

Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes

G. GIRARD
Directeur de recherches ORSTOM

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude générale des écoulements et de leur variabilité interannuelle pour la vaste région du Sahel africain, l'auteur utilise deux modèles hydrologiques globaux permettant de reconstituer de longues séries de lames écoulées annuelles à partir d'une ou de plusieurs séries de précipitations de longue durée. Ces modèles opèrent au pas de temps journalier.

L'un est un modèle à réservoirs de structure classique à l'ORSTOM et déjà utilisé ailleurs, indispensable quand l'écoulement ne se limite pas à du ruissellement. Dans le cas contraire, ce qui est souvent la réalité du Sahel d'autant plus que l'on se rapproche du désert, l'auteur a élaboré un modèle simplifié reposant sur une relation linéaire entre lame ruisselée et hauteur de pluie corrigée d'un terme caractérisant surtout l'état de saturation préalable des terrains, son réglage est rapide et possible même avec seulement un à deux ans d'observations de débits. Cette relation linéaire repose sur l'analyse des résultats de 33 bassins représentatifs de l'ORSTOM.

Les deux modèles sont appliqués à dix bassins répartis dans tout le Sahel africain. Les résultats détaillés sont présentés et critiqués. Des contraintes à l'emploi des modèles en sont déduites qui concernent essentiellement la qualité de l'information pluviométrique.

Mots-clés :

Régime des zones subarides. Modèle matriciel. Modèle global de ruissellement. Estimation des modules. Irrégularité interannuelle. Application.

ABSTRACT

Application and constraints of hydrological models to estimation of annual runoff in the african Sahel.

In the framework of a general study of annual runoff and its variability in the african Sahel, the author is dealing with two « lumped » hydrological models in order to simulate long chronicles of annual runoff from long term rainfall observations. These models are computed on a daily time interval.

One of these models is a classical model based on a serie of reservoirs simulating all the phases of water cycle (infiltration, evapotranspiration, surface and intermediary runoff, basic flow...). It has already been used by ORSTOM in many runoff conditions. When river flow is not only surface runoff, we must use this model. In this paper, it has been handled with data sets from five watersheds located in the climatic range between 700 to 900 mm of annual rainfall.

The second model has specially been built to run on Sahelian basins where river flow is only direct surface runoff. It is a rough and simplified one. The basic equation is a linear regression between runoff and rainfall. A corrective term takes account of the antecedent soil moisture.

This model is very easy to be fitted with only one or two years of observed data. The linear regression has been established with the data from 33 representative basins operated by ORSTOM in the african Sahel during the last twenty years.

This simplified model has been handled with data sets from five others basins located in the climatic range between 300 to 700 mm of annual rainfall. All the results of these handlings are given and commented in this paper.

The author is concluding by several considerations that stress the constraints to use hydrological models in such

tropical and arid regions. The hardest constraint is regarding quality of rainfall observations at synoptic stations and during the survey of representative basins.

All the basins have drainage areas between approximately 10 to 100 km². The models supplies long term series of runoff from which we could for the first time in this region evaluated the variability from year to year of this runoff.

Key-words :

Hydrological regime of subarid zones. Distributed and lumped model of runoff. Estimation of annual runoff. Irregularity from year to year. Application.

INTRODUCTION

Comme l'autre article consacré à l'application du modèle à discrétisation spatiale au bassin de l'oued Ghorfa en Mauritanie, le présent article apporte une démonstration méthodologique de l'utilité pratique des modèles hydrologiques.

Ils sont l'un et l'autre les fruits des travaux scientifiques entrepris par les hydrologues de l'ORSTOM pour valoriser l'abondante information hydroclimatologique dont ils disposaient, afin de rendre compte des phénomènes engendrés par les aléas climatiques récents dans le Sahel africain, travaux exécutés dans le cadre d'une convention d'action urgente avec la DGRST.

Le modèle à discrétisation spatiale requérant des données sur le milieu physique souvent indisponibles ne peut être utilisé au maximum de sa puissance sur de très nombreux bassins. Sa fonction de production légèrement modifiée, a servi de base à un modèle global plus aisément utilisable.

Nous avons également mis au point un modèle de ruissellement très simplifié pour simuler la lame écoulée journalière d'un petit bassin versant sahélien, directement à partir des résultats d'exploitation des bassins représentatifs de l'ORSTOM lorsque les informations par le milieu physique faisaient totalement défaut. En utilisant les séries pluviométriques aux stations de longue durée, ces modèles permettent de constituer des séries de lames d'écoulement annuelles facilitant l'appréciation de la variabilité interannuelle de la ressource en eau.

La simplicité de ce dernier modèle le rend, sous réserve de certaines contraintes explicitées en fin d'article, applicable à tout bassin représentatif de la zone sahélienne et le calage des paramètres en est aisé et rapide.

C'est donc un bon outil de l'hydrologie appliquée. Le présent article développe d'abord les considérations ayant conduit à l'élaboration du modèle simplifié pour le Sahel, puis il donne les résultats de l'application de ces deux modèles à divers bassins représentatifs.

On trouvera sur les figures 1 et 2 la situation des trente-trois bassins représentatifs ayant d'une part servi à l'élaboration de la fonction de production du modèle sahélien simplifié et sur lesquels d'autre part (dix d'entre eux), l'un ou l'autre des modèles a été testé.

Ces graphiques reproduisent les cartes de situation des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM auxquels appartiennent à deux exceptions près (Galmi et Mokolo-Tsanaga) tous les bassins versants utilisés dans cette étude.

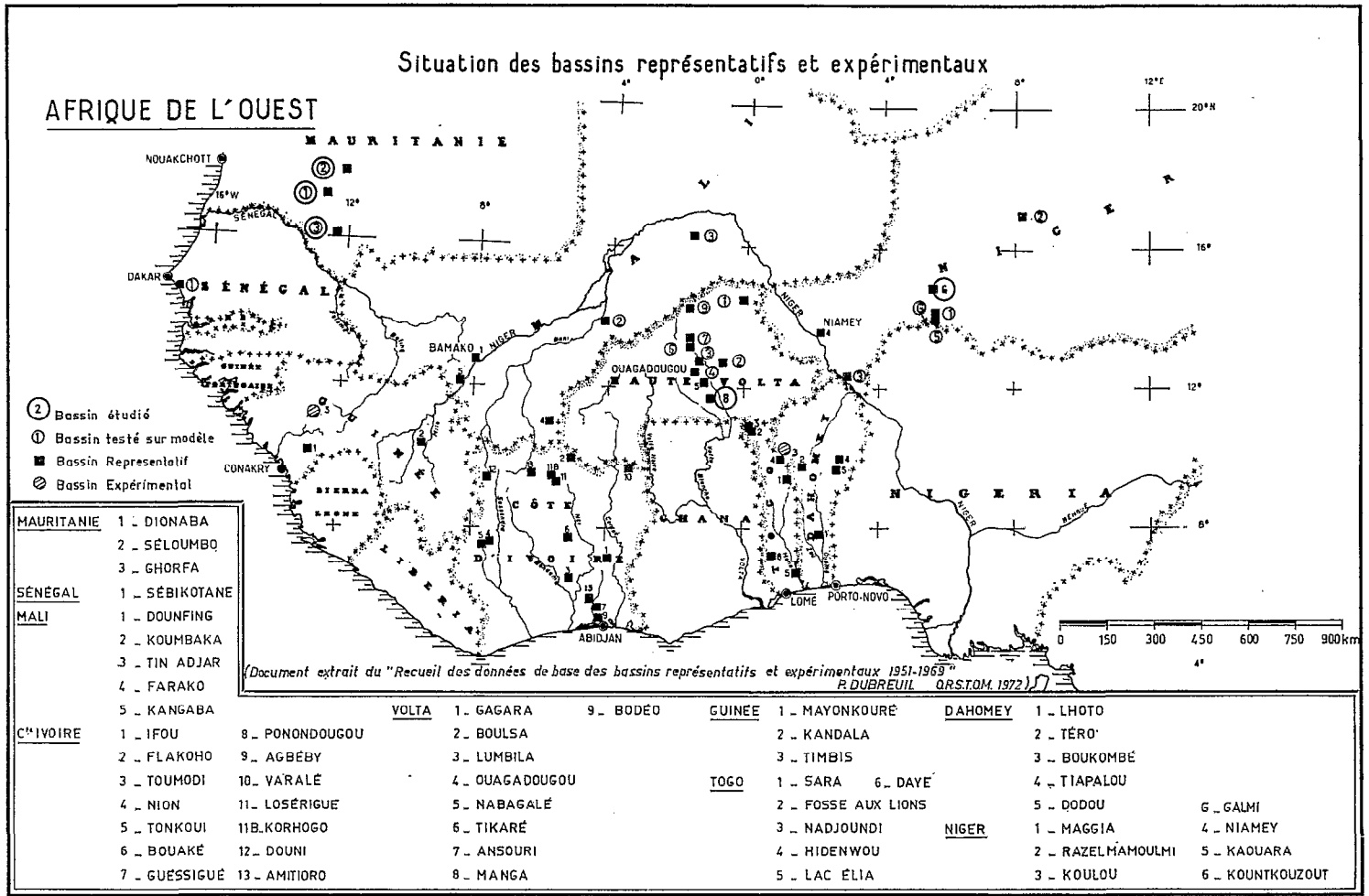
Ces bassins versants sont tous situés dans la région sahélienne — moins de 750 mm de pluviosité annuelle — ou légèrement plus au sud jusque vers 850 mm de pluviosité. Quelques références sont également faites au bassin de Korhogo (nord Côte d'Ivoire, près de 1 400 mm de pluviosité) situé en région tropicale sur lequel des études fines du régime des précipitations ont été effectuées.

1. ÉLABORATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ SAHÉLIEN

Diverses considérations ont été faites afin de permettre l'élaboration du modèle simplifié applicable au régime sahélien. Ces considérations portent essentiellement sur les relations hydropluviométriques entre précipitations et hauteurs de lame ruisselée résultantes c'est-à-dire sur la fonction de production du dit modèle.

L'orientation prise à cette occasion est étroitement conditionnée par le milieu sahélien d'une part et par l'intention d'autre part d'avoir un modèle simple et rustique. L'hypothèse de départ est que la fonction de production ne doit s'appuyer que sur des relations hydropluviométriques, par défaut ou insuffisance d'informations sur le milieu physique. Le modèle ne peut en conséquence qu'être global. Destiné à être mis en œuvre sur de faibles surfaces,

Fig. 1. — Situation des bassins représentatifs et expérimentaux



Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulee en zone sahélienne et leurs contraintes

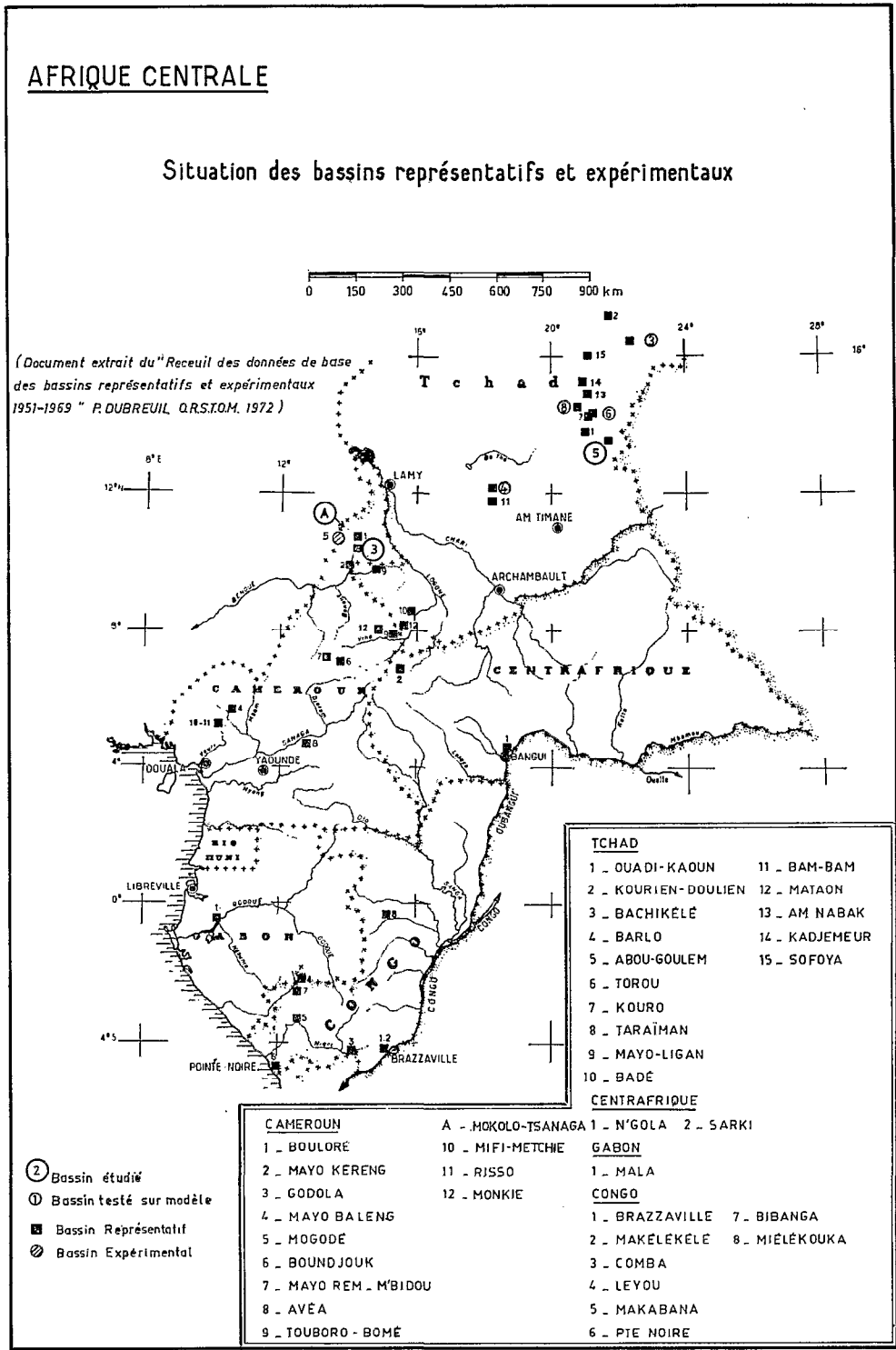


Fig. 2. — Situation des bassins représentatifs et expérimentaux

on y admettra que la hauteur moyenne de précipitations y correspond à la hauteur ponctuelle de référence à partir de laquelle on reconstituera une longue série de débits annuels. L'utilisation d'une matrice des états de pluie et de non-pluie n'est plus nécessaire ici comme elle l'était pour le Ghorfa, grand bassin de 1 000 km² environ (cf. article sur le Ghorfa dans ce cahier).

1.1. ANALYSE DE LA PRÉCIPITATION JOURNALIÈRE

On utilise les deux notions classiques de la pluie moyenne sur le bassin, appelée ici pluie totale H_t et de la pluie utile H_U . Cette dernière étant, rappelons-le, la fraction de la pluie totale tombée avec une intensité choisie supérieure à un seuil fixe S a priori en considérant la susceptibilité au ruissellement des terrains du bassin versant. On parlera également de durée utile D_U pour désigner la durée de la pluie utile.

A partir d'échantillons de relevés pluviographiques sur plusieurs années, on peut, en faisant varier le seuil S , vérifier que l'on trouve deux relations moyennes assez serrées :

- a) la durée utile D_U croît avec la hauteur de précipitation H_t pour des seuils S fixes,
- b) la hauteur utile H_U croît également avec la hauteur H_t pour des seuils S fixes.

Un tel travail analytique a été fait sur dix ans de données pluviographiques obtenues sur le bassin de Korhogo (Côte d'Ivoire).

En opérant sur une base journalière, on y vérifie que la seconde relation est égale à :

$$H_U = 0,62 (H_t - 5)$$

C'est-à-dire qu'elle obéit à une forme générale :

$$H_U = a (H_t - S) \quad (1)$$

Cette liaison a été trouvée à l'échelle journalière, c'est-à-dire en sommant toutes les pluies et pluies utiles sur cette base de temps. Il est évident (cf. 1.3.) que cette liaison existe fondamentalement au niveau de l'averse et qu'elle se retrouve ici parce que, soit la probabilité d'avoir une averse par jour est très grande, soit la forme moyenne de l'averse se conserve dans le cas où il y en a plus d'une par jour.

