

Transfert de surface : Étude systématique du temps caractéristique θ (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2 000 km²

Daniel IBIZA (1)

RÉSUMÉ

Faisant suite à une étude de la forme des crues aux Antilles (IBIZA, 1985), nous proposons, maintenant, une étude systématique des temps caractéristiques des crues sur des bassins situés en régimes climatiques variés dont les superficies varient de 2 à 2 000 kilomètres carrés. Le temps caractéristique, quotient du volume ruisselé par le débit maximal peut, en effet, être pris comme une nouvelle définition, plus performante, du temps de concentration T_c qui entre dans la formule rationnelle CIA. Nous donnons les formules du temps caractéristique en régimes intertropicaux.

MOTS-CLÉS : Bassins versants – Crues – Régime des zones intertropicales – Temps de concentration – Transferts.

ABSTRACT

SURFACE RUNOFF : ANALYSIS OF CHARACTERISTIC RESPONSE TIMES θ FOR BASINS OF 2-2 000 km² IN THE INTERTROPICAL ZONE

Following a study of flood shape in West Indies (IBIZA, 1985) we propose a systematic study of the characteristic response times for basins situated under various climatic conditions and whose areas range from 2 to 2 000 square kilometres. The characteristic time which is the ratio of surface runoff to the peak discharge can be considered as a new and more efficient definition of the time of concentration which is part of the CIA rational formula. We give the formulae of characteristic time under intertropical conditions.

KEY WORDS : Basins – Floods – Regime of intertropical zone – Time of concentration – Surface runoff.

AVANT-PROPOS

Les écoulements de surface se concentrent dans les rivières et forment les crues. On appelle processus de *transfert de surface*, l'ensemble des processus d'acheminement par voie de surface de ces écoulements vers l'exutoire du bassin. Les *fonctions de transfert* des modèles hydropluviométriques décrivent ces processus et permettent de calculer les débits en un endroit donné à partir des volumes produits par le bassin et calculés par la *fonction de production*. Ce sont les problèmes de transfert qui sont abordés dans cette note.

L'objectif est d'améliorer ou de simplifier les méthodes de calcul des débits de pointe des crues et de compléter également nos connaissances dans le domaine des transferts de surface, pour mieux encore assujettir les modèles à la réalité physique des phénomènes.

Nous proposons une étude des transferts sous la forme d'une étude du temps caractéristique θ , qui entre dans le calcul des débits de pointe, selon une approche empirique globale, mais une approche guidée, néanmoins, par

(1) Centre ORSTOM de Montpellier, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex.

quelques considérations théoriques, pour ne pas laisser le hasard établir les formules à notre place et en évitant, en particulier, les formules sorties brutes des analyses en régressions multiples.

La démarche est une démarche déterministe c'est-à-dire qu'elle consiste à rechercher les tendances systématiques entre le transfert et les caractéristiques physiographiques du milieu physique. L'objectif pratique d'une démarche de ce type est de prédéterminer les paramètres hydrologiques d'un bassin, lorsque les débits font défaut, à partir des paramètres physiques de ce bassin qui peuvent être extraits des documents existants, (cartes et photos aériennes) et on s'astreint, a priori, à n'introduire que des paramètres immédiatement accessibles. On s'interdit ceux qui demanderaient des mesures supplémentaires complexes sur le terrain parce qu'il serait préférable, alors, de mesurer directement les débits. Une approche physique analytique pure qui consisterait à établir les équations des lignes d'eau à partir de la géométrie des obstacles et des sinuosités n'a, en effet, aucune chance d'aboutir puisque les dimensions transversales des rivières, éléments essentiels du transfert, ne sont pas lisibles sur les cartes.

RODIER a déjà entrepris des études régionales du même type (RODIER et AUVRAY, 1965), (RODIER, 1976 et 1985), (RIBSTEIN, RODIER à paraître). DUBREUIL, pour sa part, a fait un inventaire des différentes méthodes de calcul des débits des crues rares proposées en zone tropicale (DUBREUIL, 1986). Notre approche n'est sûrement pas plus précise, mais elle est plus systématique et tend à montrer et à quantifier l'influence respective des différents facteurs qui interviennent dans le transfert.

1. LE DÉTERMINISME DES TRANSFERTS DE SURFACE

Il est assez sommaire en ce domaine : La force de gravité est l'agent moteur qui permet l'acheminement de l'onde de crue mais les forces de friction s'y opposent, certaines linéaires, dans le lit de la rivière, et relativement prévisibles, mais d'autres aussi, singulières, au hasard des accidents du terrain.

1.1. LA FORCE ÉROSIVE OU TRACTRICE

La masse d'eau en mouvement dans un lit est dotée d'une force érosive ou tractrice qui dépend de la vitesse des écoulements. Cette force creuse le lit de la rivière mais la morphologie du lit conditionne à son tour la vitesse. Il y a une interaction permanente entre les effets et les causes et le cours d'eau tend avec le temps vers un profil d'équilibre. Pente et rayon hydrauliques apparaissent liés entre eux et indirectement à la superficie drainée.

Le déterminisme du transfert dépend essentiellement de cette force érosive et donc de ses facteurs.

Une première approche grossière, mais néanmoins pas très fautive, consiste à admettre que l'érosion s'est parfaitement stabilisée sur le bassin. Dans ces conditions, la force tractrice est constante sur le bassin si on néglige les différences de dureté des sols et on a alors, si R est le rayon hydraulique du collecteur considéré et i la pente de la ligne d'eau :

$$Ri = \text{constante sur le bassin (0)}$$

quel que soit le cheminement envisagé, y compris sur les interfluves. Cette première approche revient pratiquement à admettre que la vitesse de propagation est à peu près constante, pour un bassin donné, quels que soient le cheminement considéré et l'ordre de confluence de ce cheminement.

1.2. LA NATURE DES TERRAINS, LA GÉOLOGIE ET LA TECTONIQUE n'interviennent pour leur part que de façon très secondaire, non systématique. Ces facteurs peuvent apporter une explication supplémentaire des phénomènes de transfert mais leur prise en compte ne peut être faite que d'une façon semi-qualitative qui demande le savoir-faire de l'expert.

1.3. L'ÉTAT DE DÉGRADATION DU RÉSEAU HYDROMÉTRIQUE intervient également de façon sensible sur l'amortissement de la crue. Les lacs et les marais peuvent en particulier ralentir sensiblement le transfert. On pourrait penser a priori que le taux de dégradation du réseau est implicitement lié à la pente mais certains événements géologiques propres au bassin tels que verrous, fosses d'effondrement, etc. peuvent contribuer de façon spécifique à la formation de lacs et de marais. Cet aspect du transfert ne sera pas abordé dans cette étude, faute de pouvoir apprécier quantitativement de façon simple le phénomène. Signalons que RODIER le fait intervenir de façon qualitative dans ses approches.

2. RECHERCHE D'UNE FORMULATION GÉNÉRALE ENTRE LES PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES DU TRANSFERT ET LES PARAMÈTRES PHYSIOGRAPHIQUES

2.1. LES PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES DU TRANSFERT

L'hydrogramme unitaire, réponse à une impulsion de pluie, homogène sur le bassin, présente un intérêt à un double niveau, qualitatif et quantitatif. Il constitue une réalité physique dans les régions arides où l'averse est brutale et rapide. Il reste une entité abstraite dans les régions humides ou tempérées où la pluie est diffuse dans le temps et où les crues sont toutes complexes.

