Ecoulement de surface dans les bassins perméables du Sahel Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux

Jean-André RODIER (1)

RÉSUMÉ

On a cherché à dégager des valeurs quantitatives intéressant l'écoulement superficiel, dans le cas de très fortes averses, sur les bassins perméables du Sahel. Ceux-ci étant assez mal connus, la totalité de l'information disponible dans les rapports originaux et les archives de l'ORSTOM a été exploitée. On a utilisé également les données de bassins de savanes perméables en zones tropicales sèches et humides. Le ruissellement superficiel isolé des autres formes de l'écoulement à partir des courbes de tarissement comme pour les bassins imperméables du Sahel a été matérialisé par les coefficients de ruissellement K pour des averses journalières de 70 mm et 100 mm : Kr 70 mm et Kr 100 mm.

On a également étudié l'écoulement total et l'écoulement de base quand il existe. Les zones d'éboulis rocheux, les lithosols et regosols sur roches vertes, les cuirasses ferrugineuses démantelées, les sols sableux sans organisation superficielle imperméable présentent des valeurs de Kr 100 très faibles généralement inférieures à 6 % et souvent 3 %. Ces valeurs de Kr 100 sont rapportées à la surface totale du bassin.

Les temps caractéristiques de l'hydrogramme unitaire comparés à ceux des bassins perméables montrent que dans presque tous les cas il ne peut s'agir que de ruissellement superficiel mais d'après les études faites par P. CHEVALLIER à Booro Borotou (Côte d'Ivoire) il est clair que pour les bassins sableux au moins ce ruissellement survenant sur le sol temporairement saturé du chevelu hydrographique, de ses abords et sur quelques rares zones priviligiées des versants ne couvre qu'une faible partie du bassin, les temps de parcours restant voisins de ceux d'un bassin qui ruissellerait sur toute sa surface. Contrairement aux bassins imperméables l'influence des précipitations antérieures et de la distribution temporelle des intensités est forte sur les relations pluies-débits qui sont très difficiles à établir. Les crues décennales sont faibles. La presque totalité de la pluie qui ne ruisselle pas est consommée par évapotranspiration directe ou différée.

On déduit de ces résultats les conséquences qui s'imposent pour les applications pratiques.

MOTS CLÉS : Bassins perméables — Ecoulement de surface — Caractéristiques hydrologiques — Sahel — Zones tropicales.

ABSTRACT

SURFACE RUNOFF ON PERVIOUS BASINS IN SAHEL AREA. COMPARISON WITH OTHER PERVIOUS TROPICAL BASINS

An attempt has been made to assess quantitative values of surface runoff during very heavy storms on pervious basins in the Sahel area. The knowledge of the hydrology of these catchments being poor, all the available information in original report and ORSTOM records was used for this. Data from savannah basin in dry and humid tropical areas were also analysed. The surface runoff is separated on the hydrographs from the other components of runoff by the analysis of the recession curves following the same procedure as for the impervious basins. Surface runoff is represented by the runoff coefficient K for daily rainfall of 70 mm and 100 mm : Kr 70 mm and Kr 100 mm.

The total runoff and the base flow were also estimated. Scree areas, Lithosols and regosols on green rocks, ferruginous dismantled crusts, sandy soils without surface impervious organisation present very low values of Kr 100 mm, generally less than 6 % and often less than 3 %. Unit hydrograph response times are the same as for impervious basins for most of the cases ; this tends to confirm that the form of runoff studied is effectively surface runoff. But according to the studies of P. CHEVALLIER at Booro-Borotou (Ivory Coast) it is clear that for the sandy basins at least, this surface runoff occurring

(1) Ancien Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM, 39 rue de la Parée, 85470 Brétignolles-sur-Mer.

on temporarily saturated soil of the depressions of the hydrographic network and on small areas not too pervious concerns only a small part of the basin, the travel times remaining about the same as for basins with surface runoff on the whole surface. Unlike the impervious basins the influence of antecedent precipitation and the time distribution of rainfall intensities is very important to the rainfall-runoff relationship, but these relations are almost impossible to assess. Ten year floods are low.

Almost all the precipitation which does not become surface runoff is absorbed by evapotranspiration direct and delayed. From these results the consequences for pratical applications are deduced.

KEY WORDS : Pervious basins — Surface runoff — Hydrological characteristics — Sahel — Tropical zones.

1. INTRODUCTION

Il sera essentiellement question dans cette note de bassins très nettement perméables : précisons que leur coefficient de ruissellement, par exemple, ne dépasse généralement pas 10 % lors des fortes crues.

On pourrait dire que ce sont des mal « aimés » par la plupart des hydrologues et ceci pour deux raisons.

Quelle que soit la qualité des observations et des mesures, ils donnent lieu à des écoulements superficiels rares et faibles, et bien que, pour cette raison, les périodes d'observations des bassins représentatifs aient été parfois plus longues que pour les autres, ils fournissent des échantillons de crues trop courts pour permettre de véritables études statistiques. Par exemple, le bassin de la Soussou (Bénin) a été observé trois ans, 1956, 1957, 1958, en 1956 et 1958 l'écoulement a été nul, il ne reste qu'une campagne d'observations.

Par ailleurs, l'écoulement y est très sensible à l'hétérogénéité des sols. Que sur un bassin imperméable il y ait quelques zones perméables de faible superficie, leur influence sur le ruissellement total est faible, peut-être une réduction de 5 à 10 % ; mais, qu'inversement sur un bassin perméable il y ait quelques zones imperméables c'est très différent, celles-ci lorsque leurs apports parviennent jusqu'à l'exutoire, fourniront presque la totalité de l'écoulement et l'hydrogramme sera souvent celui d'une petite plaque de reg, d'un fond de vallée argileux ou d'une place de village.

Tout ceci n'est pas très encourageant et cependant la connaissance des modalités de l'écoulement dans ces bassins est particulièrement utile. Il s'agit dans la pratique de ne pas construire de ponts surdimensionnés et ce qui est beaucoup plus grave de ne pas aménager des réservoirs qui ne se remplissent que dans des circonstances tout à fait favorables et encore. Il est nécessaire également dans les modèles, de prendre en compte de façon correcte le comportement des zones perméables et celui-ci est parfois de nature telle (zones rocheuses) que le simulateur de pluie ne peut apporter d'information.

Il est exact que l'information disponible n'est pas très abondante et elle est difficilement accessible. Les études de l'ORSTOM sur bassins représentatifs avaient souvent pour objectif prioritaire la détermination des débits de fortes crues ce qui privilégiait les bassins peu perméables. Mais un certain nombre de bassins ont été étudiés précisément parce qu'ils ruisselaient mal et dans des études d'ensemble de bassins en majorité imperméables, certains bassins perméables ont été observés de façon tout à fait correcte.

On doit dire également, qu'entre 1954 et 1970, les bassins perméables comme les autres ont reçu des averses très fortes dont plusieurs doivent correspondre à des fréquences égales ou même inférieures à la fréquence décennale. Par conséquent, si les échantillons disponibles ne permettent pas en général d'établir de bonnes régressions entre l'écoulement et ses facteurs conditionnels en vue de déterminer la crue décennale par exemple, cela n'est pas nécessaire en première approximation puisqu'elle a été pratiquement observée ; mais il faut souvent dégager ces caractéristiques des rapports originaux ou même des archives. L'interprétation des données faites il y a vingt ou trente ans est parfois excellente, mais dans d'autres cas, des éléments essentiels ont échappé aux auteurs qui ne disposaient pas de la masse d'informations existant actuellement, en particulier de celles du minisimulateur de pluie.

C'est pourquoi on a jugé utile de reprendre la totalité des données disponibles à l'ORSTOM sur ces bassins perméables du Sahel, en outre, on a cherché à les compléter avec celles des bassins perméables situés plus au sud, à partir des rapports originaux et des archives. Le recueil des bassins représentatifs de P. DUBREUIL (1972) est une excellente synthèse dans laquelle un bon nombre d'erreurs ont été rectifiées, mais elle ne peut contenir les détails qui nous sont nécessaires sur des bassins qui, en général, ont été considérés comme secondaires et dont l'interprétation, on vient de le voir, laisse souvent à désirer. Le lecteur est prié de se référer à cet ouvrage pour les nombreux bassins dont il sera question ici, mais il devra garder présent à l'esprit le fait que nous avons corrigé certains chiffres de ce recueil et que le présent article est basé sur une masse de données beaucoup plus considérable.

2. APPROCHE DE L'ANALYSE

Pour l'étude des pluies de faible fréquence l'existence de ruissellement superficiel est très importante, c'est pourquoi on s'est attaché à la détermination des caractéristiques de l'hydrogramme : temps de montée Tm, temps de base Tb et temps caractéristique $Tc = \frac{Vr}{Q\ max}$. On rappelle la définition de ces caractéristiques sur la figure 1.

