

GENERAL CHARACTERISTICS OF SURFACE HYDROLOGY
IN ARID AND SEMI-ARID AREAS OF AFRICA AND
THEIR CONSEQUENCES FOR DEVELOPMENT

J. A. Rodier, ORSTOM

ex Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM, ORSTOM, France

ABSTRACT

Many hydrological characteristics are the same for all arid zones but tropical Africa presents particular characteristics: well defined rainy season, simple storm intensities pattern, high temperatures, impervious crust on many soils reducing infiltration, large part of soil without cultivation, few and very sparse hydrometric networks.

This lead to the following approaches for the estimation of 10 years flood, mean annual discharge and its distribution, for small and relatively small basins. In the absence of network data, precipitations series are used as statistical basis combined with the transformation of precipitations into discharges analysed in representative basins and transposed for unknown basins. Global models are used with some artifacts for the heterogeneity problems. For the 10 years flood, the approach is deterministic and uses broadly the unit hydrograph, the flood flow being for most cases surface runoff. The production function is often simple, the storm pattern being generally the same and the daily precipitation depth being by far the most important factor of runoff depth. In the past, empirical curves have been established giving the runoff coefficient (R/P) for the 10 years precipitation from basin area, slope global index and infiltrability class. For very small basins, these curves revised in 1986 give the runoff coefficient for daily precipitation of 70 mm and 100 mm depth. A catalog of quantitative infiltrability of soil surfaces makes the infiltrability classification more reliable. The transfer function corresponds to the unit hydrograph. For the transposition, empirical curves give the rise time, base time and the peak coefficient in relation to slope area and secondary factors using a check list mentioned below. But the large number of representative basins permits with many cares the use of multiple regressions. This methodology which presents some limitations (hydrographic degeneration) will be improved by the use of the above catalog and of a check list for the factors neglected by the regressions.

The methodology is presented for the transposition of the statistical distribution of annual runoff depths. These depths are established from daily precipitation series introduced into a simple global model rainfall/runoff developed for a series of representative basins. The distribution curves are drawn and transposed for each type of basin corresponding to a set of physiogeographic factors. Recommendations are suggested concerning the information broadcasting, the networks, the research, the training.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° 39694

Cote : B

13 JUIN 1984

Caractères Généraux de l'Hydrologie Superficielle des Zones Arides et Semi-Arides en Afrique. Leurs Conséquences sur les Etudes des Ingénieurs.

Dr. RODIER J.A.

Ex. Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM
39 rue de la Parée
85470 Brétignolles sur Mer
FRANCE

ABSTRACT

Many hydrological characteristics are the same for all arid zones but tropical Africa presents particular characteristics : well defined rainy season, simple storm intensities pattern, high temperatures, impervious crust on many soil reducing infiltration, large part of soil without cultivation, few and very sparse hydrometric networks.

The deterministic approach for estimation of 10 years floods, mean annual discharge and its distribution is tied to these conditions for small and relatively small basins : precipitations used as statistical basis combined with the results of numerous representative basins in West and Central Africa, global models for small basins with some artifacts for heterogeneity problems, simple rainfall runoff relationships, large use of unit hydrograph. Catalogue of quantitative infiltrability of soil surface states will make this estimation more reliable.

But the large number of representative basins permits with many cares the use of multiple regressions. This methodology which presents some limitations (hydrographic degeneration) will be improved by the use of the above catalogue and of a check list for the factors neglected by the regressions. Applications of these methodologies to practical hydrological estimations are given.

Recommendations are suggested concerning the information broadcasting, the networks, the research, the training.

RESUME

La plupart des caractéristiques hydrologiques sont les mêmes pour toutes les zones arides mais certaines sont particulières à l'Afrique tropicale : saison des pluies bien définie, diagrammes d'intensité de précipitations simples et presque toujours les mêmes, températures élevées, pellicule superficielle imperméable recouvrant de nombreux sols et réduisant l'infiltration, faibles superficies occupées par les cultures, absence ou insuffisance des réseaux hydrographiques.

L'approche déterministe pour la détermination de la crue décennale du débit moyen annuel et de sa distribution est liée à ces conditions dans le cas des bassins de faible ou de moyenne superficie : longues séries de précipitations utilisées comme bases statistiques combinées avec les résultats de nombreux bassins représentatifs en Afrique de l'Ouest et Centrale, modèle global employé pour les petits bassins avec quelques artifices pour résoudre les problèmes d'hétérogénéité, relations simples pluies-débits, utilisation de l'hydrogramme unitaire. Un catalogue des infiltrabilités quantitatives des états de surface des sols rendra les estimations plus sûres.

Mais maintenant le grand nombre de bassins représentatifs permet l'emploi des régressions multiples moyennant certaines précautions. Elles présentent des limites (dégradation hydrographique). Cette méthodologie sera améliorée par l'utilisation du catalogue cité plus haut et d'un questionnaire pour tenir compte des facteurs négligés dans les régressions. On présente les applications de ces méthodologies à la pratique des calculs hydrologiques.

On suggère des recommandations pour la diffusion de l'information, les réseaux, la recherche et la formation.

INTRODUCTION

Dans cet exposé, nous avons adopté les définitions des zones arides utilisées pour l'élaboration de la carte de la répartition mondiale des zones arides établie par l'Unesco en 1979 (notes techniques MAB n° 7). Cette définition repose sur la valeur du rapport de la hauteur moyenne annuelle des précipitations à l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle : P/ETP . Ce rapport est compris entre 0,03 et 0,20 pour les zones arides, entre 0,20 et 0,50 pour les zones semi-arides. Pour les zones hyper-arides (Sahara), P/ETP est inférieur à 0,03. Nous ne parlerons pas des régions arides subtropicales ou méditerranéennes de l'Afrique du Nord ou de l'Afrique du Sud. Pour l'Afrique tropicale les zones arides sont comprises entre les isohyètes annuelles 100 mm et 400-500 mm, et les zones semi-arides entre les isohyètes 400-500 mm et 800-900 mm.

CARACTERES GENERAUX DES ZONES ARIDES - CAS PARTICULIERS DE L'AFRIQUE TROPICALE.

Caractères Généraux :

Les zones arides sont caractérisées d'abord par des précipitations annuelles déficitaires ou très déficitaires par rapport aux besoins des plantes, c'est la définition que nous venons de donner. Ces précipitations annuelles sont irrégulières et ceci d'autant plus que le climat est plus aride, ceci est très net sur la figure 1 (FAO) montrant la décroissance du coefficient de variation lorsque la hauteur de pluie annuelle croît. La distribution statistique est généralement asymétrique : les fortes valeurs s'écartent davantage de la valeur moyenne que les faibles valeurs pour la même fréquence. Il y a souvent persistance dans la distribution, c'est-à-dire que les années humides comme hélas les années sèches ont tendance à se grouper par séries sans que l'existence de cycles ait été prouvée.

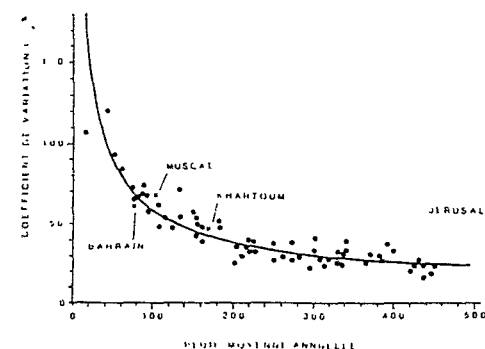


Fig 1 Coefficient de variation en fonction de la hauteur de précipitation annuelle
(Extrait de 'Arid Zone Hydrology', FAO, 1981)

L'évaporation est forte, qu'elle résulte de température élevée, du vent, ou de ces deux influences conjuguées. L'écoulement est constitué par des séries de crues parfois très fortes avec quelquefois un écoulement de base lorsque les réserves souterraines sont importantes. Les tendances des distributions statistiques indiquées pour les précipitations s'accroissent encore pour les écoulements annuels et pour les crues, en particulier celles liées à l'irrégularité.