Au niveau qualitatif, la forme de la crue passionne les hydrologues parce qu'il n'y a pas deux hydrogrammes unitaires semblables et ils sont la « signature » du bassin. D'un point de vue pratique, la connaissance de la forme est nécessaire pour certains problèmes où l'on souhaite simuler des séquences de remplissage des réservoirs au moment des fortes crues. Nous délaïsserons cet aspect pour le moment.

2.1.1. Temps caractéristique θ et temps de concentration T_c

2.1.1.1. Temps caractéristique θ

L'hydrogramme unitaire est, sur le plan quantitatif, l'opérateur global qui permet d'obtenir, dans les problèmes de prédétermination des débits, le débit de pointe de la crue, à partir de son volume, estimé dans une phase de calcul préalable. Le rapport Q_{MAX}/V du débit de pointe au volume de la crue unitaire constitue le paramètre le plus logique et le plus simple dans cette opération.

L'inverse de ce rapport est le *temps caractéristique* θ , introduit et utilisé par F. MONIOD puis P. CHAPERON dans l'étude des crues des petits bassins de Martinique et de Guadeloupe (GUISCAFRÉ, KLEIN, MONIOD, 1979 et CHAPERON, LHÔTE, VUILLAUME, 1985). Ils avaient établi des corrélations régionales entre θ et des paramètres physiques des bassins.

θ est défini de la façon suivante :

$$1/\theta = Q_{MAX}/V \text{ de la crue unitaire}$$

Cette définition présente l'avantage d'être dépourvue de toute ambiguïté : la détermination du débit de pointe Q_{MAX} est aisée (si l'étalonnage de la station est bon). La détermination du volume de ruissellement V suppose que l'on sache faire la séparation empirique entre le volume ruisselé et le volume écoulé total mais comme le débit de base est souvent proportionnellement très faible, on peut se contenter d'un découpage très approximatif.

Dans l'approche de RODIER à partir de l'hydrogramme unitaire (RODIER et AUVRAY, 1965), on pose :

$$Q_{MAX}/Q_{MOY} = \alpha, \alpha \text{ est le coefficient de forme de la crue unitaire}$$

et comme :

$$Q_{MOY} = V/T_b \text{ (} V \text{ : volume ruisselé et } T_b \text{ : temps de base)}$$

On en déduit, par identification :

$$\theta = T_b/\alpha$$

Pour un coefficient de forme $\alpha = 2$ (hydrogramme triangulaire), le temps θ vaut la moitié du temps de base (moins lorsque $\alpha > 2$). Nous avons pu observer sur un grand nombre de bassins que θ n'était pas très éloigné du temps de montée t_m , mais qu'il en constituait toujours une limite supérieure ($t_m \leq \theta$).

Remarque : Nous rappelons qu'une crue unitaire est la réponse du bassin à une averse assez groupée dans le temps (corps d'averse unique, durée de la pluie utile inférieure au temps de montée), la plus homogène possible dans l'espace, et dont la lame ruisselée dépasse, de préférence, 5 mm.

2.1.1.2. Temps de concentration T_c

Le temps de concentration T_c est le temps qui entre dans la formule CIA, dite « rationnelle », appréciée par les bureaux d'étude en raison de sa simplicité. RICHARDS en donnait une définition littérale (RICHARDS, 1955) : C'était le temps mis par les gouttes d'eau les plus éloignées du bassin pour se propager à l'exutoire. Cette définition, établie à partir des hypothèses de régime permanent, tant sur la pluie que sur la propagation des écoulements,

ne convenait pas aux régions non tempérées où l'averse est relativement brutale et ponctuelle dans le temps. Petit à petit, on lui a substitué une définition pratique plus réaliste qui est le temps de montée de la crue unitaire. On retrouve cette dernière définition chez les auteurs anglo-saxons et chez les francophones (ROCHE, 1986). Bon nombre d'hydrologues estiment cependant que la définition littérale correspond au temps de base ; c'est une raison de plus de donner au temps de concentration une définition plus stricte.

Le petit calcul qui suit va permettre de le faire.

a) *Évaluation du volume ruisselé.* Dans un article précédent (IBIZA, 1985), nous avons montré que seule la fraction des plus fortes intensités de l'averse contribuait à la production du débit maximum. Dans les régions où l'averse est groupée dans le temps, on peut admettre que cette fraction des plus fortes intensités reste inférieure ou égale à la pluie maximale tombée pendant le temps de montée de la crue unitaire. Cela revient en effet à considérer que la contribution des fractions de pluie antérieures ou postérieures à la séquence des plus fortes intensités est inférieure à la perte de débit due à la décrue de l'écoulement provenant des plus fortes intensités. Cette condition a été vérifiée sur 18 bassins antillais et elle est satisfaite dans tous les climats non tempérés. Dans ces conditions, la fraction de volume ruisselé assimilable à une crue unitaire, qui contribue au maximum de la crue, est :

$$V \leq C \text{ pb}(t_m) A$$

A est la superficie.

pb(tm) est la pluie maximale, moyenne sur le bassin, pendant le temps de montée tm. La pluie moyenne pb(tm) est égale à $a \times p(tm)$, p(tm) est lue sur la courbe Intensité-durée de même fréquence et a est l'abattement sur cette séquence pluvieuse de durée tm. C le coefficient de ruissellement sur cette même durée.

b) *Évaluation du débit de pointe*

$$Q_{\text{MAX}} = V/\theta \leq \frac{C \text{ pb}(t_m) A}{\theta}$$

On peut écrire, à condition d'assimiler tm à θ au numérateur (approximation pessimiste puisque $t_m \leq \theta$) :

$$Q_M \leq C \text{ Ib}(\theta) A$$

Ib(θ) étant l'intensité moyenne sur le bassin pendant le temps θ .

On retombe sur une formule rationnelle de RICHARDS mais avec $T_c = \theta$.

θ devient alors la valeur du temps de concentration qui rend compatible les deux approches, par l'hydrogramme unitaire et par la formule CIA. En prenant $T_c = \theta$, valeur la plus théorique de T_c , cette formule devient alors remarquable puisqu'elle allie à la performance de la formule une définition très simple et dépourvue de toute ambiguïté du temps de concentration : c'est le temps caractéristique θ où V/Q_{MAX} de la crue unitaire.

2.1.2. Le temps de montée tm

Sa détermination pratique n'est pas très simple et suppose l'examen attentif des limnigrammes. Ce paramètre ne sera pas étudié ici, pour l'instant.

2.1.3. Le temps de base Tb

Nous avons également exprimé notre réticence à introduire le temps de base dans le calcul du débit maximal de la crue. Le temps de base ne suffit pas, à lui tout seul, pour ce calcul, puisqu'il faut y associer le coefficient de forme de la crue α et c'est le rapport T_b/α qui est pris en compte. Ce rapport n'est autre que θ . La détermination empirique du temps de base n'est pas simple non plus, surtout sur les bassins où la crue est suivie d'un écoulement hypodermique non négligeable.