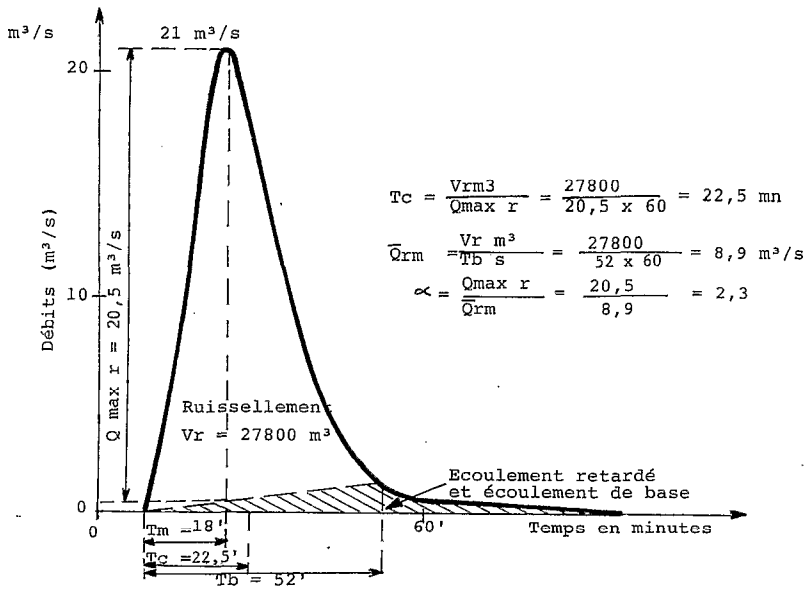

FIG. 1. — Caractéristique d'un hydrogramme unitaire (In Tiziouen Niger). S du bassin = 1,87 km^2.

La comparaison de ces caractéristiques des bassins perméables avec celles de bassins pour lesquels le ruissellement superficiel est évident, permet de vérifier ou non si cette forme d'écoulement joue un rôle prédominant. Cette comparaison ne peut pas se faire directement, car les bassins imperméables servant de référence n'ont pas obligatoirement la même surface ni la même pente que les bassins perméables à étudier. Aussi, elle se fait par l'intermédiaire de diagramme de Tm et de Tb en fonction de la surface S et de l'indice de pente global de DUBREUIL corrigé par la pente transversale soit Ig cor. Ces diagrammes pour pays sahéliens et tropicaux ont été élaborés par RODIER et AUVRAY (1965) et révisés par RODIER (1984-1985) pour les petits bassins versants.

La détermination de Tm n'est pas toujours simple. Sur un certain nombre de bassins de forme allongée, pour une averse intense de courte durée, les pointes de crues des divers affluents se succèdent bien distinctes les unes des autres pour les crues faibles ou modérées et leur importance relative est variable suivant la répartition spatiale des précipitations. Lorsque le volume de crues croît, ces pointes tendent à se confondre en une seule (P. RIBSTEIN et J.A. RODIER, 1989). Sur des sols perméables, les crues ne sont jamais fortes et il est fréquent que l'hydrogramme unitaire présente plusieurs pointes. Le choix de celle qui donne la valeur de Tm n'est pas toujours évident.

Le temps de base Tb ou durée du ruissellement a été déterminé de façon assez sommaire, la forme de la courbe de tarissement de ces bassins s'y prête parfois mal et le nombre de « fortes » crues est faible. Heureusement que, grâce à des valeurs assez fortes de Tm, et à la faible durée de la partie de l'averse qui ruisselle, ces crues sont généralement unitaires. Cependant, une précision de 30 % sur la valeur de Tb suffit et on y est parvenu dans presque tous les cas.

Pour donner une idée précise de l'importance du ruissellement, on a considéré le coefficient de ruissellement Kr, rapport du volume de ce qu'on présume être du ruissellement superficiel au volume total correspondant à la pluie journalière responsable, mesurée au pluviomètre Association.

Plus précisément, on a considéré Kr 100 mm correspondant à des conditions pluviométriques bien déterminées : averses convectives tropicales relevées sur un total d'une journée avec, pour l'averse principale, une forme de hyétogramme la plus fréquente pour les fortes averses (P. RIBSTEIN et J.A. RODIER, 1989).

On a également considéré la valeur Kr 70 mm ; ces averses surviennent 48 heures après une averses de 20 à 30 mm, vers le début de la saison des pluies. Ceci nous a conduit à éliminer, dans l'étude des bassins en zone tropicale sèche ou humide, les coefficients de ruissellement un peu plus élevés correspondant à des averses survenues en fin de saison des pluies d'années humides, après une hauteur totale cumulée de précipitations qu'on ne rencontre que de façon tout à fait exceptionnelle au Sahel. On ne tient pas compte des variations de Kr 100 avec S et Ig cor, elles sont assez faibles en valeur absolue.

Les valeurs de Kr 100 et de Tb sont généralement inférieures à celles que l'on trouve dans DUBREUIL (1972) et dans les rapports originaux. La séparation du ruissellement de l'écoulement total dans ces rapports avait été souvent

faite en éliminant seulement le débit de base provenant des nappes et en conservant avec le ruissellement superficiel les écoulements retardés (hypodermiques ou autres), alors qu'au contraire, nous nous sommes attachés à ne conserver dans le volume de ruissellement Vr que du ruissellement superficiel (voir fig. 1) (arrêt du ruissellement à la première cassure de la courbe de tarissement).

On précise dans le tableau I la plus forte valeur de pluie ponctuelle P max observée et le maximum absolu de Kr qui ne correspondent pas toujours à la même averse, ceci pour donner une idée de l'extrapolation nécessaire pour déterminer Kr 100 mm. On a précisé le débit spécifique décennal q10 en $1 s^{-1}$ km^{-2} correspondant à Kr 100 et enfin le coefficient d'écoulement annuel Ke en année correspondant à des conditions moyennes (hauteur de pluie annuelle et répartition de ces pluies dans la saison). Ce coefficient permet d'avoir une idée des restitutions possibles de l'eau infiltrée.

Les bassins ont été groupés par catégories de sol en considérant d'abord les bassins situés au Sahel, puis des bassins à type de sol identiques si possible ou analogues situés plus au sud, en indiquant les causes possibles de divergences.

3. LITHOSOLS — ROCHES DISLOQUÉES OU DÉCOMPOSÉES EN BOULES

On a observé qualitativement depuis 1956 que malgré leur pente les massifs constitués de roches dans cet état ruissellent très peu. Les bassins représentatifs correspondants dont on trouvera les fiches dans le recueil de DUBREUIL *et al.* (1972) sont les suivants : partie supérieure des bassins de l'Oued Seloumbo dans les grès du Tagant (Mauritanie), grès disloqués des bassins de la Maggia dans le continental terminal (Niger), roches cristallines et gneiss décomposés en boules dans le Nord Cameroun et le Tchad : bassins de Godola (Cameroun) de l'Ouadi Kaoun et d'Abou Goulem (Tchad).

Mais ce n'est qu'en 1976 à la mare d'Oursi (Burkina Faso) qu'a été aménagé un bassin couvert de blocs : celui de Kolel. Malheureusement, comme l'a montré une étude approfondie de PION J.C. (1979) il s'agit d'un pavage de roches sur une altération épaisse comportant des éléments parfois imperméables. A priori il se prête moins bien à l'infiltration que la plupart des amas de blocs mentionnés plus haut. Et, effectivement, dans le tableau I qui pour les divers bassins présente les caractéristiques spécifiées dans le paragraphe précédent, on trouve pour ce bassin de Kolel un coefficient de ruissellement Kr 100 mm relativement élevé : 25 %. Pour ce bassin les valeurs de Tm et de Tb sont trop fortes de 70 à 80 % par rapport à celles des diagrammes de Tm et Tb en fonction de S et Ig cor (RODIER, 1984-1985). Cette tendance qu'on retrouvera plus loin sur les bassins de la Soussou (Bénin) et de Mouda III (Cameroun) doit être attribuée à la rugosité du sol. Cette différence n'est pas assez forte pour qu'on puisse en déduire que l'écoulement soit autre chose que du ruissellement superficiel ; d'ailleurs la forme très aiguë de l'hydrogramme permet difficilement d'en conclure autrement.

On verra plus loin, d'après les observations des Ouadis Kaoun et Abou Goulem, que sur des blocs de granit et de gneiss Kr 100 mm doit être beaucoup plus faible. Mais ces bassins sont vraiment hétérogènes.

En cherchant au sud du Sahel un bassin plus représentatif de ces zones d'éboulis, on a trouvé celui de la Soussou au Bénin qui avait été aménagé précisément pour l'étude de ces types de sols ; mais il est dans une région plus humide où les croûtes superficielles imperméables sont moins fréquentes et la végétation dans les blocs est plus dense *a priori*.

Il comporte 66 % de blocs et 27 % de colluvions argileuses plus ou moins perméables. Il est facile de voir sur les hydrogrammes si les zones d'éboulis bien groupés ont ruisselé. Ce bassin a été observé en 1956-57 et 1958. Aucun écoulement n'a été observé en 1956 et 1958 années respectivement sèche, et exceptionnellement sèche. L'année 1957 a présenté une pluviométrie normale avec une répartition des averses favorable au ruissellement : au point de vue de l'écoulement c'est une année humide. On pourra donc trouver des valeurs de Kr proches de la limite supérieure.

On trouve Kr 100 mm égal à 6 % , en ne considérant que les averses de première moitié de la saison des pluies (comme on l'a fait pour estimer Tm, Tb et Tc). Si on prenait en compte la fin de la saison des pluies on trouverait 9 %, valeur pas très différente (voir la dernière colonne du tableau II). L'influence de l'état antérieur d'humidité est évidente sur Kr. Une averse de hauteur moyenne 90,7 mm sur le bassin le 21 mai n'a produit qu'un volume de ruissellement de 0,4 % du volume des précipitations, alors qu'un mois plus tard le ruissellement aurait pu être 10 fois plus élevé. Il semble que Kr soit fonction, à la fois, des précipitations tombées 24 à 48 heures avant l'averse étudiée et de la hauteur totale pluviométrique tombée depuis le début de la saison des pluies.