Mais un phénomène assez général perturbe l'écoulement, c'est la dégradation hydrographique : les cours d'eau ne peuvent pas entretenir leur lit de l'amont à l'aval. Dès qu'un petit cours d'eau drainant par exemple 10 km² débouche en zone relativement plate, il se forme une petite plaine

d'inondation de part et d'autre du lit, des bras quittent le lit principal puis le réseau débouche par un delta dans une mare où l'eau s'évapore. La combinaison de pentes plus fortes et de versants imperméables avec des débits de crues plus importants permet aux petits cours d'eau de se joindre plus ou moins bien et il y a un écoulement généralisé pour des bassins de plus de 100 et parfois plus de 500 km². L'écoulement annuel diminue fortement lorsque cette dégradation s'accroît. D'après une formule d'écoulement annuel donnée par DUBREUIL et VUILLAUME (1975) entre un bassin peu dégradé recevant 400 mm par an et couvrant 25 km² et un bassin fortement dégradé, l'écoulement annuel L_e varie de 105 à 35 mm et encore dans le cas d'une dégradation extrême L_e peut s'annuler. En montagne, avec des pentes fortes et continues, il n'y a pas de dégradation hydrographique (voir RODIER, 1985).

La couverture végétale étant souvent insuffisante, l'érosion est forte dès que la pente devient significative (plus de 1 à 2 %). La mise en culture, si elle n'est pas accompagnée de mesures appropriées de conservation des sols, aggrave sérieusement la situation. Le milieu est très sensible à l'influence de l'homme et aux fluctuations climatiques.

Caractères propres aux zones arides et semi-arides de l'Afrique tropicale :

Dans ce cas des régions tropicales africaines, il convient d'ajouter quelques caractéristiques qui leur sont propres.

1. Les pluies sont réparties sur une saison assez courte en été avec des températures élevées. Font exception, les régions arides équatoriales de l'Afrique de l'Est avec deux saisons des pluies et les côtes de la Namibie et de l'Erythrée où les pluies se produisent à un moment quelconque de l'année.
2. Les pluies sont généralement des averses convectives d'assez courte durée avec un corps à forte intensité. Elles couvrent une surface limitée (20 à 100 km²). Font exception, les régions recevant, en outre, des pluies cycloniques comme Madagascar.
3. Mis à part quelques hautes montagnes, les températures sont élevées et l'évaporation très forte. L'évapotranspiration potentielle atteint 2200 mm-2300 mm sous l'isohyète 400 mm.
4. La concentration des pluies en une saison liée à la mousson qui se reproduit régulièrement est un facteur qui atténue l'irrégularité. Cette concentration est de nature à favoriser l'écoulement sur des bassins de moyenne superficie.
5. Comme ceci est exposé dans ce séminaire, VALENTIN (1985) a montré que pour de très nombreux sols il se forme une pellicule imperméable superficielle qui limite ou interdit l'infiltration directe. Ceci est encore accentué par la nature géologique des zones tropicales arides africaines avec peu de sols ou sous-sols perméables. Les régions karstiques sont très rares. Les zones perméables sont des terrains volcaniques, des sables éoliens, des affleurements rocheux très fracturés avec parfois une auréole d'arènes perméables. Le ruissellement superficiel est favorisé.
6. Une période ancienne plus humide avec de grands systèmes fluviaux et lacustres ayant laissé des dispositions morphologiques particulières avec de nombreuses plaines grandes et petites où la dégradation hydrographique est plus rapide que dans d'autres zones.
7. De nombreux facteurs, dont les difficultés d'accès en saison des pluies rendent presque impossible l'établissement d'un réseau hydrométrique tenant compte des petits et moyens cours d'eau.

CONSEQUENCES SUR LES APPROCHES SCIENTIFIQUES

Quelles sont les conséquences de ce qui précède sur les approches des scientifiques pour organiser les recherches hydrologiques et élaborer les méthodologies à recommander aux ingénieurs ?

Conditions imposées :

Par suite de divers facteurs et, en premier lieu, de la dégradation hydrographique, les débits spécifiques décroissent rapidement en général de l'amont vers l'aval. On ne peut guère comparer que des bassins présentant la même superficie et encore les comparaisons sont surtout valables pour des bassins de moins de 5 km². C'est ainsi que pour l'étude des écoulements au Sahel, nous avons dû considérer cinq classes de superficie. Dans cet exposé on ne parlera que des superficies faibles ou moyennes, moins de 1000 km², à l'exclusion des grands bassins. Pour ceux-ci notons qu'il faut un concours de circonstances favorables (fortes pentes, terrains imperméables, peu de dégradation) pour qu'un bassin de 10 000 à 50 000 km² puisse produire un écoulement à peu près généralisé. Aussi, la plupart des grands cours d'eau, depuis le Sénégal, le Niger, le Nil au Nord jusqu'aux tributaires des marais de l'Okavango au Sud sont des fleuves exogènes ayant leur origine en zone humide.

Pour les bassins de moins de 1000 km² on ne peut pas compter directement sur les réseaux pour fournir les longues séries de débits nécessaires pour des distributions asymétriques. Ceci a conduit en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale à se baser sur les séries pluviométriques (DUBREUIL, 1986).

Pour passer des pluies aux débits on a été conduit à aménager de nombreux bassins représentatifs dont les données étaient analysées par des modèles correspondant à leurs caractéristiques physiques. Cette approche était d'autant plus justifiée que la transposition à des bassins non observés des données hydrologiques les plus utiles (débit moyen annuel, crue de fréquence décennale) n'est pas très difficile dans ces zones arides (RODIER, 1982) pour les raisons suivantes : prépondérance du ruissellement superficiel justifiant l'emploi de la méthodologie de l'hydrogramme unitaire pour établir la fonction de transfert, prépondérance de la hauteur de précipitation parmi les facteurs du ruissellement, possibilité d'assimiler la pluie journalière de fréquence donnée à l'averse de même fréquence, précipitations concentrées en un corps à forte intensité, concentration des pluies en une seule saison, conditions générales pluviographiques semblables sur de vastes étendues, superficie assez faible occupée par les cultures, ce qui permet en toute première approximation d'éliminer les facteurs : couverture végétale et influence des façons culturales.

La faible durée des observations (sur les bassins représentatifs, 2 ou 3 ans) imposait pour l'analyse, une approche déterministe qu'on retrouve dans la synthèse. Ceci suppose, tout au moins au début de ces études, une certaine dose d'empirisme que permettait une solide expérience de terrain et un examen approfondi crue par crue de l'écoulement parallèlement à ses facteurs conditionnels.

Mais la multiplication des bassins représentatifs, il y en avait plus de 110 après 1980, a permis dès 1975 d'envisager l'emploi de régressions multiples pour déterminer les débits moyens annuels (DUBREUIL et VUILLAUME, 1975) et plus tard, pour la crue décennale (PUECH et CHABI GONNI (1983), grâce au recueil des données de bassins représentatifs (DUBREUIL, 1972). Mais le champ de variation des paramètres est imparfaitement couvert et le paramètre perméabilité n'a pu être quantifié que tout récemment.