2.2. LES PARAMÈTRES PHYSIQUES GLOBAUX DU BASSIN

La pente, la superficie, interviennent dans la formation de la crue, ainsi que la forme du bassin. La pente est le phénomène moteur dominant alors que la superficie intervient comme un facteur d'amortissement et de stockage. Les approches empiriques ont du mal à séparer l'influence de ces deux facteurs parce que la pente et la superficie sont naturellement liées dans un système de relief homogène (DUBREUIL, MORELL, SÉCHET, 1975), et on peut, dans ce système, expliquer indifféremment l'agressivité de la crue par l'un ou l'autre de ces paramètres, mais dès qu'on change de système, la liaison change aussi et les règles sont différentes.

Dans l'optique de cette première approche un peu simpliste, nous avons choisi d'explicitier la pente du bassin par l'indice de pente global IG de DUBREUIL parce qu'il est plus simple à mettre en œuvre que l'indice de pente Ip de ROCHE.

IG est le rapport de la dénivelée entre l'altitude dépassée par 5 % de la superficie du bassin et celle dépassée par 95 % de la superficie, à la longueur L du rectangle équivalent :

$$IG = \frac{A(.05) - A(.95)}{L} \quad (1)$$

La longueur du rectangle équivalent L est la longueur du rectangle de même superficie S et de même coefficient de GRAVELIUS Kc que le bassin versant.

$$L = f(Kc) \cdot S^{.5} \quad \text{avec } f(kc) = Kc/1,12[1 + (1 - (1,12/Kc)^2)^{.5}] \quad (2)$$

Personne n'a, semble-t-il, étudié les corrélations systématiques entre cet indice de pente et la pente moyenne du lit principal, utilisée dans les formules anglo-saxonnes, mais nous avons souvent eu l'impression que ces deux valeurs étaient voisines l'une de l'autre.

2.3. LA VÉGÉTATION

La végétation a un rôle double dans le transfert. Elle s'oppose d'abord à l'érosion et à une bonne organisation du réseau de drainage superficiel. Elle intervient ensuite directement sur les versants, son implantation au sol crée un microrelief ou *rugosité* qui ralentit le ruissellement.

Dans le cas le plus général, il est cependant impossible de caractériser avec précision la végétation moyenne d'un bassin, surtout en climat non tempéré. La carte topographique, à laquelle on se réfère habituellement, donne des indications qualitatives sur la végétation mais ne contient aucune information quantitative, en particulier, sur la densité de recouvrement de la végétation, paramètre prépondérant dans les climats où cette végétation est raréfiée. On verra dans cette note (paragr. 3.5) que nous avons dû recourir à l'utilisation d'un indice climato-végétal.

2.4. SUPPORT THÉORIQUE

Il n'est pas très rigoureux et consiste à appuyer un raisonnement sur une image très simplifiée du bassin versant. On admet que le temps de concentration suit une loi analogue aux temps de propagation et qu'il satisfait à une loi générale du type :

$$V = LI/T, \quad \text{ou si on préfère, } 1/T = V/LI \quad (3)$$

V est la vitesse moyenne de propagation sur le bassin et LI, la distance qui sépare, si on veut, le centre de gravité du bassin de l'exutoire.

Il y a deux types de transfert sur un bassin versant. L'un, qui s'effectue par le biais des collecteurs, est globalement régi par des lois de transfert hydraulique. L'autre se produit sur les versants eux-mêmes (écoulements en lame) et peut être qualifié de « transfert de versant ». L'approche théorique du transfert pourra être qualifiée « d'approche hydraulique » ou, au contraire, d'approche par les « transferts de versant », selon que l'image simplifiée que l'on se fait des propagations privilégie l'un ou l'autre de ces transferts.

2.4.1. Approche hydraulique du transfert

On explicite, dans la formule (3), la vitesse par une formule de MANNING STRICKLER et on obtient :

$$1/T = k_1 \frac{R^{2/3} \cdot IG^{1/2}}{LI}$$

Un bassin versant n'est pas assimilable à un seul canal mais à un réseau de canaux. Le rayon hydraulique R, va augmenter progressivement de l'amont vers l'aval. Quelques exercices vont permettre de nous faire une idée de ces variations.

Exercices 1 - On suppose que deux collecteurs de même importance, de section hémicirculaire, et de même pente, se rejoignent pour former un collecteur hémicirculaire. On veut calculer la valeur du rayon hydraulique R du collecteur final en fonction de la valeur r du rayon hydraulique des collecteurs amont. On écrit la conservation des débits et on obtient, puisque le rayon hydraulique est la moitié du rayon de la section :

$$\pi(2R)^2 R^{2/3} i^{1/2} = 2 \pi(2r)^2 r^{2/3} i^{1/2}$$

i est la pente superficielle de la ligne d'eau et on peut admettre qu'elle est identique sur les trois branches du confluent, au voisinage immédiat du confluent, et on a alors :

$$R^{8/3} = 2 r^{8/3} \text{ et } : R^{2/3} = 2.25 r^{2/3}$$

Pour une superficie qui a doublé, le premier terme de l'équation précédente s'est accru dans les proportions de 2.25

2 - quelle est la valeur du rayon hydraulique à l'exutoire en fonction de celle, r_1 , du collecteur élémentaire, drainant une surface s_1 , sachant que l'opération précédente se répète n fois ? C'est :

$$R^{2/3} = (2^n).25 r_1^{2/3}$$

pour une surface totale de 2^n fois s_1

Le terme $R^{2/3}$ de la formule varie plus ou moins en raison de la racine quatrième de la superficie, mais il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur. On retrouve la valeur moyenne de $0,25$ proposée par MONIOD (MONIOD, 1983), dans un calcul qui se basait sur des hypothèses voisines, et il trouvait $0,16$ pour des rivières à section rectangulaire.

L_1 , analogue au rectangle équivalent L , évolue à son tour comme la racine carrée de la superficie (formule 2). Si on explicite R et L_1 en fonction de S on a :

$$1/T = k_2 \frac{IG^{1/2}}{S^{.25}}$$

Généralisation

On ne s'attend pas à ce qu'un bassin fonctionne exactement comme cela et le rayon hydraulique dépend peut-être aussi de $f(Kc)$ de la formule (2). On peut généraliser la formule sous la forme suivante :

$$1/T = k_3 S^a . f^b(Kc) . IG^c$$

et on admet que le temps caractéristique, lui-même analogue à un temps de propagation, va suivre une loi du même type :

$$1/\theta = k_4 S^a . f^b(Kc) . IG^c \quad (4)$$

2.4.2. Approche du transfert par les phénomènes de versant

Les écoulements se propagent, un certain temps, sur les versants, en nappe ou selon des dépressions encombrées de végétation qui s'opposent à la progression de l'eau sous la forme d'une macro-rugosité ou microrelief à la surface du sol. Les écoulements de versant sont, comparativement, très lents par rapport aux écoulements des rivières, puisque le rayon hydraulique est très faible. Le chemin à parcourir est, par contre, relativement très court. Mais comme l'érosion est essentiellement liée à la vitesse, on peut penser que cette vitesse de départ, prise par l'écoulement sur les versants, conditionnée par le recouvrement végétal, va jouer un rôle important dans l'organisation du réseau hydrographique de l'aval (cf hypothèse de base exprimée par la formule 0). On admettra que la formule précédente (4) est vérifiée également, mais le coefficient k apparaît, alors, lié à la végétation globale du bassin. Le transfert sur versants a été traité très grossièrement parce qu'on a admis implicitement que le temps de transfert sur versant était négligeable par rapport au temps de transfert hydraulique. On verra au paragraphe 3.5.2. que cette hypothèse n'est plus valable pour les bassins inférieurs à 2 km^2 qui ne peuvent être traités par cette approche. RIBSTEIN et RODIER (à paraître), dans leur approche sur petits bassins, au Sahel, font intervenir une pente transversale.