L'influence de l'intensité maximale ne doit pas être négligeable, mais on ne peut pas la séparer de celle des indices d'humidité antérieure. Pour comparer Tm et Tb aux valeurs généralement observées en régime tropical (diagramme RODIER-AUVRAY, 1965) il convient de majorer de 50 % ces valeurs pour tenir compte de la forme allongée du bassin (indice de compacité 1,34), on arriverait ainsi à Tm = 45 minutes et Tb = 270 minutes. La valeur de Tb pour la Soussou est de 35 % trop forte par rapport à cette valeur de 270 minutes, celle de Tm est beaucoup trop forte, mais

TABLEAU I
Bassins perméables (sols non sableux) ; quelques caractéristiques hydrologiques

Bassins	Ig cor m km^{-1}	Pan mm	Tm min.	Tb min.	Tc min.	Kr100 Kr 70 (%)	q^{10} $1s^{-1}$	Ke %	P max. mm	Kr max. %
Roches disloquées, décomposées en boules										
Kolel S=1,05 km^2	75	(400)	12,5	57	17(2)	25 21	15000	13	57,5	25,4(1)
Soussou S=7,4	(60)	1100	125 SS	360 SS 450 SP	125	6 5	775	5	104	7,8
B. hétérogènes sur granit, gneiss										
Ouadi Kaoun réduit S=28	9	500	120	390	(200)	11 8,9	820	1	79,5(4)	10,8
Ouadi Kaoun Total S=56	9	500	120	780	(280)	7 6,4	410	0,7	79,5(4)	6,8
Ouadi Abou Goulem petit S=12,3	22	550	30	95	45	? 18,5 ? 14,3	? 4100	2,5	75	? 12
Ouadi Abou Goulem grand S=50,2	13	550	115	300	(100)	9,5 8	1090	(15)	82	8,8
Regosol Lithosol sur roches vertes										
Mouda III S=0,058	240	900	5	20	12	2,5-3 2-2,5	2000	1,8	>116	3,02
Cuirasses ferrugineuses mauvais état										
Dounfing S=17,5	25	1070	20-25	300	100	10 8	1250	?	100	(16)
Tikaré II S=2,36	40	725	20	70	28	18,5 14	5800	3-4	68	12,7(3)

(1) Observé pour P max = 52,1 mm.
(2) Hydrog. unitaire très aigu, T_c relativement faible.
(3) Observé pour P max = 60 mm.
(4) Forte valeur de Ih, Pm = 22, 3 mn la veille.
Nota = un réexamen des archives du Dounfing donne les précisions suivantes :
Pan = 1 100, Tm = 30, Ke = (8), P max = 106.

TABLEAU II
Bassins perméables (sols sableux) ; quelques caractéristiques hydrologiques

Bassins	Ig cor m km $^{-1}$	Pan mm	Tm min.	Tb min.	Tc min.	Kr 100 Kr 70 (%)	q_{10} 1s-1	Ke %	P max. mm	Kr max. %
Sables de Niamey										
Niamey VI S=1km^2 (1)	(10)	580	8,5	60	18	18 14	5400	5,3	75,3	16,1
Niamey Bao Trésor S=1,54	9	580	10	35	25	8,5 7	3900	1,5	52,4	5
Sables de Kélo										
Badé I S=5,36	7,5	1215	80	300	160	0,3(5)	46	(2,7)	127	0,45
Badé II S=21,9	7,3	1215	300	600	285	0,45	33	(4,5)	127	0,67
Badé III S=72	3,4	1215	1560	3600	1500	1,5	21	(5,3)	138	3,3 (2)
Sables de Casamance										
Bounkiling S=		1300	-	-	-			2		
Djinokaye S=11	2-3	1300	-	-	-		150 ?	2,4		
Sables tertiaires de C. d'Ivoire										
Agbeby S=11	20	2000	240	600	300	4(5)	273	(40)	210	6
Sables Boucle du Cacao (CI)										
Ifou S=37,8	7,2	1170	450	1050	450	4(5)	137	(1) (3)	133	6,3
Sables série des cirques (Pointe Noire)										
Tchinouka S=10,7 (4)	2,5	1250	450	1150	670	10(5)	300	(30)	268	29
Hte Songolo S=16,5	34	1250	240	1080	450?	0,3(5)	15	(20)	245	0,72

(1) Affleurement rocheux.
(2) Fin de saison des pluies.
(3) Peut s'annuler en saison sèche.
(4) Partiellement urbanisé.
(5) Kr 70 est trop délicat à estimer pour ces bassins. Il serait certainement nettement inférieur à Kr 100 mm.

Tm est beaucoup moins stable que Tb. La rugosité du bassin est la cause de cet écart de 35 %. En ce qui concerne la valeur de Tm, comme ceci a été signalé plus haut, l'hydrogramme comporte deux pointes pour la crue la plus forte et parfois trois pointes pour d'autres (voir hydrogrammes de la figure 2). Le temps de montée a été pris pour la seconde pointe correspondant à peu près au centre du bassin. Un écoulement plus fort ne donnerait probablement qu'une pointe et une valeur de Tm plus faible, mais il faudrait qu'il tombe 200 mm peut-être. La valeur de Tc n'est pas trop éloignée de 0,4 Tb (valeur moyenne de Tc). Ceci montre que Tc et Tb sont conformes aux diagrammes de 1965 établis à partir de bassins qui ruissellent très bien en général.

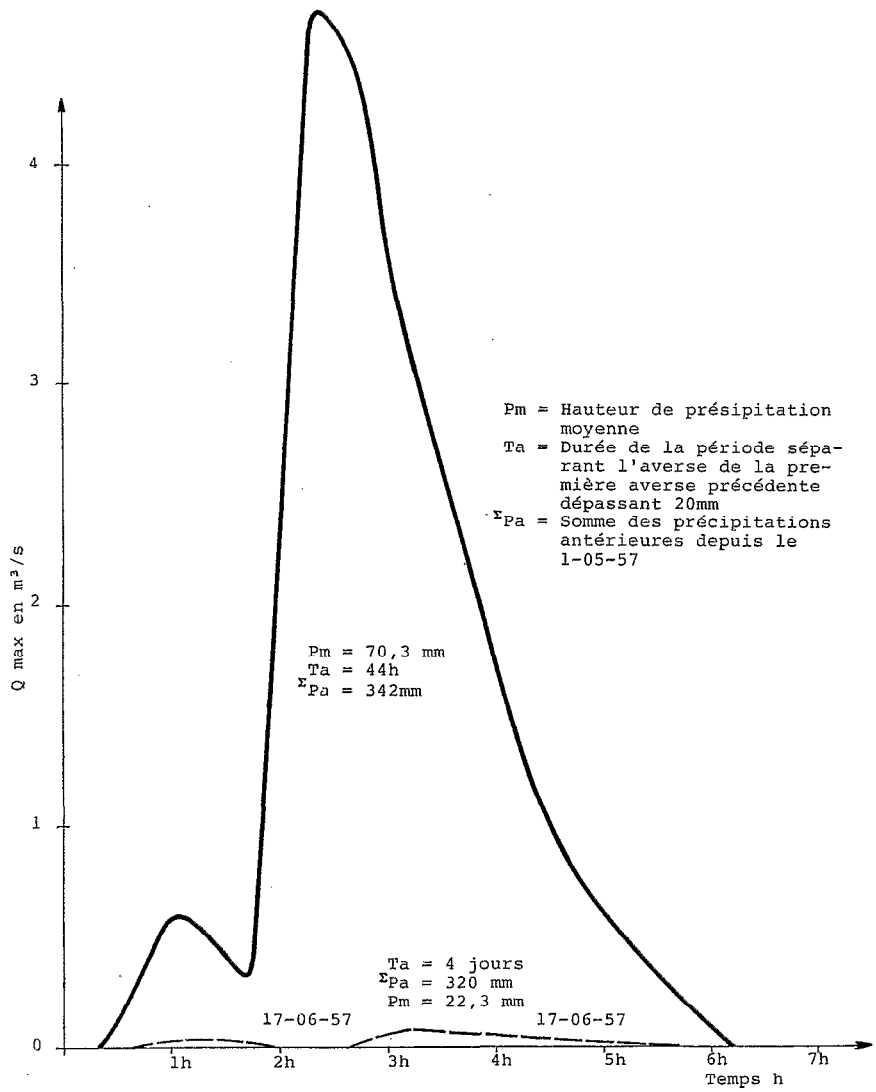

FIG. 2. — Hydrogrammes de ruissellement (Soussou à Modji) 17 et 19-06-1957.

Le débit spécifique de crue décennale 775 ls^{-1} km^{-2} est également conforme aux indications fournies par des bassins sahéliens du même genre (Ouadis du Wadaï au Tchad). Une très faible partie de l'eau infiltrée est restituée par le débit de base, la majeure partie étant absorbée par la végétation qui pousse entre les blocs, il y avait même des cocotiers !

En année moyenne l'écoulement annuel n'est que de 5 % pour Pan = 1 100 mm, les 4/5 correspondent à l'écoulement de base. En 1957 (année humide) Kr an a été de 1,7 % alors que Ke était égal à 16,1 %. Au Sahel, on

retrouverait probablement les mêmes relations entre les deux formes d'écoulement, mais l'écoulement de base cesserait pendant 7 mois au moins au lieu de 4 mois. Il n'est pas sûr qu'au Sahel, où les pluies sont beaucoup plus concentrées Ke s'annule en année sèche, mais il doit être réduit à très peu de chose.

