

Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale

Étude préliminaire *

J. A. RODIER
Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM
Conseiller Scientifique à ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

RÉSUMÉ

On a essayé d'exploiter à fond les données rassemblées par l'ORSTOM de 1956 à 1976 sur 27 bassins représentatifs forestiers tropicaux pour en tirer des règles préliminaires pour le calcul des crues décennales.

La crue décennale a été calculée sur tous les bassins observés pour une averse journalière de 120 mm.

Le coefficient de ruissellement varie de 3 à 62%. Pour évaluer ce coefficient sur des bassins non étudiés, on a considéré 6 catégories en fonction du type de sol en premier lieu et de la pente comme facteur secondaire.

Les temps de montée et de base sont donnés en fonction de la superficie et de la pente avec un facteur correctif : l'indice de compacité.

Le coefficient d'abattement des précipitations est donné d'après les derniers résultats des recherches de G. Vuillaume.

L'étude met en évidence la nécessité d'étudier à fond les relations entre structure des divers sols argileux et perméabilité en saison des pluies.

ABSTRACT

In this paper, an attempt has been made, by using the data collected by ORSTOM from 1956 to 1976 on 27 tropical forest basins, for obtaining preliminary guidances for the computation of characteristics of ten-year floods.

The ten-year floods has been studied on all these basins for the same daily precipitation of 120 mm.

The runoff coefficient is comprised between 3 and 62%. For the estimation of runoff coefficient for non-observed basins, 6 categories were considered in relation with the soil-type at first and with the slope as a secondary factor.

The rise time and the surface runoff time are given in relation with the area and the slope of the basin with a corrective factor : the compacity index.

The reduction coefficient between point rainfall and areal rainfall for the same frequency is given from the last research of G. Vuillaume on this subject.

The study shows the necessity of exhaustive researches of the relations between structure of various clay soils and permeability during rainy season.

En 1965, à la demande du Comité interafricain d'études hydrauliques, l'ORSTOM mettait au point une note technique pour « l'estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale ».

Cette étude devait porter également sur les bassins forestiers, mais après analyse des résultats des douze bassins représentatifs forestiers étudiés à cette époque, il s'avéra impossible d'élaborer des règles précises pour le calcul des crues dans les zones couvertes par la forêt. En effet, si certains bassins qui correspondaient à des cas très fré-

* Etude réalisée à l'initiative du C.I.E.H. et sur financement du Ministère de la Coopération.

quents présentaient de faibles ou très faibles coefficients de ruissellement, d'autres ruisselaient très facilement (coefficient de ruissellement supérieur à 50%) sans qu'il soit possible de bien démêler les causes ; l'action des deux principaux facteurs : perméabilité du sol et pente est complexe et leur influence, si elle s'avérait significative, ne pouvait pas être chiffrée à cette époque. Quant aux éléments de l'hydrogramme : temps de montée et temps de base, ils étaient également très variables d'un bassin à un autre et là aussi la recherche systématique des facteurs explicatifs de ces variations était pratiquement impossible ; c'est pourquoi la note de 1965 présentait uniquement les résultats obtenus sur les bassins représentatifs. Ces données indiquaient de vagues tendances sans donner de règles de calcul pour les bassins forestiers.

Depuis 1965, l'ORSTOM, avec les encouragements du CIEH, a cherché à combler cette lacune mais l'implantation d'un bassin versant forestier à fort ruissellement, sur lequel on pourrait procéder à des recherches approfondies, a été en définitive beaucoup plus laborieuse et plus longue qu'il n'avait été prévu. Un essai effectué au Cameroun n'a pas donné les résultats escomptés. Cependant, les constructeurs d'axes routiers et de voies ferrées dans ces régions ont de plus en plus besoin de données de base pour le calcul des caractéristiques des ouvrages de franchissement des rivières et ne peuvent plus attendre davantage. C'est pourquoi, en accord avec le CIEH, il a été convenu que l'ORSTOM, avec les données des bassins représentatifs étudiés jusqu'à 1976, mettrait au point une note préliminaire, tandis qu'un ensemble de recherches systématiques portant à la fois sur la physique du sol et sur le ruissellement serait entrepris sur des bassins représentatifs situés dans les zones les plus dangereuses.

Une Convention a été signée à cet effet le 9 septembre 1976 entre le CIEH et l'ORSTOM pour l'étude des débits de crue décennale des bassins de superficie inférieure à 200 km² en zone forestière, et c'est en exécution de ce contrat que la présente note préliminaire a été mise au point. Elle concerne les forêts de Côte-d'Ivoire, du Cameroun où les études réalisées sur le bassin d'Ottotomo ont été faites en collaboration avec l'ONAREST, du Gabon et de la République populaire du Congo.

CONDITIONS GÉNÉRALES DE FORMATION DES CRUES DANS LES FORÊTS D'AFRIQUE TROPICALE

La formation d'une crue, dont les variations de débits sont matérialisées par le tracé de l'hydrogramme (courbe des débits en fonction du temps), dépend de plusieurs facteurs conditionnels.

D'abord des facteurs constants dans le temps :

- topographie du bassin (superficie, forme, pente) ;
- caractéristiques du réseau hydrographique (en arête de poisson, en éventail, tracé rectiligne, méandres, etc.) ;
- nature du sol.

L'altitude, facteur essentiel dans les régions tempérées, apparaît le plus souvent secondaire en régime tropical dans le cas des pays faisant partie du CIEH, bien que son action sur les hauteurs de précipitations annuelles et journalières soit importante.

Puis des facteurs variables dans des proportions différentes d'une année à l'autre et, généralement, d'un moment de l'année à l'autre :

- précipitations (hauteur, répartition spatiale, intensité, fréquence) ;
- état de saturation du bassin ;
- couverture végétale ;
- évapotranspiration ;
- influence des nappes souterraines ;
- débordement dans les lits majeurs.

Il est facile de voir que ces facteurs sont liés physiquement les uns aux autres suivant des lois complexes, ce ne sont donc pas des variables indépendantes. Notons qu'en forêt, même si elle est dégradée, la couverture végétale peut être considérée comme un facteur constant, sauf bien entendu si la moitié du bassin est couverte de champs de manioc. L'évapotranspiration annuelle varie assez peu en saison des pluies et pour les petits bassins, en général, les débordements dans les lits majeurs sont beaucoup moins importants qu'en zone aride. On verra cependant qu'il est des cas où on ne peut pas négliger leur influence.

En forêt, le ruissellement en nappe tel qu'il est observé en régions arides ou semi-arides est très rare, heureusement.

Très souvent, les averses petites ou moyennes donnent lieu à de l'écoulement intermédiaire (appelé autrefois écoulement hypodermique), mais pour les crues moyennes ou fortes, on observe une forme d'écoulement sur la litière de feuilles mortes qui couvre le sol, dans cette litière ou à son contact avec le sol. Cet écoulement est beaucoup plus rapide que l'écoulement intermédiaire, mais nettement moins que le ruissellement superficiel en savane.

Cet écoulement se produit lorsque les couches superficielles du sol sont saturées, ce qui arrive assez souvent en forêt, surtout lorsqu'une couche d'argile imperméable se trouve à faible profondeur dans le sol. On reviendra plus loin sur ce dernier point.

Si on essaie d'interpréter statistiquement le facteur « hauteur de pluie », seul observé pendant plusieurs décennies, on constate qu'il est possible en général d'ajuster une loi mathématique simple à la distribution naturelle des valeurs annuelles jusqu'à des fréquences de l'ordre de 1/20, peut-être 1/50 pour les précipitations maximales annuelles, 1/50 ou peut-être 1/100 pour les hauteurs de précipitations annuelles.

Si l'on se livre à la même opération sur les valeurs des débits maximaux de crue, on constate tout d'abord que seuls les cours d'eau d'une certaine importance, par exemple pour des bassins plus étendus que 10 000 km², présentent des relevés de durée suffisante pour permettre des études statistiques directes.

Pour les moyens cours d'eau les plus favorisés, une dizaine ou une quinzaine de relevés annuels permettent des corrélations susceptibles de donner lieu à des évaluations des débits de crue de fréquence assez faible.

Enfin, pour les bassins de superficie inférieure à 200 km², il n'existe aucune série de relevés permettant des études statistiques directes. Le seul moyen d'évaluer les caractéristiques des crues de fréquence rare consiste à étudier quelques années sur petits bassins représentatifs, l'opérateur permettant de passer des pluies aux débits pour les fortes averses, et de reconstituer les crues de fréquence rare à partir de leur cause principale, les averses de caractère exceptionnel (par ce terme nous entendons non seulement les averses de hauteur exceptionnelle, mais également les averses de hauteur plus courante survenant dans des conditions de saturation exceptionnelle).

PRINCIPES DU CALCUL DES CRUES EXCEPTIONNELLES SUR LES PETITS BASSINS

Si la crue ne dépendait que de la hauteur de l'averse génératrice, la crue décennale correspondrait exactement à l'averse de hauteur décennale. En fait, les phénomènes sont plus complexes.

Supposons qu'il n'y ait qu'un facteur secondaire : l'humidité du sol au début de l'averse. Une averse décennale pourra provoquer une crue de débit supérieur ou inférieur à la crue décennale, suivant que l'humidité du sol sera anormalement forte ou anormalement faible. Inversement, une averse de hauteur inférieure à l'averse décennale pourra donner une crue décennale si le sol est particulièrement humide.

Pour simplifier, nous avons dans nos calculs admis que la crue décennale était provoquée par une averse de hauteur décennale présentant des caractéristiques de répartition spatiale et temporelle correspondant à des situations médianes pour les fortes averses, et rencontrant des conditions d'humidité du sol et de couverture végétale correspondant également à des situations médianes. L'opération est d'autant plus hasardeuse que les facteurs autres que la hauteur de précipitations, surtout l'humidité du sol, jouent un rôle plus important.

La méthode correcte, pour calculer la crue décennale, consisterait à ajuster un modèle pluie/débit sur les fortes et très fortes crues, et à reconstituer à l'aide de ce modèle la totalité des crues à partir d'une série de précipitations journalières d'une quarantaine d'années. Ceci a déjà été fait, mais il faudrait après transposer le modèle à des bassins non étudiés. Il serait prématuré et imprudent de recommander systématiquement cette transposition en zone forestière où, par surcroît, les données pluviométriques sont souvent de mauvaise qualité.

Heureusement, l'erreur qui résulte du calcul de la crue décennale, à partir de l'averse décennale, est moins à craindre sur les bassins les plus propices au ruissellement, donc les plus dangereux, et où il convient d'éviter autant que possible de graves erreurs dans l'estimation des crues. Il est heureux également que, généralement dans le cas de tornade, le hyétogramme présente des formes semblables d'une averse à l'autre, et que pour 25 km², l'averse couvre assez bien le bassin, ce qui réduit l'importance des deux facteurs : répartition spatiale et temporelle des précipitations.

L'averse étant connue, on doit en déduire la crue correspondante. Pour les bassins de superficie inférieure à 50 km² on peut, en général, utiliser la méthode de l'hydrogramme unitaire. Les principes essentiels de cette méthode sont les suivants : pour une averse homogène dans l'espace, dont la durée à forte et à moyenne intensité est inférieure à une limite donnée (en pratique, moins de la moitié du temps de montée de la crue), tous les hydrogrammes de ruissellement ont la même forme : ce sont des courbes affines.

Une averse de durée supérieure à la durée limite peut être décomposée en deux ou plusieurs averses de durée inférieure à la durée limite, et les hydrogrammes en résultant peuvent être ajoutés avec un décalage dans le temps égal au décalage entre les centres de gravité des averses composantes. A chaque bassin correspond donc un hydrogramme type qu'on appelle « diagramme de distribution » et qui peut être défini pratiquement par un petit nombre de caractéristiques : la surface comprise entre ce diagramme et l'axe des abscisses, la base de ce diagramme grossièrement triangulaire : temps de base (T_b) ou durée du ruissellement, et un troisième facteur dont nous parlerons plus loin, correspondant au caractère plus ou moins aigu de la pointe.

La première caractéristique, surface définie par l'hydrogramme, est égale à :

$$\int_0^{T_b} Q dt$$

Elle peut être obtenue à partir du volume total de précipitations V_P sur la surface du bassin versant, en multipliant V_P par le coefficient de ruissellement K_R .

