

Étude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale*

A. CASENAVE
Chargé de Recherches à l'ORSTOM
Centre d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)
N. GUIGUEN, J. M. SIMON
Hydrologues à l'ORSTOM

RÉSUMÉ

Cinq campagnes de pluies simulées, entreprises sur les bassins versants forestiers de Côte d'Ivoire, antérieurement étudiés de façon classique par l'ORSTOM, ont permis :

- *de mettre au point une nouvelle méthode de détermination du coefficient de ruissellement de la crue décennale,*
- *de mettre en évidence les principales caractéristiques physico-chimiques des sols forestiers qui conditionnent l'infiltration.*

ABSTRACT : *Study of ten-year floods of small forest catchments in Tropical Africa*

Five simulated rainfall campaigns, attempted on Ivory Coast forest watersheds which were previously classically studied by ORSTOM, have led :

- *To perfect a new method to determine the runoff coefficient of ten-year floods*
- *To find the main physico-chemical characteristics of forest soils which have effects on infiltration.*

SOMMAIRE

- I. *Origine de l'étude*
 - 1.1. Historique
 - 1.2. Principe du calcul des crues décennales sur les petits bassins
 - 1.3. Rappel de la note préliminaire
 - 1.4. Utilité du simulateur de pluie
 - 1.5. Objectifs et méthodologie de l'étude
- II. *Cadre géographique de l'étude*
 - 2.1. Généralités
 - 2.2. Description sommaire des bassins étudiés
- III. *Mesures effectuées*
- IV. *Analyse des résultats*
 - 4.1. Relation simulateur-bassins
 - 4.2. Relation simulateur-caractéristiques des sols
- V. *Conclusions*
- VI. *Bibliographie*

* Etude réalisée à l'initiative du Comité Interafricain d'Études hydrauliques et sur financement du Ministère de la Coopération.

I. ORIGINE DE L'ÉTUDE

1.1. HISTORIQUE

Lors de la rédaction, en 1965, de la note pour le C.I.E.H. sur « l'estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale » les auteurs ont constaté que les coefficients de ruissellement des treize bassins forestiers déjà étudiés variaient dans des proportions telles, sans qu'on puisse en déterminer exactement les causes, qu'il était impossible de donner un mode de calcul précis de la crue décennale pour ces zones forestières.

Depuis cette époque, d'autres études ont été menées par l'ORSTOM, sur des bassins forestiers, sans apporter d'amélioration sensible à cette détermination des coefficients de ruissellement. Les travaux d'aménagement se multipliant en Afrique dans ces zones forestières, cette lacune devait être comblée. C'est pourquoi l'ORSTOM, à la demande du C.I.E.H., a entrepris, dans un premier temps, la mise au point d'une note préliminaire permettant de rassembler l'ensemble des données disponibles en 1976 et d'en tirer des règles provisoires pour le calcul des caractéristiques de la crue décennale.

1.2. PRINCIPE DE CALCUL DES CRUES DÉCENNALES SUR LES PETITS BASSINS

Bien que la seule méthode correcte de calcul de la crue décennale soit d'ajuster un modèle pluie-débit sur un échantillon observé de fortes et très fortes crues, de reconstituer, à l'aide de ce modèle, les crues à partir d'une série pluviométrique journalière de longue durée, puis de faire l'analyse statistique de l'échantillon de crues ainsi obtenu, du fait des problèmes que pose la transposition très délicate du modèle à un bassin non étudié, la méthode la plus généralement employée est la suivante :

— détermination de la hauteur de l'averse décennale dont on estime que tombant dans des conditions d'humectation des sols médianes et présentant des caractéristiques de répartition spatiale et temporelle également médianes pour les fortes averses, elle engendre la crue décennale ;

— calcul de la pluviométrie moyenne sur le bassin de fréquence décennale, par l'utilisation du coefficient d'abattement, à partir de laquelle on tire le volume total de la pluie V_p ;

— détermination du coefficient de ruissellement K_r correspondant à la crue décennale et calcul du volume ruisselé $V_r = V_p \cdot K_r$;

— estimation des temps de montée (T_m) et de base (T_b) et calcul du débit moyen de ruissellement de la crue décennale $M = \frac{V_r}{T_b}$;

— évaluation de $K = \frac{Q_{\max r}}{M}$ et calcul de $Q_{\max r} = K \cdot M$ le débit maximal de ruissellement auquel on ajoute le débit de base pour obtenir le débit maximal total.

Le calcul des caractéristiques de la crue décennale d'un bassin n'ayant pas fait l'objet d'étude particulière exige donc l'estimation des paramètres suivants :

- 1) Hauteur de l'averse décennale ponctuelle,
- 2) Coefficient d'abattement correspondant à cette averse,
- 3) Coefficient de ruissellement de la crue décennale,
- 4) Temps de montée et temps de base de la crue,
- 5) Coefficient $K = \frac{Q_{\max r}}{M}$,
- 6) Débit de base.

En ce qui concerne les deux premiers paramètres, on peut estimer qu'avec les résultats des études entreprises par l'ORSTOM en la matière (Étude des averses exceptionnelles par Y. Brunet-Moret et formule du coefficient d'abattement par G. Vuillaume) leur détermination avec une précision acceptable ne pose pas trop de problèmes.

Pour ce qui est du débit de base, il est difficile de donner des règles générales pour son estimation. Seules les valeurs mesurées sur un bassin situé dans une même zone pluviométrique et présentant des caractéristiques pédologiques et géologiques similaires permettent l'évaluation du débit de base d'un bassin non étudié. Cependant, on peut considérer que pour les bassins perméables, le débit de base est en gros proportionnel à la surface. Pour les

bassins imperméables, où le débit maximal ruisselé est fort, même si l'estimation du débit de base est très grossière, celui-ci ne représentant qu'un faible pourcentage du débit maximal, l'erreur commise sur l'évaluation de ce dernier reste minime et on peut même négliger le débit de base lorsque le débit spécifique maximum dépasse des valeurs de 1 500 à 2 000 l/s · km².

1.3. RAPPEL DE LA NOTE PRÉLIMINAIRE

Dans cette note, J.A. Rodier a fait l'analyse de la totalité des informations, relatives à l'écoulement, recueillies sur 24 bassins représentatifs d'Afrique (Côte d'Ivoire, Cameroun, Congo, Gabon) et sur 3 bassins de Guyane. Cette analyse a permis de faire ressortir l'influence de la pente sur la forme de l'hydrogramme et se matérialise par deux abaques permettant de calculer les temps de base et de montée de la crue décennale en fonction de la superficie du bassin et de son indice global de pente IG* (fig. 1). Dans cette note sont également données des valeurs moyennes pour les coefficients $K = \frac{Q_{\max r}}{M}$ que nous rappelons ci-après :

Zone de plaine (classe de relief R2)	S < 5 km ²	K = 1,90
	5 < S < 10 km ²	K = 2,20
	S > 10 km ²	K = 2,30
Zone montagneuse (classe de relief R6)	S < 5 km ²	K = 2,00
	5 < S < 10 km ²	K = 2,30
	S > 10 km ²	K = 2,40

Ces valeurs sont valables pour des crues sensiblement unitaires. Pour les bassins versants très allongés en montagne, K devrait être majoré légèrement.

Si à la suite de cette note le problème de la détermination de T_m, T_b ou K d'un bassin n'ayant pas fait l'objet d'observations semblait résolu (même s'il reste beaucoup à faire pour essayer d'affiner les valeurs présentées) il n'en était pas de même pour ce qui concerne l'estimation du coefficient de ruissellement de la crue décennale. Malgré la prise en compte, non plus de la hauteur de l'averse décennale mais d'une averse de 120 mm sur tous les bassins afin d'éliminer l'influence du régime pluviométrique, cela n'a rien changé au caractère hétérogène des réactions des différents bassins. Faute de mieux, les bassins avaient été classés, en fonction de leur perméabilité supposée, en six catégories dont nous rappelons ci-après les définitions :

Catégorie I (Sitou, Bafo, Manso, Nzeme III, crique Virgile)

La presque totalité du bassin est occupée par des sols imperméables en surface ou à faible profondeur (20 à 50 cm). Ces bassins sont généralement sur schistes ou amphibolites dans un modelé sénile, parfois sur argilites et sur marnes.

$$K_r = 58 \text{ à } 62\% \text{ pour } 3 < I_g < 30$$

K_r doit monter jusqu'à 70% si I_g atteint 70 à 80.

Catégorie II (crique Grégoire, Nzémé I, Nzang, Mielekouka II, Nion I)

Le bassin est recouvert pour 30 à 60% de la surface par des sols correspondant à ceux de la catégorie I.

$$K_r = 30 \text{ à } 40\%$$

K_r croît bien entendu lorsque les surfaces imperméables occupent une partie plus importante du bassin jusqu'à tendre vers les valeurs données pour la catégorie I.

Catégorie III (Gboa, Loué, Mielekouka III, Foubou, Ottotomo III, Dzounza, Mitzibé, Amitioro I)

Bassins peu perméables en pente faible (I_g < 10) ou bassins ayant moins de 30% de leur surface imperméable avec pentes modérées à fortes (10 < I_g < 30), ou bassins perméables avec très fortes pentes (I_g > 70)

$$K_r = 20 \text{ à } 30\%$$

Catégorie IV (Nion II, Mielekouka I, crique Cacao, Amitioro II)

Bassins perméables homogènes à assez fortes pentes (20 < I_g < 40) ou bassins très perméables à très fortes pentes (I_g > 80) ou bassins de perméabilité moyenne à pentes modérées

$$K_r = 10 \text{ à } 16\%$$

* Rappelons que I_g, exprimé en m/km, est le rapport de la dénivelée utile du bassin à la longueur du rectangle équivalent, ladite dénivelée correspondant à l'intervalle contenant 90% de la superficie du bassin sur la courbe hypsométrique, extrêmes exclus.