Le climat de la Soussou, plus humide qu'au Sahel, conduit peut-être à une valeur de Kr 100 mm un peu faible la végétation étant plus dense, mais le chiffre de 6 % est bien en accord avec ceux que l'on va trouver aux paragraphes suivants et nous proposons de l'adopter pour ces zones d'éboulis. Mais dès que le rocher sain ou qu'un produit d'altération imperméable est très proche de la surface, Kr augmente très nettement, et, lorsque ce rocher sain devient prédominant même avec des fissures notables, Kr 100 mm devient très élevé : 58,7 % pour les grès de l'Ennedi (bassin de Bachikélé) et si le rocher très sain est recouvert par places de sol sablo-argileux pas très profond, comme à Gountouré (Burkina Faso) (voir CHEVALLIER *et al.*, 1985) ou dans certaines parties du bassin du Barlo (Tchad), Kr 100 mm atteint des valeurs records 73,5 % pour 24,6 km^2 soit 82 % pour 1 km^2.

4. BASSINS HÉTÉROGÈNES A SUBSTRATUM DE GRANIT ET DE GNEISS

Nous avons tenu à classer à part ces bassins qui contiennent non seulement des amas de blocs, mais aussi d'autres formations très perméables et qui, indirectement, fournissent des recoupements utiles sur le comportement des types de sols traités dans le paragraphe précédent.

Les granits sont décomposés en boules : souvent comparables à ceux de la Soussou ou ennoyés dans des sols perméables, on trouve des brêches quartzeuses en très mauvais état, des sables fins ou grossiers perméables parfois comparables à ceux que nous verrons au paragraphe 7 et enfin des sols à tendance de solonetz (sol d'érosion de CASENAVE et VALENTIN 1988 qu'on appelle hardé au Cameroun et Naga au Tchad) ou des sols argilo-sableux ou sablo-argileux, qui doivent souvent être recouverts d'une croûte imperméable. Pour ces deux derniers types de sols, les possibilités d'infiltration sont limitées, mais ils ne sont pas prédominants.

On rencontre souvent ces combinaisons de sols dans le massif du Wadaï (Tchad) où les cours d'eau sont bien connus par leur faible écoulement malgré des précipitations annuelles égales ou supérieures à 500 mm. Deux ensembles de bassins représentatifs ont été étudiés : l'Ouadi Kaoun S = 56 km^2 et l'Ouadi Abou Goulem S = 50,2 km^2. Pour tous deux des cartes de perméabilité ont été établies ; malheureusement :

1. ces cartes résultent de mesures d'infiltrabilité Muntz ou Porchet qui détruisent la croûte superficielle si elle existe, particulièrement la seconde méthode ;
2. cette cartographie n'est pas assez fine et elle ne dégage que des ordres de grandeur.

Cependant, l'analyse de l'écoulement faite à partir de ces cartes est tout à fait cohérente, ce qui tend à prouver que la croûte superficielle ne se forme pas ou est instable sur une partie des sables grossiers entourant les massifs, par exemple, ou sur les sols peu épais sur granit et sur les sables fins ; mais ceci ne serait valable que pour des roches à conditions d'altérations identiques qu'on ne rencontre pas partout.

Le bassin de l'Ouadi Kaoun observé en 1956 et 1957 présente une particularité que l'on retrouve de temps en temps dans le Sahel ; la partie amont ruisselle très peu et ses apports ne rejoignent que rarement la partie aval (S = 28 km^2) où ils sont faciles à distinguer de l'écoulement de ce bassin aval réduit. On a donc pu présenter à la fois les résultats du bassin global et du bassin réduit dans le tableau I. On peut avoir une idée de Kr 100 ; le bassin ayant reçu une averse de hauteur maximale 79,5 mm ($\overline{Pm}$ = 48,7 mm) assez bien concentrée dans le temps avec I max = 108 mm/h, 15 heures après une averse de plus de 30 mm, donc dans des conditions très favorables qui doivent conduire à une valeur de Kr assez voisine de Kr 100 mm a priori, malgré une valeur de $\overline{Pm}$ nettement plus faible : $\overline{Pm}$ = 48,7 au lieu de 81 mm. (P ponctuelle 100 mm correspond à $\overline{Pm}$ 81 mm pour 28 km^2). Une régression entre la lame ruissellée Hr et la hauteur du corps de l'averse moyenne conduit pour $\overline{Pm}$ = 81 mm à Hr = 9 mm d'où Kr 100 mm = 11 %.

Pour le bassin total on trouverait Kr 100 = 7 %, la partie amont très perméable ruisselle très peu mais séparer ses apports de la masse totale d'écoulement intermédiaire relèverait de la pure fantaisie ; disons que pour ce bassin amont Kr 100 mm serait certainement bien inférieur à 7 % ; ceci résulte de la comparaison des deux chiffres 11 et 7 %. Le coefficient de ruissellement est sensible à l'indice d'humidité antérieur. L'indice Ih ou IPA de Kohler $IPAi = (Pi + IPAi - 1)\, k \frac{t}{T}$ avec k voisin de 0,15 conduirait aux meilleurs résultats. Pour une valeur de k = 0,20 et une averse dont le corps serait de 22 mm pour des valeurs de Ik égales respectivement à 0,15, 1,15 (valeur la plus fréquente) et 7 on trouverait des lames d'eau Hr de 0,4 mm, 1,4 mm et 2 mm. Mais un autre facteur est très important étant donnée l'hétérogénéité du bassin et aussi des pluies c'est la zone d'impact du maximum spatial de

l'averse : en zone perméable ou peu perméable. Ceci est très visible si on analyse les averses une par une avec leur carte d'isohyètes, et cet autre facteur important ne permet pas une étude assez fine de l'influence de Ih qui est cependant très forte et ne se limite pas à la période la plus proche de l'averse (fig. 4).

L'estimation de Tm, Tb et Tc pour le bassin réduit exige une analyse des hydrogrammes ; comme pour la Soussou ceux-ci présentent plusieurs pointes : la première correspond à un petit affluent rive droite, la seconde aux apports du centre du bassin avec des tributaires rive droite et rive gauche et la troisième aux apports de la partie amont, très perméable, de ce bassin réduit : elle ne donne lieu que rarement à un écoulement... La figure 3 montre à la même échelle une crue produite par une averse avec $\overline{Pm}$ = 21,5 mm, un faible indice Ih (la zone contributrice ne comprend pas la partie amont) : Hr = 0,43 mm et la crue ayant présenté le plus fort écoulement avec $\overline{Pm}$ = 48,7 mm : Hr = 5,05 mm ; cette dernière averse donne une idée de ce que serait l'hydrogramme pour une très forte averse unitaire, bien que l'averse ait été centrée vers l'extrémité aval du bassin. Cette crue permet de préciser que pour le bassin réduit Tm doit être déterminé à partir de la seconde pointe. On en déduit Tb qui est bien en accord avec le diagramme RODIER (1984-1985) ; Tm est un peu long mais il est du même ordre de grandeur que celui fourni par le diagramme de la note de 1984-85. Tc n'est pas trop loin de 0,4 Tb. Il s'agit donc bien de ruissellement superficiel, mais la figure 2 montre que celui-ci n'apparaît que pour de fortes averses Pm > 20 mm comme pour la Soussou. Le débit spécifique de crue décennale 820 ls^{-1} km^{-2} est faible. Le débit de base n'existe qu'après les assez fortes crues et le lit s'assèche généralement entre les averses. Il en résulte que Ke annuel est faible : 1 %. Il n'est pas absolument sûr que Ke soit nul en année très sèche, il y aura probablement une plaque de sol imperméable pour ruisseler pour une ou deux averses. On doit noter qu'en plus du très court débit de base les pluies alimentent des nappes plus ou moins temporaires dans les sables grossiers autour des massifs et dans le lit principal.

Le bassin d'Abou Goulem observé en 1958 et 1959 semble présenter moins de sols imperméables que le bassin réduit de l'Ouadi Kaoun : 5 % de la superficie totale au lieu de près de 30 %, mais la perméabilité moyenne des 5 % n'est peut-être pas la même que celle des 30 %. Ils sont répartis à peu près sur l'ensemble du bassin de sorte que même si ces sols sont les seuls à ruisseler, Tm et Tb ont un sens (comme pour le bassin réduit précédent). Il n'y a pas le même contraste de perméabilité entre le bassin amont et le bassin aval que sur l'Ouadi Kaoun, le bassin amont à Abou Goulem est certainement beaucoup moins perméable que le bassin amont de l'Ouadi Kaoun.

Pour l'estimation du coefficient de ruissellement Kr 100, une forte averse, maximum ponctuel 82 mm a été observée le 10 août 1959, $\overline{Pm}$ = 50,3 mm, mais elle n'a pas rencontré des conditions aussi favorables (mois précédent sec, traîne notable) que la plus forte averse du bassin précédent. Sur le grand bassin le coefficient de ruissellement 5,9 % est nettement inférieur à celui de 8,8 d'une averse tombée un peu après, quand les conditions d'humidité avaient rejoint celles du début du mois d'août 1958. C'est pourquoi on a fait passer la courbe de Hr en fonction de Pm bien au-dessus du point représentatif de la crue du 10/8/59 contrairement au cas de l'Ouadi Kaoun. On arrive ainsi pour Kr 100 (Pm = 76,6 mm) à une valeur de 9,5 %.