Etudes pluviométriques :

Pour établir des bases pluviométriques et pluviographiques saines, un très gros travail d'examen critique, de traitement et d'analyse des données a été effectué par Y. BRUNET-MORET de 1963 à 1968 qui a fourni une loi générale de distribution des précipitations journalières pour l'Afrique de l'Ouest et une partie de l'Afrique Centrale, des cartes de précipitations décennales et un premier schéma de distribution temporelle des intensités au cours de l'averse décennale. Enfin, la publication de toutes les précipitations journalières depuis le début des observations jusqu'en 1965 a été faite pour tous les états francophones du Sahel.

Depuis, l'analyse des données a été poursuivie pour la période ultérieure à 1965 par Y. BRUNET-MORET, puis Y. L'HOTE. Sur une période plus longue, le CIEH (LAHAYE, 1980) a publié de

nouvelles cartes des pluies décennales nettement supérieures aux précédentes bien que la loi de GUMBEL adoptée ne permette plus comme auparavant de tenir compte des effets de site (influence d'une colline isolée, d'un plan d'eau, etc.). Y. BRUNET-MORET en 1975 a prouvé la persistance dans la distribution des précipitations et donné un moyen simple pour générer des séries de pluies annuelles avec persistance. La distribution spatiale a été caractérisée sommairement par le taux de décroissance des hauteurs de précipitations depuis l'épicentre, quantifié par le coefficient k , le rapport d'abattement entre la hauteur ponctuelle d'une averse de fréquence donnée et la hauteur de même fréquence sur une surface S . Après divers travaux de Y. BRUNET-MORET, M. ROCHE, etc., VUILLAUME (1974) a présenté un diagramme qui jusqu'ici a donné satisfaction pour le calcul de k (Fig. 2). LE BARBE (1982), puis BOUVIER (1985), après une analyse très fine des longues séries de précipitations de Ouagadougou et de Niamey, ont établi une relation graphique entre la durée du corps d'averse et sa hauteur, et fourni des formes types de hyéto-graphes pour des averses de diverses hauteurs. A partir de ces bases et d'autres données sahé-liennes, RIBSTEIN et RODIER (1988) ont défini des formes types d'averses très voisines des précédentes pour des hauteurs de précipitations journalières de 70 mm et de 100 mm et pour des tranches d'intensité décennale de 15 mn et 30 mn (Fig. 3).

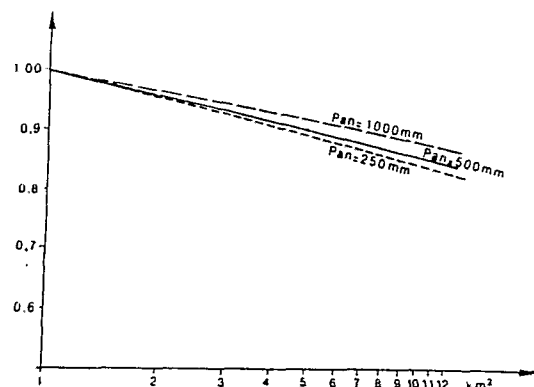


Fig 2 - Coefficient d'abattement pour la pluie décennale au Sahel en fonction de la surface S (d'après G. Vuillaume 1974)

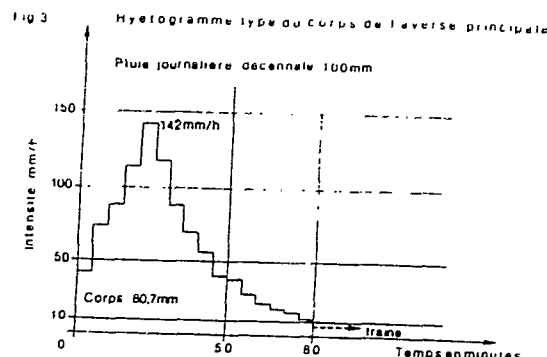


Fig 3

Utilisation d'un modèle global ou d'un modèle matriciel

Le passage des pluies aux débits dans les méthodes déterministes exige de faire un choix concernant le modèle d'écoulement, la relation pluie-débit et enfin la caractérisation d'une fonction de transfert, ces choix concernant aussi bien l'interprétation des données sur chaque bassin représentatif que la synthèse ayant pour principal objectif la transposition. Un modèle idéal aurait respecté la distribution spatiale des précipitations et l'hétérogénéité des sols. La structure spatiale des grains tropicaux dans des régions où, assez souvent, le relief n'est pas très vigoureux, permet une bonne appréciation de la hauteur moyenne de précipitation avec peu de pluviomètres et surtout une représentation acceptable des conditions moyennes par le simple coefficient d'abattement k dont il a été question plus haut, ceci est très important pour la synthèse. Mais l'hétérogénéité des états de surface des sols et de leur perméabilité pose des problèmes beaucoup plus graves. Les bassins vraiment homogènes sont rares, on trouve au moins sur un seul bassin des sols de plateaux, des sols de versants et des sols de dépressions (souvent argileux). Sur un bassin pas très hétérogène, celui de Mouda (Cameroun), on a trouvé d'après une thèse de THEBE (1987) que pour une pluie journalière type de 100 mm (Fig. 3) le coefficient de ruissellement varie de 2 à 70 % d'un point à l'autre du bassin alors que pour l'ensemble de la surface le coefficient de ruissellement moyen est voisin de 50 %. On trouverait de nombreux exemples semblables. Les conséquences les plus importantes se rencontrent sur les bassins perméables dans l'ensemble où le peu de ruissellement provient souvent des seules parties imperméables. La prise en compte vraiment correcte de cette hétérogénéité exige une excellente cartographie des états de surface jumelée avec une quantification de la perméabilité et l'emploi de l'ordinateur dans un modèle matriciel. La première condition n'est guère remplie qu'avec l'emploi judicieux de la télédétection avec une bonne vérité-sol.

Ceci explique pourquoi, dès les années 1950, on a utilisé un modèle global en admettant une perméabilité moyenne ce qui est acceptable pour un bassin pas trop perméable si les différents types de sols sont répartis un peu partout sur le bassin. Si ce n'est pas le cas, si par exemple les sols perméables sont groupés à l'amont, on élimine cette surface perméable et on fait les calculs uniquement sur le reste du bassin. C'est le concept du bassin réduit utilisé pour la première fois au Mali (bassin de Tin Ajar) et au Niger (bassin de la Maggia) vers 1957. Des études récentes (RIBSTEIN et RODIER, 1988) ont montré que le "bassin réduit" devrait être plus fréquemment utilisé, même pour la recherche de la fonction de transfert. Un autre palliatif utilisé pour la synthèse des écoulements annuels (RODIER, 1975) consiste à considérer des bassins types comportant chacun plusieurs catégories de sols. Entre les résultats de deux bassins types comportant la même association de sols en proportions différentes, il est possible d'interpoler. Ce modèle global a été dès l'origine considéré comme un pis aller. En 1958, BOUCHARDEAU, TIXIER et BESLON décomposaient des bassins perméables en diverses unités pédologiques de même capacité d'absorption moyenne, Cam , l'intensité du ruissellement étant $In - Cam$, In étant l'intensité de la pluie nette après soustraction de la pluie d'imbibition, (alors que par la suite c'est le rapport ruissellement sur précipitation le coefficient de ruissellement Kr qui a été utilisé). Cette approche n'a pas eu de suite, les essais MUNTZ ou PORCHER utilisés pour caractériser l'infiltrabilité des sols détruisaient partiellement ou totalement l'état de surface. Une première synthèse de DUBREUIL et VUILLAUME (1975) pour l'écoulement annuel évitait le modèle global grâce à une approche statistique ; il était possible de tenir compte des proportions de grès, sable et quartzite.