3. LES DONNÉES ET LEUR TRAITEMENT

3.1. LE FICHER DES DONNÉES DE BASE

Les informations utilisées dans cette note concernent 147 bassins versants étudiés par l'ORSTOM et sont extraites du « *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, de 1951-1969* » (P. DUBREUIL *et al.*, 1972) et résultent du travail de nombreux hydrologues de l'ORSTOM. Ce recueil donne pour chaque bassin un fichier qui est une sorte de résumé du rapport d'étude et qui contient : une carte topographique et d'équipement, un tableau des caractéristiques physiques, des indications sur le climat, les sols et la végétation, un tableau de

synthèse des principales crues observées, et enfin, les coordonnées d'un hydrogramme type. Dans le cadre de cette première esquisse, nous nous en sommes tenus aux indications de ce rapport et nous n'avons pas eu recours, ou très peu, aux rapports originaux.

Les bassins qui ont été utilisés ici ne représentent qu'un tiers environ des bassins étudiés par l'ORSTOM.

3.2. DÉTERMINATION DU TEMPS CARACTÉRISTIQUE

Il y a deux méthodes de calcul de θ :

L'une, qui utilise les données de l'hydrogramme unitaire qui figurent dans le recueil, permet d'obtenir directement θ . Un calcul préalable du volume de la crue par moyenne pondérée des débits est cependant nécessaire pour éliminer quelques grossières erreurs de transposition.

L'autre, indirecte, consiste à calculer Q_{MAX}/V sur l'ensemble des crues observées, correspondant à des lames ruisselées supérieures à 5 mm et à des pluies pas trop hétérogènes. Ces valeurs sont assez souvent voisines pour un même bassin et l'inverse $1/\theta$ du temps caractéristique est alors la plus forte ou une des plus fortes de ces valeurs.

Les deux méthodes doivent en principe fournir des résultats très proches et lorsqu'ils ne l'étaient pas, nous nous en sommes plutôt tenus aux valeurs fournies par la deuxième méthode.

3.3. DÉTERMINATION DE LA PENTE ET DE KC

Le calcul de la pente passe par le calcul préalable du rectangle équivalent, lui-même calculé au moyen du coefficient de Gravelius. Sa détermination précise constitue une opération délicate parce qu'il faut interpréter les résultats et qu'on ne peut se contenter d'une approche géométrique stricte. L'idée générale était qu'il fallait introduire, d'une façon ou d'une autre, la forme du bassin versant. Mais cette longueur ne représente que très vaguement la forme du bassin, certains bassins, en entonnoir ou en spirale, etc., n'ayant que peu de rapport avec un rectangle. La valeur de L , qui fait intervenir le rapport entre une longueur, le périmètre, et la surface, dépend sensiblement de l'échelle de la carte. Il faut donc « arrondir les angles » du contour lorsque l'échelle du support est trop petite et il faut également « aménager ce contour » pour mieux traduire l'organisation intérieure du bassin. P. DUBREUIL avait précisé certaines normes de stylisation pour aboutir à des valeurs comparables (DUBREUIL, 1966).

Cette approche qui s'en tient à une perception globale du bassin versant est imprécise mais elle est simple. Signalons enfin qu'une approche plus fine du transfert sur bassin a été réalisée avec succès par F. MONIOD (MONIOD, 1983). Elle est basée sur une prise en compte analytique de la configuration du bassin, mais elle nécessite un découpage en petits carreaux, avec discrétisation de la pente.

3.4. LA VÉGÉTATION

Les cartes ne donnent que des informations qualitatives sur la végétation. Elles ne précisent pas la densité de recouvrement totale de la végétation ni la densité relative des espèces ligneuses hautes.

Le même symbole, « savane arbustive », par exemple, sert à décrire la végétation des environs de Ouagadougou, et celle de la région de Bouaké, située 1 000 kilomètres plus au sud dans un climat bien plus pluvieux, mais il est évident que ces végétations sont très différentes, la première étant bien plus claire que la seconde. L'Afrique de l'Ouest est un pays au relief peu accentué et sa végétation évolue assez peu dans l'espace : elle évolue du nord au sud sous l'effet des précipitations et localement sous l'effet de l'action humaine, cette dernière action tendant à réduire le volume de la biomasse. Le pourcentage d'occupation des cultures est sans doute un bon indice pour appréhender la densité de la population, mais l'action humaine ne se limite pas seulement aux cultures. Dans les régions de savane, les populations pratiquent le brûlis qui produit, à la longue, une déforestation. C'est le seul moyen dont elles disposent pour recycler rapidement les sels minéraux et pour se débarrasser d'une végétation lignifiée et devenue non biodégradable, en fin de saison sèche, quand l'activité biologique est pratiquement interrompue. Il existe donc pour chaque climat deux types de végétation, l'une naturelle, l'autre anthropisée, mais la valeur interannuelle des précipitations nous a paru, malgré tout et faute de mieux, être un bon indice pour caractériser la végétation. Mais la végétation dépend également d'un certain nombre de facteurs secondaires tels que : sols, cultures, etc. (cf. 3.4.7) et on comprendra qu'il ne s'agit que d'une tendance globale.

Nous avons défini un certain nombre de classes climato-végétales qui recourent les classes climatiques conventionnelles et nous précisons, ci-après, pour chacune d'elles, les limites climatiques et quelques paysages typiques, vus sous l'aspect de leurs caractéristiques physiques (densité de recouvrement et biovolume).

3.4.1. Climat désertique et subdésertique

$P < 250$ mm. Classe notée « D » dans les tableaux et représentée, sur les graphiques, par un triangle blanc.

3.4.2. Climat aride et semi-aride ou sahélien

$250 \text{ mm} < P < 700$ mm. Notée « A » et représentée par un triangle noir. Végétation de graminées annuelles sur les sols perméables et végétation discontinue d'épineux ligneux sur les terrains argileux (brousse tigrée). La densité de recouvrement de la végétation reste en moyenne assez faible et ne dépasse pas 30 %, en saison des pluies.

3.4.3. Climat tropical

$700 \text{ mm} < P < 1\,200$ mm. Notée « T » et représentée par un carré blanc.

Forêt sèche, en végétation naturelle et savane de graminées pérennes (organisées en touffes), faiblement arborée, dans les régions de culture (mil, puis sorgho et coton).

Dans le sud, on a déjà de belles savanes parc, avec une densité de recouvrement des espèces ligneuses hautes pouvant atteindre 30 %.

3.4.4. Climat tropical de transition

$1\,200 \text{ mm} < P < 1\,600$ mm. Notée « TT » et représentée par un carré noir. Forêts mésophiles, en végétation naturelle, avec des densités de recouvrement des espèces ligneuses hautes pouvant atteindre 50 %. Dans les régions cultivées, on trouve du sorgho, du maïs et du coton, mais également du manioc, des ignames et quelques plantations arborées (Teck). La végétation naturelle y reste assez fortement présente sous la forme de taillis vivaces.