Pour le petit bassin S = 12,3 km^2 la valeur de Kr 100 donnée par RODIER (1984-1985) Kr 100 = 18,5 % s'est avérée surestimée après une étude plus approfondie du bassin ; ce chiffre de 18,5 % ne repose que sur l'hydrogramme de la crue du 10 août 1959 avec Kr = 12 %. Cette valeur se détache nettement de toutes les valeurs de Kr trouvées en 1958 (après révision) et de celle du 30 août 1959 qui a rencontré de bien meilleures conditions de saturation. Alors que, pour le grand bassin la même crue du 10 août a un coefficient de ruissellement plus faible que les valeurs maximales observées précédemment, les comportements des deux bassins sont tout à fait comparables pour toutes les autres crues. Ceci tient à une extrapolation trop généreuse de la courbe d'étalonnage de ce petit bassin conduisant à un volume de ruissellement trop élevé. En conclusion, on ne peut pas tenir compte de ce chiffre de 18,5 % trop élevé.

La valeur de 9,5 % trouvée sur le grand bassin pour Kr 100 mm confirme le fait que le chiffre de 6 % trouvé pour la Soussou peut s'appliquer au Sahel pour des bassins constitués uniquement d'éboulis ou de roches diaclasées, de colluvions perméables à éléments grossiers ou de sables fins perméables, Kr 70 mm est égal à 7,9 %, Kr est sensible aux fortes intensités des précipitations et au rapport hauteur du corps/hauteur totale de l'averse, il est également très sensible aux conditions d'humidité antérieures qu'il s'agisse du temps écoulé depuis la dernière averse de plus de 5 mm, comme de la hauteur totale de précipitations reçues par le bassin depuis le début de la saison des pluies. Les fortes averses d'août 1959 ont présenté, on l'a vu, de faibles coefficients de ruissellement, alors qu'au contraire, les averses médiocres d'août 1958 ont bien ruisselé grâce à un mois de juillet humide.

Il semble qu'une formule binôme pour relier la lame ruisselée à P et aux indices d'humidité antérieure, telle que celle que SEGUIS (1986) avait présentée pour le bassin de Boulsa (Burkina Faso) conviendrait en faisant intervenir à la fois 2 indices de Kohler, l'un avec K = 0,10 ou 0,15, et l'autre avec K = 0,95. On verra plus loin que la comparaison des débits de base en août 1958 et août 1959 suggère la prise en compte d'une valeur de K voisine de 1, (toutes les averses antécédentes cumulées prises en compte).

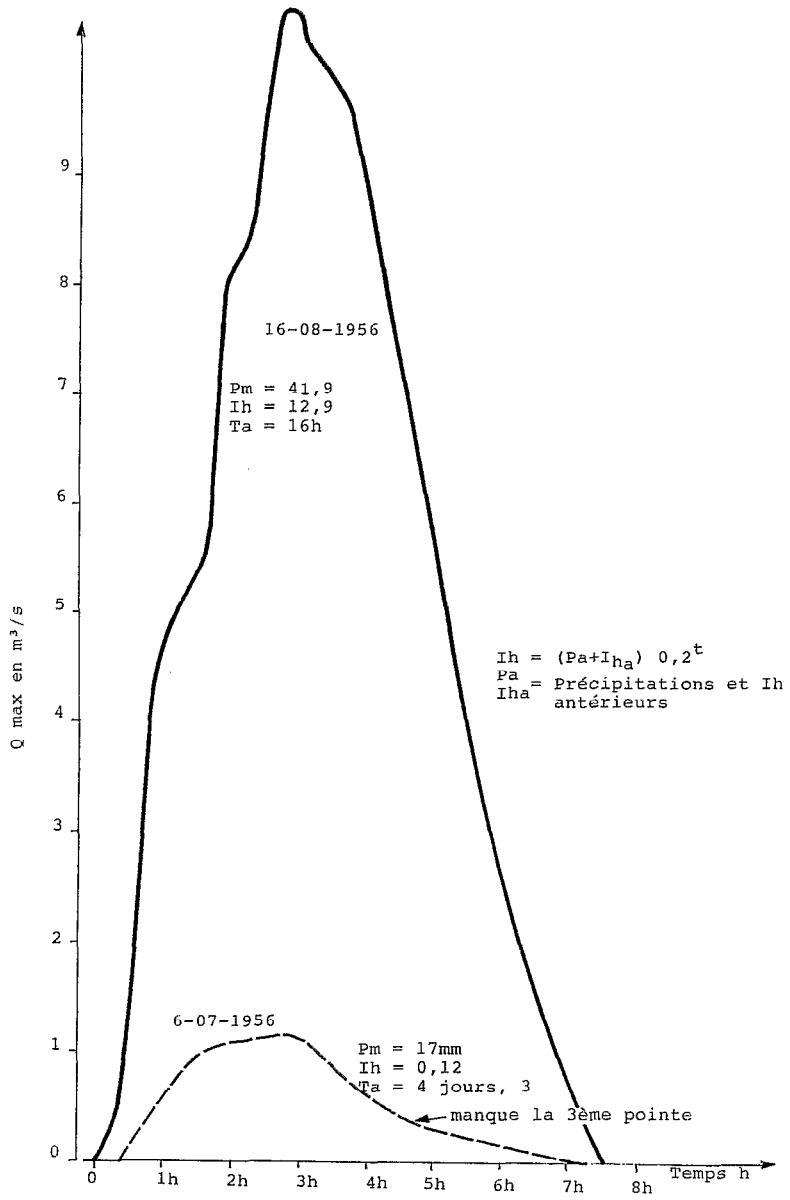

FIG. 3. — Hydrogrammes de ruissellement (Ouadi Kaoun) (Bassin réduit).

Malheureusement, le grand nombre de facteurs de l'écoulement lié au petit nombre de crues observées ne permet, pas plus que pour l'Ouadi Kaoun, la mise au point correcte d'une formule. Comme le cas précédent les hétérogénéités spatiales combinées de la pluie et des sols jouent un grand rôle. On se trouve vraiment dans des conditions limites pour faire partir l'estimation du débit de crue décennale de la seule hauteur de précipitation journalière décennale.

Comme l'Ouadi Kaoun, l'hydrogramme habituel du grand bassin est composé de plusieurs pointes (bassin allongé à arête déportée). En pratique, Tm correspond à la seconde pointe. Après réduction de 30 % pour tenir compte de la forme allongée du bassin, Tm et Tb correspondent tout à fait aux valeurs que l'on trouverait sur les diagrammes établis pour bassins imperméables. Pour le petit bassin Tm et Tb seraient un peu faibles. Il s'agit bien de ruissellement superficiel pour les fortes averses avec Pm > 20 mm.

Rappelons que pour Pm < 10 mm, il n'y a pas de modification de l'écoulement.

Dans le cas du grand bassin, la forte perméabilité du sol associée à un bon drainage et à un seuil rocheux assure un écoulement permanent en année moyenne, le débit en saison sèche est très faible, une fraction de $1 s^{-1}$. La valeur de Ke est forte : 17,5 % en 1958, elle a été corrigée par rapport au mémoire de 1959 qui donnait une valeur certainement surestimée, cette valeur de 17,5 % en 1958 est probablement supérieure à la moyenne. Notons que 85 % de ces 17 % correspondent à de l'écoulement de base. Nous ne connaissons pas la situation pour 1959, mais on peut dire que le débit de base moyen, en août 1959, est 10 fois plus faible que celui d'août 1958.

Les débits spécifiques de crues décennales sont assez forts par suite de la pente. Celui du petit bassin est nettement surestimé pour des raisons précisées plus haut.

Tout tend à indiquer pour les bassins étudiés dans ce paragraphe que Kr 100 peut être pris égal à 6 % pour les bassins constitués de blocs d'éboulis de ce type ; encore est-ce probablement une limite supérieure, car la partie amont de l'Ouadi Kaoun doit présenter une valeur plus faible.

5. RÉGOSOLS ET LITHOSOLS DE COLLINE SUR ROCHES VERTES VOLCANO-SÉDIMENTAIRES

Nous avons classé ce type de sols immédiatement après les couvertures de roches disloquées ou décomposées en boules, car ils présentent quelques caractères communs. Ici, les roches dont la section ne dépasse guère quelques décimètres sont plus ou moins noyées dans un sol particulièrement poreux au lieu d'être posées les unes sur les autres. L'écoulement sur cet état de surface a été étudié au minisimulateur et sur un bassin représentatif, Mouda III (Cameroun) par THÉBÉ (1987). Le bassin couvrant S = 0,058 km^2, n'a été observé que pendant une seule campagne en 1985, mais on y a enregistré une averse exceptionnelle de 116 mm avec une pointe d'intensité de 264 mm/h pendant 5 minutes, qui a mis en évidence les possibilités de ruissellement de ce sol dans des conditions très favorables. Sur ce bassin homogène, peut-être parce qu'il est très exigu, on a dû modifier légèrement les conditions pour le calcul de Kr 100 pour se rapprocher davantage des conditions de la crue décennale ; on a dû supposer dans l'averse de 100 mm une pointe d'intensité de 190 mm/h en 5 minutes et non 142 comme dans la pluie définie par (RIBSTEIN P. et RODIER J.A., 1989).