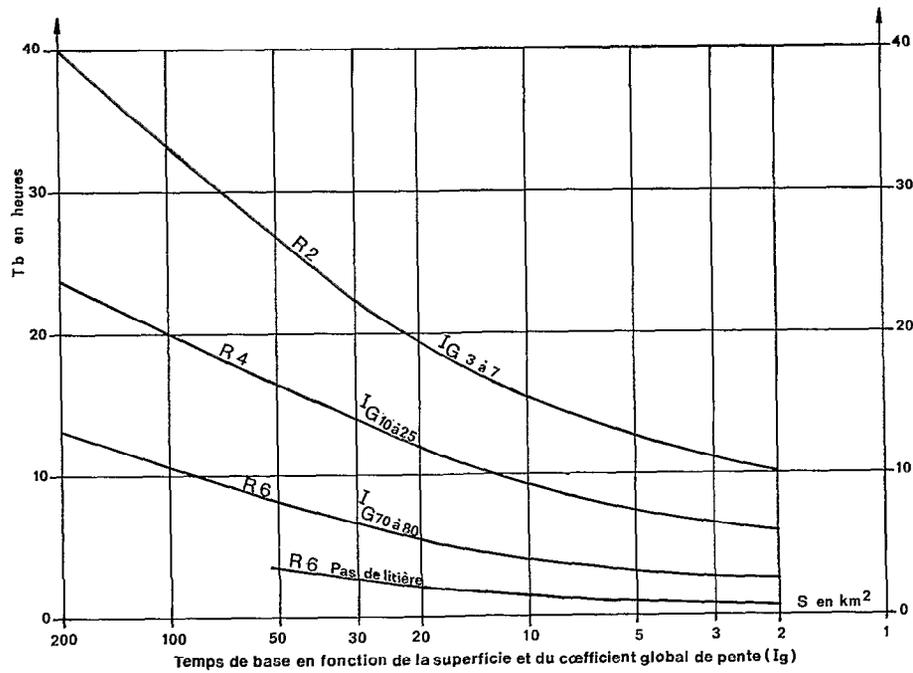
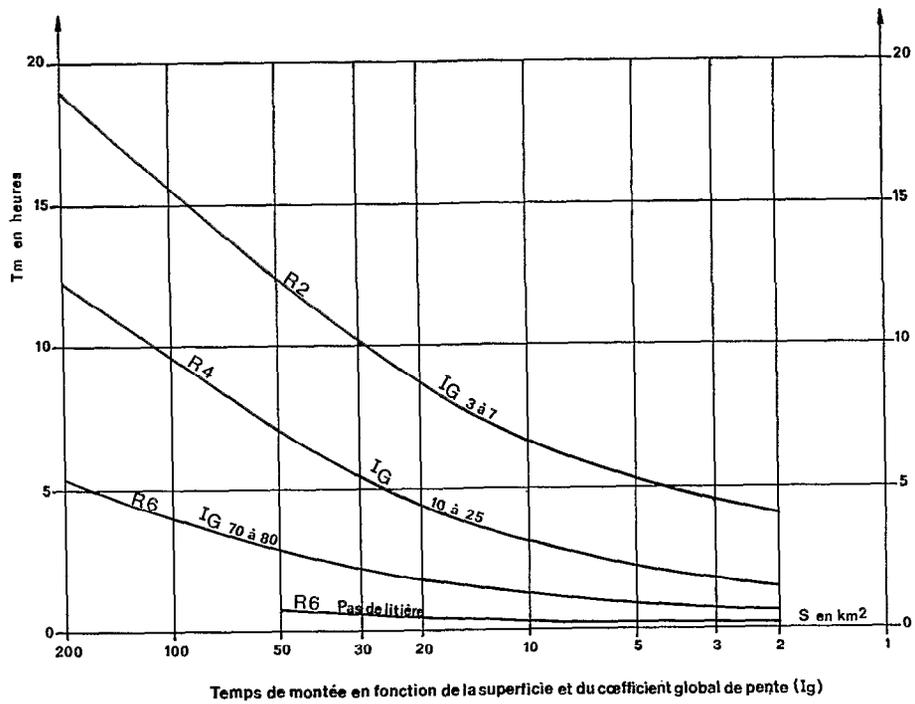


Fig. 1.

Catégorie V (Bibanga, Leyou, Avea II, Ifou)

Bassins perméables à pentes faibles à modérées ($5 < I_g < 25$)

$$K_r = 7 \text{ à } 10\%$$

Catégorie VI (Agbeby)

Bassins très perméables en surface et en profondeur à pentes assez faibles ($I_g < 10$)

$$K_r = 3 \text{ à } 5\%$$

Si pour certains des bassins la classification est évidente (Agbéby sur sables tertiaires très perméables ou Nzémé III sur marnes et argilites imperméables), pour la majeure partie des autres, faute de savoir exactement comment réagissent les différents sols, ils ont été classés plus en fonction du ruissellement observé que de critères pédologiques sûrs.

A la suite de cette note préliminaire, le principal problème restant à résoudre était donc la caractérisation de la perméabilité globale d'un bassin à l'aide d'un test simple ou de critères pédologiques facilement mesurables, afin de classer un bassin inconnu dans une des catégories d'aptitude au ruissellement précédemment évoquées. Ceci est à l'origine des mesures entreprises à partir de 1977 en Côte d'Ivoire qui ont porté sur l'étude des caractéristiques hydrodynamiques des différents sols forestiers.

1.4. UTILITÉ DU SIMULATEUR DE PLUIE

Le grand nombre de paramètres influençant le comportement hydrodynamique des sols en rend l'étude sous pluie naturelle très délicate. Pour espérer analyser le rôle des différents facteurs (pluie, nature du sol, couverture végétale, pente etc.) et déterminer la part de chacun dans le résultat observé, il faut pouvoir soit les éliminer un à un, soit, ce qui est encore préférable, pouvoir fixer à volonté leurs valeurs. Bien qu'on ne puisse espérer agir sur tous les facteurs, du moins peut-on essayer de quantifier l'influence des principaux. Le simulateur de pluie, précédemment décrit dans un autre article, permettant de fixer à volonté les caractéristiques des averses (intensité, durée, hauteur totale), l'état d'humectation des sols par des arrosages successifs, de tester différents types de sols ou de couvertures végétales, paraissait être l'instrument privilégié d'une telle étude.

1.5. OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'étude entreprise en Côte d'Ivoire avait pour but de déterminer la perméabilité globale des différents bassins à partir des essais au simulateur ou des caractéristiques des sols. Les mesures ont été menées parallèlement dans deux directions :

— tentative de liaison entre les résultats des bassins et ceux obtenus avec le simulateur. Pour ce faire, les bassins forestiers antérieurement étudiés de façon classique par l'ORSTOM ont été testés avec le simulateur sur une toposéquence représentative des différents types de sols du bassin. Cette toposéquence comportait généralement trois sites (avec 4 parcelles) correspondant chacun à un type de sol différent.

— tentative de liaison entre les résultats obtenus au simulateur et les caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés, pour essayer d'arriver au but idéal de cette étude, à savoir, de déterminer le ruissellement d'un bassin forestier inconnu à partir de simples critères pédologiques.

II. CADRE GÉOGRAPHIQUE DE L'ÉTUDE

2.1. GÉNÉRALITÉS

Les différents bassins étudiés se trouvent dans la zone de forêt dense humide sempervirente du domaine Guinéen, sauf les bassins de l'Amitiro et surtout de l'Ifou qui appartiennent à la zone de forêt dense humide semi-décidue (fig. 2).

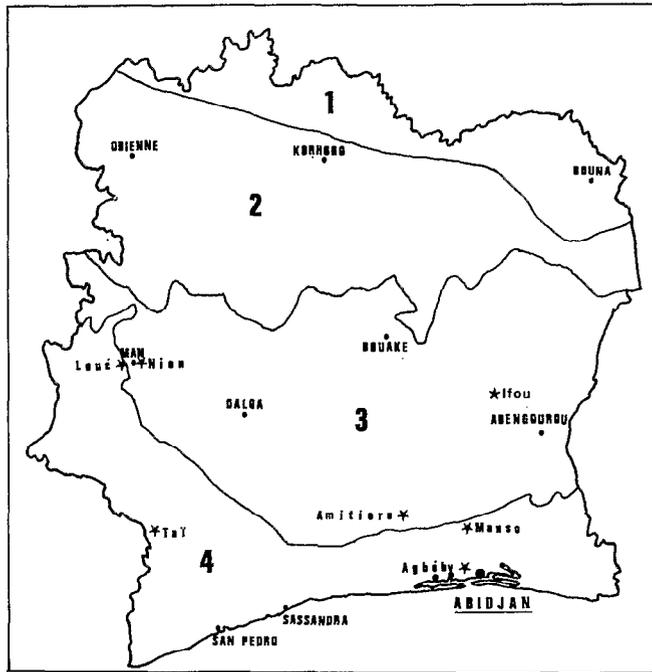
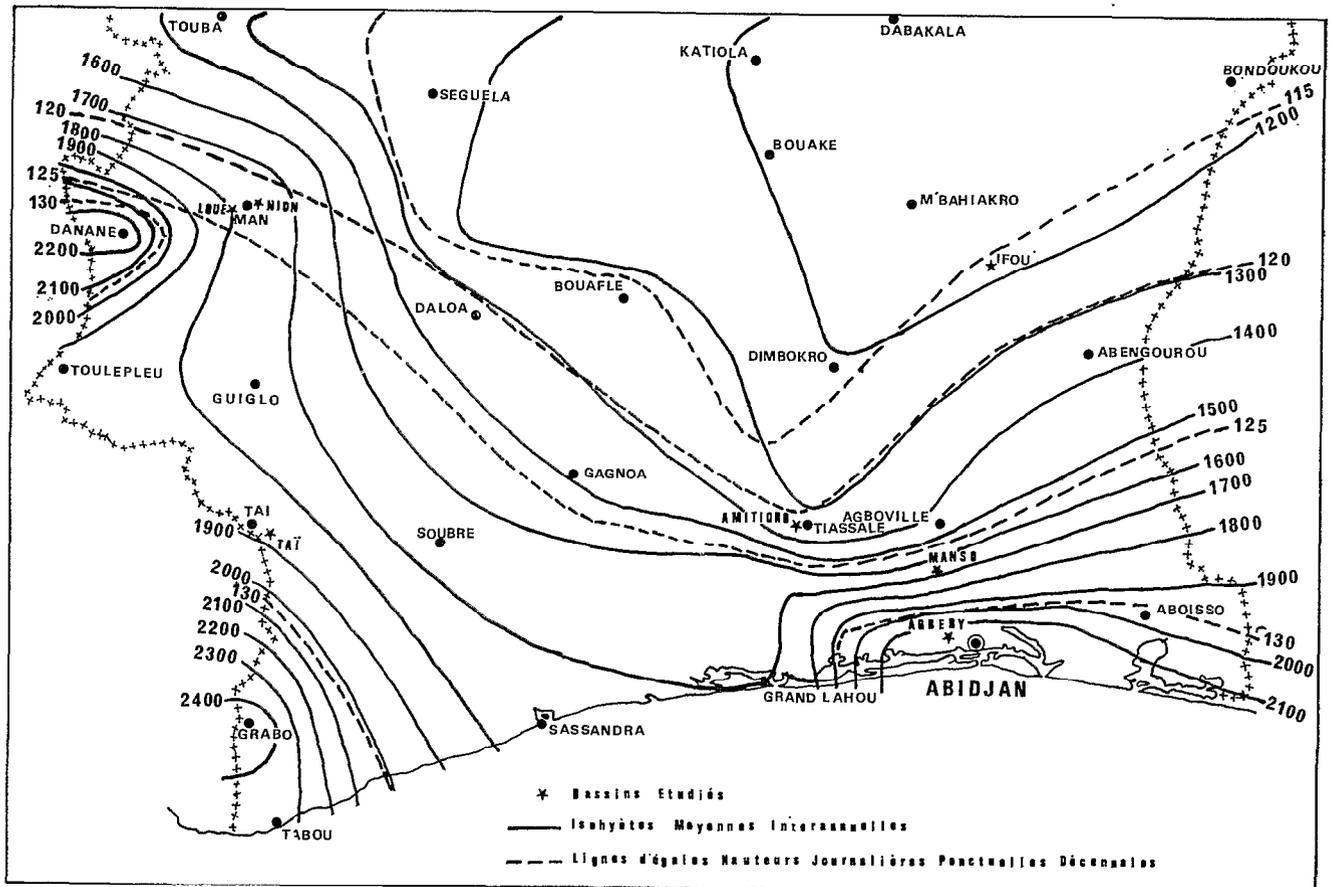


Fig. 2. — Répartition de la végétation en Côte d'Ivoire
 Domaine soudanais Domaine guinéen
 1. Secteur soudanais 3. Secteur mésophile
 2. Secteur sub soudanais 4. Secteur ombrophile
 ★ Bassins étudiés



★ Bassins Etudiés
 — Isohyètes Moyennes Internationales
 - - - Lignes d'égalité Hauteurs Journalières Ponctuelles Décennales

Sur tous ces bassins, la pluviométrie moyenne interannuelle est supérieure à 1 600 mm, sauf pour l'Amitiéro et l'Ifou qui ne reçoivent respectivement que 1 350 et 1 150 mm. Dans toute la zone étudiée, la pluie journalière ponctuelle de hauteur décennale est de l'ordre de 120 à 130 mm, sauf pour l'Agbéby et les bassins du Tonkoui où elle atteint ou dépasse 200 mm (fig. 3).