Dans certains cas, en particulier pour des terrains perméables, on a utilisé diverses variantes de la méthode dite de la capacité d'infiltration : on retranche les pertes par infiltration en mm/h de l'intensité de l'averse en mm/h sur le diagramme de l'averse, et on en déduit le volume de ruissellement. Mais il faut alors connaître ces pertes par infiltration pour les diverses époques de l'année, pour les conditions de saturation du sol et pour les diverses durées d'averses. Cette méthode, plus rationnelle mais beaucoup plus difficile que la méthode du coefficient de ruissellement, a été assez peu utilisée, mais on y reviendra peut-être. Elle rend pour le moment de grands services dans des cas particuliers.

Mais, dans la plupart des cas, on utilise le coefficient de ruissellement. Ceci suppose, bien entendu, que l'on puisse estimer la valeur décennale de V_P , c'est-à-dire la valeur décennale de la hauteur de précipitation moyenne sur la surface du bassin : nous y reviendrons plus loin.

La seconde caractéristique, temps de base, peut être déterminée par l'étude systématique des diagrammes de distribution.

La troisième peut être définie par un coefficient :

$$K = \frac{Q \max_r}{M}$$

— $Q \max_r$: débit maximal de ruissellement de la crue décennale.

— M : débit moyen de ruissellement calculé pour la crue décennale pendant un temps égal au temps de base.

Le facteur K , qui est lié au caractère plus ou moins massif de l'hydrogramme, est surtout fonction des facteurs géomorphologiques relatifs au bassin et à son réseau hydrographique.

Dans ces conditions, la détermination de la crue décennale peut être effectuée comme suit :

1) On estime la hauteur de pluie décennale ponctuelle.

2) On détermine la hauteur de précipitation moyenne sur le bassin de fréquence décennale en multipliant la hauteur ponctuelle par un coefficient de réduction ou coefficient d'abattement. La surface S étant connue, on en déduit V_P .

3) Si le bassin est petit, avec un temps de montée inférieur à 2 ou 3 heures (voir 5), on se fixe la hauteur de précipitations pour la période de forte intensité, qu'on admet continue et variant de 4 heures à 5 heures, suivant la hauteur de précipitations décennales ponctuelles.

4) La connaissance des caractéristiques du bassin permet d'évaluer K_R correspondant à la crue décennale.

5) Les caractéristiques du bassin permettent d'estimer les temps de montée T_m et temps de base T_b , ce qui permet d'évaluer M si T_m n'est pas trop petit (voir 3). $M = V_P \frac{V_P}{T_b}$ en mètres cubes, T_b en secondes, M en mètres cubes par seconde.

6) Ayant choisi la valeur de K $\left(K = \frac{Q \max_r}{M} \right)$ correspondant au bassin, on détermine $Q \max_r$ (M étant connu) : $Q \max_r = K \cdot M$.

7) $Q \max_r$ correspond uniquement au ruissellement. On ajoute le débit de base pour obtenir le débit maximal total.

8) Si T_m est trop petit, on répartit la hauteur de précipitations et, par conséquent, le volume de ruissellement respectivement en averses et en crues successives de même durée, de telle façon que chaque averse élémentaire soit à peu près unitaire (pas trop supérieure à la moitié du temps de montée). Pour chaque crue élémentaire, on adopte la même valeur de K et les mêmes temps de base et temps de montée déterminés en 5). On ajoute les ordonnées des crues successives décalées dans le temps, comme il a été indiqué plus haut. On obtient ainsi l'hydrogramme de la crue et son débit maximal $Q \max_r$ supérieur au débit maximal le plus élevé des hydrogrammes élémentaires.

Pour ce qui précède, on voit que le calcul de la crue décennale exige la connaissance des données suivantes :

1) l'averse décennale ponctuelle ;

2) le coefficient d'abattement pour cette averse ;

3) le coefficient de ruissellement K_R pour la crue décennale ;

4) le temps de base T_b et le temps de montée T_m ;

5) le coefficient $K = \frac{Q \max_r}{M}$.

Quant au débit de base : débit des nappes plus en l'occurrence une partie du débit d'écoulement intermédiaire, il est difficile de donner des règles générales pour son estimation. On peut d'ailleurs le négliger lorsque le débit spécifique du maximum dépasse 1 500 ou 2 000 l/s·km².

BASE DE L'ÉTUDE

En ce qui concerne les données relatives à l'écoulement, toute l'information disponible a été recueillie au cours des observations sur 24 bassins représentatifs africains.

Après l'aménagement des deux premiers bassins représentatifs, celui de l'Ifou (Côte-d'Ivoire) et celui du Leyou (Congo), qui avaient mis en évidence des débits spécifiques de crue très faibles, les hydrologues de l'ORSTOM s'étaient évertués à observer des bassins pouvant donner lieu aux plus forts débits spécifiques de crues et, pour cela, on avait implanté des bassins représentatifs dans la région de Man (Côte-d'Ivoire) avec de fortes pentes et une hauteur de précipitations annuelle assez élevée : bassin du Nion II d'abord, puis bassins du mont Tonkouï : Loué et Gboa. On arriva ainsi à des coefficients de ruissellement plus élevés, mais la nature perméable des sols donnait à penser que l'on n'avait pas trouvé là les conditions optimales de ruissellement en forêt. C'est alors que pour l'étude générale du bassin de l'Agneby (Côte-d'Ivoire), l'ORSTOM a aménagé les trois bassins représentatifs de Guessigué : le Sitou, le Bafo et le Manso, malgré une pente modérée, on avait trouvé des coefficients de ruissellement de 59 à 63% pour la crue décennale. Il semblait bien qu'on avait trouvé les conditions optimales de ruissellement, mais si on était sûr que la nature du sol y était pour quelque chose, on ne voyait guère comment on pouvait généraliser ces résultats, car les causes de l'imperméabilité du bassin n'étaient pas simples.

Plus tard, à la demande de l'administration du Gabon, deux bassins de montagne : celui du Nzang et de la Mitzibé, ont été étudiés dans les Monts de Cristal. Les résultats étaient un peu plus élevés que ceux obtenus dans la région de Man, mais très inférieurs à ceux des bassins de Guessigué : une partie des sols était imperméable. Puis récemment, l'ATC demandait à l'ORSTOM d'étudier la région des monts du Mayombé (Congo) et deux bassins à très forte pente aménagés en terrain perméable : le Foubou et la Dzounza ont mis en évidence des débits un peu inférieurs à ceux du Tonkouï.

D'autre part, à l'occasion de l'étude de l'alimentation en eau de Libreville, qui comprenait les observations du bassin représentatif de Nziémé I, l'ORSTOM, recherchant des bassins imperméables, avait installé un bassin représentatif argileux sur marnes et argilites, bassin peu accidenté sur lequel on retrouva les conditions de ruissellement des bassins de Guessigué, avec un coefficient de ruissellement de 66% pour la crue décennale, il semble bien que pour les faibles pentes, ce soit là un maximum. Un autre essai sur bassins assez peu perméables sur schiste et plus accidentés : les bassins d'Ottotomo (Cameroun), n'avait pas conduit à un coefficient de ruissellement très élevé. Entre-temps, l'ORSTOM avait étudié les bassins de la route du Cacao : Miélékouka, I, II et III (Congo) avec des conditions de ruissellement voisines de celles du Tonkouï, un bassin assez peu accidenté et perméable, en Côte-d'Ivoire, l'Agbeby qui représente à peu près les conditions les plus défavorables pour l'écoulement, les bassins de l'Amitioro en terrain à faible pente, ceux de l'Avéa sur pente moyenne avec terrains argileux perméables, et celui de la Bilanga (Congo) avec pente faible et sols assez perméables.

En terrain plat ou à pente modérée, on connaît donc les conditions les plus favorables et les moins favorables au ruissellement, on connaît également les conditions de ruissellement sur très fortes pentes avec sols perméables ou sur un complexe de sols perméables et imperméables, mais on n'a pas observé de bassins imperméables sur toute leur superficie avec forte pente. On doit dire qu'en domaine forestier et ferrallitique, la majorité des sols est assez perméable. Seul un horizon superficiel dit fréquemment « horizon de consistance » peut présenter de faibles porosités et perméabilités relatives, mais étant donné l'importance des précipitations tout se passe comme si on avait un horizon imperméable. Malheureusement, on manque de critères simples pour définir un sol imperméable, pour les raisons que l'on exposera plus loin. Mais il paraît possible de dégager des ordres de grandeur valables pour un grand nombre de cas.

On a donc revu les données recueillies sur ces vingt-quatre bassins. On y a joint les résultats de trois bassins de Guyane : la crique Grégoire sur sous-sol granitique avec des recouvrements en partie imperméables, la crique Virgile sur schistes avec un horizon superficiel imperméable, la crique Cacao avec un sol perméable. Ces résultats s'intègrent parfaitement parmi les données sur les bassins africains constitués des mêmes types de sol.

Pour que les résultats : K_R , T_m , T_b et le coefficient $K = \frac{Q_{\max_r}}{M}$ soient comparables, on s'est astreint à suivre les mêmes règles pour déterminer le « ruissellement superficiel ». On sait que pour établir l'hydrogramme de ruissellement, on doit séparer la part de la crue relative aux apports des nappes souterraines et de l'écoulement intermédiaire (hypodermique) des apports du ruissellement superficiel, tel que nous l'avons présenté plus haut. Il s'agit surtout de définir des temps de montée et des temps de base bien déterminés. Au début de la crue, il y a une période de croissance presque insensible des débits dont la durée correspond aux conditions particulières de l'écoulement

à proximité de la station de mesure très variables d'un bassin à un autre. Cette période a été éliminée, on considère que la crue ne commence que lorsque l'hydrogramme s'écarte de façon significative de la tangente à la décrue précédente.

Après le maximum de la crue, l'hydrogramme présente à la décrue un tracé presque rectiligne, puis s'incurve pour présenter une décroissance moins brutale, c'est la fin de ce que nous appelons en forêt le « ruissellement superficiel ». On a admis que le ruissellement se termine au milieu de cette partie courbe et non à la fin, comme on le fait quelquefois. On joint ce point figuratif de la fin du ruissellement à celui représentant le début, comme cela a été défini plus haut, par une ligne droite. Cette façon de procéder, délicate pour les crues moyennes, est assez facile pour les fortes crues qui seules nous intéressent. Le temps qui s'écoule entre ces deux points est le temps de base, le temps compris entre le début du ruissellement et le maximum est le temps de montée. La superficie de l'aire comprise entre l'hydrogramme et la ligne droite de séparation définit le volume de ruissellement indispensable pour le calcul du coefficient de ruissellement K_R . Ces opérations doivent être faites sur des hydrogrammes unitaires, résultant en principe d'averses intenses de temps court par rapport au temps de montée. En fait, nous avons considéré des crues produites par des averses dont la durée (tout au moins en ce qui concerne les fortes et assez fortes intensités) est égale parfois à la moitié du temps de montée, et même un peu plus dans certains cas. L'erreur qui peut en résulter pour T_b est négligeable.

Dans ces conditions, les valeurs de K_R , T_m , T_b et K sont souvent légèrement différentes de celles que l'on pourra trouver dans les publications de l'ORSTOM, et en particulier le « Recueil de données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM ».

Enfin, pour faciliter encore la comparaison, nous avons calculé K_R 120. C'est-à-dire que nous avons calculé, à l'aide des différentes régressions établies pour chaque bassin représentatif, le coefficient de ruissellement pour une averse ayant les mêmes caractéristiques que l'averse décennale, mais avec une hauteur de 120 mm. Comme on pourra le constater, le calcul ne correspond qu'à une légère correction. L'averse est la même mais les conditions de saturation du sol peuvent être différentes, c'est pourquoi on a calculé le total des quatre hauteurs de précipitations mensuelles les plus élevées en année moyenne, ce qui permettra d'avoir une idée de l'influence de ce facteur; ce total est représenté par le symbole P_4 m.

On a donc reporté sur le tableau I pour chaque bassin, d'une part, les caractéristiques permanentes du bassin :

- Surface S .
- Précipitation annuelle en année moyenne.
- P annuelle.
- Le total P_4 m.

— L'indice global de pente I_g , pente moyenne du bassin qui, comme on le verra plus loin, ne définit que très imparfaitement toutes les caractéristiques du relief ayant une influence sur l'écoulement.