Dans ce cas extrême, la hauteur de précipitation n'est pas un facteur prédominant, l'intensité maximale joue un très grand rôle ; dans ces conditions, définir une crue décennale à partir d'une hauteur de pluie journalière est une opération hardie, mais les erreurs absolues que l'on pourrait faire sur Kr 100 sont faibles ; pour la plupart des applications pratiques, que l'on parte de Kr 100 = 2,5 % ou 4 % revient au même. On peut estimer à 2,5–3 % la valeur de Kr 100. Cette très faible valeur est bien en rapport avec les résultats du minisimulateur. Kr 70 mm serait voisine de 2 %. Les temps Tm, Tb et Tc ne sont que des ordres de grandeur, la crue unitaire correspondant à une averse unitaire qui serait une pointe d'intensité de 5 minutes. Comparées aux valeurs trouvées dans le bassin de Tikaré I qui est deux fois plus grand S = 0, 113 km^2, avec une pente plus faible, Tm et Tb sont trop longs, mais pas au point qu'on puisse en déduire qu'il s'agit d'une autre forme d'écoulement que le ruissellement. La longueur de ces temps doit être attribuée à la rugosité du sol. A noter qu'il faut que la hauteur de précipitations dépasse 20 mm avec une forte intensité pour produire un faible ruissellement. Le débit spécifique de crue décennale est relativement élevé par suite de la très faible surface du bassin. Cette très faible surface ne permet pas de porter un jugement sur le caractère presque inexistant de l'écoulement de base, mais l'examen de l'écoulement plus à l'aval dans le bassin Mouda I, montre que la quasi-totalité des précipitations infiltrées dans Mouda III sont absorbées par évapotranspiration directe ou différée.

Nous rappelons que sur le bassin de cendres volcaniques du Mayo Baleng au sud ouest du Cameroun pour S = 10,7 km^2 Kr 100 atteignait 5 à 6 % au grand maximum. On retrouve, au Burkina-Faso, par exemple, des sols du genre de Mouda III également perméables, mais se serait une grave erreur que d'en déduire que tous les sols sur roches vertes sont perméables.

6. CUIRASSES FERRUGINEUSES PLUS OU MOINS DÉMANTELÉES

On avait constaté en 1956, sur les bassins de Koumbaka, au Mali, que ces cuirasses ruisselaient peu. La comparaison des apports du bassin total de Koumbaka et des deux bassins amont, lors d'une très forte crue, avaient bien mis en évidence la très faible contribution du bassin résiduaire couvert en majorité par des cuirasses, mais c'était là plutôt un élément qualitatif. Le bassin de Tikaré II S = 2,36 km^2 (Burkina-Faso) sans être couvert en majorité par de telles cuirasses, comporte cependant 32 % de schistes Birrimiens qu'elles recouvrent, 25 % de sols recouverts de gravillons latéritiques, le reste correspondant à des sols perméables. Nous avions estimé Kr 100 à 18 % en 1986, mais

nous pensons maintenant que cette estimation a de fortes chances d'être surestimée, 16 % serait plus réaliste, 14 % serait une limite inférieure. Le ruissellement est sensible à Ih et à l'intensité maximale (SEGUIS, 1986).

Les temps de montée et de base sont un peu longs, par suite de la présence d'une zone plate et marécageuse à l'aval, mais ces temps correspondent bien à du ruissellement superficiel. Le coefficient d'écoulement annuel moyen Ke est faible : 3-4 %. On peut essayer d'approcher un peu plus les caractéristiques d'un bassin en très grande partie sur cuirasse démantelée en analysant les données du bassin représentatif du Dounfing près de Bamako (Mali) S = 17,5 km^2, 57,5 % de cuirasse, le reste étant occupé en grande partie par des sols ferrallitiques remaniés sur éboulis de la cuirasse, mais la cuirasse est en meilleur état que celles du Sahel puisqu'elle est déjà située sous l'isohyète 1 100 mm.

Le bassin a été observé en 1954 et 1955 et n'a fait l'objet que d'un rapport sommaire qui n'a pas permis une étude très approfondie, mais grâce à de très fortes crues il est possible d'avancer sans risque une valeur de Kr 100 mm = 10 %. Pour une surface entièrement cuirassée elle serait plus faible car la valeur trouvée est influencée par des sols hydromorphes de fond de vallée. Les valeurs de Tm et Tb correspondent bien à du ruissellement superficiel : Tb = 250 min est voisin de celui de la Comba (Congo) dont le bassin à forte pente, un peu grand, ruisselle très bien. L'écoulement de base au Dounfing est permanent, mais il n'a pas été possible de bien estimer Ke. Le débit de crue décennal spécifique serait de 1 250 ls^{-1} km^{-2} pour les conditions du Sahel, un peu plus faible qu'à Tikaré si on tient compte des différences de surface. On peut conclure de l'examen de ces deux bassins que la valeur de Kr 100 = 10 % serait un grand maximum pour un bassin du Sahel entièrement couvert de surface ferrugineuse.

7. SOLS SABLEUX

Seuls au Sahel les sables de la région de Niamey ont été étudiés et occasionnellement d'ailleurs ; il s'agissait de déterminer les caractéristiques hydrologiques en milieu naturel pour comparer ces données à celles d'un milieu urbanisé sur le même type de sol. En outre, pour un type d'urbanisation très lâche d'un des quartiers de Niamey (BAO-Trésor) les conditions étaient assez proches des conditions naturelles avec de grandes surfaces de pelouses et d'arbres et très peu de rues goudronnées ou de terre battue en 1965 ; la couverture végétale en bon état constituait probablement un frein plus efficace au ruissellement que le milieu naturel. Des mesures au minisimulateur sur la pelouse n'ont donné aucun écoulement pour des conditions pluviométriques correspondant à Kr 100. Malheureusement ces deux bassins : Niamey VI et Niamey BAO Trésor ne fournissent qu'une limite très supérieure de Kr 100. Les valeurs de Kr 100 respectivement de 18 % et de 8,5 % correspondent, en grande partie au moins, à un affleurement de grès assez sain à l'amont du premier et à une route goudronnée à pente notable avec ses deux caniveaux et quelques toitures dont l'écoulement parvient jusqu'à ces deux caniveaux pour le second. Il existe un bassin naturel sableux de 20 km^2 où la proportion de grès est beaucoup plus faible, mais la station n'a pas été étalonnée ; cependant on sait que pendant la période d'observation, l'écoulement y a été très faible. On verra plus loin, pour la région de Pointe Noire, que lorsque l'on passe d'un bassin partiellement urbanisé à un bassin sableux naturel, Kr 100 passe de 10 % à 0,3 %.

Tout ceci nous conduit à admettre pour Kr 100 mm, sur un bassin entièrement composé de sables de Niamey en milieu «naturel» c'est-à-dire graminées et cultures traditionnelles, une valeur très faible de Kr 100, peut-être de l'ordre de 1 à 3 %. Mais on ne doit pas oublier qu'il y a dans la région de Niamey un bon nombre de bassins non urbanisés avec des proportions variables d'affleurement gréseux, on devrait moduler Kr 100 entre 20 % et 2 ou 3 %, suivant la proportion de surface gréseuse. Les valeurs de Tm et Tb sont sans intérêt, car elles correspondent aux parties imperméables des bassins, de même pour les valeurs de q10.

Les sables éoliens de Bol (Tchad) ont été l'objet d'une courte expérimentation en vue de contrôler la quantité d'eau infiltrée en saison des pluies. La campagne 1956 n'a présenté aucun ruissellement. La quantité d'eau infiltrée à une vingtaine de cm pour la plus forte averse ou les deux plus fortes averses était insignifiante. Ces averses journalières présentaient cependant des hauteurs de 49,5 mm et 45 mm et se sont succédé à un intervalle de 5 jours au milieu d'une saison des pluies excédentaires (Communication de R. LEFÈVRE, mars 1989). Il semble probable qu'une pluie journalière de 100 mm aurait une valeur de Kr voisine de 0.

Nous avons présenté dans le tableau II les mêmes caractéristiques que celles du tableau I pour un certain nombre de bassins représentatifs situés au sud du Sahel, en zone de savane, Kr 100 et q10 étant calculés pour les conditions du Sahel avec P = 100 mm (valeur ponctuelle). Tous ces sables ont été étudiés pour des précipitations naturelles supérieures à 100 mm et souvent avec des conditions d'humidité antérieure plus favorables qu'au Sahel sauf, peut-être pour des années exceptionnelles et encore ! A titre indicatif nous avons reporté les mêmes caractéristiques pour deux bassins forestiers : l'Agbeby et l'Ifou, la couverture forestière diminue encore Kr 100. Pour le second bassin le peu de ruissellement provient très probablement de petites surfaces moins perméables, pistes, bas-fonds etc.

Pour la Tchinouka, comme à Niamey BAO Trésor, on doit noter en 1959, une urbanisation partielle qui renforce nettement Kr 100 mm. Si on met à part ce dernier bassin, on trouve des valeurs de Kr 100 mm très faibles : de 0,3 à 4 %. Pour un type de sol rigoureusement le même Kr devrait décroître quand la surface croît, le maximum pourrait passer de 4 à 3 %, mais dans la pratique cette différence n'est pas de nature à gêner les utilisateurs de ces données. Elle est d'ailleurs inférieure aux écarts qui correspondraient à l'existence de quelques parcelles un peu moins perméables que les autres et aussi à une surestimation possible de Kr quand S croît ; on prend, en effet, facilement en compte dans Hr une partie de l'écoulement intermédiaire. Il suffit de voir les différences de Kr 100 entre Badé I et Badé III.