2.2. DESCRIPTION SOMMAIRE DES BASSINS ÉTUDIÉS

2.2.1. Bassin du Manso (5°42' N, 4°06' W)

La station hydrométrique, installée au pont de la piste Agboville-Guessigué-Elovi, contrôle un bassin de 81 km². Ce bassin qui a une forme très compacte, assimilable à un carré de 9 km sur 9, est couvert à 70% par la forêt naturelle. Cette forêt classée du Yapo est très dense et représente l'archétype des forêts que l'on peut trouver sur le bassin de l'Agbéby (forêt hygrophile à *Mapania*). Le relief du bassin est assez mou ; les pentes transversales dépassent rarement 10% et la pente moyenne du Manso peut être estimée à 1 ou 1,5%. Il en résulte des lits sinueux qui ne sont bien marqués qu'à l'aval du bassin. En saison des pluies, les eaux débordent dans le lit majeur qui forme un large marécage. Les fonds des thalwegs très allongés sont caractérisés par un relief très accentué. L'altitude moyenne est de l'ordre de 700 m et les points culminants sont 1 073 m pour le Gboa et 1 189 m pour le Loué. Les pentes longitudinales du Gboa et du Loué sont élevées et de plus les pentes transversales sont extrêmement fortes et peuvent atteindre 400m/km. Le sous-sol est constitué essentiellement de charnockite (granite à hypersthène) sur laquelle se développent des sols ferrallitiques rouges et jaunes. Alors que le bassin du Gboa est à l'heure actuelle en grande partie déforesté et cultivé, celui du Loué que nous avons étudié reste presque entièrement couvert par la forêt.

2.2.2. Bassins du Mont Tonkoui (7°23' N, 7°36' W)

A la suite des études réalisées en 1957 sur les bassins du Nion, l'ORSTOM a recherché dans un contexte pédologique et climatique semblable des bassins versants sous forêt et à très fortes pentes afin de déterminer le maximum vraisemblable du ruissellement sous forêt dans ce contexte climatique. Deux bassins situés sur les pentes du Mont Tonkoui, ceux du Gboa (12,3 km²) et du Loué (18,4 km²), répondaient à ces conditions. Ces deux bassins qui se présentent sous forme de rectangles très allongés sont caractérisés par un relief très accentué. L'altitude moyenne est de l'ordre de 700 m et les points culminants sont 1 073 m pour le Gboa et 1 189 m pour le Loué. Les pentes longitudinales du Gboa et du Loué sont élevées et de plus les pentes transversales sont extrêmement fortes et peuvent atteindre 400m/km. Le sous-sol est constitué essentiellement de charnockite (granite à hypersthène) sur laquelle se développent des sols ferrallitiques rouges et jaunes. Alors que le bassin du Gboa est à l'heure actuelle en grande partie déforesté et cultivé, celui du Loué que nous avons étudié reste presque entièrement couvert par la forêt.

2.2.3. Bassins de Taï (5°50' N, 7°20' W)

Situés à une dizaine de kilomètres au Sud-Est de la ville de Taï, les bassins sont inclus pour leur plus grande partie dans le parc national de Taï couvert d'une forêt dense humide sempervirente. La station principale contrôle une partie du cours de l'Audrenisrou (petit affluent rive gauche du Cavally). A l'intérieur de ce grand bassin (37,8 km²) deux petits bassins expérimentaux (1,4 et 1,2 km²) ont été installés sur des affluents rive droite de l'Audrenisrou. Si les pentes longitudinales sont faibles, sauf dans le haut des bassins, les pentes transversales peuvent être assez fortes et atteindre des valeurs de 90 m/km. Sur les petits bassins le lit est peu marqué et fréquemment la rivière se sépare en de nombreux bras qui serpentent dans un flat de 100 à 300 m de large. Le substratum est formé d'une migmatite hétérogène correspondant à la granitisation de très anciennes séries métamorphiques qui aboutit le plus souvent à des granites alcalins gris clair. Des panneaux de schistes peu transformés peuvent subsister. Les sols peuvent être regroupés en deux grands types : sols hydromorphes dans les bas-fonds et les bas des pentes, au-dessus des sols ferrallitiques rouges et jaunes avec le plus souvent un horizon gravillonnaire et argileux.

2.2.4. Bassins du Nion (7°22' N, 7°33' W)

Situé à quelques kilomètres à l'est de la ville de Man, le bassin principal (Nion I) a une superficie de 62,4 km². Il peut être assimilé à un rectangle de 9 km sur 7. A l'intérieur de ce grand bassin, dans la partie Nord-Ouest, se situe le bassin du Nion II d'une superficie de 10 km² qui a lui aussi une forme sensiblement rectangulaire. Le relief est très accentué sur la partie Nord du bassin I et sur la totalité du bassin II qui correspond à un massif montagneux à très fortes pentes dominé par la Dent de Man. La partie Sud du bassin I présente par contre un relief assez mou.

La végétation est une ancienne forêt très dégradée et à l'heure actuelle la majeure partie des bassins est occupée par des cultures. Du point de vue pédologique, on distingue des sols ferrallitiques rouges sur forte pente qui couvrent la majeure partie du bassin II et environ 60% du bassin I, des sols ferrallitiques brun-rouge sur colluvions, sur les faibles pentes, peu représentés sur le bassin II et occupant près de 40% du bassin I et des sols hydromorphes dans le fond des vallées qui ne représentent que 1% du bassin II et 4% du bassin I. Tous ces sols se développent sur un substratum constitué par des granites riches en minéraux calco-magnésiens et en particulier la charnockite. Etant donné les différences pédologiques existant entre les deux bassins, chacun d'eux a fait l'objet d'une campagne de mesure, le Nion II en 1981 et le Nion I en 1982.

2.2.5. Bassin de l'Aghéby (5°25' N, 4°13' W)

Ce bassin représentatif de toute la bande côtière de Côte d'Ivoire où affluent les sables argileux du tertiaire continental a une superficie de 11 km². Il est drainé par l'Aghéby, petit affluent rive gauche du Nieké qui est lui même le dernier gros affluent en rive gauche de l'Agnéby. Il peut être assimilé à un rectangle de 5 km sur 2. Son relief est caractéristique de la bande côtière du Sud de la Côte d'Ivoire ; bien que les crêtes des collines ne dépassent que rarement 100 m, la présence de nombreuses vallées très encaissées donne l'impression d'un relief mouvementé. La pente de l'Aghéby est de 1% dans sa partie centrale, mais de moins de 1% dans la zone marécageuse du confluent avec le Nieké. Les pentes transversales toujours supérieures à 5-10% peuvent atteindre 40% en tête du bassin. Les parties amont et aval du bassin sont recouvertes d'une forêt naturelle très dense, mais la majeure partie du bassin est occupée maintenant par des plantations (café, palmiers à huile). L'ensemble du bassin est situé sur les sables plus ou moins argileux ocrés ou rouges du tertiaire continental. Les sols plus ou moins ferrallitiques qui en dérivent sont très lessivés et présentent une perméabilité très importante dans les horizons supérieurs qui ne diminue que très peu en profondeur.

2.2.6. Bassins de l'Amitioro (5°49' N, 4°52' W)

L'Amitioro est un petit affluent rive droite du Bandama avec lequel il conflue un peu en aval de la ville de Tiassalé. La station I qui contrôle un bassin de 170 km² est située sur la route Tiassalé-Bocanda. A l'intérieur du grand bassin, un second bassin de taille beaucoup plus réduite (2,8 km²) a été étudié. Dans le haut du bassin, les pentes sont assez fortes, de l'ordre de 10 m/km, mais diminuent vers l'aval pour atteindre 3,5 m/km à la station principale. Les vallées ont un profil en auge avec des pentes transversales de 5 à 25% dans le haut bassin et de 3 à 8% dans la partie aval. Le Nord-Ouest du bassin est formé par une bande Birrimienne volcano-sédimentaire, constituée de schistes tufacés, de quartzites et de gondites. La zone centrale et Sud-Est du bassin qui occupe la plus grande surface a un substratum à base de schistes et de grauwackes peu métamorphisées. Il existe également quelques pointements de granites calco-alcalins sur la bordure Sud-Est du bassin. Le bassin est à l'heure actuelle occupé en majeure partie par la forêt classée de l'Amitioro. Les sols sont des sols ferrallitiques rouges sur les sommets avec un horizon gravillonnaire en surface, passant progressivement sur les pentes à des sols ferrallitiques rouges puis jaunes avec un recouvrement de l'horizon gravillonnaire par des colluvions. Les bas-fonds sont occupés par des sols hydromorphes qui représentent une fraction importante de la surface du bassin (30% sur le bassin I).

2.2.7. Bassin de l'Ifou (7°08' N, 3°54' W)

Situé sur le cours supérieur de l'Ifou, affluent de la Comoé, le bassin expérimental a une superficie de 37,8 km². La station est implantée à proximité du village de Kouassidiotékro à environ 10 km au Nord de Daoukro.

Le substratum géologique est essentiellement constitué de schistes argileux bariolés, traversés par des filons de quartz quelquefois très importants. La schistosité est orientée presque verticalement et facilite la pénétration profonde des eaux d'infiltration dans le socle. Le relief est caractéristique des zones schisteuses avec des vallées assez encaissées, à flancs concaves entre des lignes de crêtes recouvertes par des cuirasses ferrugineuses tabulaires. Le réseau hydrographique n'est pas très marqué. La plupart des rigoles ont des profils en travers en V, largement évasés, dont le fond est assez encombré par la végétation. Le cours d'eau principal a un lit assez net et sinueux, mais la végétation freine beaucoup l'écoulement. Le bassin est couvert d'une forêt mésophile très secondarisée, avec à l'heure actuelle de nombreuses plantations (café, cacao, igname, manioc, maïs). Les différents types de sols se répartissent régulièrement en fonction de la topographie. Sur les plateaux sols ferrallitiques rouges très cuirassés à faible profondeur (10-30 cm). Sur les pentes sols ferrallitiques rouges et jaunes avec concrétionnement profond. Sur certains bas de pente et dans les thalwegs, sols hydromorphes lessivés formés sur des arènes colluviales.

