crue localisée fin juillet (QM : 186 l/s.). Cette valeur est probablement aberrante et peut tenir au lavage intensif des sédiments déposés dans la fosse par les eaux de ruissellement de cette crue exceptionnelle. Toutefois, il n'est pas impossible d'admettre que pour des crues à très fort

TABLEAU IX

Carbone, azote et matière organique dans les sédiments de charriage au ravineau

Date	24/4	16/5	24/5	29/5	14/6	20/6	5/7	10/7	19/7	28/7	3/8	30/8	11/10
C (%)	1,03	1,17	0,88	0,95	0,25	1,22	2,78	3,56	3,24	3,03	0,50	4,71	2,56
N (%)	0,08	0,09	0,07	0,07	0,08	0,09	0,21	0,26	0,21	0,20	0,06	0,29	8,20
MO (%)	1,77	2,01	1,51	1,64	1,63	2,10	4,78	6,13	5,57	5,22	0,86	8,10	4,40
C/N	13,6	13,3	13,5	14,2	12,5	13,3	13,2	13,9	15,4	15,3	8,5	12,2	12,7

débit, la matière organique soit presque exclusivement transportée en suspensions. La plus forte teneur en matière organique est observée le 30 août (8,10 %). Elle décroît pendant la crue isolée du 11 octobre.

Il semble donc qu'au début de la saison des pluies il y ait préparation du matériel organique : accélération de la chute des feuilles par les précipitations, augmentation de l'humidité ambiante. Pendant cette période, le taux de matière organique transporté est voisin de celui qui est observé dans les sols. Puis, un certain degré de décomposition étant exigé pour le transport, l'accroissement des teneurs survient avec un certain retard par rapport au ruissellement. Le rapport C/N suit des variations qui sont sensiblement parallèles à celles de la matière organique.

BILAN D'ÉROSION MÉCANIQUE ET CONCLUSION

Les différents termes du bilan annuel sont les suivants :

- Pluie moyenne : P_m (mm),
- Volume d'eau écoulé : V_e (m³),
- Lamme d'eau écoulée : L_e (mm),
- Coefficient d'écoulement : C_e (%),
- Déficit d'écoulement : D_e (mm),
- Transport solide : T (tonnes),
- Dégradations spécifiques : DS (kg/ha/an).

Ils sont rassemblés dans les tableaux X (ravineau) et XI (Amitioro).

TABLEAU X

Bilan d'érosion sur le bassin du ravineau (2 ha)

Année	1964	1965	1966	1967
P_m (mm)	1 141	1 160	1 435	858
V_e (m ³)	1 315	1 777	2 325	778
L_e (mm)	65,7	88,8	116,2	39,0
C_e (%)	5,7	7,6	8,1	4,5
D_e (mm)	1 075,3	1 071,2	1 318,8	819,0
T (suspensions) (kg)	127,2	111,2	162,4	43,3
T (charriage) (kg)	14,9	12,1	8,8	7,7
T total (kg)	142,1	124,3	171,2	51,0
DS (kg/ha/an)	63,6	56,1	81,2	21,6

L'examen des bilans montre que le volume d'eau qui s'écoule du bassin est en définitive important malgré les très faibles coefficients d'écoulement observés (2,4 à 8,9 %). En dépit des faibles charges solides

en suspension, les transports solides effectués chaque année témoignent d'une action mécanique par les eaux de ruissellement non négligeable sur bassin forestier. Dans une étude descriptive des modèles de ruissellement sous forêt dense en Côte d'Ivoire, ROUGERIE (1958) montre qu'une telle action capable de modeler les sols n'est pas incompatible avec le milieu étudié. L'importance des dépôts solides sous forêt tropicale humide et sur substratum granitique en Australie, en Malaisie et à Singapour, où l'action érosive est pourtant faible, les teneurs en matière en suspension n'excédant généralement pas 100 mg/l, a été notée par DOUGLAS (1967) qui constate par ailleurs que l'essentiel du transport est réalisé en suspension.

TABLEAU XI

Bilan d'érosion sur le bassin de l'Amtitoro (170 km²)

Année	1963	1964	1965	1966	1967	1968
Pm (mm)	(1 500)	1 193	1 183	1 592	965	1 781
Ve (m ³)	17,5 · 10 ⁶	4,9 · 10 ⁶	5,2 · 10 ⁶	15,0 · 10 ⁶	4,7 · 10 ⁶	26,8 · 10 ⁶
Le (mm)	103	28,8	33,0	88,1	27,7	157,7
Ce (%)	6,9	2,4	2,8	5,5	2,9	8,9
De (mm)	1 397	1 164	1 150	1 504	937	1 623
T (suspensions) (t)	2 143	565	669	668	674	4 820
DS (kg/ha/an) ...	126	33	40	104	40	289

Les dégradations spécifiques sont assez comparables aux deux stations du bassin, bien que les coefficients d'écoulement soient toujours sensiblement plus élevés à la station du ravineau.