Le développement des moyens de calculs a permis de reprendre les modèles matriciels ou maillés. Le modèle à discrétisation spatiale mis au point par GIRARD (1972) a été utilisé avec succès sur l'Oued Ghorfa (Mauritanie) puis plus tard par CHEVALLIER (1985) et par ALBERGEL (1987) au Burkina Faso. Il donne de bons résultats pour la détermination des apports journaliers mais il n'est pas encore utilisable pour les pointes de crues des petits bassins représentatifs vu les faibles pas de temps nécessaires, Il est loin d'être opérationnel pour la synthèse régionale. C'est très probablement ce genre de modèle qui donnera la chef de l'estimation des modules et des crues pour des bassins de 100 à 1000 km². Les travaux de CASENAVE et VALENTIN (1988) permettent d'apprécier quantitativement l'infiltrabilité et on a déjà pu résoudre avec ce modèle le problème des bassins présentant une légère dégradation hydrographique. Mais pour les plus petits bassins le modèle global employé avec discernement peut encore rendre de grands services.

Relations Pluies-Débits :

Dans l'approche déterministe on admet que la pluie décennale est produite par une averse de hauteur décennale dont toutes les caractéristiques autres que la hauteur y compris l'état d'humidité du sol correspondent aux conditions les plus fréquentes pour les fortes averses. CHEVALLIER et al. (1985) ont plus ou moins démontré au Burkina Faso que cette façon de procéder ne présente pas de grands risques pour les zones arides. Le calcul du débit des crues maximum décennal exige la détermination du volume ruisselé correspondant à l'averse décennale (fonction de production) puis celle de l'hydrogramme (fonction de transfert).

La lame d'eau ruisselée L_r dépend de la hauteur de l'averse, de la distribution temporelle des intensités, de la répartition spatiale des précipitations, de l'état d'humidité du sol et du réseau hydrographique au début de l'averse, de l'état de la végétation, etc. En plus, la plupart de ces facteurs sont difficilement représentés par un seul paramètre : pour la distribution des intensités, l'intensité maximale de 5 mn. ne suffit pas, le pourcentage de l'averse correspondant au corps à forte intensité a une influence plus significative ; pour l'état d'humidité des sols l'indice de KOHLER ne suffit pas pour un bon nombre de cas, par exemple celui de argiles à fentes de retrait qui s'ouvrent ou se referment en fonction de ce qu'elles reçoivent des autres sols situés plus haut. L'hétérogénéité des sols combinée à l'hétérogénéité de la pluie peut renforcer L_r par rapport à une averse homogène dans l'espace ou au contraire la réduire. L'analyse de l'influence de ces facteurs est complexe étant donné leur nombre. Au stade de l'analyse la méthode des déviations résiduelles ne permet guère que l'examen de trois paramètres et au Sahel d'autres paramètres viennent souvent masquer l'action des trois premiers. Elle peut permettre cependant, jumelée à un examen de la situation, averse par averse, de situer les volumes de ruissellement des plus fortes averses par rapport aux ruissellements qui seraient obtenus avec des averses de même hauteur mais avec les valeurs les plus fréquentes des autres facteurs. Une étude systématique de SEGUI (1986) qui ne porte malheureusement sur aucun bassin vraiment perméable a confirmé la prépondérance absolue de la hauteur de précipitation : l'influence de l'état d'humidité du sol variable suivant les bassins reste beaucoup plus faible. SEGUI a précisé la valeur la plus fréquente de l'indice de KOHLER correspondant à deux jours après une averse de 10 à 20 mm. Il propose de plus, la fonction de production suivante : $L_r = \sqrt{\beta_2 P^2 + \alpha_2} - \alpha$.

β et α sont des paramètres liés aux caractéristiques du bassin ; pour un bassin très imperméable β est voisin de 1. Cette formule ne doit être employée que jumelée avec une analyse directe des écoulements correspondant aux plus fortes averses pour situer la courbe moyenne dans sa partie haute. Elle ne doit être utilisée pour la synthèse qu'avec la plus grande prudence. Pour les bassins perméables une étude empirique récente a montré que l'influence des facteurs du ruissellement autres que la hauteur de pluie est nettement plus forte, mais la hauteur reste prépondérante. De toute façon une bonne partie de la variance reste et probablement restera difficile à expliquer, mais l'examen cas par cas des couples averses-crues avec toutes les données des facteurs de l'écoulement montre que les bassins ont des réactions que l'on peut expliquer.

Pour la synthèse on a employé jusqu'ici des moyens beaucoup plus simples : dans une note technique AUVRAY et RODIER (1965) ont donné le coefficient de ruissellement $K_r = L_r/P10$ pour la pluie décennale (sans se soucier des variations de $P10$ à l'intérieur de la zone aride) pour différentes conditions de pentes et de perméabilité moyenne, en fonction de la superficie du bassin. En reprenant cette méthodologie RODIER (1986) donne pour des bassins de moins de 20 km² les mêmes courbes de K_r en fonction de S pour deux pluies journalières 100 mm et 70 mm avec les caractéristiques les plus fréquentes pour les fortes averses (Fig. 3) ce qui permet d'interpoler entre les deux faisceaux de courbes.

Pour les lames écoulées annuelles la dispersion autour de la régression Le_{an} , Pan est forte, Le pour une année donnée variant fortement suivant la distribution temporelle des averses et leurs caractéristiques. Dans une note technique RODIER (1975) a défini pour divers types de bassin une valeur du coefficient d'écoulement médian Ke_{med} : rapport entre la valeur médiane de Le_{an} et la valeur médiane de P_{an} .

Fonction de transfert :

Les conditions générales du régime hydrologique imposent presque l'utilisation de l'hydrogramme unitaire pour les petits bassins. On a retenu à l'ORSTOM trois caractéristiques de cet hydrogramme : le temps de montée T_m , le temps de base T_b , (durée du ruissellement) et le coefficient de pointe α , rapport entre le débit maximum ruisselé et le débit moyen de ruissellement pendant la durée T_b . La détermination manuelle de T_b n'est pas trop délicate à condition de choisir des averses qui ruissellent bien et dont la durée de la partie efficace n'excède pas trop la moitié du temps de montée. Avec un programme automatique c'est plus délicat, le nombre de points qu'utilise le programme dans la courbe de récession étant insuffisant. Au-delà de 100 à 150 km² l'averse décennale risque de ne plus couvrir tout le bassin, la méthodologie ci-dessus ne s'applique plus. On a donc essayé de s'affranchir de l'hydrogramme unitaire. PUECH et CHABI GONNI (1984) le font partiellement puisqu'ils partent directement des débits de pointes décennaux mais ceux-ci ont été généralement calculés avec l'hydrogramme unitaire. IBIZA (1987) dans une note inédite a proposé d'employer la notion de temps caractéristique déjà utilisée par MONIOD (1979) aux Antilles. Ce temps est l'inverse du rapport du débit maximum au volume de crue. Pour une crue unitaire ce temps est voisin en moyenne de 40 % de T_b . Une régression est présentée pour déterminer ce temps, avec la dénivelée spécifique De/S (dénivelée totale sur le bassin = $l_g \cdot l$, l : longueur du rectangle équivalent) et avec un paramètre CLIMA (égal à P/Etp). On vérifie bien que sur les quelques grands bassins où on a pu calculer T_b ce temps reste en moyenne égal à 0,4 T_b , mais la dispersion est très grande (influence de la dégradation hydrographique) ; c'est dommage, car au-delà d'une superficie de 200 km², il n'y a guère de solution pour estimer les débits de crues et la fonction de transfert pose des problèmes encore plus ardu que la fonction de production.