Chaque fois qu'on a pu esquisser une régression entre la lame écoulée Hr et la pluie moyenne Pm, on a pu constater, comme pour les sols précédents, que cette régression n'est plus linéaire pour Pm > 20 mm. Mais il est préférable comme pour l'Ouadi Kaoun (fig. 4) et Badé II de remplacer Pm par la pluie utile ou, ce qui revient au même, le corps de l'averse. Cette régression comporte une très forte dispersion, l'influence des conditions d'humidité immédiatement antérieures et de la somme des précipitations depuis le début de la saison des pluies sont toujours très grandes, les valeurs de Kr en fin de saison des pluies sont toujours plus fortes. Un ensemble d'autres facteurs correspond à la répartition temporelle des intensités : intensité maximale, présence ou non d'une traîne importante. L'hétérogénéité des bassins ne jouerait que pour la Tchinouka.

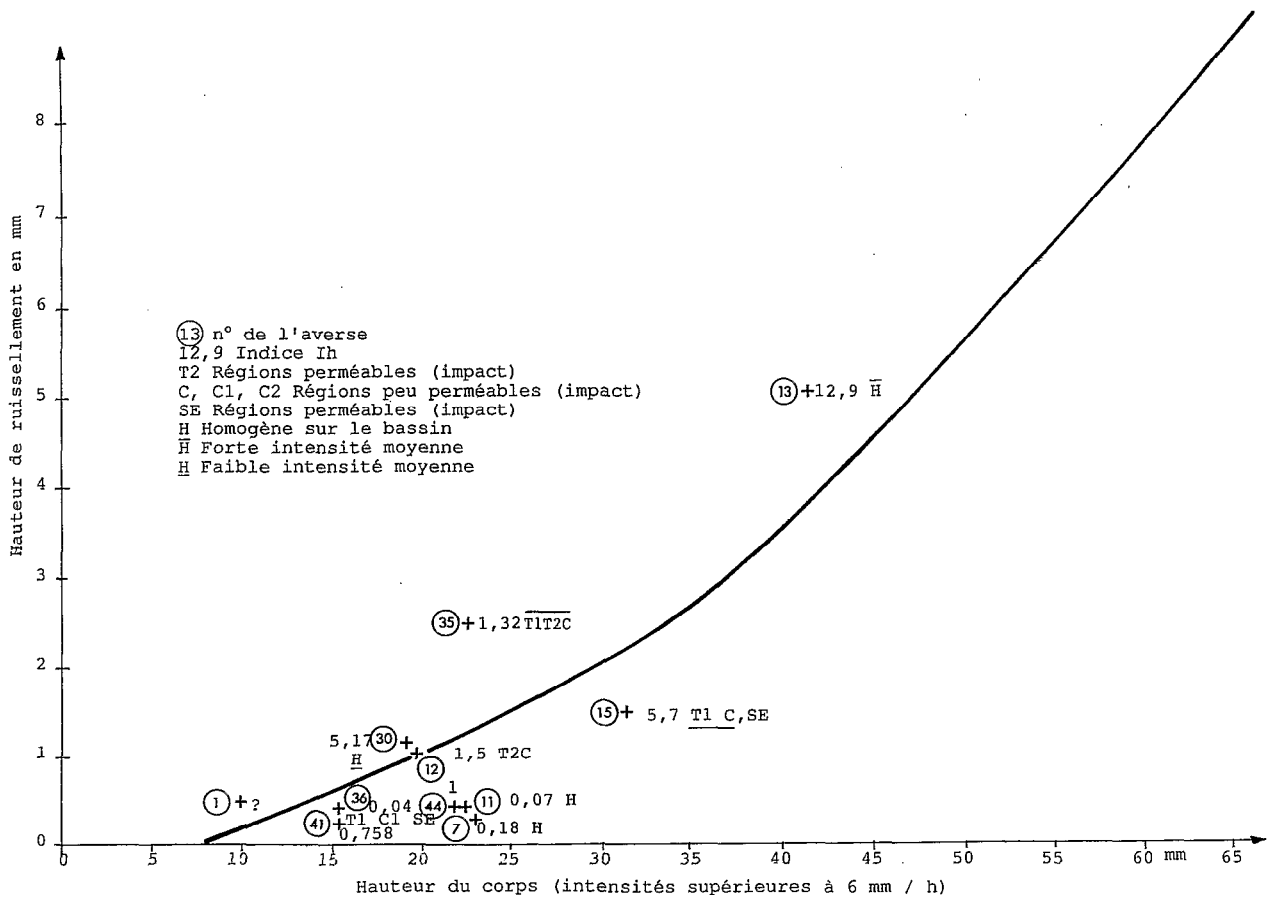

FIG. 4. — Ouadi Kaoun (Tchad) (Bassin réduit 28 km^2).

On retrouve souvent des hydrogrammes où les diverses pointes se fondent difficilemnt en une seule : par exemple à Badé II, l'Agbéby et la Haute Songolo, tous trois en milieu naturel ou à peu près ; cependant, mis à part le bassin de Badé III, on peut déterminer Tm et Tb sans trop de difficultés. Pour Badé III, on connaît mal, de façon générale, les valeurs de ces temps avec des pentes aussi faibles ; Tb semble valable, mais Tm paraît bien long ; il est vrai qu'avec des valeurs de Hr de 0,5 à 1 mm, il ne faut pas s'étonner de trouver des hydrogrammes trop mous.

Pour la Haute Songolo, il semble que Tm et Tb soient en rapport avec la pente longitudinale 8,5 km et non avec la pente corrigée beaucoup plus forte. La valeur de Kr : 0,72 étant extrêmement faible, il est possible que seuls les fonds de vallée ruissellent, ce qui élimine les pentes transversales ; en outre, des effets piston ne sont pas exclus dans ce cas particulier.

Pour tous les autres cas Tm, Tb et Tc sont bien en rapport avec ce que l'on a trouvé pour des bassins où le ruissellement est incontestable. Pour Badé I, par exemple, Tm et Tb correspondent à ceux des diagrammes de RODIER (1984-1985) établis pour le Sahel à partir des données de bassins imperméables comme celui de Gountouré (Burkina).

Pour les bassins forestiers Tm et Tb sont de l'ordre de grandeur de ceux établis également par RODIER (1976), à partir de bassins dont certains présentent un ruissellement superficiel bien évident (bassins de Guessigué, Côte d'Ivoire). Mais certainement, dans la plupart des cas, ce serait une erreur de croire que la totalité du bassin a ruisselé à 3 ou 4 % par exemple. Les expérimentations et les études de P. CHEVALLIER (1988) sur le bassin versant perméable de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) ont bien montré que pour une forte pluie journalière 100 mm par exemple survenant après une assez longue période de pluie, les dépressions élémentaires et principales du chevelu hydrographique et leurs abords présentent des nappes temporairement affleurantes et sous-affleurantes et que dans ces conditions seuls ces bas-fonds et quelques zones priviligiées des versants ruissellent. Cette aire contributrice, de faible superficie relative, présente alors un coefficient de ruissellement apparent bien supérieur à 4 % sur la surface totale. Les temps caractéristiques de l'hydrogramme pour les très fortes averses, s'ils sont déterminés en éliminant les averses à longue traîne et celles à double pointe, conduisent à de courtes valeurs de Tb et Tm de 150 mn et 65 mn, un peu inférieures à celles d'un bassin imperméable ce qui s'explique très bien puisque les temps Tm et Tb sont liés aux longueurs de parcours et non aux surfaces, et le freinage de la végétation dans la dépression compense le manque partiel ou total de ruissellement sur les versants.

Or pour nos bassins sableux on retrouve un tel faisceau d'éléments communs à ceux de Booro-Borotou : très faible valeur de Kr global pour Pm = 100 mm, influence très forte des hauteurs de pluie tombée depuis le début de la saison, courtes valeurs de Tm et Tb qu'on peut en déduire, qu'au moins dans la plupart des cas, le processus d'écoulement est le même. La localisation du ruissellement dans les bas-fonds avait déjà été suggérée pour l'Agbéby il y a un bon nombre d'années et nous l'avions suggéré pour la Haute Songolo avant de prendre connaissance des résultats de Booro Borotou. La conclusion pratique est que l'on peut utiliser l'hydrogramme unitaire comme si tout le bassin ruisselait, surtout à partir de surfaces de plusieurs km^2, mais le modèle global n'est plus qu'une fiction simplifiante et on ne doit jamais l'oublier.

Que devient toute cette eau infiltrée ? Dans les régions à très fortes précipitations annuelles conjuguées ou non avec une très forte perméabilité, les nappes souterraines en bénéficient largement et l'eau, qu'elles restituent aux rivières, constitue la majeure partie de la valeur de Ke annuelle pour l'Agbéby, la Tchinouka et la Haute Songolo.

Rappelons que pour les sables des plateaux Batékés (Congo), voisins des deux derniers bassins, le bilan hydrologique des rivières met en évidence des valeurs de Ke atteignant jusqu'à 55 % pour Pan = 1 850 mm-1 900 mm, avec un ruissellement superficiel inexistant ou dérisoire.