III. MESURES EFFECTUÉES

On trouvera dans le tableau 1 les principales caractéristiques des différentes parcelles étudiées.

TABEAU 1

Bassin	Site	Situation topographique	Nature du sol	N° de la parcelle	Pente en %
Manso	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface	1	11,0
				2	9,0
	II	Mi-versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire un peu plus profond	3	9,5
				4	19,5
	III	Bas de versant	Sol hydromorphe	5	19,0
				6	19,5
				7	4,0
				8	4,5
				9	6,0
Taï	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface	1	12,0
				2	13,0
	II	Mi-versant	Sol ferrallitique jaune avec horizon gravillonnaire profond et un horizon compacté à 10 cm de profondeur	3	20,0
				4	23,0
				5	9,5
	III	Bas de versant	Sol ferrallitique jaune sur colluvions avec traces d'hydromorphie	6	5,0
				7	12,0
				8	12,5
				9	6,5
				10	9,5
				11	12,0
				12	14,0
Loué	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface	1	16,5
				2	19,0
	II	Mi-versant	Sol ferrallitique jaune avec horizon caillouteux	3	13,5
				4	21,5
	III	Bas de versant	Sol ferrallitique jaune avec horizon caillouteux	5	22,0
				6	19,0
				7	18,0
				8	13,0
Nion	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire profond	1	11,0
				2	6,5
	II	Bas de versant	Sol ferrallitique jaune sans horizon gravillonnaire	3	12,0
				4	11,0
				5	14,0
				6	19,0
				7	18,0
Agbéby	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire profond	1	26,0
				2	24,5
	II	Bas de versant	Sol ferrallitique jaune sans horizon gravillonnaire	3	22,5
				4	26,0
				5	10,0
				6	10,0
				7	7,0
				8	7,5

TABLEAU 1 (suite)

Bassin	Site	Situation topographique	Nature du sol	N° de la parcelle	Pente en %	
Amitioro	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface	9	11,0	
			10	20,0		
	II	Mi-versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface	11	10,5	
			12	17,5		
	III	Bas de versant	Sol hydromorphe	5	12,0	
			6	14,0		
			7	13,5		
			8	14,0		
			1	10,0		
			2	8,5		
	Nion I	I	Haut de versant	Sol ferrallitique jaune à induration en profondeur	1	14,5
				Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire profond	2	17,0
3				12,0		
II		Mi-versant	Sol ferrallitique jaune appauvri sans horizon gravillonnaire	4	9,5	
			5	9,0		
III		Bas de versant	Sol hydromorphe	6	10,0	
			7	8,5		
			8	8,5		
			9	7,5		
			10	10,0		
			11	14,0		
			12	8,5		
Ifou	I	Haut de versant	Sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface, cuirassé à faible profondeur	1	6,0	
			2	8,0		
	II	Mi-versant	Sol ferrallitique ocre avec horizon gravillonnaire profond, sur matériau induré (cuirasse)	3	5,5	
			4	4,0		
	III	Bas de versant	Sol hydromorphe	5	9,5	
			6	6,0		
			7	8,0		
			8	8,0		
			9	4,0		
			10	2,0		
			11	1,5		
			12	2,0		

Au total 389 pluies simulées ont été effectuées pendant les cinq campagnes. Pour ce qui est des protocoles utilisés et du dépouillement des mesures on se reportera à l'article précédent dans ce même cahier.

IV. ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1. LIAISON SIMULATEUR - BASSIN

4.1.1. Résultats des mesures au simulateur

A partir des courbes Lr (Pu, IK) sur sol nu, nous avons extrait la valeur de la lame ruisselée pour une pluie de 100 mm et une valeur de IK = 50 pour tous les bassins, sauf pour l'Ifou où pour tenir compte des conditions

climatiques de la région nous avons utilisé une valeur de $IK = 20$. Nous avons estimé que cette valeur de $IK = 50$, ou 20 pour l'Ifou, correspond au degré d'humectation des sols au milieu de la saison des pluies. Nous sommes bien sûr conscient qu'il s'agit là d'une approximation, la valeur de IK étant fonction de la hauteur pluviométrique annuelle (qui passe de 2 200 mm sur le Mont Tonkoui à 1 150 mm sur l'Ifou) et de la répartition temporelle des pluies qui n'est pas la même sur tous les bassins. Si l'on voulait arriver à une meilleure estimation de IK au milieu de la saison des pluies, il faudrait reprendre les séries pluviométriques de longue durée des postes proches des bassins étudiés, calculer les valeurs de IK correspondantes et prendre les valeurs moyennes des séries de IK ainsi calculées. Cependant, si on estime que la crue décennale est générée par une averse de hauteur décennale tombant dans des conditions d'humectation des sols médianes, ce n'est là aussi qu'une approximation, car la crue décennale peut aussi résulter d'une pluie de hauteur inférieure à la pluie décennale survenant dans des conditions d'humectation des sols très favorables ou vice versa. On devrait donc, en toute rigueur, à partir des échantillons Lr (Pu , IK) observés sur les bassins, rechercher le maximum de la fonction Lr , Pu (F_1), IK (F_2) pour une probabilité composée $p = F_1 \cdot F_2 = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05$ en supposant que Pu et IK sont des variables aléatoires indépendantes. Toutefois, étant donnée la forme des courbes Lr (Pu , IK), il ne nous semble pas que l'approximation que nous faisons sur la valeur de IK puisse entraîner une erreur très importante sur l'estimation de la crue décennale, aussi avons-nous conservé ces valeurs de $IK = 50$ ou 20. On trouvera dans le tableau 2 les valeurs des lames ruisselées correspondant à ces valeurs de IK , pour $Pu = 100$ mm.

TABLEAU 2
LAMES RUISSSELÉES EN mm POUR UNE PLUIE DE 100 mm ET UN INDICE $IK = 50$
(20 POUR L'IFOU)

Bassin	Site I	Site II	Site III
Taï	64	75	88
Manso	71	85	90
Loué	33,3	5,8	11,5
Nion I	53	4,0	52
Nion II	18,5	3,0	52
Agbéby	0,75	1,9	
Amitioro	0	1,5	54,5
Ifou	12	1,8	70

La valeur du site II de Taï est une valeur estimée, le sol testé avec son horizon compacté à faible profondeur n'étant pas représentatif des sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire profond que l'on trouve sur l'ensemble des bassins. Le très fort ruissellement mesuré sur ce sol ($Lr(100,50) = 94$ mm) a été sensiblement diminué. Nous avons retenu pour ce sol une valeur intermédiaire entre celle du site I (sol ferrallitique avec horizon gravillonnaire en surface) et celle du site III (sol sans horizon gravillonnaire à tendance hydromorphe) ce qui est le cas généralement observé pour les bassins présentant des caractéristiques pédologiques similaires. Cette évaluation est de plus confirmée par les mesures faites par les pédologues aux parcelles d'érosion sur une autre toposéquence du même type à l'intérieur du bassin 1 de Taï.

Pour la Loué, la valeur indiquée pour le site I est une moyenne des deux courbes représentatives du site (parcelles 1 et 2) de même pour le site II. Ce tableau appelle les commentaires suivants :

— On peut remarquer l'extrême variabilité des résultats obtenus pour des sols d'un même type. Même si dans tous les cas où ils ont été testés : Sites III de Taï, du Manso, de l'Amitioro et du Nion (la valeur de l'Ifou correspondant à un IK différent n'est pas directement comparable), les sols hydromorphes ruissellent fortement, la lame ruisselée passe quand même pratiquement du simple au double entre l'Amitioro et le Manso. La variabilité est encore plus forte dans le cas des sols ferrallitiques. Les sites I des bassins de Taï, du Manso, du Loué et de l'Amitioro correspondent tous à un sol ferrallitique rouge avec horizon gravillonnaire en surface ou à très faible profondeur (moins de 10 cm), les lames ruisselées pour un même état d'humectation des sols vont de 71 mm sur le Manso à 0 mm sur l'Amitioro (où même à la 6^e pluie qui correspond à la plus forte humectation des sols, le ruissellement est nul, alors qu'il est de 90% à Taï et au Manso et 70% pour le Loué). De même, pour les sols ferrallitiques à horizon

gravillonnaire profond, la lame ruisselée passe de 0,75 mm à l'Agbéby à 75 mm à Taï. Ces quelques exemples montrent bien l'insuffisance de la classification pédologique pour caractériser l'aptitude d'un sol au ruissellement.

— Les résultats du bassin de l'Amitioro permettent de comprendre pourquoi il n'existe généralement pas, pour les bassins de ce type, de relation entre le coefficient de ruissellement d'un bassin et sa superficie. Sur ce bassin, la quasi-totalité du ruissellement provient des sols de bas-fond qui ne représentent que 30% de la surface totale. On peut donc considérer que la « superficie utile » du bassin I n'est pas de 170 km², mais de 50 km². Notons d'ailleurs, que si on rapporte sur les courbes T_m et T_b (S, Ig), les points représentatifs de ce bassin à cette surface de 50 km², les points se rapprochent notablement des courbes moyennes).

4.1.2. Répartition des différents types de sol

A partir des cartes pédologiques, nous avons déterminé le pourcentage de la superficie occupé sur chaque bassin par chacun des sols testés. Pour les bassins du Manso, du Loué et de l'Amitioro 1 où il n'existe pas de carte pédologique, les surfaces occupées par les différents types de sol ont été estimées par photo-interprétation. Nous avons été obligé, bien sûr, de faire des regroupements de sols pour les rapporter tous à un site testé. Ces regroupements ont été facilités par le fait que pratiquement dans toute la zone forestière ivoirienne on peut classer les sols pour ce qui est de la dynamique de l'eau en trois catégories en fonction de leur situation topographique. Sur les positions hautes du modelé, on trouve le plus souvent des sols ferrallitiques rouges avec un horizon gravillonnaire et argileux en surface ou à très faible profondeur. Ces sols sont caractérisés par une dynamique de l'eau verticale dominante. De l'amont vers l'aval des transects, on passe des sols à dynamique de l'eau verticale aux sols à dynamique superficielle et latérale. Généralement en haut de versant, mais parfois à mi-versant ou dans le tiers inférieur du versant, le « basculement » de la dynamique coïncide avec l'apparition en surface de recouvrements sableux. Ces sols des versants sont moins perméables que ceux des sommets. Ce sont des sols ferrallitiques rouges en haut du versant avec tendance au jaunissement quand on passe à l'aval des pentes. Le recouvrement sableux au-dessus de l'horizon gravillonnaire épaisit de l'amont vers l'aval des versants. La plupart du temps l'horizon gravillonnaire disparaît en bas de pente. Enfin, dans les bas-fonds, on trouve des sols hydromorphes pour lesquels la dynamique de l'eau dépend de la saison. D'une dynamique verticale en saison sèche, on passe, du fait de l'engorgement très rapide des horizons superficiels, à une dynamique superficielle et latérale en saison des pluies. Ce sont, pendant la saison des pluies, les sols qui ruissent le mieux.