3.4.5. Climat équatorial de transition ($1\,600 \text{ mm} < P < 2\,000$ mm) et hyper-humide ($P > 3\,000$ mm)

Notée « ET » et représentée par un rond blanc.

La forêt naturelle, hygrophile, est fortement densifiée par des espèces non ligneuses ou peu ligneuses hautes : lianes, bambous, palmiers. La densité de recouvrement des espèces hautes peut atteindre 80 %. C'est le domaine des plantations : bananiers, caféiers. Les cultures traditionnelles, sur buttes, prennent l'aspect de clairières ou de jardins que la végétation naturelle, envahissante, a tôt fait de reprendre (manioc, ignames...).

Nous avons également rangé dans cette classe les végétations de climats hyperhumides, généralement insulaires, où les espèces arborées sont relativement dégradées au profit des espèces moins ligneuses.

3.4.6. Climat équatorial

$2\,000 \text{ mm} < P < 3\,000$ mm. Notée « E » et représentée par un rond noir. Forêt équatoriale à plusieurs strates arborée et arborescente. Densité de recouvrement voisine de 100 %.

3.4.7. « Bassins cultivés »

Les bassins dont les cultures occupaient plus de 50 % de la superficie totale ont été rangés dans la sous-classe « Bassins cultivés » de chacune des classes précédentes. Le symbole de la classe climatique est alors entouré d'un rond.

3.4.8. Recouvrements particuliers

Les bassins occupés de « roches nues » sur 50 %, au moins, de la superficie ont été rangés dans une classe spéciale « roche nue », quel que soit le climat régional, et représentée par un « X ». Les bassins occupés de zone urbaine sur plus de 50 % de la superficie, enfin, ont été rangés dans la même classe.

3.5. ÉTABLISSEMENT DES CORRÉLATIONS

3.5.1. Recherche d'un indice climato-végétal : Variable CLIMA

La végétation naturelle est en relation avec les précipitations annuelles, dans le contexte climatique des régions intertropicales, mais cette relation n'est pas simple. On cherche surtout à caractériser la densité de recouvrement de la végétation et ce paramètre tend vers 100 % pour les précipitations de l'ordre de 2 000 millimètres. Pour les très fortes précipitations, supérieures à 2 000 mm, qui coïncident avec des zones d'altitude, le biovolume végétal

a tendance à décroître lorsque la pluie croît. Il nous a semblé préférable d'introduire un indice climato-végétal CLIMA pour décrire l'état de la végétation naturelle. Cet indice est défini comme le rapport de la pluie à l'ETP régionale :

$$\text{CLIMA} = P/\text{ETP}, \text{ borné par } .15 \text{ et } 1,3$$

Cet indice est, comme tous les indices climato-végétaux, basé sur une comparaison plus ou moins directe de la pluie et de l'ETP, mais il nous a semblé que les valeurs qu'il prenait en zone tempérée ne sont pas aberrantes et que cet indice permettait, dans le domaine des transferts de surface, une correspondance de différents types de végétation sous des climats différents. On peut en espérer une plage d'utilisation plus générale que la simple valeur de la pluie ou que d'autres indices climato-végétaux comme, par exemple, celui d'Emberger.

Les bornes conseillées sont purement empiriques mais elles s'expliquent facilement : la valeur de 0,15 correspond à des sols nus et les valeurs inférieures à 0,15 ne sont pas significatives pour décrire la végétation. La valeur de 1,3 correspond à un climat équatorial avec une ETP de 1 600 mm et un recouvrement végétal voisin de 100 %. Au-delà de cette valeur, pour les climats hyperhumides, la végétation a plutôt tendance à réduire, de nouveau, de volume.

Le facteur CLIMA a été calculé sur tous les bassins, à partir d'une valeur de l'ETP évaluée sommairement sur tous les sites d'étude. La valeur de l'ETP utilisée correspond plutôt, en fait, à l'évaporation sur bac Colorado.

3.5.2. Méthode de régression linéaire multiple

Pour obtenir de bons résultats avec une telle méthode, il faut que les variables introduites aient, bien sûr, une liaison linéaire avec la variable à expliquer, mais également que les différentes variables soient indépendantes entre elles.

Une linéarisation de la formule (4) est obtenue au moyen des logarithmes. Le modèle recherché est du type :

$$\log(1/\theta) = a \log S + b \log f(Kc) + c \log IG + d \log \text{CLIMA} + e$$

Le programme de corrélations en régressions multiples utilisé fonctionne selon le mode « stepwise » (progression pas à pas à partir des variables les plus explicatives), avec exclusion des variables au-dessous d'un certain seuil d'explication. Les corrélations étaient également visualisées sur imprimante, au fur et à mesure, grâce à un programme qui représentait les positions des différents bassins dans un champ ($IG1 = IG S^{a/c} f^{b/c}, 1/\theta$). On a pu se rendre compte, de cette façon, que les petits bassins inférieurs à 2 km² ne suivaient pas le même déterminisme et ils ont été éliminés. L'influence du transfert sur versants devient en effet prépondérante sur ces bassins, par rapport au transfert hydraulique (cf p. 2.4.2.).

La deuxième condition était irréalisable : La superficie et la pente apparaissent toujours fortement liées en sens inverse et on pouvait craindre, sur des classes de végétation de 30 à 40 valeurs, une instabilité des corrélations, dans laquelle les points extrêmes auraient joué un rôle excessif. Cette préoccupation nous a conduits à rechercher, également, un modèle sur l'ensemble des points, tous climats confondus, de façon à avoir des valeurs des exposants plus significatives.

Les bassins faisant l'objet d'un recouvrement particulier, cultures intensives, roche nue ou urbanisation prépondérante, ont été représentés sur les corrélations mais n'ont pas été introduits dans le modèle, les conclusions sur le comportement de ces bassins résultent d'un simple examen visuel, par comparaison avec les valeurs en végétation naturelle (cf. paragr. 5).

Pour simplifier les formules et ne conserver que les influences vraiment significatives le seuil d'exclusion des variables explicatives a été relevé à 10 %.

4. RÉSULTATS OBTENUS

Les corrélations ont été recherchées, classe par classe, puis sur les regroupements A + D + T, TT, ET + E, puis sur l'ensemble des points.

4.1. MODÈLE GÉNÉRAL

4.1.1. Formule obtenue sur l'ensemble des points observés

θ est exprimé en minutes, S en km², I_G en m/Km².

Elle porte sur 105 bassins en recouvrement naturel dont 6 supérieurs à 500 km² et 12 compris entre 100 et 500 km².

Pourcentage d'explication de la variable : $R^2 = 86,0 \%$ ($R = 0,93$)

$$1/\theta = 0,0010 S^{-26}, f(Kc)^{45} IG^{71} CLIMA^{-73}$$

4.1.2. Comparaison avec les valeurs théoriques avancées

La valeur de $-0,26$ de a , exposant de S , est très proche de la valeur de $-0,25$ évaluée sommairement, lors de l'approche théorique et ce résultat est très satisfaisant.

La valeur de c , de $0,71$, est également proche de la valeur théorique de $0,5$, bien que légèrement supérieure. Cette particularité tient, peut-être, à la définition qui a été donnée de la dénivelée. L'indice de pente n'est qu'une quantification très approximative du facteur pente.