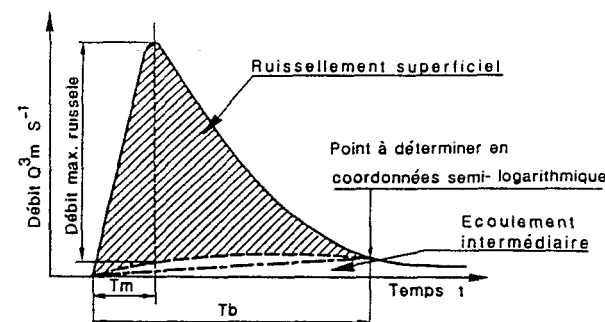


Fig.4-Hydrogramme unitaire et temps caractéristiques

PROBLEMES PRATIQUES DES CALCULS HYDROLOGIQUES

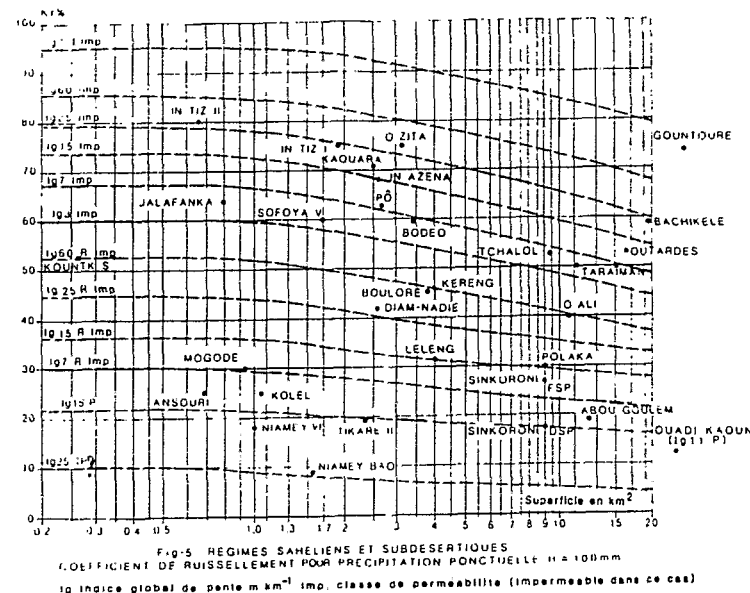
Les approches méthodologiques qui viennent d'être passées en revue ont été appliquées à des problèmes concrets. Ceux que l'on rencontre le plus souvent sont l'estimation du débit de crue auquel doit résister un pont ou un barrage, et du volume d'eau que l'on peut compter mettre en réserve. Traduit en langage hydrologique, c'est la détermination des débits de crue, de l'écoulement moyen annuel et de sa distribution statistique. On a cherché à donner des directives pour le calcul de la crue de fréquence décennale parce que pour cette fréquence relativement forte on peut approcher le débit de crue sans grand risque (on en a d'ailleurs observé directement) et, pour un bon nombre de petits ouvrages c'est la fréquence qui est adoptée. Pour des fréquences plus faibles, on peut, soit prendre une marge de sécurité supplémentaire, soit conserver la même méthodologie, dans les deux cas on prend des risques.

Estimation de la crue décennale :

Même en se limitant à cette fréquence, le débit maximum varie dans de très larges proportions. Pour les petits bassins représentatifs observés, les débits ramenés à une surface de 10 km² varient de 160 m³s⁻¹ pour le bassin de Kaouara (réduit) bassin imperméable du Niger à pente notable, pluie décennale 100 mm, à 4 m³s⁻¹ pour le bassin de Mouda III (très extrapolé) au Cameroun avec un sol perméable à forte pente (pluie décennale 70 mm). Le coefficient K_r varie de 80 % à 1,5 %. Il existe des bassins plus imperméables que Kaouara et des pentes plus faibles que pour Mouda III, l'étude sur bassins fictifs présentée par RODIER et RIBSTEIN (1988) met en évidence un rapport de 85 entre débits extrêmes. Cette variabilité liée en grande partie à l'infiltrabilité du sol exige qu'on ne limite pas les études aux seuls bassins peu perméables.

Approche déterministe : Pour les petits bassins versants, cette approche était la seule possible il y a 25 ans. AUVRAY (1962) a été très réaliste en classant les bassins de façon presque qualitative en catégorie de perméabilité globale sans chercher à quantifier cette dernière ce qui était alors impossible. Il a pu ainsi dégager le principal élément pour la détermination du coefficient K_r . La synthèse ainsi présentée a été améliorée par RODIER et AUVRAY (1965) avec des séries de courbes définissant K_r en fonction de la surface pour diverses classes de perméabilité et de pentes définies par un indice de pente très voisin de I_g , T_b , T_m , et a en fonction de S pour chaque classe de pente. L'étude par ensemble (sahélien, tropicaux de transition, etc.) tenait compte de façon globale du couple climat-couverture végétale. La fonction de production donne V_r volume de ruissellement, en fonction de $P10$: $P10 = kP10$ (k : coefficient d'abattement) et la fonction de transfert se réduit aux deux équations $Q_r = V_r$ en m³/Tb en mn. $Q_{max} = a Q_r$, Q_r : débit moyen de ruissellement. On trouvera plus de détails sur cette méthode et sur la méthode révisée qui suit dans une communication présentée à ce séminaire. Elle a été beaucoup utilisée mais elle présente les inconvénients suivants : bases insuffisantes pour la mise au point des courbes pour les très petits bassins, domaine d'application limité à 100-200 km², difficulté de mise en oeuvre par un hydrologue non confirmé, nombre limité de paramètres pris en compte, surtout classement trop subjectif dans une catégorie de perméabilité.

Pour ces raisons le CIEH, l'ORSTOM et l'OMM ont cherché les moyens d'améliorer cette note de 1965 ou de la remplacer par une méthodologie à caractère probabiliste qui sera présentée plus loin. Un programme de recherches a été mis au point comprenant également l'élaboration d'un répertoire des états de surface des sols à partir de l'emploi du minisimulateur de pluie (CASENAVE, 1982) et un check list, tous deux étant à la base de toutes les méthodologies. La révision de la note de 1965 (RODIER et RIBSTEIN, 1988) concerne des bassins de 1 à 10 km², mais elle peut sans grande difficulté s'appliquer encore à des bassins couvrant jusqu'à 20 km². Il semble que ce soit actuellement la méthode la plus au point par l'approche déterministe, surtout avec l'emploi du répertoire des états de surface qui apporte tous les éléments pour classer quantitativement la perméabilité des sols du Sahel (CASENAVE, VALENTIN, 1988) et du questionnaire préalable ou check list qui permet de procéder, s'il le faut, à des corrections pour les paramètres non pris en compte dans les courbes. Celles-ci ont été corrigées et on a en outre présenté de nouvelles courbes donnant directement les temps de montée T_{m2} , et les temps de base T_{b2} , pour les crues non unitaires (puisque les bassins sont trop petits). Il s'agit de droites $T_{b2} = aS + b$: a décroît avec la pente et croît avec la perméabilité de 2,75 à 19,6. b croît avec la pente de 97 à 255 mn. Il varie légèrement avec la perméabilité. Cette révision a mis en évidence un certain nombre de particularités du régime des zones arides dépassant le cadre étroit de 1 à 10 km² en particulier le brusque accroissement de la vitesse de ruissellement lorsque la pente dépasse 1 à 2 %. Elle apporte une méthodologie intéressante, celle des bassins fictifs. Mais cette méthode déterministe s'arrête à 150-200 km², limite d'application de l'hydrogramme unitaire.