— I_g a été parfois corrigé pour tenir compte de pentes transversales très fortes ou, au contraire, très faibles; dans ce cas, les valeurs corrigées sont données entre doubles parenthèses, par exemple le Foubou a un indice global de pente de 10 m/km, et des pentes transversales de l'ordre de 80 m/km, la Dzounza un indice global de pente voisin de 20, et des pentes transversales qui sont de 150 m/km. Ce qui conduit, pour ce qui concerne K_R , à des indices de pente respectifs de ((50)) pour le Foubou, et de ((70)) pour la Dzounza.

— On présente ensuite les données concernant l'averse décennale, la hauteur ponctuelle P_{10} et la hauteur de l'averse décennale sur la surface du bassin $\overline{P_{10}}$, le rapport $\frac{P_{10}}{\overline{P_{10}}}$ est le coefficient d'abattement. Pour le Loué et

le Gboa on a conservé la valeur de $\overline{P_{10}}$ adoptée dans le rapport. elle est très faible mais elle tient compte de conditions d'exposition spéciales. Pour le calcul de K_R 120, on a supposé une averse à maximum 120 mm, assez bien répartie sur le bassin, avec les valeurs du coefficient d'abattement données par G. VUILLAUME : 0,91 et 0,93 au lieu de 0,50, K_R 120 est plus faible car dans l'ancien mode de calcul les précipitations de 200 mm sur la partie aval du bassin jouaient un rôle important, elles compensaient largement le déficit sur la partie amont.

— Enfin, les caractéristiques relatives à l'hydrogramme de la crue décennale K_R , T_m , T_b , K et K_R 120 défini plus haut; T_m , T_b et K correspondent à l'averse décennale ou à une averse unitaire de forte intensité, si le bassin est très petit et s'il faut décomposer l'averse en averses élémentaires (cas du Nzang et de la Mitzibé). Bien entendu T_m , T_b et K sont les mêmes pour l'averse décennale que pour l'averse de 120 mm.

— Une dernière colonne Q_0 donne le débit de base observé sur chaque bassin pour les averses dont l'hydrogramme a été utilisé pour le calcul de K .

Le débit maximal observé était chaque fois égal à $Q \max_r + Q_0$. Dans chaque cas, il s'agissait de très fortes crues souvent décennales. Q_0 qui est en rapport avec S , la perméabilité du sol et le degré de saturation du sol, est utile pour la dernière opération du calcul du débit de crue.

Plus loin, on examinera l'influence des indices de forme des bassins et d'un indice définissant la longueur du principal formateur.

C'est des données de ce tableau que partira toute l'analyse.

TABLEAU I
 ÉCOULEMENT DANS LES BASSINS VERSANTS FORESTIERS

Bassin	S (km ²)	P (mm)	P 4 m (mm)	P ₁₀ (mm)	\bar{P}_{10} (mm)	I _g (m/km)	K _R (%)	K _{R,120} (%)	T _m (h)	T _b (h)	k	Q ₀ (m ³ /s)
Sitou	27,8	1 770	1 000	120	104	5,5	62	62	11	22	2,30	2,1
Cr. Virgile	7,6	4 200	2 265	175	172	23,4	63	60	2	6	1,77	1,3
Manso	88	1 770	1 000	120	98	3,94	59	59	14	32	2,60	8,4
Bafo	26,7	1 770	1 000	120	104	6,5	59	59	8	20	1,80	1,2
Nziémé III	3,26	2 500	1 540	160	154	7	66	58	5	15	1,91	0,66
Cr. Grégoire	8,4	3 600	1 930	170	164	15,4	45	40	3	7,5	(2,8)	1
Nziémé I	73,6	2 500	1 540	160	128	6,95	41,5	37	8	30	1,95	10
Nzang	9,2	2 100	1 150	140	130	84	47	37	0,25	1,33	2,16	2,5
Miélek II	11,1	1 800	885	140	127	14,3	34,8	34	3,50	10	2,13	1
Nion I	75	1 800	1 005	121	102	(5,9)	34	34	20	70	2,06	2,5
Gboa	12,3	2 200	1 385	200	((100))	73	33	30	3	9	2,20	1,6
Loué	18,4	2 200	1 385	200	((100))	70	33	30	2,2	9	2,50	2,7
Miélek III	43	1 800	885	140	127	12,1	29,5	29	8	15	2,18	2,6
Foubou	38,5	1 400	889	130	109	((50))	27	24	2,66	10	2,35	1,10
Ottotomo III	23,6	1 700	990	105	90	7,8	19	23	10	21	2,06	0,70
Dzounza	3,1	1 400	889	130	125	((70))	24	22	1,25	4	1,62	0,06
Amitioro I	170	1 365	730	117	90	3,3	21	21	13	32	2,38	4
Mitzibé	6,7	2 100	1 150	140	132	109	28	22	0,33	1,13	2,53	1,1
Nion II	12,1	2 000	1 110	140	130	((40))	18	16	5	12	2,7	2,0
Miélé I	3,9	1 800	885	140	133	21,6	16	16	1,66	4,5	1,94	0,25
Cr. Cacao	13	3 800	2 050	170	163	85,8	15,5	13,5	1,5	4,0	2,3	2,20
Amitioro II	2,75	1 365	730	117	112	(20)	12,4	12,5	1,66	7,0	1,87	0,20
Bibanga	25,2	1 800	970	140	123	6,8	11,5	10	18	28	1,85	0,53
Leyou	6	1 800	970	140	129	23,1	11	9	2,66	7,50	2,25	0,30
Avéa II	39	1 600	925	116	99	9	8	8			2,44	0,52
Ifou	37,8	1 125	650	117	96	7,2	7	7	6,5	15	2,44	0,90
Agbéby	11	2 150	1 420	220	202	10	7	3	3,5	11	1,69	0,91

- S Surface du bassin en km²
 P Précipitation moyenne annuelle en mm
 P 4 m Total des précipitations pour les 4 mois les plus humides en mm
 P₁₀ Pluie journalière décennale ponctuelle
 \bar{P}_{10} Pluie moyenne correspondante sur le bassin en mm
 I_g Indice global de pente en m/km
 K_R Coefficient de ruissellement pour l'averse décennale en %
 K_{R,120} Coefficient de ruissellement pour P = 120 mm, en %
 T_m Temps de montée en heures et dixièmes et centièmes d'heure
 $k = \frac{P_{max}}{P_{moyen}}$
 Q₀ Débit à ajouter avec prudence au débit maximal de ruissellement

HAUTEUR DE L'AVERSE DÉCENNALE PONCTUELLE

En zone forestière, l'averse décennale est soit un orage convectif qui a une pointe d'intensité d'assez courte durée, c'est souvent le cas au Congo dans la moitié sud du pays, soit une averse de caractère continu durant plusieurs heures et présentant plusieurs pointes. Pour simplifier, nous admettrons dans ce cas que la partie à forte intensité est groupée en un seul épisode durant de quatre à cinq heures, la crue qui en résulte est généralement plus dangereuse que si on a affaire à deux épisodes pluvieux d'importance à peu près égale, séparés par trois ou quatre heures ou plus sans pluie.

Enfin, sur la côte, on trouve des averses de longue durée à multiples épisodes répartis sur les vingt-quatre heures.

La hauteur d'averse décennale n'est que très vaguement en rapport avec la hauteur de précipitation annuelle. Elle varie souvent avec l'altitude, mais elle n'augmente pas nécessairement avec elle, elle peut décroître au contraire. La latitude doit jouer également un certain rôle. Les régions côtières du Cameroun et du Gabon mises à part, on peut dire qu'elle varie de 100 à 200 mm en vingt-quatre heures.

On trouve plus de 200 mm sur une très étroite bande côtière (10 à 20 km de largeur).

Malheureusement, la Côte-d'Ivoire mise à part, aucune étude systématique des précipitations journalières décennales n'a été faite. On vient juste d'achever la mise au point du fichier « en l'état » des précipitations journalières pour le Cameroun, le Gabon et la République populaire du Congo.

On présentera donc dans le tableau II les averses journalières décennales pour toutes les stations de Côte-d'Ivoire situées en zone forestière pour lesquelles il a été possible de le faire. Ces résultats ont été obtenus à partir du fichier opérationnel « Établissement d'un fichier pluviométrique opérationnel et étude des averses exceptionnelles. Application à la Côte-d'Ivoire » par Y. BRUNET-MORET.

TABLEAU II
 AVERSES JOURNALIÈRES DÉCENNALES EN CÔTE D'IVOIRE
 (en mm)

Abidjan Aéro	224	Brimbo	108	Man Aéro	111
Abengourou	114	Dabou	208	Mbahiakro	114
Abidjan Ville	246	Daloa	119	Ndouci	111
Abidjan Cocody	187	Danané	144	Oumé	120
Abidjan Port	200	Daoukro	101	Sassandra	215
Aboisso	153	Dimbokro	114	Séguéla	122
Adiaké	183	Divo	110	Soubré	113
Adiopodoumé	227	Duékoué	113	Tabou	231
Adzopé	122	Gagnoa	112	Taï	133
Agboville	109	Grabou	133	Tangréla	126
Agnibilékrou	111	Grand Lahou	213	Tiassalé	127
Azaguié	124	Guiglo	137	Toulépleu	127
Banco	219	Guitry	109	Vavoua	123
Bocanda	109	Lakota	100	Tonkoui	(200)
Bondoukrou	100	Lamé	176	Kouassidiotékro	117
Bongouanou	111	Lamto	108	Guéssigué	120
Bouaflé	121	Man	119	Amitioro	117

Il n'a pas été possible malheureusement d'exploiter de façon systématique les données de la station du Tonkoui près de Man, une des rares stations de montagne qui présentait trop de lacunes, mais on a reproduit dans le tableau l'évaluation faite en 1959 pour les bassins représentatifs du Loué et du Gboa, on y a reproduit également la valeur calculée pour les bassins de Guéssigué (Sitou, Bafo, Manso), celle de Kouassi Diotékro calculée pour le bassin de l'Ifou, celle des bassins de l'Amitioro.

Dans le tableau III, on a reproduit pour chacun des trois autres pays à zones forestières les valeurs des averses décennales pour les stations les mieux observées de ces pays, et celles résultant d'évaluations faites pour les bassins versants représentatifs qui y sont situés.

TABLEAU III
 AVERSES DÉCENNALES POUR QUELQUES STATIONS
 (en mm)

Cameroun		Gabon		Congo	
Abong Mbang	117	Bitaim	127	Boko	126
Akonolinga	102	Coco Beach	224,20	Brazzaville	133
Amban	108	Libreville	213	Fort Rousset	132
Batouri	107	Lastourville	122	Imptondo	124
Bertoua	109	Lambaréné	157	Kimongo	118
Donala	140	Makokou	132	Ouessou	126
Ebolowa	111	Mayumba	219	Sibiti	110
Edéa	149	Port-Gentil	192	Sonanké	100
Eséka	142	Oyem Mikong	126	Mossendjo	138
Evoudoula	100	Tchibanga	110	Bassin de Miélékouka	140
Kribi	193	Région de Mala	140	Région de Makokou	140
Lomié	126	Région de Ntoum	160	Région de Ncessé (Mayombe)	130
Mbalmayo	110				
Moloundou	109				
Nkolbison	113				
Sengmelima	109				
Yaoundé	100				
Yokadouma	118				
Ottotomo	105				

COEFFICIENT D'ABATTEMENT ENTRE PLUIE PONCTUELLE
 ET PLUIE MOYENNE SUR LE BASSIN

Le rapport entre la hauteur de précipitation journalière décennale en un point donné du bassin ou voisin du bassin, et la valeur décennale de la hauteur moyenne sur un bassin de surface donnée pour une région homogène et sans grand relief, a été étudié d'abord par Y. BRUNET-MORET qui a donné les bases théoriques de cette étude, puis G. VUILLAUME qui a dégagé des données utilisables et fourni des normes de calcul pour une région homogène, sans grand relief. Le coefficient d'abattement pour une hauteur moyenne annuelle de précipitation déterminée varie linéairement avec le logarithme de la surface. Il varie légèrement avec la fréquence de l'averse considérée dès que celle-ci dépasse 100 mm, ce qui est toujours le cas en forêt pour l'averse décennale.

Nous donnons ci-dessous les valeurs du coefficient d'abattement pour quelques surfaces pour des hauteurs de précipitations annuelles de 1 500 mm, 2 000 mm et 2 500 mm pour l'averse décennale.