La liaison (1) n'est qu'une liaison moyenne. Son utilisation est admissible ici car bien que travaillant sur une base journalière, le modèle n'est envisagé que pour fournir des débits cohérents à l'échelle de n jours, disons du mois et certainement de l'année.

Si l'on voulait reproduire des débits journaliers plus réalistes, il ne faudrait pas utiliser cette relation moyenne mais établir le tableau de contingence entre la hauteur utile et la hauteur totale journalière. De ce dernier tableau on peut tirer la matrice de probabilité conditionnelle donnant la probabilité d'obtenir une hauteur utile étant donné la hauteur totale journalière effectivement observée.

1.2. RELATION HYDROPLUVIOMÉTRIQUE DE L'ÉVÉNEMENT AVERSE-CRUE

On sait que dans la plupart des études approfondies sur la forme de la relation entre lame ruisselée et pluie au niveau de l'événement averse-crue réalisées à partir des données de bassins représentatifs, on aboutit à l'idée d'une forme parabolique. L'asymptote de celle-ci représente en quelque sorte l'enveloppe supérieure de la relation et elle admet implicitement l'idée d'un coefficient de ruissellement maximal constant.

C'est cette idée que nous avons reprise comme noyau de la fonction de production à élaborer. Sur le bassin de Korhogo où les événements averse-crue sont en nombre supérieur à 100, on a pu vérifier que tous les points dans un plan $LR-H_U$ s'inscrivaient entre deux droites d'équation.

$$LR = 0,43 (H_U - S_u)$$

La droite inférieure correspondant à une saturation préalable des terrains à son niveau minimal ($S_u = 50$ mm) ; la droite supérieure au niveau maximal de la même saturation ($S_u = 0$).

On pose donc en principe que la relation est de la forme :

$$LR = K (H_U - S_u) \quad (2)$$

le paramètre K ressemblant à un coefficient de ruissellement et S_u caractérisant l'état de saturation préalable. Théoriquement, si l'on associe les équations générales (1) et (2), on peut obtenir une relation linéaire $LR-H_t$ à l'échelle de la pluie totale journalière. On a en effet :

$$LR = K a (H_t - S) - K S_u$$

qui peut s'écrire :

$$LR = K a \left(Ht - S - \frac{Su}{a} \right)$$

et en posant :

$$K_0 = K a \text{ et } H_0 = S - \frac{Su}{a}$$

on obtient :

$$LR = K_0 (Ht - H_0) \quad (3)$$

Dans l'exemple précédent de Korhogo, on obtient :

$$LR = 0,62 \times 0,43 (Ht - 5) - 0,43 Su$$

$$LR = 0,27 \left(Ht - 5 - \frac{Su}{0,62} \right)$$

le terme H_0 variant de 0 à 26,5 mm.

On a voulu vérifier si cette relation (3) apparemment simpliste était réaliste pour les paysages sahéliens. Elle a été recherchée et trouvée pour les 33 bassins répertoriés sur les figures 1 et 2.

Bien entendu, elle a été établie au niveau de l'événement averse-crue et à partir de Ht . Il est apparu que la valeur minimale de H_0 était nulle dans la majorité des cas et n'excédait pas 4 mm dans les rares autres cas. On a donc convenu qu'une valeur minimale nulle simplifierait l'utilisation de la relation (3).

Le paramètre H_0 varie donc entre 0 et $H_0 \text{ max}$, valeur de référence de l'état de saturation des terrains. Les valeurs de K_0 et $H_0 \text{ max}$ pour tous les bassins étudiés sont réunies dans le tableau I.

TABLEAU I
TABLEAU DES VALEURS DE $H_0 \text{ max}$ ET K_0 CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS ÉTUDIÉS

Bassin	Pays	Bassin (km^2)	$H_0 \text{ max}$ (mm)	K_0 (%)	Pluie annuelle moyenne (mm)
Barlo	Tchad	36,6	20	21	750
Koulou	Niger	17,3	31	4	825
Maggia Alokoto	Niger	48,3	32	34	520
In. Tiziouen	Niger	1,3	13	80	165
Koukouzout	Niger	16,6	26	43	405
Kaouara	Niger	3,3	24	50	520
Bachikele	Tchad	19,8	11	52	100
Torou	Tchad	50	22	14	475
Abou-Goulem (petit)	Tchad	12,3	24	22	550
Abou-Goulem (grand)	Tchad	50,2	27	10	550
Pô-Ghorfa	Mauritanie	2,7	18	72	475
Taraïman	Tchad	11,2	20	58	270
Galmi	Niger	20-39	26	78	490
Ghorfa-Kadiel	Mauritanie	39	27	50	475
Ghorfa-Djajibine	Mauritanie	148	23	55	475
Ghorfa-Echkata	Mauritanie	149	40	26	475
Dionaba (grand)	Mauritanie	111	18	26	300
Dionaba (petit)	Mauritanie	34	18	36	300
Seloumbo	Mauritanie	12,2	25	42	230
Boulsa	Haute-Volta	22	50	36	775
Gagara Ouest	Haute-Volta	28,4	28	49	450
Tin Adjar	Mali	35,5	30	39	220
Sehikotane	Sénégal	2,6	34	50	640
Koumbaka	Mali	30,4	42	46	650
Ouagadougou Moro-Naba	Haute-Volta	19,1	54	68	850
Tikare II	Haute-Volta	2,4	34	20	725
Tikare I	Haute-Volta	0,3	40	16	725
Ansouri	Haute-Volta	0,7	30	30	725
Bodeo	Haute-Volta	3,5	30	56	600
Lumbila	Haute-Volta	137	40	21	825
Bodeo	Haute-Volta	11,2	46	18	600

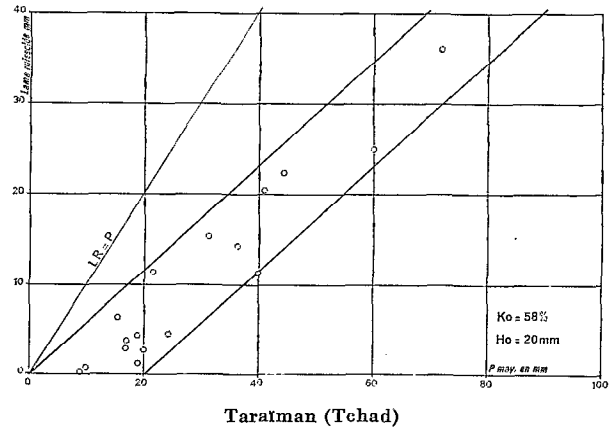
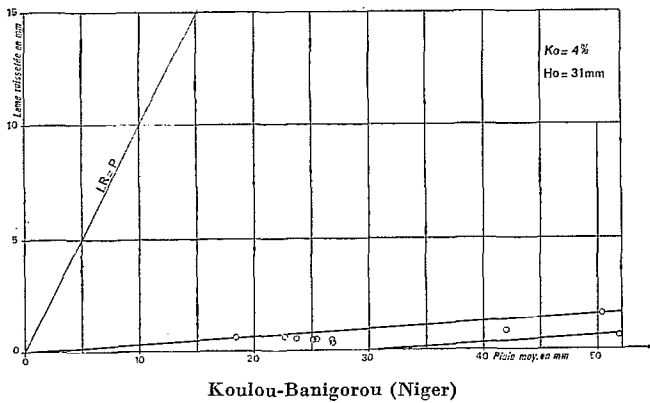
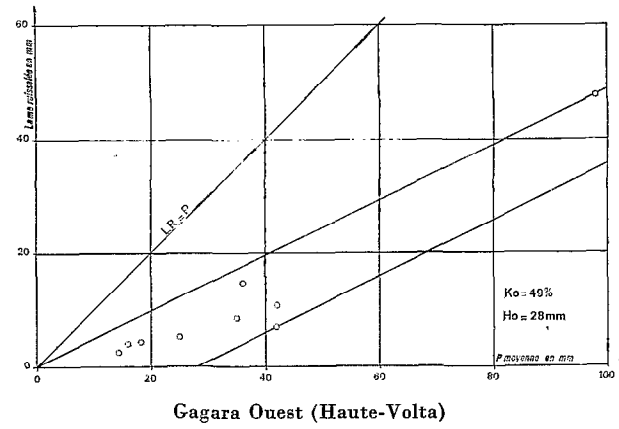
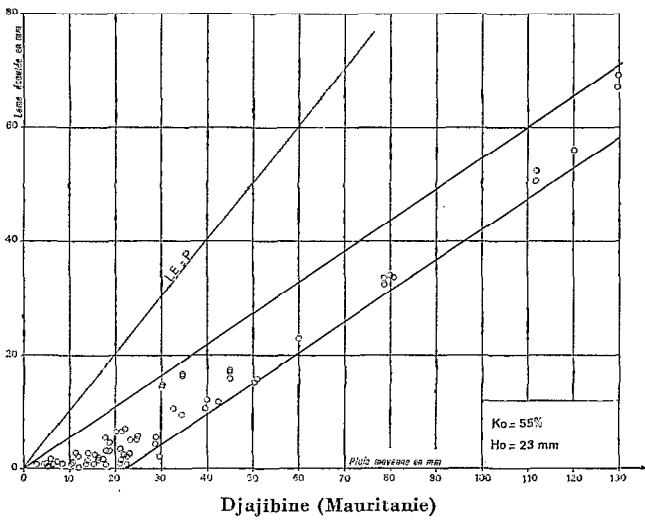