Approche probabiliste : Au CIEH, PUECH et CHABI-GONNI (1983) ont présenté une nouvelle méthodologie de calcul des crues décennales. Ils ont mis à profit la masse de données concernant les débits de crues décennales et les facteurs responsables de ces crues contenue dans le recueil de DUBREUIL (1972) et ils ont cherché par des régressions multiples à mettre au point un système d'abaques utilisable par tous pour l'ensemble des pays du CIEH. Deux formules particulières ont été mises au point pour le Sahel.

$$Q10 = a S^b K_{r10} I_g^d$$

$$Q10 = a S^b I_g^c P_{an}^d$$

S : surface du bassin,
 I_g : indice global de pente,
 P_{an} : précipitation moyenne annuelle,
 K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal donné par une formule où intervient la nature géologique du sous-sol des bassins.

En définitive, cette méthode donne des résultats légèrement inférieurs à ceux de la méthode déterministe de 1965 avant révision, pour les raisons suivantes : l'échantillon utilisé comprenait très peu de bassins perméables, l'indice ne tient pas compte des pentes transversales (RODIER, 1986), K_r est lié de façon très lâche à la nature géologique du sous-sol mais très étroitement, au contraire, aux états de surface (voir la communication de CASENAVE et VALENTIN). Enfin la plupart des débits décennaux de DUBREUIL sont ceux des rapports originaux avec ou sans marge de sécurité (celle-ci peut être considérable). Cependant jusqu'ici, pour des superficies dépassant 100-200 km², c'est la seule méthode de régionalisation. Cependant pour ces surfaces elle peut être sérieusement mise en échec en cas de forte dégradation hydrographique. Cette méthode peut être fortement améliorée :

1. En partant de données révisées pour I_g comme pour les débits décennaux et en remplaçant dans les régressions P_{an} par la pluie $P10$ donnée par les cartes CIEH.

2. En utilisant le concept de bassins fictifs où les facteurs principaux sont donnés et la crue décennale calculée par la méthode déterministe en laissant de côté tous les facteurs généralement secondaires. L'échantillon ainsi généré couvre tout le champ de variations des paramètres principaux. Le biais introduit par le fait qu'on ne part pas directement des débits décennaux estimés est bien inférieure à celui qui résulterait d'un échantillon naturel insuffisant, d'autant plus qu'une grande précision n'est pas nécessaire pour les bassins perméables.

3. En déterminant *kr10* à partir du répertoire des états de surface de CASENAVE et VALENTIN conjointement avec une bonne cartographie des états de surface (avec utilisation de la télédétection).

4. En utilisant le questionnaire préalable (check list) qui permet de tenir compte des paramètres non pris en compte dans les régressions. On ne peut en utiliser que très peu dans ces régressions, quatre au maximum. On peut même tenir compte de la dégradation hydrographique si elle n'est pas trop forte.

Bassins couvrant plus de 100-200 km² :

L'ORSTOM pensait résoudre ce problème en équipant des bassins "de 1000 km²". Quatre bassins seulement ont été aménagés car leur étude était très coûteuse. Pour envisager une régionalisation, il en aurait fallu au moins 20. La méthode déterministe butte sur l'hétérogénéité des sols et surtout sur le type de distribution spatiale des pluies à adopter pour la crue décennale ainsi que sur la dégradation hydrographique. La méthode probabiliste une fois améliorée fournira dans certains cas favorables une solution et dans d'autres un point de repère. Mais un point est réconfortant : au cours de missions, d'études sur bassins représentatifs, ou tout simplement par l'observation des réseaux, on a pu observer et mesurer entre 1956 et 1974 sur des bassins de plus de 200 km², un bon nombre de crues qui à l'époque ont simplement paru un peu fortes alors qu'avec le recul on s'aperçoit maintenant que leur période de retour atteignait souvent 10 ans ou dépassait ce chiffre. Le tableau I présente quelques-unes de ces crues et donne une idée de leur très grande variabilité : de 0,0004 à 2,2 m³s⁻¹ km⁻². Les différences de perméabilité (entre Djajibine et Boudame 149 km² par exemple) ou de pente, expliquent certaines différences de débits spécifiques, les différences de superficie également, mais la dégradation hydrographique joue un rôle considérable. Par exemple la différence entre le Kori Teloua et l'Ouadi Haouach est frappante (la pente joue en plus en faveur du premier). Pour l'Ouadi Fera le débit provient, en quasi-totalité d'un petit affluent à l'aval. Le résultat de Djajibine 2,2 m³s⁻¹ km⁻² est à comparer à la crue décennale de P6, un des sous-affluents (2,7 km²), dont la crue décennale a été estimée à 15,4 m³s⁻¹ km⁻². Une étude générale systématique de toutes ces crues y compris le grand nombre de celles qui n'étant pas sur bassins représentatifs ne figurent pas dans le recueil DUBREUIL (1972), semblable à l'étude faite en 1975 pour les écoulements annuels, donnerait une base assez solide pour les études de régionalisation ultérieures, en particulier les études de régressions multiples. Les modèles à discrétisation spatiale pourront probablement donner des solutions pour la régionalisation, mais il reste encore beaucoup à faire. De tout façon il faut une étude sérieuse de terrain pour déterminer les zones qui ruissellent et celles qui ne ruissellent pas. On trouvera dans une étude d'écoulement au Sahel (RODIER, 1975) un exemple de ce qui peut être fait sur l'Ouadi Enne (Tchad). On peut également utiliser les méthodes indirectes d'estimation des débits par l'examen des lits ou des ouvrages RIGGS (1978), BENSON (1968). Mais il faut garder présent à l'esprit le fait qu'un bassin dégradé peut fournir à l'aval un débit dont la vallée ne donne aucune idée. Par exemple avant la crue de 1974, au lac de Bam (Burkina), nous avons parcouru la zone de jonction entre partie amont et partie aval du bassin ; on ne pouvait pas imaginer le débit qui est passé par là, à cette crue de 1974.

Estimation des débits moyens annuels ou modules :

Le module annuel n'est pas une caractéristique très significative étant donné sa grande variabilité interannuelle en zones arides, mais sa connaissance liée à quelques notions sur sa distribution statistique est nécessaire pour l'étude des conditions de remplissage de réservoirs.

Tableau I - Quelques crues de fréquences voisines de la fréquence décennale au Sahel

Bassin	Pan (mm)	S (km ²)	Q10 (m ³ s ⁻¹)	q10 (l.s ⁻¹ .km ⁻²)	Dégradation
Sofaya (Tchad)	120	345	12	100	+
Haouach (Tchad)	120	7 700	3	0,4	+++
El Meki (Niger)	150	165	200	1 200	0
Teloua (Niger)	170	1 170	450	380	0
Enné (Tchad)	530	525	75	140	++
Fera (Tchad)	420	5 600	120	21	+++
Djajibine (Mauritanie)	450	148	325	2 200	0
Boudamé (Mauritanie)	450	149	35	230	+
Boudamé (Mauritanie)	450	1 125	200	180	+
Tambas (Niger)	460	284	400	870	0
Gorouol (Burkina Faso)	520	7 500	117	15,5	+
Maggia (Niger)	475	2 525	140	55	0
Bam Bam (Tchad)	800	1 200	350	290	+
Mayo Oulo (Cameroun)	1 000	1 160	(1 000)	800-900	0

Le module est lié aux précipitations annuelles mais aussi à d'autres facteurs dont la répartition temporelle des averse. Par exemple, en 1961, au Nord de Ouagadougou, *Pan* a été nettement déficitaire, mais comme une bonne partie des précipitations était concentrée en deux très fortes averse qui ont produit de fortes crues, on a observé un module annuel nettement excédentaire. On peut arriver cependant à définir un coefficient d'écoulement médian Ke_{med} , rapport de la valeur médiane de l'écoulement à celle de *Pan*; mais ceci ne veut pas dire que si *Pan* est voisin de la médiane, il en soit de même du module. Trouver cette valeur médiane est assez délicat, cependant, avec trois ou quatre années d'observations sur un bassin représentatif, un hydrologue expérimenté arrive à cerner cette valeur médiane après un examen de l'ensemble des débits journaliers. Un moyen plus précis consiste à utiliser un modèle pluie-débit au pas de temps journalier (cela suffit pour l'Afrique tropicale) avec comme entrées une ou mieux, plusieurs longues séries pluviométriques de même régime que sur le bassin dont on déduira une longue série de modules et leur distribution avec sa médiane. C'est ce qui a été fait par GIRARD (1975) pour des petits bassins avec un modèle simplifié dont les paramètres étaient en rapport avec les caractéristiques physiques du bassin. Pour de plus grands bassins versants des modèles à discrétion spatiale également établis par GIRARD permettent de tenir compte de l'hétérogénéité des sols.