TABLEAU IV

Hauteur annuelle (mm)	Superficie						
	2 km ²	5 km ²	10 km ²	25 km ²	50 km ²	100 km ²	200 km ²
1 500	0,97	0,93	0,90	0,86	0,83	0,81	0,77
2 000	0,98	0,945	0,92	0,89	0,87	0,85	0,825
2 500	0,985	0,96	0,94	0,92	0,91	0,89	0,87

Les équations qui ont servi à établir ce tableau supposent des relations assez étroites entre hauteur de précipitations annuelles et hauteurs de précipitations journalières décennales. Nous avons vu plus haut que ces relations peuvent être très lâches en forêt mais, étant donné les faibles variations pour une même surface entre coefficient d'abattement pour des hauteurs annuelles différentes, notre simplification ne peut pas conduire à des erreurs importantes. Cette méthode s'applique mal en montagne, mais elle ne peut conduire qu'à des valeurs surestimées du coefficient d'abattement, si la hauteur de précipitation décennale ponctuelle choisie correspond à une altitude voisine de l'altitude moyenne du bassin, ce qui joue en faveur de la sécurité.

Nous noterons que ces valeurs sont légèrement différentes de celles figurant dans la note technique de 1965 antérieure aux études de G. VUILLAUME.

Il sera facile d'interpoler entre les valeurs données pour des superficies de bassins et des hauteurs de précipitations annuelles différentes de celles pour lesquelles nous avons donné le coefficient d'abattement.

VALEURS DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Le tableau I, où les bassins ont été classés par ordre d'aptitude décroissante au ruissellement, met en évidence pour une même averse de 120 mm une grande variabilité : de 3% pour l'Agbeby, valeur obtenue par interpolation, à 62% pour le Sitou.

En première approximation, la superficie n'a pas d'action directe sensible. C'est ce qui avait déjà été observé pour les régimes tropicaux, et tropicaux de transition pour le terrain assez perméable et très perméable. Bien entendu, la surface couverte par l'averse diminue avec la superficie du bassin (le coefficient d'abattement décroît). Les temps de montée et de base croissent, mais ceci n'a pas d'action sur K_R . La pente moyenne du bassin décroît, mais ceci est souvent compensé par l'augmentation relative des surfaces peu perméables (sols hydromorphes par exemple).

Si on se réfère aux descriptions données en annexe par les pédologues, on voit que la perméabilité du sol joue une grande influence, mais comment chiffrer cette perméabilité globale puisqu'une valeur ponctuelle n'a pas de signification : pratiquement, tous les bassins sont hétérogènes : que cette hétérogénéité soit due à l'hétérogénéité géologique du substratum ou aux propriétés différentes des diverses parties d'un même paysage pédologique. En outre, pour les sols ferrallitiques qui, manifestement, doivent être considérés comme imperméables, les horizons superficiels sont perméables, soit en raison de la structure grumeleuse, soit en raison de l'appauvrissement en éléments fins (horizons sableux).

Si l'on met à part les sols du bassin de la Nziémé III : sols argileux sur marnes et argilites, les sols « imperméables » sont généralement constitués comme suit : ils comportent à faible profondeur, 20 à 50 cm, un horizon argileux riche en gravillons ferrugineux. Il s'agit de sols ferrallitiques remaniés, reposant sur des schistes ou des roches de constitution analogue. Ils sont momentanément et relativement imperméables en surface lorsqu'ils sont gorgés d'eau, or, la durée et l'importance de la saison des pluies sont telles qu'ils le sont toujours à un moment où il y a de fortes chances que se produise l'averse décennale. Le cas le plus typique est celui des trois bassins : Bafo, Sitou et Manso pour lesquels la valeur de P_4 m est de 1 000 mm, valeur relativement modeste. Seuls les bassins de Miélékouka, du Foubou et de la Dzounza, de l'Amitioro, de l'Avéa et du Léyou présentent des valeurs de P_4 m plus faibles. Les quatre mois les plus forts sont répartis pour ces trois bassins entre les deux saisons des pluies, la première étant la plus forte. On ne peut donc pas dire qu'au point de vue des précipitations ces trois bassins soient plus favorisés que les autres, en particulier les quatre bassins du Nion, du Loué, de la Gboa, qui ruissellent beaucoup moins. La différence de comportement provient essentiellement de la constitution des sols.

Il a été dit plus haut qu'en général les bassins n'étaient pas homogènes, on constate que K_R est d'autant plus élevé que la proportion de sols imperméables, tels que nous les avons décrits plus haut, est plus forte. On ne doit pas d'ailleurs confondre sols argileux et sols imperméables. Si le sol argileux présente une structure microgrenue en assemblage lâche à faible cohésion, friable, il peut être considéré comme perméable. Le sol ferrallitique, même avec 50-70% d'argile, est beaucoup plus perméable que les vertisols ou sols salés des zones sèches, ou que les sols argileux dans les terrains alluviaux (Nziémé III).

Quant à l'influence de la pente, elle est complexe, les conditions offertes à la pédogenèse par les fortes pentes sont telles que les sols qui en résultent sont généralement perméables (sauf sur certains sols jaunes) ; c'est pourquoi l'ORSTOM a rencontré tant de difficultés pour trouver des bassins à forte pente et imperméables. Mais à perméabilité égale, la pente joue un rôle très important sur la valeur de K_R , alors que son rôle n'est pas très évident pour les terrains imperméables. Il est vrai que celle-ci atteint déjà 60% pour des pentes très modérées (cas du Bafo et de la Nziémé) et qu'elle ne peut guère augmenter. La limite supérieure doit être de l'ordre de 70-75%. On ne doit pas oublier que nous ne considérons que le ruissellement. Si on prend en compte toutes les formes de l'écoulement, on doit arriver à 85-90%.

Par ailleurs, il est bon d'indiquer qu'il n'est pas très facile de caractériser l'effet de la pente par un seul indice. On a choisi l'indice global parce qu'il est assez facile à estimer avec peu de données topographiques. Il suffit de diviser par la longueur du rectangle équivalent, la différence entre les cotes laissant 5% du bassin au-dessus et 5% du bassin en dessous. Le rectangle équivalent est celui qui a la même surface que le bassin et le même coefficient de forme:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Mais cet indice permet surtout de définir la pente longitudinale. Deux autres éléments interviennent : la pente transversale et la plus ou moins grande sinuosité des axes de drainage (qui ne joue que pour les temps de base et de réponse). C'est ainsi que la Foubou, la Dzounza et l'Agbeby, qui présentent des vallées principales à faibles pentes, ont de très fortes pentes transversales. Pour le Nion II, c'est le contraire, la présence d'un piton rocheux et des sols de piedmont qui l'entourent, la dent de Man tend à augmenter la valeur de I_g sans pour cela conduire à une augmentation de K_R . C'est pourquoi nous avons corrigé de façon importante les indices de pente I_g correspondants au tableau I.

En général, la hauteur de précipitations annuelles ne joue pas un rôle appréciable. Nous avons vu plus haut que la concentration des précipitations en saison des pluies représentée par P_4 m n'exerçait pas non plus une influence très appréciable, sauf peut-être pour le cas de l'Ifou pour lequel la forêt se maintient dans des conditions limites pour cette partie du monde. Et ceci, malgré l'importance certaine des possibilités de saturation des couches superficielles du sol, mais pour P_4 m supérieur à 750-1 000 mm, le sol est pratiquement saturé, s'il y a une couche imperméable à faible profondeur, pendant une bonne partie de la saison des pluies.

La perméabilité globale des bassins étant impossible à chiffrer, il est impossible de procéder à une étude systématique de régressions pour définir des règles de calcul du coefficient de ruissellement K_R . Nous nous contenterons de définir six catégories de bassins d'après des indications qualitatives de perméabilité et l'indice global de pente.

CATÉGORIE I (Sitou, Bafo, Manso, Nziémé III, crique Virgile)

La presque totalité du bassin est occupée par des sols argileux massifs *imperméables* en surface ou à faible profondeur : 20 à 50 cm, présentant dans ce dernier cas des phénomènes d'engorgement au voisinage de la surface dès que la saison des pluies est assez avancée. Ces bassins sont généralement sur schistes ou amphibolites dans un modèle sénile, parfois sur argilites et sur marnes à gisement sub-horizontale (Nziémé III).

$$K_R = 58 \text{ à } 62\% \text{ pour des pentes définies par } 3 < I_g < 30$$

K_R doit monter jusqu'à 70% si I_g atteint 70 à 80, mais ceci est très rare puisqu'avec des pentes de ce genre la pédogenèse conduit à des sols plus perméables.

CATÉGORIE II (crique Grégoire, Nziémé I, Nzang, Mielekouka II, Nion I et Nziémé I)

Le bassin est recouvert pour 30 à 60% de sa surface par des sols correspondant à ceux de la catégorie I (très net pour Nion I et Nziémé I). Ces sols *imperméables* sont situés parfois dans la partie basse du bassin, en particulier lorsqu'il s'agit de sols hydromorphes. Dans le cas des monts de Cristal, Nzang, la partie imperméable du bassin occupe peut-être moins de 30%, mais ceci est compensé alors par une très forte pente ($I_g > 80$).

$$K_R = 30 \text{ à } 40\%$$

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 : $I_g < 10$ (Amitioro I) ou bassins avec moins de 30% de la surface, *imperméables* avec pentes modérées à très fortes $10 < I_g < 30$, ou bassins perméables en surface et en profondeur (sols sur charnockite par exemple, sols argileux à structure grumeleuse), avec *très fortes pentes* : $I_g \geq 70$ (pentes latérales très fortes : cas du Loué et du Gboa et de la Dzounza et du Fourou).

$$K_R = 20 \text{ à } 30\%$$

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 : $I_g > 80$ (crique Cacao), ou bassins de perméabilité moyenne à pentes modérées (Amitioro II).

La valeur (40) donnée pour le Nion tient compte des pentes transversales qui sont moins fortes que ne le laisserait supposer la seule pente longitudinale qui, elle, correspond à $I_g = 60$.

$$K_R = 10 \text{ à } 16\%$$

CATÉGORIE V (Bibanga, Leyou, Avéa II, Ifou)

Bassins perméables, par exemple argile à structure grumeleuse puis microgrenue en profondeur, arènes argileuses, etc., sans horizon imperméable en profondeur. 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 pente assez faible : $I_g < 10$ (Agbeby sur sables tertiaires de Côte-d'Ivoire).

$$K_R = 3 \text{ à } 5\%$$

Cette classification est loin d'être parfaite. Il est bien difficile de faire entrer la Mitzibé ou le bassin de l'Ami-tioro II dans cette classification par suite de nos connaissances insuffisantes sur la nature des sols.

Il en est de même pour le Nion II.

Dans la pratique, pour ranger un bassin dans une catégorie donnée, on consultera les cartes géologiques et pédologiques. Si ces cartes sont insuffisantes ou inexistantes, on fera reconnaître les bassins à étudier par un pédologue. On éliminera les bassins à sols argileux sur argilites ou sur marnes (catégorie I), ou les bassins sur sables très perméables (catégorie VI). On se méfiera tout particulièrement des bassins sur schistes ou sur amphibolites où on recherchera si les sols ferralitiques qui les recouvrent sont remaniés et s'ils comportent un horizon imperméable à faible profondeur.

On prêtera un soin particulier à la structure des sols argileux. Si cette structure est telle que ces sols sont perméables en raison des pluies sur une forte profondeur, on classera le bassin dans les catégories III, IV ou V. La proportion de sols imperméables permettra de classer le bassin dans la catégorie II ou III et de préciser K_R en fonction du pourcentage de ces sols imperméables à l'intérieur de chaque catégorie.

Ce classement sera souvent difficile, cependant on ne doit pas oublier que, sauf en montagne, la majeure partie des bassins rencontrés sera de la catégorie V, mais ce n'est pas une raison suffisante pour ne pas se méfier des autres.

Un examen du thalweg principal permet souvent de donner une indication supplémentaire : des berges à bords francs, relativement hautes, et un lit avec présence de graviers et de galets, correspondent souvent aux catégories I et II, surtout lorsque I_g dépasse 30 à 50 m/km.

TEMPS DE MONTÉE ET TEMPS DE BASE

On se heurte ici à d'autres difficultés : la forme du réseau hydrographique, la longueur et le caractère plus ou moins sinueux des lits principaux ont une influence très importante sur la longueur des temps de montée et de base. Comme le nombre de bassins dont nous disposons est limité, on ne peut pas procéder à une étude systématique de tous ces paramètres, il en résultera une certaine dispersion dans les résultats.