Fig. 3.

Fig. 4.

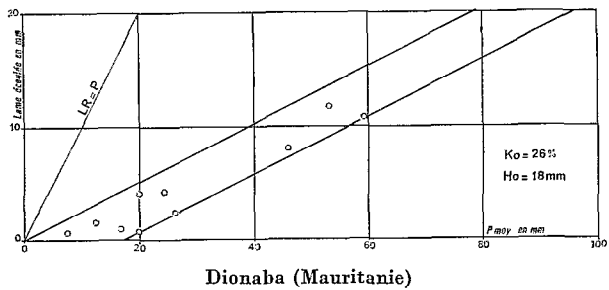
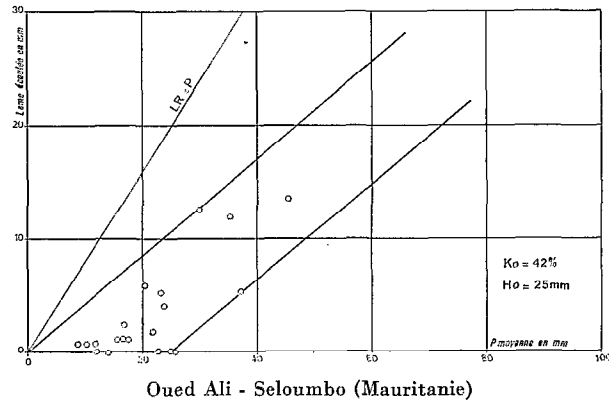


Fig. 5.

Relation lame écoulée ou ruisselée - Pluie moyenne d'une averse

Grâce à l'observation simultanée d'une gamme imposante de couples averse-crue dont certains de fréquence rare, le diagramme (LR — HT) pour le bassin versant de Djajibine (oued Ghorfa) présente deux rails parfaitement bien définis (fig. 3).

On peut expliquer cette liaison quasi linéaire entre la lame ruisselée et la hauteur de l'averse pour ce bassin sans détruire les principes même de la théorie de l'infiltration de la manière suivante :

Lorsque la hauteur de l'averse croît, la durée totale de l'averse croît également et la durée de la pluie utile, définie pour un seuil donné d'intensité, croît proportionnellement en moyenne avec la hauteur de l'averse. Si ce seuil d'intensité correspond à la valeur de la perméabilité moyenne, il est tout à fait normal que la pluie excédentaire, donc la lame ruisselée, varie linéairement avec la hauteur de l'averse.

L'expérience montre que la relation (3) LR — Ht est bien linéaire, même pour des averses exceptionnellement très fortes, malgré la perméabilité des sols d'un bassin qui varie considérablement d'un point à un autre selon la nature du sol, la couverture végétale et l'utilisation de ces sols, sans oublier leur état initial d'humidité.

Nous devons considérer comme très importante cette constatation expérimentale qui tend à montrer l'influence extrêmement grande de l'homogénéisation spatiale.

À l'échelle de l'averse, la loi expérimentale liant LR à HU présente une très grosse dispersion due en grande partie à la variabilité de l'intensité (ou durée) de l'averse pour un même total pluviométrique et à la variabilité de l'état antérieur de saturation du bassin versant.

Cette dernière influence s'estompe pour un bassin versant présentant en moyenne une imperméabilité notoire. C'est alors que la dispersion des points dans le diagramme (LR — HU) résulte directement des caractéristiques propres à l'averse. C'est le cas du petit bassin du Pô sur l'oued Ghorfa pour lequel nous avons noté une dispersion comparable sur les diagrammes (LR — HT) et (HU — HT). Pour ce bassin très imperméable, à l'exception d'une partie du bassin ne contribuant pas, semble-t-il, à l'écoulement (20%), partie d'ailleurs reconnue par les hydrologues sur le terrain, la pente K_0 des droites limites de la bande est de 0,80. Cette pente, pour la même région climatologiquement homogène, va diminuer quand la perméabilité moyenne des sols et du sous-sol du bassin va augmenter.

C'est ainsi que pour les bassins de Seloumbo, l'oued Moktar et l'oued Ali, dont le sous-sol est plutôt gréseux, la pente des « rails » passe à des valeurs de 0,56 et de 0,42 et l'écartement de ces rails devient plus important. Il est tout à fait probable que les variations totales d'humidité dans tous les sols de ce bassin soient plus importantes que celles du bassin du Pô pour lequel l'écartement est beaucoup plus faible.

En conclusion, nous dirons que la pente des rails K_0 est liée à l'extension des zones à rétention définitive du bassin, à la valeur de la perméabilité et à la dimension du bassin versant. Cette pente décroît avec l'extension des zones de rétention, l'accroissement de la perméabilité et l'augmentation de la superficie du bassin.

L'écartement H_0 max des rails dépend de la capacité de rétention des sols, de l'amplitude de variation annuelle du stock d'eau des sols et de la structure des précipitations (fréquence et intensités). On voit ainsi H_0 max très faible et égal à 18 mm pour le petit bassin imperméable du Pô-Ghorfa, atteindre 25 mm pour celui plus grand de l'oued Ali sur terrains gréseux et finir avec des valeurs voisines de 50 mm pour tous les bassins recouverts de sols relativement profonds et dotés d'une certaine rétention (Boulsa, Ouagadougou).

Comment prendre en compte la variabilité du paramètre H_0 dans la relation (3) qui est somme toute à elle seule la fonction de production du modèle simplifié sahélien ?

La variation de H_0 pour un même bassin versant en liaison avec l'état d'humidité de celui-ci ne peut être qu'approximativement évaluée.

Si nous notons parfaitement bien une tendance nette de la variation de H_0 avec la succession des précipitations dans le temps compte tenu de leur importance, nous n'avons pas, à l'heure actuelle, recherché de relation expérimentale, mais seulement admis une hypothèse sur la forme de cette relation possible.

On adopte pour calculer H_0 une fonction de la forme :

$$H_{J+1} = (H_j + H_{tj}) C \quad (4)$$

dans laquelle :

H_{tj} est la pluie moyenne totale du jour J,

H_j un index des pluies antérieures à J,

H_{J+1} l'index des pluies antérieures à J + 1...

C un coefficient compris entre 0 et 1 et souvent voisin de 0,7.

Cette équation (4) permet de calculer un index H_j dont on tire la valeur de H_0 pour le même jour J de la manière suivante :

a) si $H_j > H_0$ max $H_0 = 0$,

b) si $H_j = 0$ $H_0 = H_0$ max,

c) si $0 < H_j < H_0$ max $H_0 = H_0$ max — H_j .

Le coefficient C est un paramètre de réglage du modèle.

1.3. INFLUENCE DE LA RÉPARTITION ET DE LA FORME DES PLUIES DANS UNE JOURNÉE

Le modèle simplifié élaboré au paragraphe précédent est donc composé des équations (3) et (4). Il peut reconstituer des débits moyens journaliers à partir de hauteurs totales journalières de pluie. Cette reconstitution n'est valable qu'en moyenne et ne devient admissible que pour une somme de n jours ce qui est compatible avec l'objectif du modèle qui est seulement de reconstituer des séries annuelles d'écoulement.