Nous avons déjà signalé une première synthèse faite par DUBREUIL et VUILLAUME (1975) qui ont présenté une formule donnant l'écoulement annuel moyen en mm

$$Le = 0,15 P2 - 1,3C - 0,37G + A$$

$$P2 = \sum_{i=1}^{12} (Pm - \frac{1}{36} E_{TB})$$

Pm : pluie mensuelle,
 ETB : évaporation annuelle sur bac,
 C : pourcentage de culture,
 G : pourcentage de grès ou quartzites ou sables,
 A représente deux classes de surface et la dégradation hydrographique, et varie de 135 à 20.

Au début de la sécheresse, il a paru nécessaire d'étudier la distribution des modules, une synthèse a été effectuée par RODIER (1975) avec toute l'information disponible. Trois paramètres ont été utilisés pour la régionalisation : S , Pan et le paysage correspondant au bassin c'est-à-dire l'ensemble des états de surface des sols et des facteurs caractérisant la pente, chaque paysage correspondant à un bassin type. On peut interpoler les résultats entre deux bassins types s'ils comportent les mêmes composants en proportions variables. Pour les petits bassins le rôle de la pente sur le module n'est pas très important bien que significatif.

Un seul bassin type en a tenu compte. Pour la catégorie de surface 2 à 40 km² les courbes de distribution ont été établies par le modèle simplifié de GIRARD pour un bassin type imperméable et un bassin type perméable pour les valeurs de *Pan med* de chaque bassin. Il a été assez facile de passer aux mêmes courbes de distribution pour *Pan med* variant de 300 mm à 750 mm et à la surface 25 km² (Fig. 6). Un autre réseau de courbes a été tracé pour $S = 5$ km². Pour les autres bassins types on a estimé directement la fréquence des valeurs observées ce qui a fourni trois points de la courbe de distribution qu'on a pu tracer par interpolation entre les deux réseaux de courbes des bassins perméables et imperméables. Le tableau II montre la variabilité des valeurs médianes et des valeurs décennales pour sept bassins types

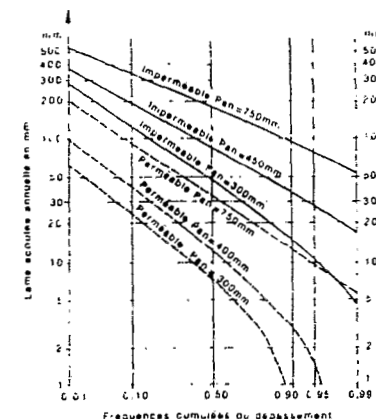


Fig 6. Diagramme de distribution de l'écoulement annuel en région sahélienne pour deux types de perméabilité et diverses hauteurs de précipitations annuelles *Pan* (Surface 25 km²)

Bassin	Sol	Le (med)	Le (déc)
Galmi réduit (Niger)	Colluvions argileuses	140 mm	50 mm
Gountoure (Burkina Faso)	Granit sain avec dépressions peu profondes comblées par des sols sableux	86 mm	30 mm
Gagara (Burkina Faso)	Vertisols imperméables sur granit sur une partie du bassin	52 mm	17 mm
Barlo (Tchad)	Sols de Gountoure + sols perméables	24 mm	7 mm
Abou Goulem (Tchad)	Majorité de sols perméables sur granit	12 mm	3 mm
Niamey (Niger)	Sols sableux perméables ± cultivés	(2) mm	0

Tableau II. Ecoulement annuel pour quelques bassins types sahéliens
 $S = 25$ km² $Pan = 400$ mm - Ig entre 6 et 20 m/km

Pour des superficies de plus de 40 km² on s'est inspiré des fréquences déterminées directement sur les valeurs annuelles observées aux bassins représentatifs et les courbes de distribution des stations des réseaux qui grâce aux années sèches 1971 et 1972 avaient un caractère assez sûr pour la partie basse. La figure 7 montre par l'exemple de l'Ouadi Enné au Tchad toute l'importance des variations interannuelles lorsque la dégradation hydrographique est forte. Pour des bassins de 100 à 500 km² la valeur médiane de l'écoulement sur les bassins observés varie de 7 mm à 90 mm.

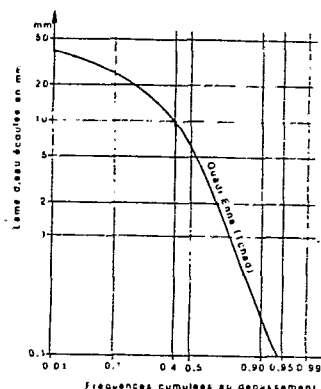


Fig 7 - Ebauche de la courbe de distribution des écoulements annuels pour un ouadi en zone aride (ouadi Enné (Tchad)).
S = 527 km² dégradation hydrographique assez forte

Pour les plus grands bassins on a utilisé exclusivement les stations des réseaux qui malheureusement ne couvrent pas tout. Sur le Kolimbiné (Mali) on ne sait presque rien et sur le Karakoro on ne sait rien. Il est pratiquement impossible de transposer des données d'un grand bassin endogène à un autre.

Cette synthèse de 1975 pourrait être améliorée en utilisant le modèle simplifié de GIRARD sur d'autres bassins-types ce qui préciserait les réseaux de courbes en ajoutant d'autres bassins-types (l'un d'eux paraît s'imposer sur granit à peu près sain (mare d'Oursi)) et enfin pour des bassins de plus de 40 km² en examinant si les réseaux de stations de jaugeage permettraient d'apporter des compléments.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

On voit par ce qui précède que tout au moins dans les zones arides d'Afrique Occidentale et Centrale on est actuellement assez bien armé pour estimer les principaux paramètres hydrologiques dans certains cas ; mais pour d'autres catégories de bassins, par exemple pour les crues des bassins de 200 à 2000 km², il est bien difficile de transposer les résultats des observations.

On trouvera ci-après un certain nombre de recommandations susceptibles de faciliter l'emploi des méthodologies opérationnelles, d'améliorer les méthodologies récentes, ou pouvant conduire à l'élaboration de nouvelles méthodologies.

1. Il convient de bien faire connaître ce qui existe aux utilisateurs éventuels, c'est un des buts de ce séminaire. Mais, en outre, il faudrait diffuser très largement un certain nombre de notes techniques pour la pratique des estimations, surtout les cartes de pluies décennales du CIEH, puis le manuel technique sur les aménagements de bas-fonds en zone soudano-sahélienne, une note sur l'emploi des régressions multiples dès que les améliorations suggérées plus haut auront été apportées, le répertoire de l'infiltrabilité des états de surface, le check list et d'autres notes pratiques pour lesquelles ce séminaire aura prouvé l'urgence d'une large diffusion.

2. Il serait bon également que les nombreux résultats obtenus dans les zones tropicales au Nord de l'Equateur soient connus dans les zones tropicales au Sud et vice versa. Les recherches sur l'érosion ont largement utilisé par exemple les travaux sur l'énergie cinétique de la pluie réalisés dans les zones australes.