Le temps de montée T_m part de l'arrivée des premiers ruissellements et se termine au maximum de la crue, c'est-à-dire à l'arrivée à la station de mesure du ruissellement provenant de la bande isochrone qui couvre la surface maximale. Cette bande est souvent située entre les $2/3$ et les $3/4$ de la longueur totale du bassin. Le temps de base T_b a la même origine que le temps de montée, et se termine à l'arrivée du ruissellement provenant des parties les plus éloignées du bassin versant. Si l'extrémité amont du bassin est très effilée, on ne distingue pas ses apports sur l'hydrogramme, ils risquent d'être éliminés du ruissellement superficiel et de se retrouver dans l'écoulement retardé.

Pour les très petits bassins, T_m et T_b comprennent deux parties :

- 1) le temps qui s'écoule entre l'arrivée dans le réseau hydrographique des éléments de surface bordant ce réseau et l'arrivée des éléments situés à la distance moyenne du réseau. Il s'agit d'écoulement sur le sol à faible vitesse, de l'ordre de 0,05 à 0,10 m/s ;
- 2) le temps de parcours dans le réseau hydrographique où l'eau s'écoule à une vitesse moyenne de 0,40 à 1 m/s, et plus rapidement peut-être dès que le cours d'eau devient plus large et plus profond.

La surface du bassin joue un grand rôle : en principe, à une constante près (première phase de l'écoulement) les temps de base et de montée sont proportionnels à la longueur du cours d'eau principal, c'est-à-dire à la racine carrée de la surface du bassin. Mais dès que celui-ci devient assez grand et si la pente générale ne diminue pas trop, la vitesse moyenne dans le cours d'eau principal augmente, de sorte que pour des superficies dépassant 50 km² les courbes des T_b et des T_m sont en dessous des courbes

$$T = a \sqrt{S} + b.$$

La pente également a une grande influence : plus elle croît, plus la vitesse de l'eau sur le sol et dans le réseau hydrographique augmente.

Nous analyserons donc les valeurs de T_m et T_b du tableau I, en portant sur la figure 1 les valeurs de S en coordonnées logarithmiques, en abscisses, et en ordonnées les valeurs de T_m ou de T_b, et on cherchera à déterminer la position des courbes T_b = f(S) et T_m = f(S) pour trois séries de valeurs de l'indice de pente :

- 3 m/km < I_g < 7 correspondant à la catégorie de relief R₂ dans la classification ORSTOM du relief ;
- 10 m/km < I_g < 25 m/km correspondant à la catégorie de relief R₄ ;
- 70 m/km < I_g < 80 m/km correspondant à la catégorie de relief R₆.

Enfin, une dernière courbe correspond à la catégorie R₆ dans le cas où il n'y a pas de litière de feuilles sur une bonne partie du bassin. On verra que, dans ce cas, T_b et T_m sont les mêmes que sur sol de steppe ou de savane, ce qui est normal.

Ces courbes correspondent à des bassins assez compacts avec un indice de forme de Gravelius de l'ordre de 1,20 à 1,30, et à l'indice de longueur du cours principal $\frac{L^2}{S}$ voisin de 2.

Si les indices de forme ou de longueur du cours d'eau principal sont nettement supérieurs à ces valeurs, les temps de base et de montée seront plus long.

Les points de la figure 1 ont été repérés par leur indice global de pente.

La dispersion est grande, l'influence du coefficient de forme ou du coefficient de longueur est forte; en outre, d'autres causes peuvent intervenir pour conduire à des valeurs éloignées des valeurs moyennes.

Si on considère la courbe 3 m/km < I_g < 7 m/km, qui a été mise au point à partir de l'équation T_m = 1,5 √S + 2, S en km², T_m en heures, on trouve 4 valeurs aberrantes :

- 1) le bassin du Nion I est massif, mais le cours d'eau principal comporte, dès le pied de la montagne, des zones de débordements qui augmentent très sensiblement T_m et encore plus T_b, bien entendu ;
- 2) le bassin de la Bibanga est très allongé : l'indice de Gravelius est égal à 1,48 ;
- 3) sur le bassin de la Nziémé I, seule la partie imperméable, c'est-à-dire 40% de la surface située vers l'aval, intervient dans la formation de l'hydrogramme. Donc le point serait à décaler vers S = 30 km² ;
- 4) Pour l'Ifou, qui ruisselle très peu, seule la partie aval doit concourir à la formation de l'hydrogramme. On devrait donc déplacer sérieusement le point représentatif vers la droite du graphique.

On doit préciser qu'il n'est pas facile de déterminer T_m à plus de 15 ou 20%, même avec des hydrogrammes bien nets.

Quant à l'écart entre Amitioro I et Manso, il s'explique très bien : Amitioro I a un coefficient de Gravelius faible : 1,17 (1,28 pour le Manso) et un réseau hydrographique en éventail, ce qui est moins net sur le Manso, ceci est plus favorable à un temps de montée plus court que dans les conditions les plus fréquentes.

Ces écarts montrent combien de petits détails concernant la forme du bassin et les dispositions du réseau hydrographique peuvent modifier le temps de montée par rapport à la valeur moyenne.

En ce qui concerne les bassins entrant dans la catégorie de relief I_g 10 à I_g 25 ou R₄ la courbe T_m = √S semble la mieux adaptée sauf pour les bassins couvrant plus de 50 km², pour lesquels on a dû adopter à peu près la tangente à cette courbe. Si la pente reste la même, les obstructions par les arbres dans le lit sont relativement moins importantes et la vitesse croît dans le réseau hydrographique. Il y a d'ailleurs assez peu de bassins atteignant cette dimension avec I_g = 20 sauf en montagne. Deux points sont un peu aberrants : la crique Virgile avec un coefficient de Gravelius égal à 1,14 et un réseau hydrographique en éventail présente des conditions de ruissellement particulièrement favorables, d'où une position un peu trop basse. L'Agbeby, avec son très faible coefficient de ruissellement, ne doit pas donner lieu à un ruissellement généralisé, donc le point représentatif doit être nettement déplacé vers la droite et être nettement au-dessus de la courbe moyenne, ce qui est normal (I_g = 10).

Le Nion II avec son indice de pente voisin de 40 présente un relief intermédiaire entre la catégorie que nous venons de considérer et la suivante, le point représentatif est au-dessus de la courbe T_m = √S tout simplement parce que le bassin est allongé comme le montre l'indice de forme de Gravelius, qui est égal à 1,40.

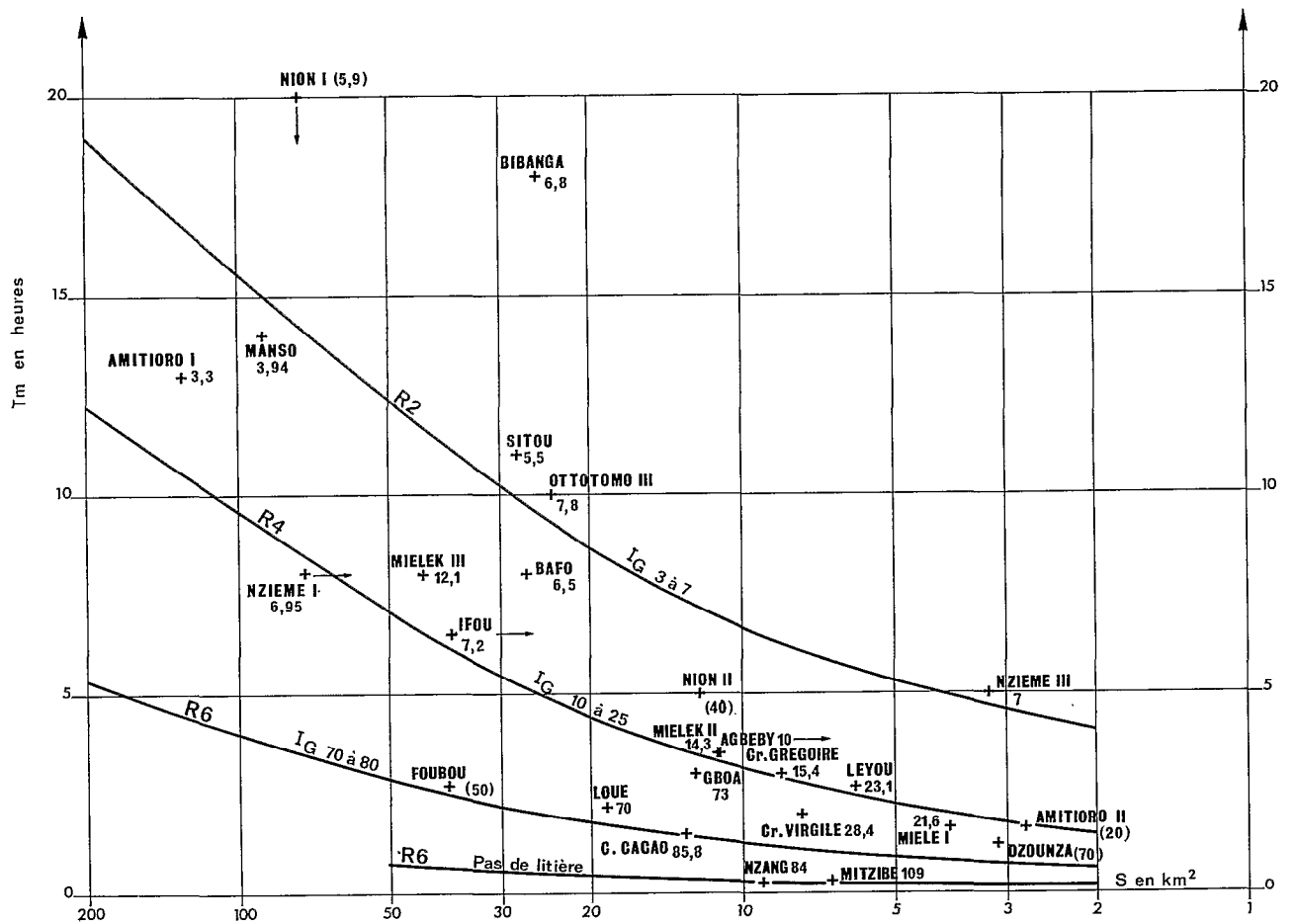


Fig. 1. — Crues décennales pour les petits bassins versants forestiers.
Temps de montée en fonction de la superficie et du coefficient global de pente (I_g)
Bibanga 6,8 : 6,8 est l'indice global de pente I_g

Enfin, on a pu tracer une courbe correspondant aux indices globaux de pente $70 < I_g < 80$ m/km. Il s'agit de bassins de montagne à l'indice de relief R_6 . La plupart des points représentatifs sont au-dessus de la courbe car ils correspondent à des bassins longs ou très longs avec un coefficient de Gravelius supérieur ou égal à 1,44. Encore les points correspondant au Loué et au Foubou devraient-ils être nettement plus haut si, pour des raisons d'exposition, les fortes averses sur ce bassin n'étaient pas centrées sur la partie aval. Or, pour les applications, on doit considérer une courbe qui corresponde à des averses homogènes. La courbe $T_m = 0,4 \sqrt{S}$ convient très bien jusqu'à une valeur de S égale à 40 ou 50 km², après il faut la modifier comme on l'a fait pour la courbe précédente. Il y a peu de bassins qui présentent un indice de pente de 70 m/km avec une superficie dépassant 50 km².

Enfin, pour les bassins des monts de Mala (Nzang et Mitzibé) où la litière a disparu sur une partie du bassin, on peut adopter la courbe $T_m = 0,1 \sqrt{S}$. Ce cas ne doit concerner que des bassins de superficie inférieure à 20 km². La courbe correspond à une courbe de pays de savane.

On peut tenir compte de la forme du bassin en majorant de 100% les temps de montée pour des valeurs du coefficient de Gravelius $K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$ supérieur à 1,50-1,60 (exemple de la Bibanga, du Nion, de la Gboa, de la Dzounza).

TEMPS DE BASE

Pour des raisons analogues à celles invoquées pour le temps de montée, le temps de base est lié de façon plus ou moins lâche à \sqrt{S} .