L'utilisation d'une relation LR — Ht (3) établie à l'échelle de l'événement averse-crue est admissible à l'échelle journalière en pays sahélien où il y a sûrement une très forte probabilité à n'avoir qu'une pluie par jour. Quant à la forme et à l'intensité de l'averse, leur rôle est confondu dans ce modèle, à l'intérieur du terme H_0 , avec l'influence de la saturation des terrains.

Reprenons les deux droites limites de l'équation (3) pour H_0 nul ou égal à H_0 max.

Si tous les points se groupent entre deux droites bien délimitées, l'écartement horizontal de ces deux droites limites doit être imputé non pas seulement à l'état antérieur d'humidité du bassin mais aussi à la variation de la durée et de l'intensité de la précipitation en cause. Pour une averse de faible intensité et de longue durée la lame, ruisselée sera très faible étant donné qu'une grosse partie de la pluie aura pénétré dans le sol.

Mais comme très souvent la hauteur de l'averse est liée à l'intensité, on peut admettre qu'une relation moyenne existe. Si le bassin versant est en moyenne beaucoup plus imperméable, l'écartement horizontal de ces droites diminue, ce que l'on observe bien sur tous les graphiques (Kadiel, Pô, ...).

Une étude non publiée de Y. BRUNET-MORET sur le Pô (oued Ghorfa) a montré que la dispersion entre le corps C de l'averse, hauteur utile d'intensité supérieure à 18 mm/h, et le total de l'averse, se retrouvait également entre le corps de l'averse et la lame ruisselée.

Ceci confirme l'importance primordiale sur le ruissellement total de l'averse de l'intensité des précipitations et bien entendu du total pluviométrique de la journée.

Dans une autre étude, Y. BRUNET-MORET (1960) montre que le corps de l'averse est lié à la hauteur totale de celle-ci en région sahélienne (Mauritanie) de la manière suivante : $C = 0,87 (P - 4)$.

Quant à la lame ruisselée sur des bassins du même secteur, le même auteur l'explique par une relation de la forme $LR = KR (C - C_0)$, C_0 étant un indice d'humidité variant de 4 à 14 mm. On remarque avec satisfaction que les formes générales de ces relations sont identiques à celles des relations (1) et (2). Ceci ne saurait surprendre dans cette région de Mauritanie où l'on a en général une seule averse par jour de pluie et où cette averse a en général une pointe intense unique (identité entre le corps et la pluie utile).

On peut donc conclure qu'en moyenne le modèle simplifié sahélien à pas de temps journalier ne trahit pas trop le schéma réel au niveau de l'averse.

2. LES MODÈLES D'ÉCOULEMENT JOURNALIER UTILISÉS

Rappelons que l'objectif pratique de ce projet d'études hydrologiques dans le Sahel est la détermination de lames écoulées journalières à partir des séries pluviométriques journalières observées de longue durée ; les lames écoulées mensuelles et annuelles qui en découlent sont les seules données valables et exploitables.

On a utilisé pour cela deux modèles : le modèle simplifié sahélien dont l'élaboration est décrite au chapitre 1 et un modèle complet. Le modèle simplifié sahélien a été appliqué à cinq bassins représentatifs de l'ORSTOM :

- 1) le bassin de Dionaba (bassin du Gorgol blanc, Mauritanie),
- 2) le bassin de Kadiel, partie de l'ensemble de l'oued Ghorfa (Mauritanie),
- 3) le bassin de l'oued Ali, partie du bassin de Seloumbo (Mauritanie),
- 4) le bassin de Kountkouzout (région de Tahoua, Niger),
- 5) le bassin d'Abou Goulem (bassin du Batha, Tchad).

La superficie de ces bassins versants reste comprise entre 10 km² et 110 km². Les résultats obtenus peuvent être transposables aux bassins versants plus petits sans restriction et à ceux plus grands mais dont la superficie ne dépasse pas 150 km² à condition toutefois que la dégradation du réseau hydrographique ne soit pas trop avancée.

Le modèle complet d'écoulement journalier s'inspire du modèle à discrétisation spatiale mis au point pour le bassin du Ghorfa et présenté dans un article voisin. Il s'agit en réalité d'un modèle global admettant en entrée, comme le modèle simplifié, les relevés journaliers d'un poste pluviométrique sensés représenter la pluie moyenne sur le bassin.

Ce modèle se limite donc à une fonction de production proche de la fonction dite Ghorfa horaire (article déjà cité). Elle comporte une représentation du fonctionnement du bassin par une série de réservoirs en série dont les capacités et les lois de vidange sont autant de paramètres à régler. L'emploi de ce modèle, évidemment plus compliqué à régler, se justifie pour des bassins versants sur lesquels les données hydropluviométriques sont nombreuses

et de qualité et pour lesquels quelques renseignements sur le comportement hydrodynamique des terrains sont disponibles.

Il exige en outre un temps de calage des paramètres beaucoup plus long que le modèle simplifié.

Ce modèle complet est enfin indispensable lorsque le ruissellement immédiat ne représente pas tout l'écoulement, c'est-à-dire qu'il y a une part notable de vidange de nappes en fin de saison des pluies, car le modèle simplifié est en réalité un modèle de ruissellement pur et immédiat.

Ce modèle complet a été appliqué au bassin d'Abou Goulem déjà traité à l'aide du modèle simplifié, ainsi que sur cinq autres bassins.

- 1) le bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo (Cameroun),
- 2) deux bassins de l'ensemble de Godola-Motorsolo (Cameroun),
- 3) deux bassins de l'ensemble de Manga (Haute-Volta).

3. RÉSULTATS DES APPLICATIONS DES MODÈLES

3.1. APPLICATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ AU BASSIN DE DIONABA (MAURITANIE)

Ce bassin a une superficie de 111 km².

Calage du modèle

Les deux coefficients du modèle simplifié (K_0 , H_0 max) ont été obtenus à partir de la liaison établie entre la lame écoulee et la pluie moyenne sur le bassin versant à la fin des deux campagnes hydrologiques de 1958 et 1959. Les données observées ont été présentées par Y. BRUNET-MORET (1960).

Un seul calage fut nécessaire puisque la correspondance entre les lames journalières observées et calculées présentait, pour ces deux années 1958 et 1959, un très grand degré de confiance à l'échelle journalière.

Résultats obtenus

La station pluviométrique de référence (Moudjeria), observée depuis 1921 mais avec des lacunes, a été utilisée pour simuler la série chronologique des lames journalières mensuelles et écoulées.

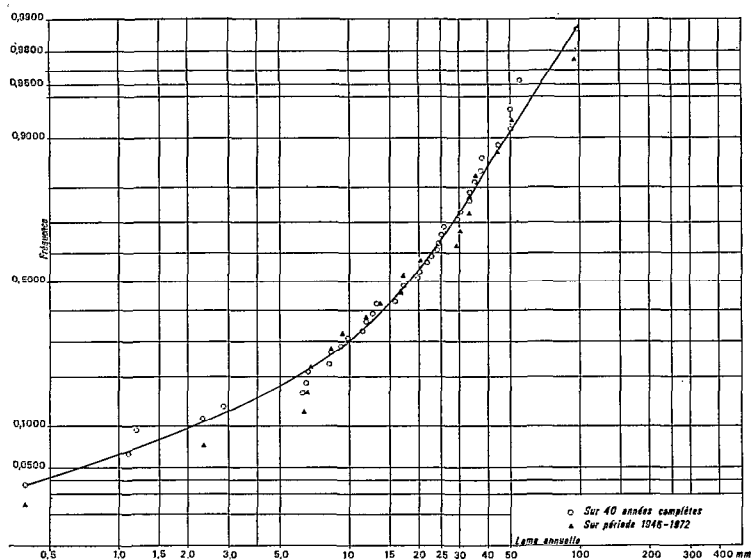


Fig. 6. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin de Dionaba aval à partir du poste de Moudjeria (Mauritanie)

Notons que la pluviométrie annuelle calculée pour les seize années complètes de la période 1921-1941 est de 201 mm, que celle calculée pour les seize années complètes de la période 1950-1972 atteint 257 mm.