Elles sont légèrement supérieures sur le fleuve collecteur : le Bandama puisqu'elles sont comprises entre 69 et 157 kg/ha/an pour des modules annuels de 232 à 484 m³/s (MONNET, 1970). Mais la plus grande partie des eaux du Bandama provient du nord du bassin, couvert de savanes, où les dégradations sont beaucoup plus fortes que sous forêt (1 033 à 1 818 kg/ha/an sur le bassin versant du Loserigüe - LENOIR, 1968).

Les résultats obtenus sur le Bandama sont inférieurs à ceux rapportés par NOUVELLOT (1969) pour des rivières du Cameroun. Les dégradations spécifiques du fleuve Sanaga sont de l'ordre de 300 kg/ha/an mais pour un module supérieur à celui du Bandama (1 042 m³/s).

En conclusion, l'ensemble des faits exposés tendent à montrer que les conditions actuelles ne peuvent rendre compte du ravinement intense auquel le bassin semble avoir été soumis. Il paraît plausible d'attribuer la physionomie actuelle du bassin à une phase érosive antérieure plus intense. Ceci est confirmé par la nature même du transport tel qu'il s'effectue dans le cycle actuel c'est-à-dire sous forme d'éléments fins provenant du sapement des versants par le ruissellement diffus, les transports en suspension étant largement prédominant sur le charriage.

De plus, les dépôts en matériaux solides sont rythmés par la répartition des pluies et apparaissent comme des épisodes limités dans le temps dont quelques-uns seulement sont responsables de la majeure partie des dégradations annuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULANGE (B.), 1970. — Transport et érosion sur un bassin versant représentatif tributaire de la rivière Amitioro (Côte d'Ivoire) *Rapp. ORSTOM, multigr.*, 40 p.
- DOEGLAS (D.J.), 1946. — Interpretation of the results of mechanical analyses. *J. Sediment. Petrol.*, 16, 19-40.
- DOUGLAS (I.), 1964. — Intensity and periodicity in denudation processes with special reference to the removal of material in solutions by rivers. *Ann. de Geomorph.*, 8, 4, 453-473.
- DOUGLAS (I.), 1967. — Erosion of granite terrains under tropical rain forest in Australia, Malaysia and Singapor. A.I.H.S. Assemblée gén. Berne. 75, 31-39.
- LENOIR (F.), 1968. — Transport solide en suspension sur le bassin de Korhogo. *Rapp. ORSTOM, multigr.*, 36 p.
- LUSTIG (L.K.) et BUSCH (R.D.), 1967. — Sediment transport in alluvial channels. Sediment transport in Cache Creek drainage basin in the Coast Ranges West of Sacramento California. *Geol. Surv. Prof Paper.* 562, A IV, 36 p.
- MERIAUX (S.), 1953. — Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. INRA, thèse, Paris, 118 p.
- MONNET (C.), 1970. — Transport solide en suspension par un fleuve de Côte d'Ivoire : le Bandama. *Rapp. ORSTOM multigr.*, 161 p., 85 fig.
- NOUVELLOT (J.F.), 1969. — Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, VI, 4, 43-85.
- RIVIÈRE (A.), 1952. — Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Indices caractéristiques et interprétation géologique. Notion de faciès granulométriques. *B.S.G.F.*, 6, 11-11, 155-167.
- ROUGERIE (G.), 1958. — Existence et modalité du ruissellement sous forêt dense de Côte d'Ivoire, *C.R. Acad. Sci.*, 246, 2, 290-292.
- SEGALEN (P.), 1957. — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. Inst. Scientif. Madagascar*, D, VIII, 182 p.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VI, I, 105-126.
- SIRCOULON (J.), 1967. — Bassin de l'Amitioro. Etude du ruissellement et de ses facteurs conditionnels climatologiques. *Rapp. ORSTOM, multigr.* 89 p., annexe.
- SOUCHÈRE (P. de La), 1963. — Etude pédologique d'un bassin versant tributaire de la rivière Amitioro (région de Tiassalé, Côte d'Ivoire). *Rapp. ORSTOM, multigr.*, 14 p., 1 carte.
- VATAN (A.), 1967. — Manuel de Sédimentologie. Ed. Technip., Paris, 397 p.
- VUILLAUME (G.), 1969. — Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin du Kountkouzout, Niger). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, VI, 4, 87-132.