Les pourcentages de la surface des bassins occupés par les sols correspondant aux différents sites testés sont indiqués dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Bassin	Site I	Site II	Site III
Taï B.V. 1	9,4	62,3	28,3
Taï B.V. 2	10,8	65,5	23,7
Taï B.V. 3	12,1	70,2	17,7
Manso	20	67	13
Loué	75	20	5
Agbéby	92	7	
Amitioro I	10	60	30
Amitioro II	10	70	20
Nion I	58	38	4
Nion II	85	14	1
Ifou	49,6	44,2	6,2

Pour le bassin de l'Agbéby les sols hydromorphes n'ont pas été testés, mais ils ne représentent qu'un très faible pourcentage de la surface du bassin (1%).

4.1.3. Relation simulateur-bassin

A partir des données des tableaux 2 et 3, nous avons essayé de relier les lames ruisselées mesurées à l'aide du simulateur aux coefficients de ruissellement des bassins pour la pluie de 120 mm utilisée dans la note préliminaire. Il s'avère que si on multiplie la lame ruisselée L_r (100,50) d'un site par le pourcentage occupé sur le bassin par le sol correspondant et que l'on fasse la somme des valeurs ainsi obtenues sur l'ensemble des sites du bassin, le total semble bien corrélé avec le K_r 120 du bassin. Ce calcul peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$\Sigma L_r S = (L_{r_1} \times S_1) + (L_{r_2} \times S_2) + \dots + (L_{r_n} \times S_n) = f(K_r 120)$$

où

L_{r_n} = lame ruisselée sur sol nu du site n, pour une pluie de 100 mm et un indice IK de 50 (20 pour l'Ifou)

S_n = pourcentage de la superficie du bassin occupé par le sol du site n.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Bassin	Site I			Site II			Site III			$\Sigma L_r \cdot S$	Kr 120
	Lr (mm)	S (%)	$L_r \cdot S$	Lr (mm)	S (%)	$L_r \cdot S$	Lr (mm)	S (%)	$L_r \cdot S$		
Taï B.V. 1	64	9,4	602	75	62,3	4 673	88	28,3	2 490	7 765	57
Taï B.V. 2	64	10,8	691	75	65,5	4 913	88	23,7	2 086	7 690	52
Taï B.V. 3	64	12,1	774	75	70,2	5 265	88	17,7	1 558	7 597	53
Manso	71	20	1 420	85	67	5 695	90	13	1 170	8 285	59
Loué	33,3	75	2 498	5,8	20	116	11,5	5	58	2 672	30
Agbéby	0,75	92	69	1,9	7	13				82	3
Amitioro I	0	10	0	1,5	60	90	54,5	30	1 635	1 725	21
Amitioro II	0	10	0	1,5	70	105	54,5	20	1 090	1 195	12,5
Nion I	53	58	3 074	4,0	38	152	52	4	208	3 434	34
Nion II	18,5	85	1 573	3,0	14	42	52	1	52	1 667	16
Ifou	12	49,6	595	1,8	44,2	80	70	6,2	434	1 109	7

* Les valeurs de K_r 120, pour les bassins de Taï, sont des valeurs provisoires, susceptibles de légères modifications, l'étude n'étant pas terminée.

Si on reporte, sur papier semi-logarithmique, les valeur de $\Sigma L_r \cdot S$ en regard des valeurs de K_r 120 correspondantes (fig. 4), on constate que pour tous les bassins ayant un K_r 120 > 5% les points s'alignent sans dispersion notable sur une droite d'équation :

$$K_r 120 = 55 \log (\Sigma L_r \cdot S) - 159$$

Pour les bassins ayant un K_r 120 < 5%, il est difficile de tracer la droite K_r 120 f ($\Sigma L_r \cdot S$) puisque nous n'avons qu'un seul bassin de ce type : l'Agbéby. Toutefois, étant donnée la gamme des coefficients de ruissellement dans laquelle se situe cette imprécision, cela n'a pas grande importance quant à l'application pratique de la méthode. On peut prendre, pour tous les bassins où $\Sigma L_r \cdot S$ est inférieure à 950, une valeur du coefficient de ruissellement de 5% sans que cela entraîne une surestimation grossière de la crue.

La justification de la méthode utilisée pour déterminer à partir des mesures au simulateur les coefficients de ruissellement des bassins se trouve dans la nature pédologique des bassins étudiés (qui sont représentatifs de l'ensemble de la zone forestière ivoirienne). Pour tous ces bassins, on peut schématiser la répartition des différents types de sols par des auréoles concentriques autour de l'axe des thalwegs, la perméabilité diminuant quand on va

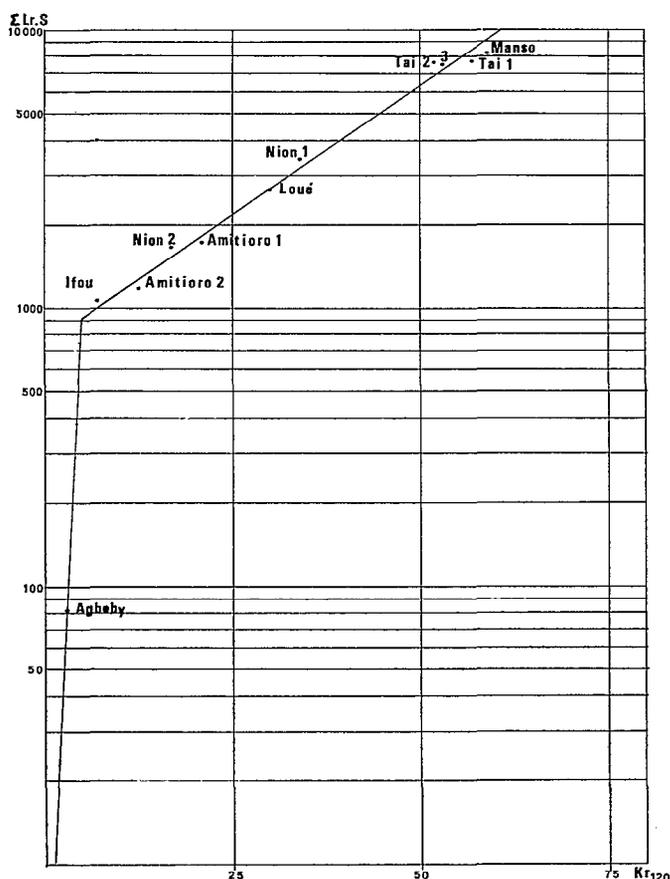


Fig. 4.

des auréoles les plus externes vers le thalweg. L'auréole la plus interne correspondrait aux sols hydromorphes très peu perméables en saison des pluies, l'auréole médiane serait celle des sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire profond plus perméables que les sols de bas-fond, enfin la plus externe représenterait les sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire en surface ou à faible profondeur qui sont les plus perméables. Ce que nous savons des sols de la zone forestière camerounaise (cf. Muller, Bassins d'Ottotomo), de Guyane (cf. Boulet, bassins Ecerex) ou du Gabon (Collinet, communication orale) nous laisse à penser que cette susceptibilité croissante de l'aptitude des sols au ruissellement quand on va des sommets aux thalwegs est assez générale en zone forestière. (Avec une réserve pour les bassins du Gabon où il est fréquent qu'un seul type de sol représente 95 à 100% de la surface du bassin). La méthode qui consiste finalement à sommer les apports des différentes zones semble justifiée par le fait que l'eau qui ruisselle ne peut s'infiltrer en cours de route, les sols qu'elle rencontre étant de moins en moins perméables. La crue résulte donc de la somme des apports des différentes zones contrairement à ce que l'on peut trouver en savane où l'aptitude des sols au ruissellement dépend avant tout de leur état de surface (pellicule de battance). Dans ce cas, même si une zone ruisselle très bien, la quasi-totalité de l'eau ruisselée peut s'infiltrer dans des zones situées plus en aval et n'arrive donc pas à l'exutoire du bassin. Il est bien évident qu'à l'échelle d'un bassin, du fait du microrelief, une partie de l'eau ruisselée s'infiltrera en cours de route dans les cuvettes et dépressions, de plus la répartition des sols n'est bien sûr pas aussi parfaite qu'indiqué dans le modèle théorique. C'est pourquoi nous insistons sur le fait que le simulateur ne peut servir à calculer directement le volume de la crue. Les mesures effectuées en Haute-Volta (Chevallier, Etude des bassins d'Oursi et Albergel, Etude du bassin de Bindé) montrent que s'il est possible de reconstituer les lames ruisselées à partir des essais au simulateur c'est à un facteur d'échelle près qui semble être surtout fonction de la surface des bassins. Les études ne sont toutefois pas encore assez avancées pour pouvoir déterminer avec précision ce facteur d'échelle. Pour l'instant le simulateur doit être utilisé comme un test permettant une approche de la perméabilité globale des bassins, et la détermination du coefficient de ruissellement à l'aide de la formule $Kr_{120} f = (\sum Lr \cdot S)$.

Nous avons essayé d'établir une corrélation similaire à celle de la figure 4 à partir des lames ruisselées extraites des courbes caractéristiques des sites sous végétation. Malgré tous les essais de correction que nous avons pu faire, nous ne sommes pas parvenu à obtenir une corrélation correcte. Cela nous incite à croire que les mesures qui ont été faites ne sont pas représentatives du rôle joué par la végétation sur l'ensemble du bassin et que des mesures ponctuelles, même en les multipliant, ne permettent pas d'approcher le processus de transformation introduit par la végétation. De même, nous n'avons pu trouver de relation entre les valeurs de R_x et le débit maximal ruisselé.

4.2. RELATION SIMULATEUR-CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

4.2.1. Résultats des analyses des sols

Les principales caractéristiques des sols pouvant influencer l'infiltration sont la texture (composition élémentaire, lorsque tous les agrégats ont été détruits), la structure (manière dont ces éléments sont groupés en agrégats), le pourcentage de matière organique ou d'argile. Les essais de liaison entre les valeurs des lames infiltrées et les valeurs caractérisant la texture du sol ne sont pas concluants sauf pour le taux de sable grossier et le pourcentage d'argile. Il en est différemment de la structure qui est étroitement liée à la lame infiltrée, de même que le pourcentage de matière organique. En définitive, nous avons retenu pour notre étude les variables suivantes :

Ag A = Pourcentage d'agrégats stables à l'eau après un prétraitement à l'alcool. Ce prétraitement a généralement un effet protecteur sur la structure et accroît le taux d'agrégats stables.

Ag E = Pourcentage d'agrégats stables à l'eau sans prétraitement.

Ag B = Pourcentage d'agrégats stables à l'eau après un prétraitement au benzène qui a un effet sensibilisateur sur la structure sauf pour les terres riches en matière organique.

La détermination du taux d'agrégats est faite sur un sol séché à 35 °C. Les agrégats considérés sont ceux ayant une taille comprise entre 0,2 et 2 mm et comprennent donc les sables grossiers (SG). Les agrégats « vrais » n'ayant pas les mêmes propriétés que les sables grossiers (contrairement à eux, ils peuvent se détruire), nous avons également utilisé les variables suivantes :

Ag A-SG = Pourcentage d'agrégats « vrais » après prétraitement à l'alcool. Cette variable est généralement bien liée au taux d'argile.