De ce fait, nous avons considéré d'une part la série hydrologique complète des lames écoulées calculée à partir de quarante années complètes et d'autre part celle correspondant aux vingt dernières années (1946 à 1972) pour montrer la faible différence obtenue sur la distribution statistique de ces résultats.

La dimension réduite de l'échantillon ne permet pas de tirer des conclusions très nettes. Cependant il est possible de montrer que les lames pour les années faibles se trouvent surestimées pour la série complète (cf. fig. 6).

Les caractéristiques des lames annuelles simulées sont :

Lame moyenne	= 22,0 mm
Lame médiane	= 18,0 mm
Lame décennale sèche	= 2 mm
Lame décennale humide	= 49 mm
Coefficient de variation	= 0,87 mm
Coefficient d'écoulement décennal sec	= 2 %
Coefficient d'écoulement décennal humide	= 13,5 %
Coefficient d'écoulement décennal médian	= 8,5 %

TABLEAU II

LAMES ANNUELLES SIMULÉES SUR LE BASSIN DE DIONABA (MAURITANIE)
OBTENUES A PARTIR DU POSTE PLUVIOMÉTRIQUE DE MOUDJERIA

<i>Année complète</i>	<i>Pluie</i>	<i>Lame écoulée</i>
1923	233,1	24,4
1924	122,0	2,9
1925	188,7	9,8
1926	112,0	1,2
1927	240,4	20,1
1928	173,6	8,2
1929	215,3	15,8
1930	169,5	24,2
1931	156,9	25,8
1932	248,0	37,9
1933	373,3	55,7
1934	145,0	11,5
1935	282,9	25,1
1936	295,0	37,9
1940	202,7	12,6
1941	55,1	0
1942	89,5	1,1
1943	403,3	50,2
1944	234,5	22,6
1945	223,3	21,7
1946	118,6	8,3
1947	251,7	33,6
1948	187,8	17,2
1949	196,3	13,1
1950	282,0	20,1
1951	241,8	11,9
1952	291,9	29,7
1953	174,8	6,6
1954	354,6	44,6
1955	387,7	35,3
1957	250,0	30,3
1961	94,0	0,04
1965	204,8	9,2
1966	325,2	33,3
1967	354,1	50,6
1968	153,4	6,4
1969	535,0	96,5
1970	238,0	16,5
1971	159,0	6,5
1972	66,5	2,3

3.2. APPLICATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ AU BASSIN VERSANT DE KADIEL, SOUS BASSIN DE L'OUED GHORFA (MAURITANIE)

Ce bassin a une superficie de 39 km².

Calage du modèle

Il suffit de fournir les données des précipitations journalières à une ou plusieurs stations de référence pour obtenir une simulation des débits journaliers sur le bassin versant de Kadiel (République islamique de Mauritanie).

Les lames mensuelles et annuelles sont évaluées et comparées à la précipitation mensuelle et annuelle et aux lames observées. Ces données sont extraites du rapport de G. JACCON et H. CAMUS (1967).

Les résultats

Parmi les résultats obtenus, nous avons les lames écoulées annuelles et les caractéristiques permettant de juger la validité de la simulation sur deux plans différents : modèle et résultats.

Pour ce bassin, on avait le choix entre deux postes pluviométriques de référence M'Bout et Kankossa. En quatre années d'observations sur le bassin de Kadiel, on observe deux précipitations de 147 et 151 mm, alors qu'en vingt années au poste de Kankossa on n'observe qu'une pluie de 110 mm. Sans mettre en doute les données à ce poste, il convient de se limiter volontairement dans les conclusions que l'on pourrait tirer de l'ensemble des débits simulés à partir de ces données.

Il est par contre très intéressant de montrer à la fois la souplesse du modèle et l'homogénéité du régime des pluies dans la bande sahélienne. A cet effet, on a simulé les écoulements du bassin de Kadiel à partir du poste de Madaoua, au Niger, de pluviosité comparable à celle de M'Bout. Les résultats, sous la forme de la liaison entre lames écoulées annuelles et hauteurs annuelles de pluie, sont donnés pour les deux postes sur les figures 7 et 8. Ils sont très comparables.

Les lames annuelles d'écoulement calculées à partir des trois postes de référence sont présentées dans le tableau III. Les valeurs caractéristiques de ces reconstitutions sont données dans le tableau suivant.

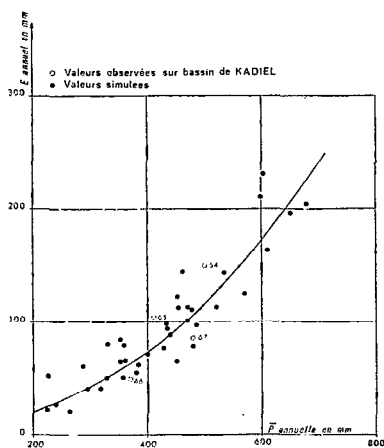


Fig. 7. — Ecoulement annuel simulé en fonction de la pluie annuelle à M'Bout (Mauritanie) bassin de Kadiel

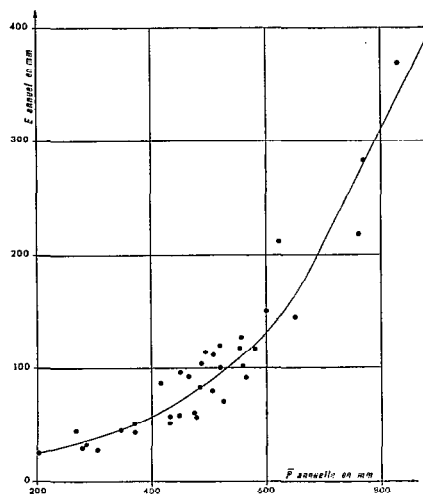


Fig. 8. — Ecoulement annuel simulé en fonction de la pluie annuelle à Madaoua (Niger) bassin de Kadiel

	Valeurs calculées à partir des données de		
	Kankossa (20 années) (mm)	M'Bout (38 années) (mm)	Madaoua (36 années) (mm)
Lame moyenne annuelle écoulée	83	95	102
Lame annuelle décennale sèche écoulée	32	40	30
Lame annuelle décennale humide écoulée	142	160	200
Coefficient de variation des lames écoulées	0,51	0,55	0,72
Lame médiane calculée	78	84	90
Lame maximale journalière calculée	35,6	45,6	32,7
Pluie maximale journalière observée	111,0	132,0	98,6
Pluie annuelle moyenne	418	423	484
Pluie annuelle maximale	562	680	830
Pluie annuelle minimale	212	225	205

Des valeurs décennales d'environ 30 mm et 150 mm sont tout à fait acceptables pour l'écoulement du bassin versant de Kadiel.

La meilleure reconstitution reste celle de M'Bout. Elle a permis de dresser la distribution statistique des lames calculées (cf. fig. 9).

TABLEAU III
LAMES ANNUELLES SIMULÉES SUR LE BASSIN DE KADIEL
A PARTIR DE TROIS POSTES PLUVIOMÉTRIQUES (mm)

Année	M'Bout	Kankossa	Madaoua	Année	M'Bout	Kankossa	Madaoua
1921	98,0			1951	194,7		101,2
1922				1952	112,2		218,5
1923	55,6			1953	51,0	119,0	70,2
1924	204,2			1954	125,2	140,8	145,4
1925	41,3			1955	112,2	36,9	57,2
1926	22,3			1956	231,4	99,1	111,5
1927	62,4			1957	113,4	77,3	57,7
1928	41,4			1958	77,7	154,4	116,8
1929	52,5			1959	102,6	75,8	119,6
1930	143,8			1960	211,4	32,4	95,9
1931	20,8			1961	88,7	35,2	212,2
1932				1962	79,4	105,8	100,3
1933				1963	70,8	66,4	45,3
1934				1964	123,3	103,9	28,0
1935				1965	80,1	142,6	44,2
1936			283,6	1966	50,3	76,3	104,4
1937			117,5	1967	97,0	141,6	51,1
1938				1968	26,1	43,2	25,9
1939			91,4	1969	64,9	102,0	58,5
1940			52,1	1970	97,3	45,8	114,6
1941			79,9	1971	83,9	35,5	45,3
1942			31,5	1972		26,7	
1943			149,9				
1944	143,3		83,1				
1945	112,6		126,6				
1946	77,1		60,9				
1947	65,4		92,5				
1948	62,3		87,2				
1949	65,4		29,8				
1950	162,8		368,7				