On a tracé la courbe moyenne du temps de base T_b en fonction de la surface pour des indices globaux de pente compris entre 3 et 7 m/km, indice de relief R_2 avec une valeur du coefficient de Gravelius comprise entre 1,20 et 1,30 et un coefficient de longueur du formateur principal de l'ordre de 2. Cette courbe pour $S < 40 \text{ km}^2$ est représentée par l'équation $T_b = 3\sqrt{S} + 6$; pour $S < 40 \text{ km}^2$, la courbe choisie passe en dessous de la courbe correspondant à l'équation pour des raisons expliquées plus haut. Il y a 4 points aberrants : celui relatif à l'Amitioro I qui correspond à un indice de forme et à une forme du réseau très favorables au ruissellement, celui correspondant à la Bibanga, très long bassin, et surtout celui correspondant au Nion I pour lequel la vidange des zones de débordements tend à allonger encore davantage le temps de base que le temps de montée, ce qui est normal. On a vu plus haut que l'Ifou a certainement donné lieu à un ruissellement partiel, le point représentatif doit être déporté très nettement sur la droite. Pour la Nziémé I, au contraire, le déséquilibre entre le ruissellement sur sol imperméable et sol perméable, s'il raccourcit le temps de montée, n'a pas d'action sensible sur le temps de base puisque, ici, tout le bassin ruisselle.

Pour des indices de pente compris entre 10 et 25 m/km, classe de relief R_4 , on a tracé une courbe qui, jusqu'à $S = 40 \text{ km}^2$, correspond à l'équation $T_b = 2\sqrt{S} + 3$. Notons que le point représentatif de l'Agbeby devra être déplacé un peu sur la droite, puisqu'il s'agit de ruissellement partiel, il est donc nettement au-dessous de la courbe, ce qui est normal. Le point représentatif du Nion II, qui devrait être compris entre la courbe $2\sqrt{S} + 3$ et celle dont nous allons parler ci-dessous, est trop haut pour la raison exposée plus haut.

Pour des indices compris entre 70 et 80 m/km, classe de relief R_6 , on peut adopter la courbe $T_b = \sqrt{S} + 1$. Comme pour le temps de montée, les trois points représentatifs du Loué, de la Dzounza, de la Gboa sont situés trop haut pour les mêmes raisons. Le Foubou est situé un peu trop bas pour la valeur de son coefficient de Gravelius 1,61. Ceci tient au ruissellement partiel dont il a été question plus haut.

Enfin, pour le cas de bassin de montagne où la litière a disparu, tout au moins sur une partie de la surface, on peut retenir la courbe $T_b = 0,5\sqrt{S} + 1$.

Les valeurs données par les courbes sont à majorer de 80% pour la courbe relative à R_4 et de 50% pour la courbe relative à R_6 si le coefficient de Gravelius vient à dépasser les valeurs 1,50-1,60 et si le ruissellement existe sur tout le bassin. Si le bassin comporte de longues zones de débordement (généralement R_4 avec des bassins couvrant plus de 30 km^2), on peut majorer T_b de 100%.

Le temps de base est souvent déterminé avec une marge d'imprécision de 15 à 20%.

$$\text{COEFFICIENT } K = \frac{Q \text{ max}_r}{M}$$

Ce coefficient qu'on peut appeler coefficient de pointe, a été déterminé pour chaque bassin représentatif à partir de crues unitaires ou voisines de crues unitaires et toujours pour de forts ou très forts ruissellements, car la forme de l'hydrogramme en forêt est souvent différente, suivant qu'il s'agit de crues moyennes ou faibles ou de fortes crues.

Il est assez difficile de dégager des règles pour l'estimation de K. Ce qui est très net c'est qu'il est plus faible qu'en savane et souvent voisin de 2, parfois inférieur, ce qui veut dire que, dans bien des cas, l'hydrogramme pourrait sans inconvénient être remplacé par un triangle.

Les valeurs de K sont plus fortes en montagne qu'en plaine. On peut adopter les valeurs moyennes suivantes :

Plaine (R_2) :	$S < 5 \text{ km}^2$	$K = 1,90$
	$5 \text{ km}^2 < S < 10 \text{ km}^2$	$K = 2,20$
	$S > 10 \text{ km}^2$	$K = 2,30$
Montagne (R_6) :	$S < 5 \text{ km}^2$	$K = 2,00$
	$5 \text{ km}^2 < S < 10 \text{ km}^2$	$K = 2,30$
	$S > 10 \text{ km}^2$	$K = 2,40$

Ces valeurs sont valables pour des crues sensiblement unitaires. Pour les très petits bassins, elles sont plus fortes que celles qui seraient obtenues à partir des hydrogrammes de crue décennale (voir le dernier exemple du paragraphe suivant).

Pour les bassins versants très allongés en montagne, K devrait être majoré légèrement. Par exemple, on passerait de 2,40 à 2,50 ou 2,60 pour un coefficient de Gravelius dépassant 1,60.

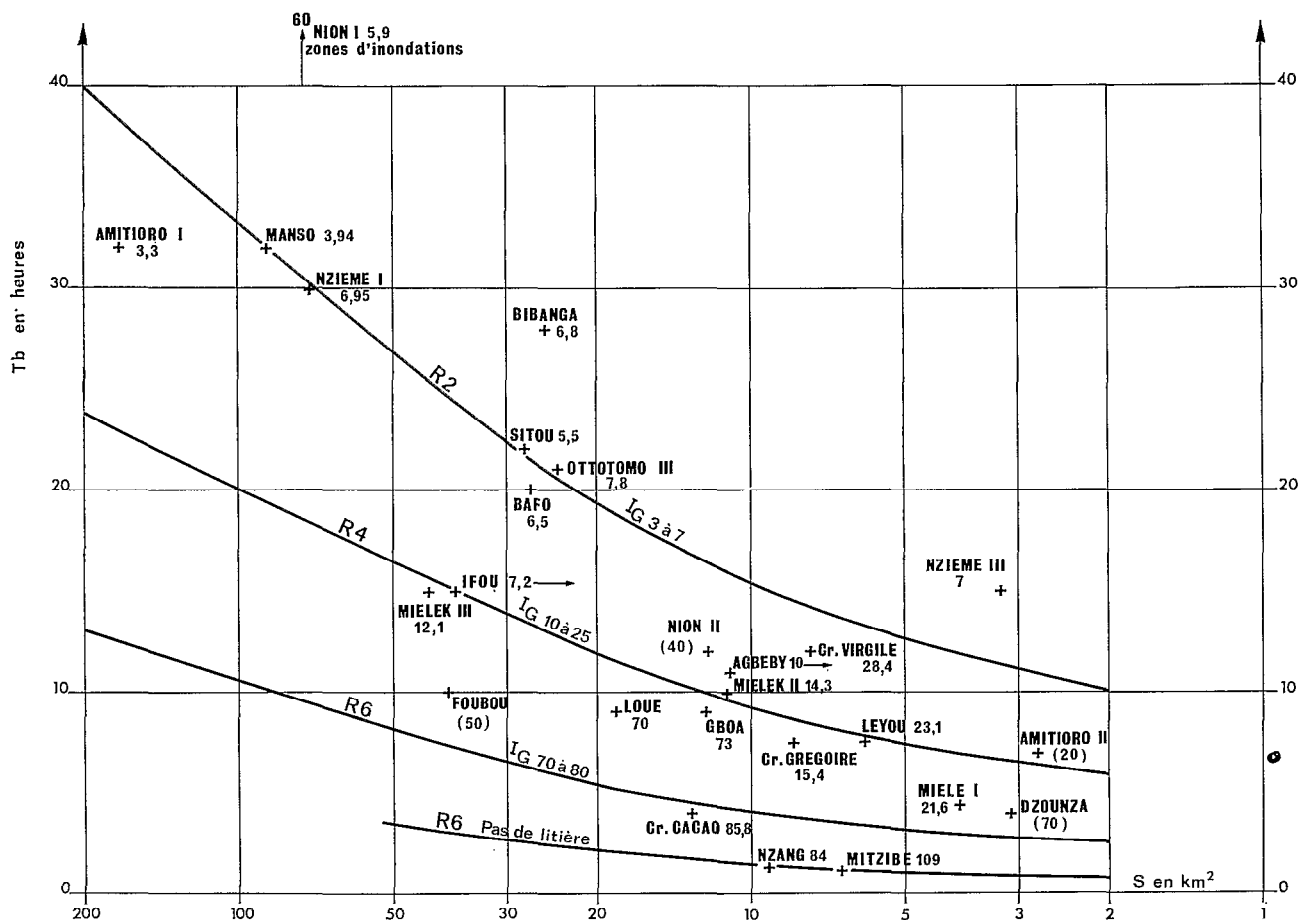


Fig. 2. — Crues décennales pour les petits bassins versants forestiers. Temps de base en fonction de la superficie et du coefficient global de pente (I_g)
Bibanga 6,8 : 6,8 est l'indice global de pente I_g

QUELQUES EXEMPLES

On donne ci-après quelques exemples typiques :

1) Bassin dans la région de Mayoko, de surface 8 km², perméable

La reconnaissance pédologique a permis de classer ce bassin dans la catégorie V. L'indice de Gravelius est voisin de 1,20. L'indice global de pente est égal à 18.

$$P \text{ annuelle} = 1\ 800 \text{ mm}$$

$$P_{10} = 140 \text{ mm}$$

On recherche la valeur du coefficient d'abattement dans le tableau correspondant : il est compris entre 0,91 et 0,94. On adoptera 0,92.

$$\overline{P}_{10} = P_{10} \times 0,92 = 129 \text{ mm}$$

On admet un coefficient de ruissellement un peu inférieur à celui du Leyou par suite d'une pente plus faible.

$$K_R = 8\%$$

Le temps de montée donné sur la figure 1 est de 2 h 48'. Le temps de base lu sur la figure 2 est de 8 h 45'. Le coefficient $K = \frac{Q_{\max_r}}{M}$ de l'hydrogramme unitaire est égal à 2,20 d'après le paragraphe précédent.

Si on suppose l'averse décennale avec un seul épisode pluvieux intense, on doit admettre que celui-ci s'étend sur 5 heures avec une traîne de pluie de hauteur totale 5 mm sans influence sur le ruissellement. Théoriquement la durée de l'averse unitaire à prendre en considération ne doit pas dépasser la moitié du temps de montée, soit 1 h 24'. On doit donc diviser l'averse en quatre parties. Supposons 30 mm, 30 mm, 50 mm et 14 mm avec des coefficients de ruissellement successifs de 2%, 7%, 12% et 9%. Le ruissellement total est de 10,3 mm correspondant bien à 8% de 129 mm. Les averses élémentaires se succèdent avec un décalage de 1 h 15'. L'hydrogramme global correspondant à la somme des 4 hydrogrammes admet un maximum de 5 m³/s environ.

Si, sans décomposer l'averse, on fait comme si l'hydrogramme qui en résultait était unitaire, le volume global de ruissellement serait de :

$$0,0103 \times 8 \times 10^6 = 82\,500 \text{ m}^3$$

$$M = \frac{82\,500}{8,75 \times 3\,600} = \frac{82\,500}{31\,500} = 2,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

$Q_{\max_r} = 2,62 \times 2,2 = 5,75 \text{ m}^3/\text{s}$ au lieu de 5 m³/s. On pourrait à la rigueur adopter cette simplification, mais elle conduirait à une surestimation de l'ordre de 15%. Ceci montre cependant qu'on peut être large, en ce qui concerne la notion d'hydrogramme unitaire et adopter, à la rigueur, des averses de l'ordre de grandeur du temps de montée sans qu'il en résulte d'erreur appréciable.

On peut supposer un débit hypodermique égal à 0,40, supérieur à celui du Leyou : pour les bassins perméables, ce débit peut être admis comme proportionnel à la superficie du bassin. On arrive à un débit maximal voisin de 5,40 m³/s (680 l/s·km²).

2) Bassin plat, de surface 50 km², imperméable

On considère un bassin plat R_0 à horizon imperméable à faible profondeur, de superficie égale à 50 km². Le coefficient de forme est voisin de 1,20. La hauteur de précipitation annuelle est de 1 800 mm.

$$P_{10} = 140 \text{ mm.}$$

Le coefficient d'abattement, d'après notre tableau, est compris entre 0,83 et 0,87 pour 50 km². On admettra 0,85.

$$\overline{P}_{10} = 140 \times 0,85 = 119 \text{ mm.}$$

Pour un tel bassin de catégorie I, le coefficient de ruissellement K_R peut être admis égal à 60%.

Le temps de montée pour $3 \text{ m}/\text{km} < I_g < 7 \text{ m}/\text{km}$ est égal à 12 h 20', d'après la figure 1, et le temps de base à 27 heures.