Près du Sahel, sur les trois bassins de Badé, le débit de base croît pendant la saison des pluies comme sur la Tchinouka (de 20 l/s au début janvier 1959 pour cette dernière jusqu'à 300 l/s avant la grande crue de mars 1959 et 800 l/s après) mais les débits de base sont beaucoup moins importants et deviennent rapidement très faibles en saison sèche. Ke annuel n'est plus que de 5,3 % à l'échelle annuelle pour Badé III, la majeure partie étant du débit de base. Près de 95 % des précipitations est absorbé par l'évapotranspiration directe ou différée, les nappes profondes ne doivent pas recevoir grand chose des 1 215 mm précipités. Ces sables de Kélo ont toujours posé de graves problèmes pour les ressources en eau.

Il en est de même pour les sables de Casamance avec Ke de l'ordre de 4 %. Pour Niamey, au Sahel, à l'échelle des plus petits bassins il n'y a pas de débit de base. Pour être complet, indiquons que sur les terres de barre sols sableux du Togo et du Bénin, une station contrôlant 151 km^2 avait été aménagée sur le Boko et observée de 1961 à 1964, il n'a pas été possible de procéder à des jaugeages car les débits extrêmement faibles remplissaient simplement la mouille ou était installé le limnigraphe sans déclencher l'écoulement, la situation doit être un peu plus favorable à l'amont où la dégradation hydrographique (Pan $<$ 1 000 mm) est moins avancée, sans que pour cela les débits spécifiques atteignent des valeurs notables.

Tout ce qui précède montre que sur les bassins sableux homogènes sans croûte superficielle le coefficient de ruissellement en cas de forte crue doit être très faible, Kr 100 reste compris entre 0 et 3 %. Mais s'il y a croûte superficielle leur comportement peut être très différent, en particulier dans le cas des sables grossiers ou arènes qui constituent souvent une auréole autour des massifs de granit ou de gneiss qui peuvent ruisseler assez bien, comme cela a été contrôlé au Burkina ou qui ruissellent très peu comme les sables à l'ouest du mont Kalinguen sur l'Ouadi Kaoun (Tchad). L'aspect du réseau hydrographique montre alors s'il y a ou non un fort ruissellement.

8. CONCLUSIONS

L'examen de toute l'information disponible sur les 5 catégories de sols perméables étudiés :
1. recouvrement d'éboulis ou de roches disloquées ;
2. bassins hétérogènes : sols précédents, sables grossiers perméables et sols beaucoup moins perméables ;
3. régosols et lithosols sur roches vertes ;
4. cuirasses ferrugineuses plus ou moins démantelées ;
5. sols sableux ;

permet d'aboutir aux constatations suivantes qui confirment dans les cas 3 et 5 et qui complètent dans les cas 1 et 4 ce que nous ont appris les mesures au minisimulateur de pluie.

8.1. L'infiltrabilité dans ces sols est pour les cas typiques relativement homogènes, nettement plus forte que ne l'indique la plupart des bassins hétérogènes étudiés. Le coefficient de ruissellement s'en déduit en première approximation en retranchant de 1 l'infiltrabilité. Pour une averse de 100 mm dont toutes les caractéristiques ont été strictement définies ce coefficient est inférieur ou égal à 6 % pour le cas n° 1, compris entre 2 et 3 % pour le cas n° 3, inférieur à 10 % pour le cas n° 4, compris entre 0 et 3 % pour le cas n° 5, donc très faible.

8.2. Mais ces comportements peuvent être modifiés :

— dans le cas n° 1 lorsque les éboulis reposent directement sur la roche à peu près saine en place ou lorsque les roches sont simplement diaclasées sans excès ou enfin lorsque le sol interstitiel s'il y en a est peu perméable ;

— dans le cas n° 2 lorsque le sol enrobant les blocs de roches vertes est peu perméable ;

— dans le cas n° 4 lorsque les sables fins ou grossiers constituent, sans et surtout avec argile ou limon, une croûte imperméable dès les premières pluies. Il convient de rester prudent et de rechercher à titre de vérification s'il y a des rigoles de ruissellement.

8.3. L'étude des temps de montée et de base montrent que pour les très fortes crues, l'essentiel de l'écoulement pour un bon nombre de ces bassins ne peut guère être constitué que par du ruissellement superficiel, localisé la plupart du temps sur les zones à nappes affleurantes ou subaffleurantes des dépressions du chevelu hydrographique et de leurs abords immédiats. L'aire contributrice ne couvrant qu'une faible partie de la surface totale. Cependant il est encore possible d'utiliser avec précaution le modèle global et l'hydrogramme unitaire.

8.4. Ce ruissellement assez faible ne permet pas souvent la formation d'un hydrogramme simple, chaque affluent important produisant sa pointe, il peut être malaisé de déterminer le temps de montée.

8.5. Les relations pluies-débits sont caractérisées par une forme non linéaire qui se révèle dès que la hauteur de précipitation dépasse 20 mm. L'influence de l'état antérieur d'humidité du sol est forte sur le coefficient de ruissellement. Elle s'exerce suivant deux modalités ; la durée de la période sèche séparant l'averse de la première averse antérieure de 10-20 mm et la hauteur de précipitation depuis le début de la saison sèche (correspondant à la saturation générale du sol et parfois au remplissage du réseau hydrographique). Mais il est extrêmement difficile de dégager correctement des relations précises par suite de l'existence d'autres facteurs tout aussi influents, tels que la concentration de l'averse dans un corps prédominant, l'intensité maximale en 5 minutes, et pour les bassins hétérogènes, la répartition spatiale de la pluie. A ceci s'ajoute la faible taille des échantillons d'événements pluies-débits.

8.6. Sauf cas de très fortes perméabilités liées à un drainage souterrain bien organisé, la presque totalité de la pluie qui ne ruisselle pas est consommée par évaporation immédiate ou différée. Dans les cas favorables 10 à 15 % des précipitations sont récupérés sous forme de débit de base, mais dans certains cas il est possible de récupérer des quantités d'eau probablement plus faibles mais non négligeables dans des nappes souterraines plus ou moins temporaires.

8.7. Si le bassin perméable est homogène les crues décennales sont faibles ou très faibles ; le débit spécifique varie avec la pente et la superficie mais pour une surface de 10 km^2 il peut varier entre 15 $l/s.km^2$ et 1 000 $l/s \cdot km^2$, le second chiffre étant un très grand maximum.

8.8. Pour les applications pratiques, quelles que soient les méthodologies utilisées pour le calcul des crues, il est parfaitement justifié de négliger les apports de ces zones non perméables dans un bassin hétérogène.

Si elles sont bien groupées on peut faire toute l'étude sur la seule partie peu perméable. Puisqu'il s'agit alors de ruissellement superficiel classique on peut tirer profit de toute les pratiques issues du concept de l'hydrogramme unitaire.

Mais on devra rester prudent sur le fait qu'en terrain très perméable, la prédominance absolue de la hauteur de pluie en tant que facteur de l'écoulement n'est plus évidente comme en terrain peu perméable. Il faudrait tenir compte de la répartition temporelle des intensités, des caractéristiques de l'averse antérieure et de la hauteur de précipitations tombée depuis le début de la saison des pluies, enfin de l'hétérogénéité éventuelle du bassin. Sinon, c'est l'aventure, ce qui est peu favorable à la bonne détermination des débits de crues.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 28 août 1989.

BIBLIOGRAPHIE

Archives et rapports multigraphiés ORSTOM concernant les ensembles de bassins suivants : Seloumbo, Ifou, Agbéby, Dounfing, Koumbaka, Tikaré, Razelmamoulni, Niamey, Lhoto, Godola, Mifi-Metchié, Ouadi Kaoun, Bachikélé, Barlo, Abou Goulem, Badé, Comba, Pointe Noire (Références précises dans DUBREUIL *et al.*, 1972).

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1990. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Communauté Economique Européenne. ORSTOM. 202 p. + annexes + planches photographiques, *Didactiques*, ORSTOM, Paris.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. — Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (1976-1981). *Trav. et Doc ORSTOM*, n° 190, 252 p., Paris.

CHEVALLIER (P.), 1988. — Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse Université des Sciences et techniques du Languedoc, 330 p. + annexes, *Multigr.*

DUBREUIL(P.), CHAPERON(P.), GUISCAFRE (J.) et HERBAUD (J.), 1972. — Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Année 1951-1969, ORSTOM, Paris 916 p. *Multigr.*

IBIZA (D.), 1987. — Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicale de 2 à 2 000 km^2. ORSTOM, Paris, 101-115, *Multigr.*

PION (J.C.), 1979. — Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Sciences géologiques n° 57, Université L. Pasteur de Strasbourg.

RIBSTEIN (P.) et RODIER (J.A.), 1989. — Fortes crues des petits cours d'eau du Sahel. Forme de l'hydrogramme. *Hydrol. Continentale*, Vol. 4 n° 1, ORSTOM, Paris, 1-15.

RODIER (J.A.) et AUVRAY (C.), 1965. — Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km^2 en Afrique occidentale. CIEH, ORSTOM, Paris, 30 p., Translated in english by Herridge (W.E.), 1965 (*Multigr.* CIEH Ouagadougou).

RODIER (J.A.), 1976. — Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Etude préliminaire. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.*, vol. XIII, n° 4, ORSTOM, Paris, 243-267.

RODIER (J.A.), 1984-1985. — Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs du Sahel. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.*, vol. XXI, n° 2, ORSTOM, Paris, 25 p + annexes.

SEGUIS (L.), 1986. — Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée) et sa régionalisation. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 326 p. *Multigr.*

THÉBÉ (B.), 1987. — Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 238 p. + annexes, *Multigr.*.