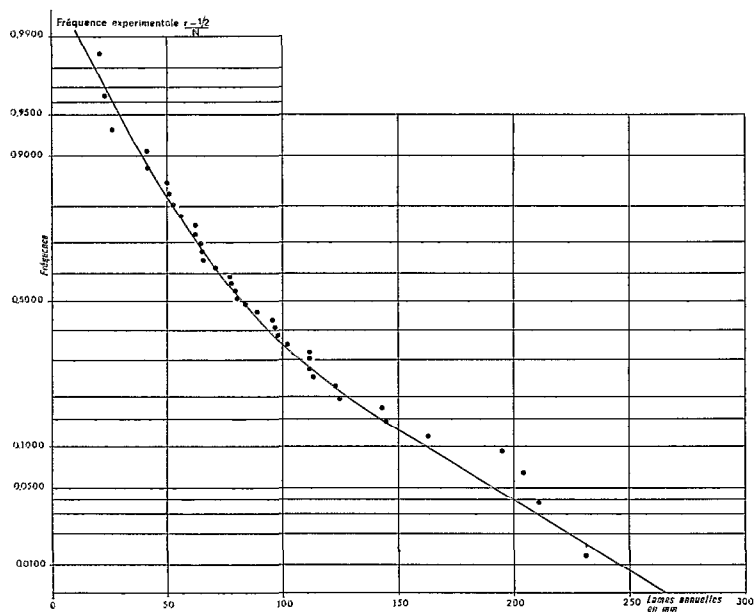


Fig. 9. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Kadiel à partir de M'Bout (Mauritanie)

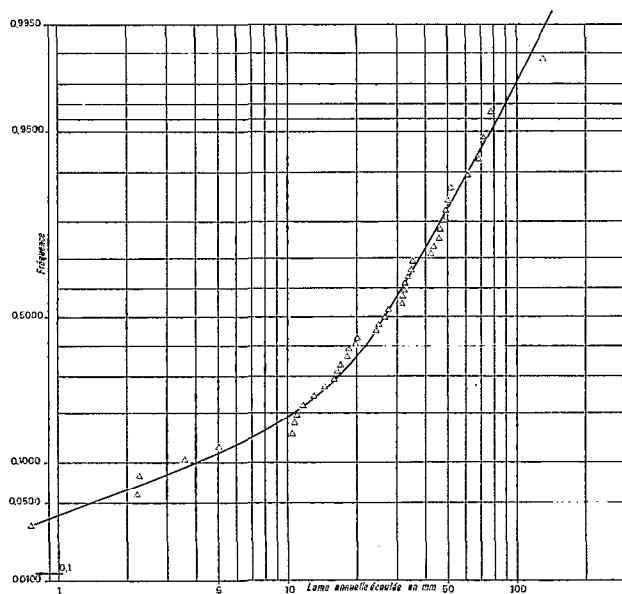


Fig. 10. — Distribution des lames annuelles écoulées simulées sur le bassin versant de l'oued-Ali à partir de la station pluviométrique de Moudjeria (Mauritanie)

3.3. APPLICATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ AU BASSIN VERSANT DE L'OUED ALI, SOUS-BASSIN DE L'OUED SELOUMBO ET DU GORGOL BLANC (MAURITANIE)

Calage du modèle

Les années 1957, 1958 et 1959, pour lesquelles nous disposons des débits moyens journaliers et des précipitations moyennes journalières sur le bassin versant de l'oued Ali, sont utilisées pour assurer le calage du modèle simplifié.

Pour ce bassin de 10,4 km² de superficie, la liaison entre la précipitation moyenne et la lame ruisselée est relativement lâche. Le faible nombre de points représentatifs des couples averse-crue n'aide pas beaucoup à la définition classique de cette liaison. Deux essais ont été nécessaires pour assurer le calage du modèle simplifié. Notons que le dédoublement des corps d'averse dans cette région a pour effet d'augmenter la dispersion des points sur le diagramme lame-pluie (fig. 5), comme l'a montré Y. BRUNET-MORET (1960).

Malgré cette dispersion initiale, le calage du modèle est satisfaisant :

Année	Lame observée (mm)	Lame calculée (mm)
1957	17,9	25,2
1958	33,4	30,2
1959	24,2	25,2

Résultats obtenus

La station pluviométrique de référence (Moudjeria), observée depuis 1921 mais avec des lacunes, a été utilisée pour simuler la série chronologique des lames journalières, mensuelles, annuelles écoulées. Le tableau IV donne les lames annuelles simulées pour le bassin versant de l'oued Ali, qui reçoit en moyenne 230 mm de précipitation annuelle. La figure 10 montre la distribution de caractère gaussio-logarithmique des lames annuelles simulées sur le bassin versant.

Les valeurs caractéristiques de la série des lames annuelles sont les suivantes :

	Pluie (mm)	Lame (mm)
Moyenne	233,6	31,0
Ecart-type	97,9	25,20
Coefficient de variation	0,44	0,81

On notera l'accroissement du coefficient de variation en passant des pluies aux lames.

TABLEAU IV

PLUIE ANNUELLE ET LAME ANNUELLE ÉCOULÉE SIMULÉE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ALI
(RÉPUBLIQUE ISLAMIQUE DE MAURITANIE)
Poste pluviométrique de Moudjeria

Année	Pluie annuelle (mm)	Lame annuelle simulée (mm)	Année	Pluie annuelle (mm)	Lame annuelle simulée (mm)
1923	233,1	35,3	1951	241,8	18,4
1924	122,0	5,0	1952	291,9	43,3
1925	188,7	16,9	1953	174,8	10,6
1926	112,0	2,2	1954	354,6	61,7
1927	240,4	27,5	1955	387,7	50,4
1928	173,6	13,0	1956	(155,1)	(16,0)
1929	215,3	24,3	1958	243,0	46,6
1930	169,5	31,5	1959		
1931	156,9	33,6	1960		
1932	248,0	49,1	1961	94,0	0,8
1933	373,3	76,8	1962	185,5	18,4
1934	145,0	16,5	1963		
1935	282,9	34,9	1964		
1936	295,0	51,9	1965	204,8	14,5
1940	202,7	20,0	1966	325,2	48,1
1941	55,1	0	1967	354,1	68,2
1942	89,5	2,3	1968	153,4	10,8
1943	403,3	71,9	1969	535,0	130,2
1944	234,5	32,3	1970	238,0	26,7
1945	223,3	31,9	1971	159,0	11,0
1946	118,6	11,6	1972	66,5	3,6
1947	251,7	46,3			
1948	187,8	25,0			
1949	196,3	19,9			
1950	282,0	32,6			

3.4. APPLICATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ AU BASSIN VERSANT DE KOUNKOUZOUT (RÉPUBLIQUE DU NIGER)

Pour ce bassin versant de 16,6 km², les paramètres du modèle simplifié ont été ajustés par un nombre réduit d'essais à l'aide des observations présentées par G. VUILLAUME (1968).

Pour réussir l'ajustement du modèle à ce bassin, il a été nécessaire de réduire l'influence des précipitations antérieures en agissant sur l'indice d'état d'humidité du bassin (réglage du paramètre C de l'équation 4 donnant H_j).

Le calage effectué sur trois années est à peu près satisfaisant :

<i>Année</i>	<i>Lame observée (mm)</i>	<i>Lame calculée (mm)</i>
1965	72,9	67,2
1966	74,9	94,9
1967	77,9	51,4

Résultats obtenus par la simulation

La station pluviométrique longue durée utilisée pour simuler la série hydrologique est celle donnée en référence dans le rapport (poste de Tahoua). Le tableau V contient les valeurs des précipitations annuelles et les valeurs des lames annuelles simulées. Il résume l'ensemble des caractéristiques obtenues lors de la simulation. Au cours de la critique des résultats, une anomalie sur les données d'entrée — pluviométrie journalière et annuelle — a été détectée.