Ag E-SG = Pourcentage d'agrégats vrais sans prétraitement.

Ag B-SG = Pourcentage d'agrégats vrais après prétraitement au benzène. Cette variable est destinée à mettre en évidence le rôle de la matière organique.

$$\overline{\text{Ag-SG}} = \frac{(\text{Ag A-SG}) + (\text{Ag B-SG}) + (\text{Ag E-SG})}{3}$$

SG = Pourcentage de sable grossier (particules ayant une taille comprise entre 200 et 2 000 μ).

Arg = Pourcentage d'argile (particules ayant une taille comprise entre 0 et 5 μ).

M.O. = Pourcentage de matière organique.

Les valeurs de ces différentes variables, pour l'horizon de surface de tous les sols testés (à l'exception du Manso, où les analyses n'avaient été faites que pour une fosse représentative de chaque site et non sur chaque parcelle, et du Nion I et de l'Ifou pour lesquels nous ne disposons pas encore des résultats des analyses), sont données dans les tableaux 5, 6 et 7. Dans ces tableaux sont également mentionnées les valeurs de la lame infiltrée correspondant à une pluie de 100 mm et une valeur IK de 50. Ces lames infiltrées ont été extraites des courbes Lr (Pu, IK) de chaque parcelle $Li = 100 - Lr (100,50)$.

TABLEAU 5
SOLS AVEC HORIZON GRAVILLONNAIRE A FAIBLE PROFONDEUR

N°	Bassin	Site	Parcelle	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
1	Taï	I	2	37	62,4	56,8	47,8	23,9	3,5	23,2	7,9	16,4	15,8	39,8
2	Taï	I	3	12	74,9	64,5	53,1	25,8	5,5	35,9	17,5	26,2	26,5	37,6
3	Taï	I	4	25	70,4	52,9	41,3	31,1	4,6	37,0	7,9	19,6	21,5	33,4
4	Loué	I	1	83	88,0	85,0	40,5	54,2	5,2	71,4	23,8	67,2	54,1	17,0
5	Loué	I	2	49	83,5	81,2	46,4	57,6	5,5	70,5	32,2	67,3	56,7	13,7
6	Loué	I	3	54	86,3	84,4	46,0	48,4	5,3	67,4	26,0	64,2	52,5	19,7
7	Amitioro	I	9	100	83,8	76,7	64,3	29,3	8,0	68,9	49,7	61,6	60,1	14,9
8	Amitioro	I	10	99,5	68,6	51,7	41,7	28,0	6,9	58,1	31,4	41,1	43,5	10,5
9	Amitioro	I	11	100	81,9	76,5	68,8	28,8	7,0	68,6	55,3	63,1	62,3	13,4
10	Amitioro	I	12	100	85,5	80,6	69,2	31,5	6,2	76,4	60,1	71,8	69,4	9,0
11	Amitioro	II	5	95,5	45,7	38,9	29,7	15,3	2,9	27,6	11,3	20,1	19,7	18,4
12	Amitioro	II	6	98,5	52,1	44,9	41,2	16,8	3,7	33,4	22,6	26,0	27,3	18,7
13	Amitioro	II	7	99	56,4	47,7	38,9	19,8	4,5	42,8	25,9	34,5	34,4	13,3
14	Amitioro	II	8	99	61,9	51,2	40,7	18,5	2,7	41,1	20,0	30,6	30,6	20,7

TABLEAU 6
SOLS AVEC HORIZON GRAVILLONNAIRE PROFOND

N°	Bassin	Site	Parcelle	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
15	Taï	II	6	4,5	64,3	61,6	60,2	10,0	1,3	7,2	2,3	4,1	4,5	57,5
16	Taï	II	7	6	66,4	60,4	59,2	16,0	1,2	9,1	1,8	3,4	4,8	57,2
17	Taï	II	8	2	66,1	60,5	57,7	13,2	1,4	8,8	1,4	3,4	4,5	56,9
18	Loué	II	4	92	79,9	79,0	78,0	28,9	11,7	59,5	58,5	59,2	59,1	19,9
19	Loué	II	5	97,5	76,2	75,6	77,5	30,8	14,1	61,2	62,4	60,8	61,5	15,0
20	Loué	III	6	88	80,5	82,4	74,9	30,3	6,1	46,0	37,4	45,4	42,9	36,3
21	Loué	III	7	88	84,1	78,8	73,4	36,0	5,7	49,6	39,7	46,0	45,1	33,7
22	Loué	III	8	91	82,5	79,6	81,1	31,0	7,0	46,1	45,0	45,1	45,4	35,7
23	Agbéby	I	1	99	80,9	80,6	81,8	26,5	4,8	28,3	30,0	28,6	29,0	52,1
24	Agbéby	I	2	92	80,2	80,8	82,0	16,0	4,6	25,3	27,0	25,4	25,9	55,1
25	Agbéby	I	3	92	83,7	82,2	81,1	19,0	4,9	29,6	28,7	29,7	29,3	53,0
26	Agbéby	I	4	99	84,4	81,0	79,0	16,0	4,9	31,8	28,8	30,7	30,4	51,0
27	Nion	I	1	94	87,7	83,7	67,8	28,5	4,4	48,5	27,6	44,6	40,2	39,5
28	Nion	I	2	100	87,2	83,8	74,1	27,3	7,5	52,8	40,8	50,2	47,9	33,8
29	Nion	I	3	100	87,2	85,2	80,5	25,5	8,9	48,2	42,2	47,2	49,9	38,4
30	Nion	I	4	100	90,3	84,4	70,0	28,5	5,7	51,0	31,1	46,0	42,7	38,9

TABLEAU 7
SOLS SANS HORIZON GRAVILLONNAIRE

N°	Bassin	Site	Parcelle	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
31	Taï	III	9	12,5	63,8	56,5	55,1	15,0	1,0	11,3	4,2	3,1	6,2	52,3
32	Taï	III	10	12,5	64,0	53,5	50,7	17,1	1,0	12,7	0,5	3,7	5,6	50,4
33	Taï	III	11	54,5	67,3	59,7	54,2	16,8	1,5	13,7	2,3	7,4	7,8	52,6
34	Taï	III	12	15	67,2	55,4	51,9	19,7	2,7	21,2	5,7	10,3	12,4	45,8
35	Agbéby	II	5	98	73,5	73,0	71,8	11,3	2,7	11,1	10,4	10,0	10,5	62,3
36	Agbéby	II	6	98	72,1	71,9	73,6	10,5	2,4	9,4	10,7	9,1	9,7	62,8
37	Agbéby	II	7	98	81,1	78,1	78,2	12,9	2,7	16,0	14,6	14,2	14,9	64,2
38	Agbéby	II	8	96	79,2	76,9	78,4	13,4	3,0	15,7	15,1	15,5	15,4	62,7
39	Nion	II	5	97	79,3	68,5	52,9	26,8	3,8	44,2	17,9	31,8	31,3	35,6
40	Nion	II	6	99	83,7	71,6	47,3	27,0	2,8	46,0	11,2	35,0	30,7	36,8
41	Nion	II	7	99	85,9	75,2	49,6	28,5	3,4	50,1	14,9	41,5	35,5	34,7
42	Amitioro	III	1	45,5	60,3	57,6	62,0	11,3	2,0	11,7	13,5	9,3	11,5	48,5
43	Amitioro	III	2	45,5	62,6	57,0	64,8	11,5	2,1	12,4	16,3	7,9	12,2	49,3
44	Amitioro	III	3	65,5	55,2	54,4	61,8	9,5	2,9	12,9	20,1	13,2	15,4	41,7
45	Amitioro	III	4	19	51,1	46,9	52,6	9,8	2,4	10,0	11,9	8,0	10,0	40,2

4.2.2. Relation lames infiltrées - caractéristiques des sols

Pour trouver parmi ces variables celles qui sont le mieux liées à Li, nous avons établi pour l'ensemble des sols la matrice des coefficients de corrélation de toutes ces variables prises 2 à 2 (tableau 8).

TABLEAU 8
MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION

	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
SG	-0,331	-0,071	0,022	0,417	-0,639	-0,587	-0,834	-0,615	-0,767	-0,759	1,000
Ag-SG	0,580	0,632	0,603	0,171	0,762	0,812	0,960	0,888	0,981	1,000	
AgE-SG	0,558	0,664	0,616	0,115	0,827	0,783	0,978	0,849	1,000		
AgB-SG	0,611	0,531	0,571	0,460	0,491	0,895	0,780	1,000			
Ag A-SG	0,509	0,609	0,496	-0,041	0,847	0,738	1,000				
M.O.	0,490	0,495	0,498	0,367	0,525	1,000			45 parcelles		
Arg	0,198	0,603	0,501	-0,152	1,000						
Ag B	0,331	0,530	0,689	1,000							
Ag E	0,465	0,932	1,000								
Ag A	0,449	1,000									
Li	1,000										

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

— Il est très difficile de démêler le rôle de chacune des variables, car elles sont toutes plus ou moins liées entre elles. De plus une même variable peut avoir, comme nous le verrons ultérieurement, deux actions de sens opposé (cas des sables grossiers ou de l'argile).

— On peut constater que les liaisons entre la lame infiltrée et les différentes valeurs Ag qui sont représentatives de la structure (y compris l'intervention des sables grossiers dans cette structure) sont assez mauvaises. Cela peut s'expliquer par le fait que les sables grossiers influencent de deux façons opposées l'infiltration. D'un côté ils favo-

risent par la création d'une porosité importante l'infiltration, mais ils ont d'un autre côté un effet défavorable sur la structure en diminuant le pourcentage de vrais agrégats stables. On peut constater qu'il existe une assez bonne liaison entre SG et les différents Ag-SG mais cette liaison est négative ce qui traduit le fait que plus le taux de sable grossier augmente plus le pourcentage d'agrégats vrais diminue. Cela s'explique par la diminution de l'efficacité de l'argile qui est d'autant plus faible que le squelette qui lui est associé est grossier (D. Kheyrahi et G. Monnier). La présence d'un pourcentage important de sables grossiers fragilise les vrais agrégats qui sont plus facilement détruits. La destruction des agrégats doit entraîner la libération d'éléments fins qui bouchent les pores favorisant ainsi le ruissellement. C'est ce processus qui peut expliquer la liaison négative qui semble paradoxale entre Li et SG. (Plus il y a de sables grossiers plus l'infiltration est faible). La limite entre les deux rôles contradictoires des sables grossiers n'est pas facile à définir car elle ne dépend pas seulement du taux de sable grossier mais aussi des pourcentages de sable fin et de limon avec lesquels le sable grossier est associé et surtout du pourcentage d'argile, la stabilité augmentant avec le pourcentage d'argile. Toutes choses étant égales par ailleurs, la stabilité de deux sols ayant le même taux de sable grossier dépendra du pourcentage d'argile, mais pour deux sols ayant le même pourcentage d'argile la stabilité dépendra du taux de sable grossier.