L'averse avec épisodes pluvieux de 5 heures est unitaire.

$$V_R = 0,119 \times 0,6 \times 50 \times 10^6 = 3,57 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

$$M = \frac{3,57 \times 10^6}{27 \times 3\,600} = 36,7 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Pour un tel bassin $K = 2,30$ ($S > 10 \text{ km}^2$ plaine) :

$$Q_{\max_r} = 36,7 \times 2,30 = 84 \text{ m}^3/\text{s}$$

on admettra un débit de base de 5 m³/s :

$$Q_{\max} = 84 + 5 = 89 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1 760 l/s·km}^2\text{)}.$$

3) Bassin plat, de surface 50 km², perméable

Si on considère un bassin de même superficie avec la seule différence d'un sol perméable comme celui du Leyou, catégorie V (coefficient de forme voisin de 1,20) :

$$P \text{ annuelle} = 1\,800 \text{ mm}$$

$$P_{10} = 140 \text{ mm}$$

$$\text{Coefficient d'abattement} = 0,85$$

$$\overline{P}_{10} = 119 \text{ mm}$$

La valeur de K_R pour $P_{10} = 120 \text{ mm}$ ($\overline{P}_{10} = 114 \text{ mm}$) est de 9%

La valeur de K_R pour $P_{10} = 140 \text{ mm}$ ($\overline{P}_{10} = 129 \text{ mm}$) est de 11%

Pour $\overline{P}_{10} = 119 \text{ mm}$ on admettra $K_R = 10\%$

Le temps de montée est toujours de 12 h 20', le temps de base de 27 heures :

$$V_R = 0,119 \times 0,10 \times 0,50 \times 10^6 = 0,595 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$M = \frac{595\,000}{27 \times 3\,600} = 6,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour un tel bassin $K = 2,30$,

$$Q \text{ max}_r = 6,1 \times 2,30 = 14 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \text{ max} = 14 + 5 \text{ m}^3/\text{s} = 19 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (380 l/s}\cdot\text{km}^2\text{)}$$

On mesure à la comparaison avec les chiffres précédents l'influence de l'imperméabilité du sol.

4) Bassin de montagne perméable

Considérons un bassin de montagne $70 < I_g < 80 \text{ m/km}$ à sol perméable, type Loué, d'une superficie de 25 km^2 . Le coefficient de Gravelius est supposé égal à 1,50.

La hauteur de précipitations annuelle est supposée égale à 1 800 mm et la hauteur de précipitations décennale est toujours de 140 mm.

$$P_{10} = 140 \text{ mm}$$

le coefficient d'abattement est compris entre 0,86 et 0,89. On admet 0,88.

$$\overline{P}_{10} = 140 \times 0,88 = 123 \text{ mm}$$

Si P_{10} était égal à 120 mm ($\overline{P}_{10} = 109 \text{ mm}$) et la superficie du bassin de 18 km^2 , K_R serait égal à 30%. Le coefficient observé sur le bassin avec $P_{10} = 200 \text{ mm}$, mais \overline{P}_{10} beaucoup plus faible : 0,50 (correspondant à l'exposition spéciale de ce bassin) était de 33%. Pour $\overline{P}_{10} = 123$ les conditions sont un peu moins favorables que dans le cas $\overline{P}_{10} = 200$, malgré le coefficient d'abattement plus élevé : 0,88, on admettra $K_R = 31\%$.

Le temps de montée serait égal à 2 heures avec un coefficient de forme de 1,20.

Le temps de base serait égal à 6 heures avec un coefficient de forme de 1,20.

Le coefficient de forme étant de 1,50 :

$$T_m \text{ est égal à } 2 \times 2 = 4 \text{ heures}$$

$$T_b \text{ est égal à } 6 \times 1,8 = 10 \text{ h } 45'$$

L'averse dure 5 heures mais avec un temps de montée de 4 heures, on peut faire comme si elle était unitaire. On trouvera une valeur très légèrement surestimée pour $Q \text{ max}$:

$$V_R = 0,123 \times 0,31 \times 25 \times 10^6 = 0,950 \times 10^6$$

$$M = \frac{950\,000}{10,75 \times 3600} = 24,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour un bassin de montagne de plus de 10 km², $k = 2,40$

$$Q_{\max_r} = 24,6 \times 2,40 = 58 \text{ m}^3/\text{s}.$$

En supposant un débit de base égal à 3,5 m³/s correspondant à celui du Loué, on trouve :

$$Q_{\max} = 58 + 3,5 = 61,5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (2 460 l/s}\cdot\text{km}^2\text{)}$$

5) Bassin perméable d'indice global de pente 40 m/km

Si on considère un bassin type Nion, homogène, perméable : $I_g = 40 \text{ m/km}$, les reconnaissances géologiques permettent de le classer dans la catégorie IV.

La superficie est de 25 km². Le coefficient de Gravelius est égal à 1,5. La hauteur de précipitations annuelle est de 1 800 mm : $P_{10} = 110 \text{ mm}$. Le coefficient d'abattement est compris entre 0,86 et 0,89, admettons 0,88 :

$$\overline{P}_{10} = 110 \times 0,88 = 97 \text{ mm}.$$

On peut admettre $K_R = 15\%$ (catégorie IV).

Pour un coefficient de forme 1,20 :

$$T_m \text{ serait égal à } 3 \text{ h } 30',$$

$$T_b \text{ serait égal à } 9 \text{ h } 30'.$$

Ces valeurs sont lues sur une courbe intermédiaire qui serait tracée entre $I_g \text{ } 10 - 25 \text{ m/km}$ et $I_g \text{ } 70 - 80 \text{ m/km}$.

Du fait du coefficient de forme égal à 1,50, ces valeurs deviennent :

$$T_m = 3,50 \times 2 = 7 \text{ heures}$$

$$T_b = 9,50 \times 1,70 = 16 \text{ h } 25'$$

$$V_R = 0,097 \times 0,15 \times 25 \times 10^6 = 0,364 \times 10^6$$

$$M = \frac{364\,000}{16,25 \times 3\,600} = 6,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

On peut à la rigueur considérer ce bassin comme un bassin de montagne et adopter $K = 2,40$.

$$Q_{\max_r} = 6,25 \times 2,40 = 15 \text{ m}^3/\text{s}.$$

En admettant un débit de base égal à 4 m³/s :

$$Q_{\max} = 15 + 4 = 19 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (750 l/s}\cdot\text{km}^2\text{)}.$$

6) Bassin type monts de Cristal

Enfin, on considérera un bassin du type de ceux des monts de Cristal, sans litière et très forte pente : $S = 15 \text{ km}^2$, P annuelle = 2 000 mm. On admet $P_{10} = 140 \text{ mm}$.

Le coefficient d'abattement est égal à 0,89 :

$$\overline{P}_{10} = 140 \text{ mm} \times 0,89 \qquad \overline{p} = 125 \text{ mm}.$$

Le coefficient global de ruissellement pour $P_{10} = 120$ était de 37%, pour $P_{10} = 140 \text{ mm}$ on peut l'estimer à 45% :

$$T_m = 0,45 \text{ heure} \qquad T_b = 1,90 \text{ heure}.$$

Manifestement, l'averse de 5 heures n'est pas unitaire. On la divise en 15 averses élémentaires de 20 minutes.

Cette durée de 20 minutes est un peu longue, mais admissible.

L'averse peut se décomposer comme suit (P : précipitation, H : écoulement) :

P (mm)	H (mm)	P (mm)	H (mm)
6	0	10	6
6	0,5	10	6,5
6	1,2	12	8,5
10	2	20	16,2
10	3	3	1,4
10	3	0	0
12	5	2	0,1
8	3		
68	17,7	57	38,7

Si on applique le coefficient de ruissellement global aux 125 mm : $125 \times 0,45 = 56,4$

$$V = 0,0564 \times 15 \times 10^6 = 0,85 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Sur ce genre de bassin, il ne semble pas que le coefficient de forme joue un rôle significatif, sauf s'il dépasse nettement 1,6.

Les caractéristiques des 15 hydrogrammes élémentaires sont les suivantes (le coefficient K est égal à 2,40) :

$V_1 = 0$	$M_1 = 0$	$Q_1 \text{ max}_r = 0$
$V_2 = 7,5 \times 10^3 \text{ m}^3$	$M_2 = 1,09 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_2 \text{ max}_r = 2,63 \text{ m}^3/\text{s}$
$V_3 = 18 \text{ »}$	$M_3 = 2,63 \text{ »}$	$Q_3 \text{ max}_r = 6,3 \text{ »}$
$V_4 = 30 \text{ »}$	$M_4 = 4,38 \text{ »}$	$Q_4 \text{ max}_r = 10,5 \text{ »}$
$V_5 = 45 \text{ »}$	$M_5 = 6,59 \text{ »}$	$Q_5 \text{ max}_r = 15,8 \text{ »}$
$V_6 = 45 \text{ »}$	$M_6 = 6,59 \text{ »}$	$Q_6 \text{ max}_r = 15,8 \text{ »}$
$V_7 = 75 \text{ »}$	$M_7 = 10,95 \text{ »}$	$Q_7 \text{ max}_r = 26,3 \text{ »}$
$V_8 = 45 \text{ »}$	$M_8 = 6,59 \text{ »}$	$Q_8 \text{ max}_r = 15,8 \text{ »}$
$V_9 = 90 \text{ »}$	$M_9 = 13,18 \text{ »}$	$Q_9 \text{ max}_r = 31,7 \text{ »}$
$V_{10} = 97,5 \text{ »}$	$M_{10} = 11,29 \text{ »}$	$Q_{10} \text{ max}_r = 27,1 \text{ »}$
$V_{11} = 127,5 \text{ »}$	$M_{11} = 18,7 \text{ »}$	$Q_{11} \text{ max}_r = 44,8 \text{ »}$
$V_{12} = 243 \text{ »}$	$M_{12} = 35,60 \text{ »}$	$Q_{12} \text{ max}_r = 85,44 \text{ »}$
$V_{13} = 21 \text{ »}$	$M_{13} = 3,07 \text{ »}$	$Q_{13} \text{ max}_r = 7,37 \text{ »}$
$V_{14} = 0$	$M_{14} = 0$	$Q_{14} \text{ max}_r = 0$
$V_{15} = 1,5 \times 10^3 \text{ m}^3$	$M_{15} = 0,22 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{15} \text{ max}_r = 0,53 \text{ m}^3/\text{s}$

Les hydrogrammes se succèdent à 20 minutes d'intervalle. L'hydrogramme global en résultant admet un maximum de $134,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si on admet un débit de base de $5 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$Q \text{ max} = 140 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (9,350 l/s}\cdot\text{km}^2\text{)}$$

A noter que dans un tel cas l'influence des précipitations pendant la période la plus intense (sur 20 ou 40 minutes) est capitale : l'hypothèse de 20 mm en 20 minutes n'a rien de conservatif et, si on veut être très prudent, il y aurait intérêt à majorer cette précipitation partielle de 20 à 30%.

Tout dans nos calculs tient à la reconnaissance pédologique, qui permet de déterminer la catégorie du bassin, et à l'étude des pentes et des caractéristiques de forme, qui jouent un grand rôle sur le temps de base, donc sur le débit maximal de ruissellement $Q \text{ max}_r$.

CONCLUSION

La présente note ne constitue qu'un essai préliminaire d'exploitation systématique des données fournies par les bassins représentatifs forestiers de l'Afrique à l'ouest du Congo. Si le rôle de la pente a pu être mis en évidence de façon nette sur la forme de l'hydrogramme, l'influence de la constitution du sol sur le coefficient de ruissellement n'a pas pu être suffisamment dégagée. La différence de comportement vis-à-vis de l'écoulement des sols argileux, suivant la structure de leurs différents horizons, est très grande. Elle a été insuffisamment étudiée, et c'est surtout sur ce point que devront porter les prochaines recherches. Ceci conduira dans l'immédiat à faire précéder toute estimation systématique de débits de crues sur un tracé de route ou de voie ferrée, de reconnaissances pédologiques assez importantes. Elles le seront moins lorsque les recherches de l'ORSTOM sur ce point auront atteint leur objectif.

En raison de ces difficultés, il est essentiel de bien saisir le comportement hydrologique de ces bassins, c'est pourquoi on a présenté un schéma de calcul un peu long, décomposant les différentes opérations de l'estimation des crues afin de permettre à chaque étape des corrections en fonction des données d'observation du terrain, plutôt que de présenter une série de formules ou d'abaques fournissant directement le débit en l/s·km² qui, dans l'état actuel des recherches, conduiraient plus facilement à de graves erreurs.