3. Les réseaux hydrométriques des zones arides et semi-arides devraient être l'objet de la sollicitude de toutes les administrations nationales et des organisations internationales intéressées. Ceci doit concerner aussi bien les bassins de plus de 200 km² que les grands fleuves. Il n'y a qu'avec de longues séries d'observations qu'on pourra bien connaître les fluctuations climatiques et les crues de fréquence rare. Un effort important devrait être fait, nous le répétons depuis plus de 10 ans sur les bassins du Karakoro et de la Kolimbiné, il y a là des cours d'eau à crues violentes que les hydrologues connaissent mal.

4. Dans le domaine de la recherche il paraît essentiel :

- de comparer la crue décennale déterminée par modèle et voie statistique avec celle estimée jusqu'ici par le modèle global avec les dernières améliorations ;
 - d'améliorer la méthode des régressions multiples pour le calcul de la crue décennale en s'inspirant si possible des suggestions du présent exposé ;
 - d'effectuer une première synthèse à partir des rapports originaux pour les crues maximales observées au Sahel pour des superficies comprises entre 200 et 3000 km² ;
 - de poursuivre les recherches pour l'élaboration de modèles pluies-débits dont les paramètres seraient liés aux caractéristiques des bassins ;
 - de poursuivre l'étude de la structure des averses au Sahel notamment en ce qui concerne la répartition temporelle et spatiale dans le cas des averses de très faible fréquence.
5. D'inclure dans la formation des ingénieurs et techniciens la pratique des calculs hydrologiques pour les aménagements à partir de méthodologies opérationnelles et que cette partie du programme occupe une place suffisante.

REFERENCES

ALBERGEL J. (1987)

Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Thèse Paris. 6. ORSTOM. 327 p.

AUVRAY C. (1962)

Estimation de débits de crues en régimes tropicaux. Multigraph CIEH présenté à la conférence de Monrovia. 50 p.

BENSON M.A. (1968)

Measurement of peak discharge by indirect methods. WMO Technical, note n° 90 Publ. WMO 225 TP 119. Genève.

BERTON S. (1988)

La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et micro barrages en Afrique de l'Ouest. Dossier n° 12 Groupement de Recherches et d'Etudes Technologiques. Paris.

BOUVIER C. (1985)

Etude de ruissellement urbain à Niamey. Rapport Général. Tome 3 : Interprétation des données. CIEH. Mission ORSTOM au Niger, 106 p.

BRUNET-MORET Y. (1963 à 1968)

Etude Générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. Multigraph. CIEH-ORSTOM. Bondy.

République de Haute-Volta (1963) 19 p.,

République du Niger (1963) 18 p.,

République du Mali (1963) 23 p.,

République du Sénégal (1963) 18 p.,

République de la Mauritanie (1964) 23 p.,

République du Tchad (1966) 27 p.,

Rapport de Synthèse (1968) 17 p.

BRUNET-MORET Y. (1975)

Essais sur la persistance des précipitations annuelles en Afrique Occidentale. Cahiers ORSTOM, Série Hydrol. Vol. XII, n° 4. ORSTOM. Bondy.

CASENAVE A. (1982)

Le minisimulateur de pluie - Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cahiers ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XIX, n° 4, pp. 208-227. Paris.

CASENAVE A. et VALENTIN C. (1988)

Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Communauté Economique Européenne-ORSTOM. 202 p. + annexes + planches photographiques. 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). Travaux et Documents, n° 190. 251 p. ORSTOM. Paris.

DUBREUIL P. (1965)

Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. Colloque AISH. Bassins représentatifs et expérimentaux. Budapest, pp. 54-63. Publ. AISH n° 66.

DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. et HERBAUD J. (1972)

Recueil de données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951-1969. ORSTOM. Paris.

DUBREUIL P. et VUILLAUME G. (1975)

Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. Colloque AISH sur les caractéristiques hydrologiques des bassins fluviaux. Tokyo. pp. 205-215. Publication AISH n° 117.

DUBREUIL P. (1987)

L'évaluation de l'utilisation des ressources en eau des régions semi-arides et intertropicales. Sols et eaux, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. Actes du Séminaire Banque mondiale. Mai 1986. Washington. Publ. ORSTOM.

FAO (1981)

Arid Zone Hydrology. FAO Irrigation and drainage paper, n° 37. FAO. Rome.

GIRARD G. (1975a)

Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'Oued Ghorfa (Mauritanie). Cahier ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XII, n° 3, pp. 167-188. ORSTOM. Paris.

GIRARD G. (1975b)

Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XII, n° 3, pp. 129-221. ORSTOM. Paris.

IBIZA D. (1987)

Transferts de surface. Note inédite.

LAHAYE J.P. (1980)

Etudes de pluies journalières de fréquence rare dans les Etats membres du CIEH. Synthèse régionale des valeurs réduites des pluies maximales annuelles. Aspects théoriques. Rapport multigraph. CIEH. 58 p. et annexes. Ouagadougou.

LE BARBE L. (1982)

Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou. Essais d'interprétation théorique. Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XIX, n° 3, pp. 135-204. ORSTOM. Paris.

PUECH C. et CHABI GONNI D. (1983)

Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH. Rapport multigraph. 73 p. et annexes. Ouagadougou.

RIGGS H.C. (1978)

Streamflow Characteristics from channel Size. J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civ. Engrs, 104 n° Hy1.

RODIER J.A. et AUVRAY C. (1965)

Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de moins de 200 km² en Afrique Occidentale. CIEH-ORSTOM, 30 p.. Paris (translated in english by Herridge, W.E. (1965) multigraph. CIEH Ouagadougou)

RODIER J.A. (1975)

Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Travaux et Documents. N° 46, 115 p.. ORSTOM. Paris (translated in english by Eeles, A. published (1982) Tr. et Doc. n° 145. ORSTOM).

RODIER J.A. (1982)

La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cahier ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XIX, n° 2, pp. 115-127. ORSTOM. Paris.

RODIER J.A. (1985)

Aspects of arid zone hydrology in Rodda J.C. (ed) Facets of hydrology II, Hohn Wiley and Sons, Chichester, pp. 205-247.

RODIER J.A. (1986)

Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cahier ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XX1, n° 2, 25 p. + annexes. ORSTOM. Paris.

RODIER J.A. et RIBSTEIN P. (1988)

Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km². 108 p. + annexes. ORSTOM. Montpellier.

SEGUIS L. (1986)

Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière et sa régionalisation. 241 p. + annexes. Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier.

THEBE B. (1987)

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

UNESCO (1979)

Carte de la répartition mondiale des zones arides. Note technique MAB n° 7. Unesco. Paris.

VUILLAUME G. (1974)

L'abattement des précipitations journalières en Afrique Intertropicale. Variabilité et précision de calcul. Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XI, n° 3, pp. 205-240. ORSTOM. Paris.

LA MODELISATION HYDROLOGIQUE POUR LA GESTION DE L'EAU DES REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES DE L'AFRIQUE

R. J. Moore, Institute of Hydrology

Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, England

RESUME

Les mécanismes de formation de la pluie, de l'évaporation et du ruissellement qui opèrent dans les régions arides et semi-arides, diffèrent de ceux des régions tempérées. On passe en revue la manière par laquelle, la spécificité des processus hydrologiques des régions arides et semi-arides, affecte la structure, le besoin en données et la précision des modèles utilisés pour la gestion de l'eau de ces régions. On souligne ensuite, la part que prennent les modèles de gestion de l'eau, dans le système de décision appliqué à la gestion des sécheresses. Des recommandations sont faites sur la nature des efforts à apporter, afin de rendre les modèles hydrologiques plus applicables aux problèmes de ressources en eau des pays arides et semi-arides de l'Afrique.