4.2. INFLUENCE DES DIFFÉRENTES VARIABLES EXPLICATIVES

4.2.1. La forme du bassin $f(Kc)$

La forme du bassin intervient dans le modèle, sur l'ensemble des points, avec une pente positive de $0,45$, mais l'influence de $f(Kc)$ sur $1/\theta$ est cependant faible (coefficient de corrélation relatif $\rho = 0,13$). Cette influence annule celle qui a été introduite dans la définition de la pente. Cela signifie que l'introduction de la longueur du bassin dans le calcul de la pente n'améliore pas, globalement, la corrélation. Ce résultat n'est cependant pas persistant au niveau des classes : Cette contre-influence est particulièrement nette dans les zones de climat sec et elle ne l'est plus dans les zones de climat humide.

4.2.2. Le facteur CLIMA

L'influence du climat sur $1/\theta$ est également assez faible et CLIMA intervient dans le modèle sur l'ensemble des points, avec une pente négative de $-0,73$: Les bassins en zone sèche à faible recouvrement végétal ont un temps caractéristique θ relativement plus faible, à caractéristique égale. On peut dire qu'ils sont plus agressifs que les bassins en zone humide.

Quand on en vient à l'étude classe par classe, le terme CLIMA est exclu, ou son influence est très faible (classe TT), mais le terme constant de la corrélation est modifié en conséquence et traduit la même tendance.

4.2.3. La pente et la superficie

Ces deux variantes apparaissent toujours liées, entre elles, en sens inverse, (ρ de l'ordre de $0,6$) et elles influencent fortement l'agressivité du bassin $1/\theta$ avec des coefficients partiels ρ voisins de $0,75$, aussi bien pour la pente que pour la superficie, sur l'ensemble des points.

La superficie intervient dans le modèle avec une pente $a = -0,26$ sur l'ensemble des points. La pente du bassin intervient dans le modèle avec une pente $c = 0,71$. Au niveau de l'étude classe par classe, les valeurs de ces paramètres sont légèrement différentes, mais il ne faut pas, cependant, tenter de donner une explication physique à la variation observée régionale de ces exposants, qui est moins significative sur un échantillon de 30 à 40 valeurs, en raison de la liaison inverse entre la pente et la superficie.

4.3. MODÈLE SIMPLIFIÉ. Modèle en S , DG/S , CLIMA (mêmes unités, DG en mètres).

Le résultat de 4.2.1. nous incite à tenter d'éliminer l'influence de $f(Kc)$, qui semble avoir été introduite malencontreusement dans la pente. Pour cela, on pose : DG (dénivelée utile) = $A(,05) - A(,95)$. C'est le numérateur de l'expression de la pente (formule (1)). On passe de IG à DG par la formule : $DG = IG f(Kc) S^5$.

4.3.1. Modèle intermédiaire

Modèle $S^a f(Kc)^b DG^c CLIMA^d$.

Avec ce modèle intermédiaire on a obtenu : $a = -0,62$, $b = 0$ (variable exclue), $c = 0,69$, $d = -0,74$.

Les formules se simplifient ; l'exposant a de la puissance de S vient s'accroître, en valeur absolue, de $c/2$ environ par rapport au modèle général, ce qui confirme la stabilité des corrélations.

4.3.2. Modèle simplifié

On est alors frappé des symétries des influences en S et DG puisqu'on a, à peu près, $a = -c$ et on est amené, finalement, à rechercher un nouveau modèle simplifié avec les variables S, $f(Kc)$, DG/S, CLIMA.

Les formules résultantes apparaissent alors très simplifiées puisque les variables S, $f(Kc)$ sont éliminées, sans perte d'explication sensible (moins de 1 point). Ces dernières formules sont équivalentes aux précédentes, du moins par rapport à notre échantillon. Le terme $(DG/S)^{0,5}$ est analogue à l'inverse d'un temps, comme $1/\theta$, si on rajoute au numérateur l'accroissement de la pesanteur g que l'on a oublié quelque part. Le rapprochement avec des formules hydrauliques simples de perte de charge est troublant.

Avec ce nouveau modèle, on remarque une liaison directe entre la forme du bassin et le terme DG/S. ($\rho = 0,21$ sur l'ensemble des points) et la liaison entre DG et $f(Kc)$ est encore plus forte ($\rho = 0,403$). Cette liaison montre que les bassins à dénivelée importante sont, dans l'ensemble, allongés. Elle doit avoir une explication géomorphologique, et elle est à l'origine du « rejet », par le modèle, de la forme du bassin comme variable explicative. Cette tendance est observée globalement sur l'échantillon mais cela ne veut pas dire qu'elle se vérifie sur chaque bassin en particulier.

Formule générale simplifiée :

La formule simplifiée obtenue sur les 105 bassins précédents, avec un pourcentage d'explication $R^2 = 85,6\%$ ($R = 0,93$), est la suivante :

$$1/\theta = 0,0013 (DG/S)^{0,64} CLIMA^{-0,70}$$

Dans cette formule, le terme DG/S est nettement prépondérant puisque la corrélation partielle de ce terme avec $1/\theta$ est $\rho = 0,83$.

4.4. FORMULES RÉGIONALES (formules provisoires)

θ est exprimé en minutes, S en km^2 , IG en m/km^2 , DG est en mètres.

Les formules régionales sont peut-être un peu plus précises, bien que les gains en pourcentage d'explication, obtenus en procédant classe par classe, soient faibles.

4.4.1. Zone sèche D + A + T

43 bassins en végétation naturelle dont 5 supérieurs à $500 km^2$ et 4 compris entre 100 et $500 km^2$.

$0,15 < CLIMA < 0,45$

L'échantillon est constitué d'une façon telle que l'effet du couvert végétal n'est pas suffisamment pris en compte, alors qu'il est manifeste sur les graphiques. On reprendra la corrélation obtenue sur l'ensemble des points :

Modèle simplifié :

$$1/\theta = 0,0013 (DG/S)^{0,64} CLIMA^{-0,70}$$

4.4.2. Zone de transition TT : $0,45 < CLIMA < 0,85$

29 bassins en végétation naturelle, dont 4 supérieurs à $100 km^2$.

Modèle simplifié : $R^2 = 86,1\%$ ($R = 0,93$)

$$1/\theta = 0,0016 (DG/S)^{0,70} CLIMA^{-1,16}$$

Lorsqu'on travaille par classe de végétation, le facteur CLIMA joue, évidemment, un rôle moins important.

4.4.3. En zone humide : ET + EQ $0,85 < CLIMA < 1,2$

33 bassins en végétation naturelle dont 1 supérieur à $500 km^2$ et 4 compris entre 100 et $500 km^2$. La remarque générale de 4.3. ne s'applique pas à cette classe de végétation, en raison, peut-être, de la nature particulière de l'échantillon.

Modèle avec IG : $R^2 = 87,7\%$ ($R = 0,94$)

$$1/\theta = 0,0008 S^{-1,14} IG^{0,67}$$

5. EXAMEN DES RÉSULTATS

Les figures 1,2 et 3 représentent les couples de valeurs ($1/\theta_{\text{calc}}$, $1/\theta_{\text{obs}}$). A l'exception de quelques points marginaux, les valeurs calculées se rapprochent des valeurs observées avec un écart de + ou - 70 %. Ces écarts résiduels sont très satisfaisants si on les compare à la plage de variation de $1/\theta$ dans des proportions de 1 à 100 environ. Du point de vue des applications pratiques, le temps caractéristique, dans le cadre de la formule CIA, par exemple, où il prend la place du temps de concentration, n'intervient que pour l'évaluation de l'intensité de pluie I . Cette variable n'est fort heureusement pas une fonction linéaire du temps et une variation de 70 % de θ peut n'entraîner, dans les meilleures conditions, c'est-à-dire en zone humide qu'une variation de I de 30 à 40 %. Cette précision est tout à fait suffisante pour des évaluations de débits de pointe rares, dans le cadre d'un avant-projet d'étude, ou pour des installations au fil de l'eau.