Les études pédologiques et topographiques devront être accompagnées d'un examen des thalwegs : forme du lit (berges franches), nature des matériaux charriés, en relation avec la superficie du bassin, ces observations permettront, conjointement avec les résultats des quelques trous creusés par les pédologues, de voir sans trop de difficultés si le bassin est à classer dans la redoutable catégorie I ou non. On devra également contrôler rapidement si le bassin est bien recouvert par une litière sur la quasi-totalité de sa surface.

Il reste à souhaiter aux utilisateurs qu'ils rencontrent le plus souvent possible des bassins de catégorie V ou VI, ce qui heureusement est le cas le plus courant.

ANNEXE

DESCRIPTION SOMMAIRE DES SOLS DES BASSINS REPRÉSENTATIFS CITÉS DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE

A titre indicatif, on a repris ci-dessous les descriptions données par les pédologues pour les sols des différents bassins forestiers dont on a utilisé les données dans la présente note.

Les études pédologiques sur ces bassins s'étalent sur vingt ans, de sorte que la terminologie n'est pas homogène. En outre, le caractère des études varie beaucoup d'un bassin versant à un autre. Certains ont fait l'objet d'une simple reconnaissance, d'autres, par contre, ont été cartographiés de façon tout à fait régulière.

Enfin la nécessité de condenser ces données pédologiques a conduit à donner une image plus ou moins déformée de la nature généralement très complexe et hétérogène des sols de ces bassins.

Nous pensons cependant que ces quelques informations pourront guider les hydrologues dans le classement difficile des bassins à étudier parmi les six catégories. Nous suivrons sensiblement l'ordre du tableau I.

Bassins du Sitou, Manso, Bafo (régions de Guessigué, Côte-d'Ivoire)

— *Sous-sol* : en général schistes arkosiques, une partie non négligeable du bassin du Manso est constituée par un massif de granite calco-alcalin à biotite et muscovite.

Sols ferrallitiques sur l'ensemble du bassin :

— Sur les bas de pente et dans les thalwegs, sols sableux de bas de pente avec tendance très nette à l'hydromorphie permanente ou temporaire.

— Sur les pentes et les plateaux : sols appauvris en argile, perméables ou assez perméables en surface. Entre 30 ou 40 cm de profondeur on rencontre un horizon gravillonnaire, avec pourcentage d'argile élevé. L'indice de drainage devient très médiocre, la perméabilité est alors à peu près nulle en saison des pluies.

Par ailleurs en profondeur, ces sols présentent des phénomènes d'engorgement plus ou moins caractérisés.

Bassin de la crique Virgile

— *Sous-sol* : schistes antécambriens : série de l'Orapu (séricitoschistes) nombreuses failles.

— Sols hydromorphes lessivés à gley sur alluvions fluviales sur les bas de pente et les dépressions, couvrent une partie importante du bassin (42%).

— Sur les plateaux et les pentes, sols ferrallitiques fortement désaturés, remaniés et rajeunis (57%), sol argileux peu perméable lorsqu'il est gorgé d'eau. En dessous des 20 premiers cms les horizons sous-jacents argileux sont massifs.

Bassin de la Nziémé III

— *Sous-sol* : argilites et marnes, formation à très léger pendage, favorisant l'engorgement.

Horizons humifères et à minéraux argileux, peu épais sur argilite imperméable. Ces horizons présentent des fentes de retrait, dès que les fentes se referment après le début de la saison des pluies, le sol est imperméable malgré une structure grumeleuse, puis polyédrique moyenne et fine sur l'horizon humifère de surface.

Bassin de la crique Grégoire

— *Sous-sol* : gneiss et migmatites.

Sols ferrallitiques fortement désaturés.

Trois groupes de sols :

— Sols ferrallitiques typiques modaux perméables en surface (structure grumeleuse), puis horizon sablo-argileux massif moins perméable avec élément de quartz grossier reposant sur un sol encore moins perméable.

- Sols ferrallitiques lessivés modaux sablo-argileux à sableux, perméables en surface ; vers 40 cm de profondeur sol sablo-argileux avec éléments de quartz constituant un horizon massif dur, imperméable, sur lequel on constate un écoulement subhorizontal.
- Sols remaniés, penevolués, hydromorphes : en surface mêmes caractéristiques que plus haut, puis sol à structure polyédrique. L'horizon C à 1 m de profondeur, sablo-argilo limoneux à structure massive et imperméable.
- Les sols remaniés hydromorphes sur bas de pente et les sols hydromorphes de fond de vallée ne couvrent qu'une faible surface.

Bassin de la Nziémé I

- *Sous-sol* : grès, marnes et argilites.

Altération intense de type ferrallitique de tous les matériaux originels constituant le substratum géologique du bassin. Sols fortement désaturés.

- Nord-ouest du bassin : sol épais sableux sur grès à grains grossiers, très perméable.
- Nord-est du bassin : sols sur matériau sablo-argileux à sable fin, souvent perméables.
- Sud-est et limite est du bassin : sol à texture argileuse, peu épais sur marnes ou argilites subhorizontales, imperméable (voir Nziémé III).
- Entre ces trois catégories, mosaïque de sols à perméabilité très variable d'un type de sol à un autre.

Plus de 30% du bassin est constitué par des sols imperméables en saison des pluies.

Bassins de la Nzang et de la Mitzibé

Quatre types de sols :

- Sols sur gneiss, ferrallitiques, sablo-argileux à argilo-sableux, une ligne de discontinuité avec débris de gneiss noyés dans une terre très fine. Sols perméables.
- Sols sur amphibolites : texture argileuse. Porosité moyenne, microporosité faible, le relief accusé provoque une érosion très importante qui emporte la litière et déchausse les racines.

Ces sols peuvent être considérés comme très peu perméables après le début de la saison des pluies.

- Sols sur itabirites : blocs ferrugineux emballés par une terre fine argileuse, constituant un pavage qui diminue la perméabilité.
- Dépôts alluviaux sableux nettement hydromorphes.

Les formations perméables dominant, mais la proportion de sol imperméable est notable.

Bassins de Miélékouka I, II, III

- Sols sur série schisto-pellitique du précambrien moyen (série de la Douma), avec parfois des grès ou des quartzites : ces sols comportent un horizon humifère d'une dizaine de cm, puis un sol très argileux assez imperméable.
- Sols sur dolérites.
- Zones d'affleurement d'horizons gravillonnaires nombreuses mais réduites en étendue.

Le bassin versant I comporte de nombreux affleurements d'horizons gravillonnaires.

Bassins du Nion I

- *Sous-sol* : granite porphyroïde ou charnockite.

Trois types de sols :

- Alluvions de fond de vallée 25 cm de sol argilo-sableux sur sol argileux très plastique (ne couvrent qu'une faible surface).

- Centre du bassin (40% de la surface) : sols ferrallitiques peu érodés en pente colluvionnaire, sable argileux ou argilo-sableux avec structure grumeleuse en surface, fortement argileux, compact en profondeur, perméabilité moyenne : 5 à 7 cm/h sur l'ensemble du profil, devient peu perméable après le début de la saison des pluies.
- Sols de pente sur granite porphyroïde, sol grumeleux en surface fortement argileux vers 80 cm, très perméable en surface moins en profondeur.
- Sur charnockites (voir bassin du Nion II), sols très perméables.

Bassins du Gboa et du Loué

- Sols sur charnockites, analogues à ceux du Nion II. Très perméables surtout pour le Loué.

Bassins du Foubou et de la Dzounza

- Aucune indication pédologique.
- Sols sur quartzites?

Bassin d'Ottotomo III

- Peu d'indications pédologiques.
- *Sous-sol* : gneiss et embréchites (séries grenatifères de Yaoundé). Relief en demi-orange.
 - Sols ferrallitiques de versant fortement désaturés, typique jaune, texture argileuse dès 50 cm de profondeur (argile 57%), peu perméables.
 - Sols de bas fond : sable et graviers de quartz et disthème colmaté près du versant par une argile blanche du type gley kaolinitique, placage d'argile jaune, compacte au contact avec le versant.

Bassin d'Amitioro

- Sols sur schistes arkosiques (centre et sud-est d'Amitioro I).
 - Sols sur terrains birrimiens volcano-sédimentaires (nord-ouest du bassin), schistes tufacés, quartzites gondites.
 - Sols sur quelques pointements de granite calco-alcalins en bordure sud-est.
- Deux groupes de sols principaux sur schiste (80% du bassin).
- Sols faiblement ferrallitiques fortement gravillonnaires sur schistes :
 - Sommets et crêtes : sols brun-rouges, argilo-sableux fins à argileux très gravillonnaires.
 - Plateaux et pentes : sols ocre, sableux, fins argileux à argilo-sableux, très gravillonnaires.
 - Bas de pente et replats : sols jaunes sableux fins limoneux ; bas de pente sols à pseudo-gley de profondeur. Les zones de plateaux sont assez perméables, les pentes et surtout les bas de pente, beaucoup moins :
 - Sols hydromorphes minéraux avec engorgement de surface dans les bas-fonds :
 - Sols beiges à jaunes, à pseudo-gley de profondeur.
 - Sols gris dans de petites cuvettes, imperméables après le début de la saison des pluies. Au total 30% de sols peu perméables pour le bassin versant I.

Le bassin versant II qui comprend peu de sols de bas-fond comporte une proportion beaucoup plus faible de terrains peu perméables.

Bassin du Nion II

- *Sous-sol* : charnockites, sols ferrallitiques argilo-sableux ou sablo-argileux ; structure grumeleuse en surface. Très perméables en surface et également en profondeur.

Bassin de la crique Cacao

— *Sous-sols* : laves ou schistes andésitiques (roches vertes).

Évolution du sol : sols ferrallitiques fortement désaturés. Produits riches en argile et en fer :

— Sommets couverts par cuirasses anciennes (1).

— Glacis couvert soit de cuirasses secondaires affleurantes, soit sols ferrallitiques profonds plus ou moins concrétionnés en profondeur (2).

— Très fortes pentes, sols peu profonds d'érosion, compacts en profondeur (1).

— Bas de pente : sols ferrallitiques plus ou moins profonds sur colluvions à cuirasse de bas de pente (4).

— Terrasses : complexe de sol du type précédent mêlé d'alluvions hydromorphes (4').

Les sols argileux ont une structure grenue très fine favorable au drainage interne dans les horizons meubles : abondance de terriers et de souches déracinées. Les sols 1 et 3 sont nettement moins perméables.

Bassin du Leyou

Très peu de données pédologiques.

— *Sous-sol* : granite du massif du Chaillu :

Sol ferrallitique argilo-sableux, probablement aussi perméable que le bassin du Nion II, épaisse litière.

Bassin de la Bibanga

Pas de données pédologiques.

Conditions très analogues à celles du Leyou.

Bassin de l'Avéa II

— *Sous-sol* : micaschistes à deux micas, gneiss à deux micas, quartzites et migmatites.

— Sols ferrallitiques modaux rouges et jaunes à horizon induré non affleurant, sauf dans les bas de pente.

En forêt sol acide, en savane faiblement acide et couleur jaune, gris et rose. Les sols rouges à structure grenue très fine, perméables, dominant.

Bassin de l'Ifou

— *Sous-sol* : schistes bariolés à pendage à peu près vertical.

— Sols ferrallitiques sur les plateaux : très cuirassés, recouvrement sableux ou sablo-argileux jusqu'à 70 cm à 1 m.

— Sols ferrallitiques rouges, brun-rouges, brun-jaunes avec concrétionnement ferrugineux sur les pentes et les lignes de crête (stone lines).

— Sols ferrallitiques moins concrétionnés plus argileux, brun-jaunes sur les bas de pente, perméabilité moyenne ou faible.

— Sols hydromorphes : arènes colluviales de bas de pente très perméables en surface, arènes graveleuse de thalwegs, cette dernière catégorie est très perméable.

Les sols hydromorphes n'occupent qu'une faible superficie, mais ils reçoivent les quelques apports venant des pentes et des plateaux et peuvent en absorber une bonne partie lorsqu'ils sont perméables.

Bassin de l'Agbeby

Sables plus ou moins argileux ocres ou rouges du Tertiaire continental avec intercalation de grès ferrugineux. Perméabilité des horizons supérieurs très grande, ne diminue pratiquement pas avec la profondeur.