— La mauvaise liaison entre la lame infiltrée et le taux d'argile s'explique elle aussi par les deux rôles opposés que peut jouer l'argile qui d'un côté favorise une bonne structure (pourcentage de vrais agrégats élevé) mais qui au-dessus d'un certain seuil provoque une imperméabilisation relative du sol. Il semble que le seuil entre ces deux actions contradictoires de l'argile se situe autour d'un pourcentage de l'ordre de 40%.

— Si l'on considère l'ensemble des sols, la meilleure liaison est obtenue entre Li et les pourcentages de vrais agrégats particulièrement avec Ag B-SG qui met en évidence l'influence de la matière organique sur la structure. (On peut constater que Ag B-SG est bien lié avec le taux de matière organique, alors que Ag E-SG et Ag A-SG sont plus liés au pourcentage d'argile). La liaison est meilleure entre les agrégats vrais et Li qu'entre Li et le taux de matière organique ce qui semblerait montrer que la matière organique n'agirait pas directement sur l'infiltration mais par l'intermédiaire de la structure, un taux important de matière organique favorisant une bonne structure.

Afin d'essayer d'améliorer les liaisons entre les lames infiltrées et les différentes variables, nous avons séparé l'ensemble des sols en trois groupes en fonction de critères pédologiques.

Groupe 1 : Sols sans horizons gravillonnaires. Ce sont les sols de bas de pente ou de bas-fond en général à tendance hydromorphe. Cette catégorie regroupe le site III de Taï et de l'Amitioro et les sites II du Nion II et de l'Agbéby soit 15 parcelles.

Groupe 2 : Sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire profond. Dans ce groupe on trouve le site I de l'Agbéby et du Nion II, le site II de Taï et les sites II et III du Loué ce qui représente 16 parcelles.

Groupe 3 : Sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire à faible profondeur (sommet de l'horizon à moins de 15 cm sous la surface). Ce groupe concerne les sites I de Taï et du Loué et les sites I et II de l'Amitioro soit 14 parcelles.

4.2.2.1. Sols sans horizon gravillonnaire

On trouvera dans le tableau 9 les coefficients de corrélation entre les différentes variables pour ce groupe de sols.

TABLEAU 9

	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
SG	0,148	0,065	0,343	0,841	-0,621	-0,309	-0,672	-0,214	-0,586	-0,625	1,000
Ag-SG	0,615	0,679	0,511	-0,310	0,801	0,774	0,955	0,536	0,991	1,000	
Ag E-SG	0,643	0,724	0,558	-0,309	0,817	0,746	0,959	0,467	1,000		
Ag B-SG	0,562	0,155	0,317	0,346	-0,045	0,759	0,274	1,000			
Ag A-SG	0,466	0,694	0,430	-0,501	0,940	0,617	1,000				
M.O.	0,703	0,521	0,542	0,132	0,385	1,000					
Arg	0,266	0,663	0,322	-0,628	1,000			15 parcelles			
Ag B	0,444	0,139	0,496	1,000							
Ag E	0,901	0,912	1,000								
Ag A	0,769	1,000									
Li	1,000										

La lame infiltrée semble bien corrélée avec trois variables, les taux d'agrégats stables après traitement à l'alcool (Ag A), sans prétraitement (Ag E) et de matière organique (M.O.), mais faiblement avec le pourcentage d'argile. L'infiltration dans ces sols dépend essentiellement de la structure de l'horizon de surface.

A partir des éléments du tableau 9, nous avons essayé des corrélations linéaires multiples pour trouver une formule permettant de reconstituer la lame infiltrée à partir des caractéristiques du sol. Pour la reconstitution nous avons utilisé comme première variable explicative celle qui est la mieux corrélée à Li (Ag E). Pour espérer un gain sensible d'explication, la deuxième variable doit être bien corrélée avec Li et le plus faiblement possible avec la première variable explicative (ce qui exclut Ag A). Nous avons retenu comme deuxième variable le taux de matière organique. La relation entre ces trois variables s'exprime par l'équation

$$Li = 2,64 Ag E + 13,82 M.O. - 138,1 \quad (1)$$

avec pour les 15 parcelles un coefficient de détermination multiple $R^2 = 0,878$ soit un coefficient de corrélation multiple $R = 0,937$.

4.2.2.2. Sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire profond

Les valeurs des coefficients de corrélation entre les différentes variables pour ce groupe de sols sont reportées dans le tableau 10.

TABLEAU 10

	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	$\overline{Ag-SG}$	SG
SG	-0,556	-0,408	-0,441	-0,361	-0,807	-0,911	-0,919	-0,897	-0,909	-0,922	1,000
$\overline{Ag-SG}$	0,830	0,703	0,748	0,643	0,854	0,908	0,987	0,973	0,997	1,000	
Ag E-SG	0,839	0,737	0,774	0,621	0,861	0,879	0,994	0,953	1,000		
Ag B-SG	0,810	0,608	0,691	0,735	0,787	0,950	0,925	1,000			
Ag A-SG	0,804	0,733	0,746	0,546	0,876	0,855	1,000				
M.O.	0,657	0,425	0,514	0,602	0,651	1,000					
Arg	0,677	0,630	0,623	0,437	1,000						16 parcelles
Ag B	0,861	0,658	0,791	1,000							
Ag E	0,964	0,961	1,000								
Ag A	0,910	1,000									
Li	1,000										

La lame infiltrée est bien liée à tous les pourcentages d'agrégats mais particulièrement avec Ag E. Bien que nettement moins bonne qu'avec les taux d'agrégats la liaison entre Li et les pourcentages de matière organique ou d'argile n'est pas négligeable. Les coefficients de corrélation entre la lame infiltrée et les taux de matière organique ou d'argile étant du même ordre de grandeur, c'est avec l'utilisation de M.O. qui est moins lié à Ag E, comme deuxième variable explicative, qu'on obtiendra le gain le plus grand dans la reconstitution de Li. La relation Li (Ag E, M.O.) s'exprime par l'équation

$$Li = 3,64 Ag E + 2,29 M.O. - 217,7 \quad (2)$$

Pour les 16 parcelles, le coefficient de détermination multiple $R^2 = 0,964$ ($R = 0,982$).

4.2.2.3. Sols ferrallitiques à horizon gravillonnaire peu profond

On peut constater dans le tableau 5 que les pourcentages d'agrégats stables trouvés à l'analyse pour les sols de l'Amitioro et particulièrement pour le site II sont très faibles. Ces résultats sont d'autant plus surprenants qu'ils ne correspondent pas à la description des sols faite par C. Valentin qui avait noté au contraire une très bonne structure de ces sols avec en particulier un pourcentage important d'agrégats de petite taille. Ce décalage peut être attribué à deux causes ; les sols de l'Amitioro sont très riches en limons (pourcentage toujours supérieur à 30% alors que pour les autres sols testés il dépasse rarement 15 à 20%), il est possible qu'une fraction non négligeable des agrégats formés par la coalescence de ces limons soit d'une taille inférieure à 0,2 mm et ne soit donc pas détectée

à l'analyse. Il est possible également que la différence provienne d'un comportement des agrégats à la réhumectation qui n'est pas le même dans le milieu naturel où ils sont maintenus à un degré d'humidité assez fort et sur un sol séché artificiellement (phénomène d'éclatement des agrégats à la réhumectation sur un sol sec), d'autant plus que les sols du site II de l'Amitiéro sont pauvres en argile et que donc les agrégats sont fragiles. Nous n'avons donc pas utilisé les résultats du site II de l'Amitiéro pour établir la matrice des coefficients de corrélation (tableau 11).

TABLEAU 11

	Li	Ag A	Ag E	Ag B	Arg	M.O.	Ag A-SG	Ag B-SG	Ag E-SG	Ag-SG	SG
SG	-0,863	-0,638	-0,534	-0,337	-0,362	-0,717	-0,931	-0,811	-0,862	-0,916	1,000
Ag-SG	0,785	0,847	0,788	0,549	0,403	0,691	0,976	0,893	0,970	1,000	
Ag E-SG	0,681	0,913	0,889	0,398	0,596	0,544	0,978	0,765	1,000		
Ag B-SG	0,817	0,601	0,537	0,823	-0,034	0,800	0,786	1,000			
Ag A-SG	0,745	0,874	0,789	0,362	0,546	0,640	1,000				
M.O.	0,741	0,431	0,258	0,575	-0,143	1,000					
Arg	0,001	0,641	0,672	-0,399	1,000						
Ag B	0,480	0,344	0,349	1,000							
Ag E	0,357	0,946	1,000								
Ag A	0,429	1,000									
Li	1,000										

C'est dans ce groupe de sols que les liaisons entre Li et les différentes variables sont les plus faibles. Ces mauvaises liaisons peuvent s'expliquer de la manière suivante :

— Ce groupe est plus hétérogène que les deux précédents puisqu'il recouvre à la fois des sols où l'horizon gravillonnaire affleure la surface (cas de Taï) et d'autres où cet horizon gravillonnaire est surmonté d'un recouvrement sableux qui même s'il est peu épais n'a pas les mêmes caractéristiques hydrodynamiques que l'horizon gravillonnaire.

— Nous avons essayé pour améliorer les liaisons de prendre les caractéristiques non pas de l'horizon de surface mais celles de l'horizon gravillonnaire. Cet essai n'a pas été concluant. Il faut dire que dans le cas des horizons gravillonnaires, les gravillons occupant 60 à 80% du volume, la détermination des pourcentages d'agrégats qui se fait sur la terre fine emballant ces gravillons n'a pas beaucoup de signification et n'est guère représentative de la structure de ces horizons, ce qui explique en partie les faibles liaisons Ag-Li du tableau 13, le pourcentage d'agrégats des sols de Taï n'ayant pas la même signification que pour les autres sols.

— Il est probable que pour les sols où l'horizon gravillonnaire est surmonté d'un recouvrement sableux l'infiltration n'est pas contrôlée uniquement par l'horizon de surface, mais, en fonction de l'état d'humectation du sol, soit par l'horizon de surface quand le sol est sec, soit par l'horizon gravillonnaire quand l'horizon de surface est saturé. La quantité d'eau nécessaire pour arriver à la saturation de l'horizon de surface dépendant de ses caractéristiques intrinsèques doit varier d'un sol à l'autre. Pour une même valeur de IK, on doit avoir une infiltration qui est contrôlée dans certains sols par l'horizon de surface et pour d'autres par l'horizon gravillonnaire.

— Faute de mieux, nous avons utilisé les valeurs de l'horizon de surface pour reconstituer les valeurs de Li. Le tableau 11 met en évidence le fait que les meilleures liaisons sont obtenues entre Li et les différents pourcentages d'agrégats vrais (particulièrement Ag B-SG) et avec le taux de sable grossier (avec une liaison négative). Ces résultats peuvent s'interpréter de la manière suivante. L'infiltration est conditionnée par la structure du sol qui est donnée par le pourcentage d'agrégats vrais, surtout les plus résistants (Ag B-SG), l'action des agrégats étant contrebalancée par le taux de sable grossier qui fragilise les agrégats et facilite donc la destruction de la structure. Pour des sols ayant la même structure (même pourcentage d'agrégat), plus le taux de sable grossier est fort plus cette structure sera facilement détruite et plus l'infiltration sera faible. La liaison entre lame infiltrée, taux d'agrégats vrais et sable grossier s'exprime par la formule

$$Li = 0,64 (Ag B-SG) - 1,75 \cdot SG + 82,8 \quad (3)$$

Le coefficient de détermination multiple pour les 10 parcelles $R^2 = 0,785$ ($R = 0,886$) est le plus faible des trois groupes pour les raisons précédemment évoquées.