En zone sèche, par contre, l'erreur sur θ aurait tendance à se reporter intégralement sur le débit maximum, en raison de la brutalité des averses, et une enquête préalable qualitative, du type « Check list » préconisée par RODIER (RODIER, 1985), permettant d'apprécier les influences des facteurs secondaires (forme du bassin, réseau hydrographique particulier, etc.) est susceptible d'améliorer la précision.

5.1. EN ZONE SÈCHE

Les bassins de Mayo'Kereng (CAM02) et de la Lhoto (DAH01A) n'ont pas été pris en compte pour l'établissement du modèle, en raison de leur position marginale. Cette décision est une simple précaution pour éviter « d'affoler » les corrélations (cf. 3.5.1. 2^e al.) et ne constitue pas, bien entendu, un jugement sur la qualité des mesures de ces bassins.

On a reporté sur ces corrélations les bassins en culture et les bassins à recouvrements particuliers, urbanisés ou roche nue.

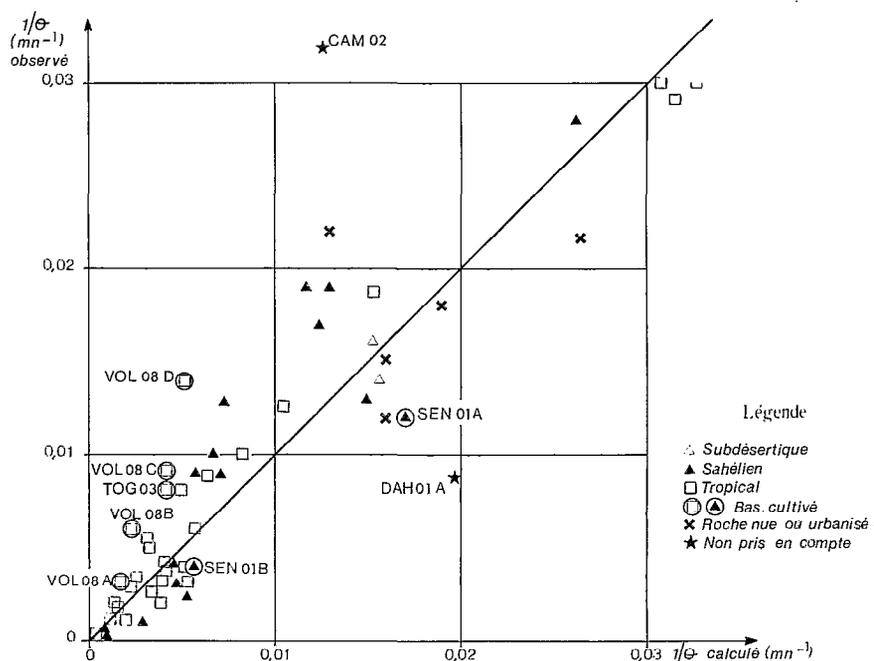


FIG. 1. - Corrélations ($1/\theta$, $1/\theta_c$) en zone tropicale sèche (modèle simplifié régional)

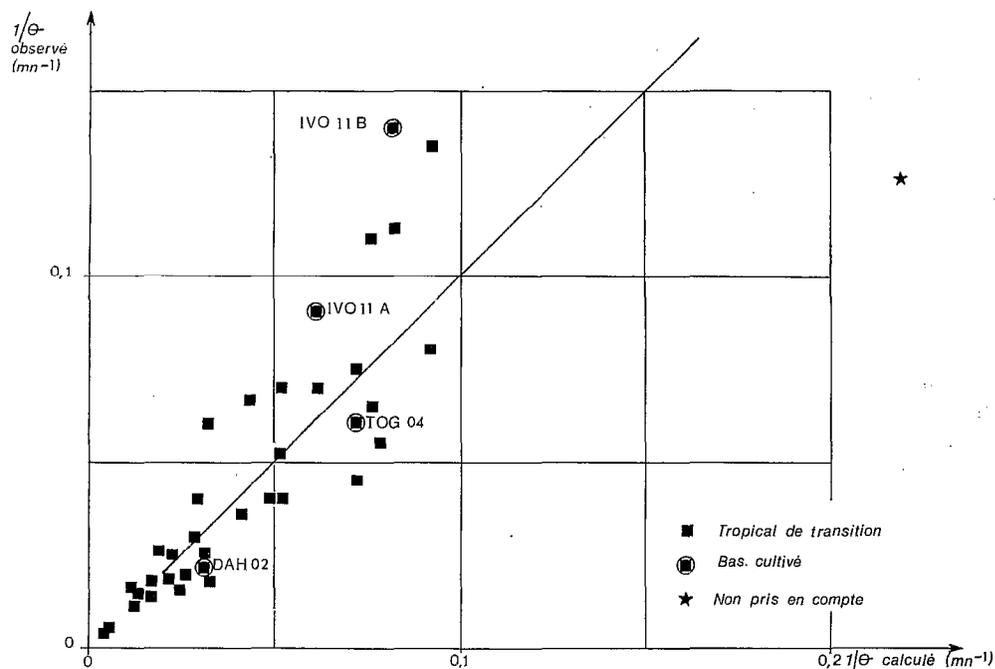


FIG. 2. - Corrélations ($1/\theta$, $1/\theta_c$) en zone intertropicale de transition (modèle simplifié régional)

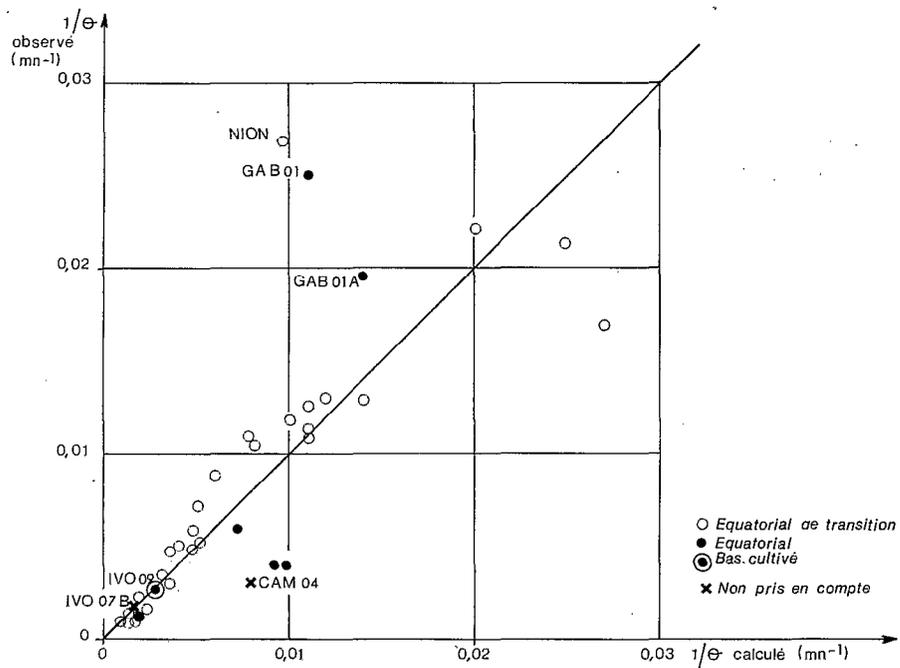


FIG. 3. - Corrélations ($1/\theta$, $1/\theta_c$) en zone intertropicale humide (modèle simplifié régional)

5.1.1. Bassins mis en culture

Il y a deux bassins sénégalais de Sebikotane (SEN01A et SEN01B) qui se situent assez bien par rapport à la corrélation des points en végétation naturelle, mais ces bassins sont à la limite de la zone sahélienne et ils sont crédités d'un indice climato-végétal CLIMA de 0,2 proche de la valeur minimum de 0,15. Les bassins tropicaux voltaïques de Manga (VOL08A, 08B, 08C, 08D) se trouvent, par contre, très au-dessus de la courbe des points en végétation naturelle et ont un comportement de bassins sahéliens naturels. La mise en culture pourrait entraîner une dégradation du couvert végétal et faire évoluer les comportements des bassins vers des bassins à sols nus. Ces points entreraient dans la corrélation si on leur attribuait une valeur de CLIMA de 0,15 qui est la valeur pour les sols nus.

5.1.2. Bassins à recouvrement particulier

On a également dessiné sur ce graphique les points correspondant à des bassins à recouvrement particulier : zone urbaine, roche nue, quelle que soit leur situation géographique (Niger, Tchad, Congo), mais en leur attribuant une valeur de CLIMA de 0,15.

Ces points s'intègrent assez bien dans la corrélation et ont, dans l'ensemble, un comportement de bassin à sol nu.

5.2. ZONE DE TRANSITION

Tous les bassins de cette zone, sauf 2, proviennent de l'Afrique intertropicale. Le bassin de Makabana (NGO05) a été exclu pour l'établissement du modèle.

Bassins cultivés

Certains bassins cultivés occupent dans la corrélation une place élevée, mais la tendance des bassins cultivés à régresser d'une classe de végétation est moins nette qu'en zone sèche. Il faudrait encore distinguer selon les différents modes de pratique culturale. Dans l'ensemble, tout ce qui favorise l'érosion accélère aussi le transfert.

5.3. ZONE HUMIDE

La corrélation des bassins de zone humide, dans laquelle on a rajouté bon nombre de bassins antillais, reste néanmoins assez peu satisfaisante du fait de la présence des bassins gabonais Nzang et Mitzibe (GAB01 et GAB01A), qui occupent une position élevée dans la corrélation. Ces deux bassins sont des bassins forestiers mais il est vraisemblable que la densité de recouvrement de la végétation y est assez faible. RODIER les qualifiait de « bassins forestiers sans litière » (RODIER, 1976).

Bassins en culture

Les bassins cultivés sont peu nombreux dans cet échantillon, mais ils semblent bien s'intégrer aux autres bassins en végétation naturelle, parce que la mise en culture n'entraîne pas, dans ces régions, une diminution considérable du taux de recouvrement.

6. CONCLUSION

Le temps caractéristique θ est le rapport V/Q_{MAX} qui permet de passer le plus simplement du volume estimé de la crue au débit de pointe Q_{MAX} . Ce temps caractéristique peut être proposé avantageusement à la place du temps de concentration T_c de la formule rationnelle CIA, dont la performance est ainsi renforcée. Dans les régions arides, où la précision de la méthode reste assez faible (cf. paragr. 5, 1^{er} al.), un questionnaire pour apprécier les influences secondaires peut apporter un gain de précision supplémentaire.

L'étude systématique de θ en régimes climatiques variés permet de montrer les influences respectives des différents paramètres morphologiques qui interviennent dans la formation des crues.

Sur notre échantillon, le temps caractéristique varie dans des proportions de 1 à 100 environ. Le tableau suivant donne l'amplitude, observée sur notre échantillon, des variations des différents paramètres explicatifs, ainsi que l'amplitude de variation correspondante de θ , calculée à partir de la formule générale simplifiée.

Paramètres	Amplitude de variation	Variation correspondante de θ
DG	$\times 20$	1 à 8
S	$\times 1\ 000$	1 à 100
CLIMA	0,15 à 1,3 ($\times 8$)	1 à 4
f(Kc)	de 1 à 2	éliminée

On voit, sur le tableau, que la superficie est, de loin, le paramètre qui influence le plus les variations de θ , bien que l'échantillon ait été limité à des bassins dont la superficie était comprise entre 2 et 2 000 km².

La dénivelée utile vient ensuite, puis l'indice climato-végétal qui représente la végétation et plus exactement la densité de recouvrement de la végétation. Pour ce dernier paramètre, il convient de souligner qu'il peut s'agir d'une influence indirecte puisque la végétation intervient également comme facteur conditionnel de l'érosion et, par suite, à long terme, dans le calibrage des rivières. La forme du bassin interviendrait dans des proportions de 1 à 2 environ, mais elle a été, en pratique, éliminée de nos corrélations.

Rappelons toutefois que les phénomènes de dégradation du réseau (lacs, marais) résultant de configurations géologiques particulières (verrous, fosses d'effondrement...) n'ont pas été pris en compte.

BIBLIOGRAPHIE

- CHAPERON (P.), L'HÔTE (Y.), VUILLAUME (G.), 1985. – Les ressources en eau de la Guadeloupe. *Monogr. Hydrol. ORSTOM* n° 7.
- DUBREUIL (P.), 1966. – Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants : leur détermination avec une précision acceptable. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, Vol. 5.
- DUBREUIL (P.) et al., 1972. – Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, ORSTOM.
- DUBREUIL (P.), MORELL (M.), SECHET (P.), 1975. – Comportements et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, Vol. XII, n° 1.
- DUBREUIL (P.), 1986. – Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. *Journal of hydrology* 87, (1986) : 201-222.
- GUISCAFRE (J.), KLEIN (J.-C.), MONIOD (F.), 1979. – Les ressources en eau de surface de la Martinique. *Monogr. Hydrol. ORSTOM* n° 4.
- IBIZA (D.), 1985. – Enquête aux Antilles : Influence de la forme de l'averse sur la forme de la crue. Application : méthode globale de prédétermination des crues rares, méthode analytique. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, Vol. XXI, n° 4.
- MONIOD (F.), 1983. – Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydr.*, Vol. XX, n° 3-4.
- RIBSTEIN (P.), RODIER (J.), à paraître. – Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant 1 à 10 km².
- RICHARDS (B.D.), 1955. – Flood estimation and control, Chapman et Hall L^{ted} London.
- ROCHE (M.), 1986. – Dictionnaire français d'hydrologie (de surface), Masson éd.
- RODIER (J.), AUVRAY (C.), 1965. – Estimation des débits des crues décennales pour les petits bassins versants de superficie inférieure à 200 km², CIEH ORSTOM.
- RODIER (J.), 1976. – Estimation des crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale, *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, Vol. XIII, n° 4.
- RODIER (J.), 1984-1985. – Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel, *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, Vol. XXI, n° 2.