4.2.3. Utilisation pratique des caractéristiques des sols

A partir des caractéristiques des sols, il est possible par l'utilisation des formules 1, 2 et 3 de reconstituer les lames infiltrées correspondant à une pluie de 100 mm et pour une valeur de $IK = 50$. Des lames infiltrées, on passe aux lames ruisselées puis aux valeurs $Lr \cdot S$ qui permettent de calculer Kr 120.

A titre d'exemple, nous avons, à partir des caractéristiques des sols mesurées sur les différents bassins étudiés, reconstitué les valeurs des lames ruisselées des différents sites. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 12.

La reconstitution n'est bien sûr pas parfaite (fig. 5) mais nous pensons que les mesures ultérieures permettront d'affiner les formules 1, 2 et 3 et d'arriver à une précision acceptable dans les reconstitutions des lames ruisselées. Les caractéristiques pédologiques utilisées dans les formules 1, 2 et 3 étant facilement déterminables même par un laboratoire relativement rudimentaire, cela permettrait une application très étendue de la méthode.

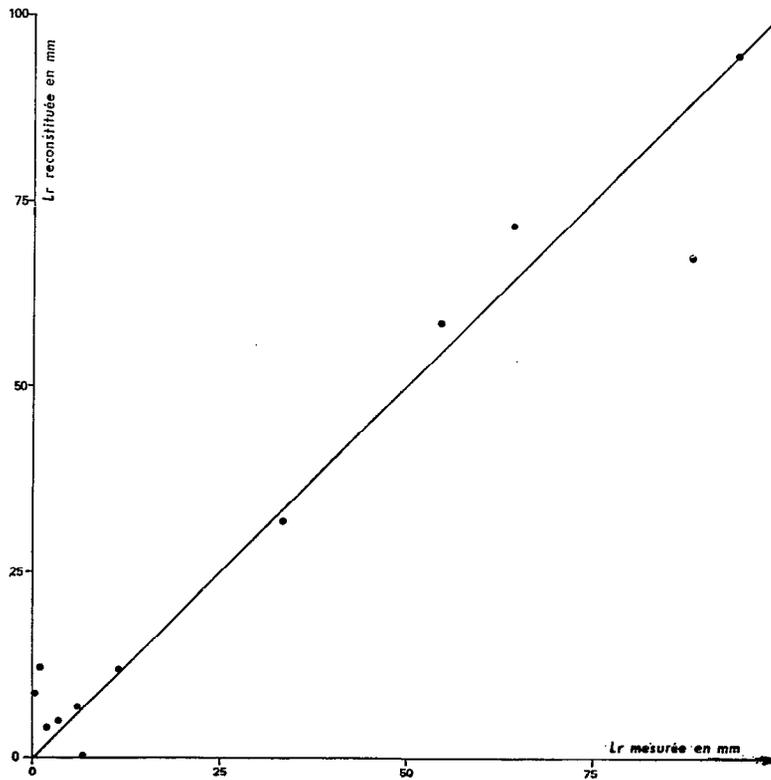


Fig. 5. — Relation entre lames ruisselées reconstituées et mesurées

TABLEAU 12

Bassin	Site	Parcelle	Li reconstituée	Li médiane	Lr reconstituée	Lr mesurée	
Tai	I	2	18,1	28,0	72,0	64	
		3	28,0				
		4	29,3				
	II	6	9,5	5,7	94,3	94	
		7	4,9				
		8	5,7				
	III	9	24,8	32,5	67,5	88	
		10	16,9				
		11	40,2				
		12	45,4				
	Loué	I	1	68,1	68,1	31,9	33,3
			2	79,2			
3			64,8				
II		4	96,7	93,3	6,7	5,8	
		5	89,8				
III		6	96,2	88,1	11,9	11,5	
		7	82,2				
		8	88,1				
Nion II	I	1	97,1	100	0	6,5	
		2	100				
		3	100				
		4	100				
	II	5	95,2	95,2	4,8	3,1	
		6	89,6				
		7	100				
Agbéby	I	1	86,7	87,7	12,3	0,75	
		2	87,0				
		3	92,7				
		4	88,4				
	II	5	91,9	96,0	4,0	1,9	
		6	84,8				
		7	100				
		8	100				
Amitiéro	I	9	88,2	91,3	8,7	0	
		10	84,3				
		11	94,4				
		12	100				
	III	1	41,5	41,4	58,6	54,5	
		2	41,3				
		3	45,5				
		4	18,8				

V. CONCLUSIONS

Les cinq campagnes de mesure ont permis d'arriver à des relations entre résultats du simulateur et coefficients de ruissellement des bassins qui, si elles ne sont pas parfaites, permettent cependant d'envisager, d'ores et déjà, l'utilisation du simulateur pour traiter un cas pratique. Cela suppose, bien entendu, que pour les bassins à étudier on dispose d'une carte pédologique. Dans le cas contraire, il faudra faire précéder la campagne de simulateur d'une reconnaissance pédologique permettant de déterminer les grands types de sols du bassin. Plutôt qu'une cartographie classique, il serait bon d'utiliser la méthode développée par les pédologues de l'ORSTOM en Guyane (Boulet et al.)

et de tracer des courbes d'iso-différenciation (courbes joignant les points d'apparition ou de disparition de certains critères). On peut penser qu'en zone forestière 2 à 3 courbes d'iso-différenciation, celle délimitant la zone où affleure l'horizon gravillonnaire, celle séparant les sols ferrallitiques des sols hydromorphes et éventuellement celle séparant les sols ferrallitiques rouges et jaunes, seraient suffisantes pour implanter les sites de mesure au simulateur et calculer les valeurs $Lr \cdot S$.

Les relations entre lames infiltrées et caractéristiques des sols nous permettent de penser qu'il n'est pas irréaliste d'espérer que, dans un avenir un peu plus lointain, on arrive à déterminer le coefficient de ruissellement d'un bassin non étudié à partir de simples critères pédologiques en passant par le schéma suivant :

- A partir d'une carte en courbes d'iso-différenciation, détermination des surfaces occupées par les principaux types de sols et positionnement des lieux de prélèvement pour analyse,
- Analyse des sols,
- Calcul à partir des résultats des analyses des lames infiltrées correspondant à chaque site représentatif d'un type de sol,
- A partir de la valeur médiane des lames infiltrées calculées, reconstitution de la lame ruisselée,
- Calcul des valeurs $Lr \cdot S$ pour chacun des sites,
- A partir de la valeur $\Sigma Lr \cdot S$, calcul de $Kr 120$.

Notons toutefois qu'il serait imprudent d'utiliser à l'heure actuelle les relations entre lames infiltrées et caractéristiques des sols pour traiter un cas pratique, ces formules ayant été établies sur un nombre de parcelles beaucoup trop faible pour qu'on puisse espérer en généraliser les résultats. Pour l'instant, seule une campagne de simulation de pluie peut permettre de déterminer le coefficient de ruissellement à utiliser pour l'estimation de la crue décennale d'un bassin inconnu. Encore faudra-t-il, avant de généraliser cette nouvelle méthode, s'assurer que les relations obtenues pour la zone forestière de Côte d'Ivoire sont valables dans les autres pays. Les mesures qui ont débuté au Cameroun (Bassin d'Ottotomo dont les résultats semblent en accord avec ceux de Côte d'Ivoire) et qui doivent démarrer prochainement au Congo devraient permettre d'arriver à ce résultat.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- BOULET (R.), FRITSCH (J.M.), LESCURE (J.P.) – 1980 – L'opération ECEREX. Etude multidisciplinaire de l'écosystème forestier guyanais et son évolution sous l'effet de divers types d'exploitation. *ORSTOM*, Cayenne.
- BRUNET-MORET (Y.) – 1967 – Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Côte d'Ivoire. *CIEH-ORSTOM*.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.) – 1978 – Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers. Campagne 1977. *CIEH-ORSTOM*, Adiopodoumé.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.) – 1979 – Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers. Campagne 1978. *CIEH-ORSTOM*, Adiopodoumé.
- CASENAVE (A.) – 1981 – Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Rapport final. *CIEH-ORSTOM*, Adiopodoumé.
- CASENAVE (A.) et al. – 1980, 1981 – Etude hydrologique des bassins de Taï : Campagnes 1978-1979. *ORSTOM*, Adiopodoumé. Campagne 1980. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- DUBREUIL (P.) – 1960 – Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire. Rapport général. Tome I : Zone forestière. *ORSTOM*, Paris.
- FRITSCH (E.) – 1980 – Etude pédologique et représentation cartographique à 1/15 000^e d'une zone de 1 600 ha, représentative de la région forestière du Sud-Ouest Ivoirien. Rapport d'élève, 2^e année. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- GERAEDTS (J.), CASENAVE (A.), SIMON (J.M.) – 1981 – Etude des caractéristiques hydrodynamiques de sols tropicaux à l'aide d'un simulateur de pluie. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- GIRARD (G.) – 1963 – Etude du bassin versant de la rivière Agnéby. Résultats des campagnes 1961-1962. Tome I : Les bassins supérieur et moyen. Tome II : Le bassin inférieur. *ORSTOM*, Paris.
- HENIN (S.) – 1976 – Cours de physique du sol. *ORSTOM-EDITEST*.

- HUNINK (J.A.), CASENAVE (A.), SIMON (J.M.) – 1980 – Study of hydrological characteristics of forest soils with the aid of a rain simulator. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- KHEYRABI (D.), MONNIER (G.) – 1968 – Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agr.*, 19 (2), pp. 129-152.
- MULLER (J.P.) – 1979 – Niveaux d'organisation des sols du bassin versant représentatif d'Ottotomo. Introduction à une recherche de systèmes hydrodynamiques en milieu ferrallitique. *ORSTOM-ONAREST*, Yaoundé.
- SIRCOULON (J.) – 1967 – Bassins de l'Amitioro. Etude du ruissellement et de ses facteurs conditionnels climatologiques. Tome I et II. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- RODIER (J.A.) – 1976 – Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Etude préliminaire. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, 4.
- RODIER (J.A.), AUVRAY (C.) – 1965 – Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. *CIEH-ORSTOM*.
- VALENTIN (C.) – 1979 – Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers. Description du milieu naturel des sites expérimentaux du Mont Tonkouï (Man-Côte d'Ivoire). *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- VALENTIN (C.) – 1980 – Description des sols testés par le laboratoire d'Hydrologie : Bassin versant du Nion. *ORSTOM*, Adiopodoumé.
- VUILLAUME (G.) – 1974 – L'abattement des précipitations journalières en Afrique Intertropicale. Variabilité et précision de calcul. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XI, 3.