TABLEAU V

RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES LAMES ANNUELLES ÉCOULÉES SUR LE BASSIN VERSANT DE KOUNKOUZOUT A PARTIR DES POSTES DE TAHOUA

<i>Année</i>	<i>Pluie</i>	<i>Lame</i>	<i>Année</i>	<i>Pluie</i>	<i>Lame</i>
Période I			Période II (suite)		
1921			1948	530,7	72,0
1922	368,6	38,0	1949	280,2	18,8
1923	418,2	79,0	1950	492,8	87,0
1924	354,4	43,3	1951	353,4	33,3
1925	270,5	39,4	1952	528,0	84,3
1926	227,5	36,2	1953	461,7	63,7
1927	424,0	69,4	1954	546,1	104,5
1928	308,0	28,9	1955	468,2	64,5
1929	348,9	50,6	1956	396,7	48,2
1930	352,6	40,6	1957	387,6	34,8
1931	337,5	59,6	1958	533,6	112,8
1932			1959	477,8	88,1
1933	397,0	64,4	1960	315,0	39,7
1934	335,5	46,1	1961	582,0	119,7
1935	386,1	52,8	1962	555,2	110,5
1936	611,1	118,4	1963	342,6	30,4
1937	352,4	44,3	1964	440,8	63,9
1938	228,2	23,9	1965	477,9	71,2
1939	363,7	30,6	1966	463,8	58,4
1940	374,2	66,3	1967	497,9	67,2
1941	310,4	25,5			
1942	208,6	14,3			
Période II			Période III		
1943			1968	407,6	64,3
1944	304,3	42,1	1969	317,0	27,6
1945	434,3	78,1	1970	421,7	53,9
1946	480,1	64,7	1971	267,2	33,8
1947	438,1	74,5	1972	267,1	37,0

En effet les lames annuelles simulées présentaient des anomalies de valeurs (moyenne, dispersion...) sur trois sous-périodes. Par l'effet amplificateur de la transformation pluie-débit, le modèle mettait ainsi en lumière une anomalie de la série pluviométrique de Tahoua.

La figure 11 présente la courbe de simple masse des précipitations annuelles au poste de Tahoua. Cette courbe se compose de trois segments de droite. Les deux segments extrêmes, parallèles, indiquent une véritable homogénéité entre les données sur ces périodes 1922-1942 et 1968-1972.

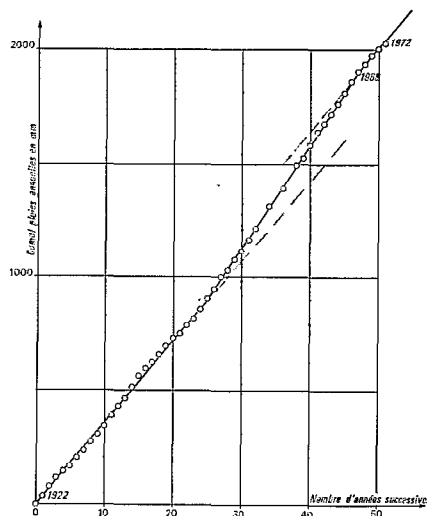


Fig. 11. — Simple cumul des précipitations annuelles de Tahoua (Niger)

Le rapport de la pluie moyenne annuelle sur les deux périodes en discordance, 1922-1942 et 1943-1967, est de 0,78 et celui des lames correspondantes de 0,69. Les valeurs caractéristiques des distributions de pluies et de lames sur ces deux périodes sont données ci-dessous (moyennes, écart-types et coefficients de variation) :

Période	P_{moy}	Le_{moy}	σP	σLe	CVP	$CV Le$
I	353,8	48,31	86,4	22,83	0,244	0,473
II	455,8	69,13	79,4	27,36	0,174	0,396
III	336,1	43,33				

On a reporté sur la figure 12 les distributions des lames annuelles calculées à partir de Tahoua pour le bassin de Kountkouzout pour chacune des deux périodes longues I et II ci-dessus.

Comme la hauteur moyenne de pluie annuelle sur le bassin est nettement supérieure à celle qui tombe à Tahoua, on estime que la vraie distribution des lames pour ce bassin devrait plutôt être une droite parallèle à celle de la période I passant par une valeur médiane de 50 mm (et non de 43 mm).

3.5. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET ET DU MODÈLE SIMPLIFIÉ AU BASSIN VERSANT D'ABOU GOULEM (SOUS-BASSIN DU BATHA, RÉPUBLIQUE DU TCHAD)

Calage des modèles

L'étude des crues de 1958 et 1959 sur le bassin versant représentatif d'Abou Goulem (12,3 km²) réalisée par J. TIXIER et M. BESLON (1961) ne nous permet pas d'évaluer les écoulements de tarissement avec une précision suffisante pour assurer le calage du modèle. Aussi, dans une première estimation, nous avons voulu procéder à deux simulations des écoulements journaliers sur le petit bassin versant, une première dans l'hypothèse forte d'un écoulement de tarissement notoire, une seconde dans l'hypothèse faible d'un unique écoulement de ruissellement. La première de celles-ci est réalisée à l'aide du modèle complet et la seconde à l'aide du modèle simplifié.

Les calages ont été sommairement réalisés compte tenu de l'information disponible à partir des années 1958 et 1959 pour le petit bassin versant de 12,3 km².

On trouve ainsi :

	Lame observée (mm)	Lames calculées (mm)	
		modèle complet	modèle simplifié
1958	12,95	14,3	3,9
1959	plus de 10,94	42,9	21,4

Résultats

L'extension de la série hydrologique est assurée grâce à la série pluviométrique journalière du poste d'Abéché. Les résultats obtenus dans les deux hypothèses sont portés dans le tableau VI et les distributions de deux séries obtenues sur la figure 13.

Notons que l'écart entre les deux séries est d'autant plus élevé que la lame d'eau écoulée devient importante. Cet exemple montre combien est influente la valeur de l'information de base sur le résultat de la simulation. Cependant l'erreur ne dépasse 100% que pour des lames dont la fréquence au non dépassement est de 0,90.

Bien que le modèle complet prenne en compte un écoulement de tarissement notoire, il semble cependant avoir une légère tendance à surestimer les apports en année abondante. On a finalement choisi l'hypothèse d'un écoulement faible sans apport de tarissement. Le modèle simplifié a été ensuite appliqué à deux autres postes pluviométriques de référence, Ati au Tchad et Gouré au Niger (voir tableau VI). La figure 14 montre la distribution des lames obtenues d'après Gouré, peut-être un peu plus dissymétrique que d'après Abéché. Pour avoir une meilleure appréciation des écoulements d'années exceptionnelles, on a appliqué la méthode des stations-années aux trois postes (hypothèse valable d'indépendance) et constitué ainsi une série plus longue de lames écoulées.

Ceci est d'autant plus justifié que les trois séries de lames déduites de chacun des trois postes ont des distributions voisines (cf. le bas du tableau VI).

La figure 15 représente la distribution résultante des lames.

3.6. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET AU BASSIN VERSANT DU MAYO-TSANAGA A MOKOLO (RÉPUBLIQUE UNIE DU CAMEROUN)

A l'exutoire de ce bassin versant de 48,9 km², l'existence d'un écoulement de tarissement sur près de deux mois nous oblige pour assurer une simulation correcte des lames d'eau journalière écoulées à utiliser le modèle complet mais d'une manière globale et non pas en discrétisation spatiale étant donné la petitesse du bassin versant.

Calage du modèle

Le modèle correctement calé au quatrième essai sur la seule année 1974, reproduit aussi bien les crues de début de saison des pluies que celles de fin de saison ainsi que la phase tarissement de l'écoulement.

Les résultats

La simulation des lames journalières écoulées à partir des données pluviométriques journalières du poste de Mokolo a été réalisée pour la période de fonctionnement de ce poste : 1948-1966 (voir tableau VII).

La distribution des lames écoulées annuellement sur papier gaussique présente une très nette dispersion en partie due à la petite taille de l'échantillon (18 valeurs) (fig. 16).

3.7. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET AU BASSIN VERSANT DE LELENG-MOTORSOLO (RÉPUBLIQUE UNIE DU CAMEROUN)

Le modèle complet a été utilisé d'une manière globale pour simuler les lames journalières à l'issue du bassin versant de Leleng dont la superficie est de 4 km².

Pour assurer le calage de ce modèle, les résultats des campagnes d'études hydrologiques 1966-1967-1968-1969 présentés dans la publication de E. CADIER (1971) ont été exploités.

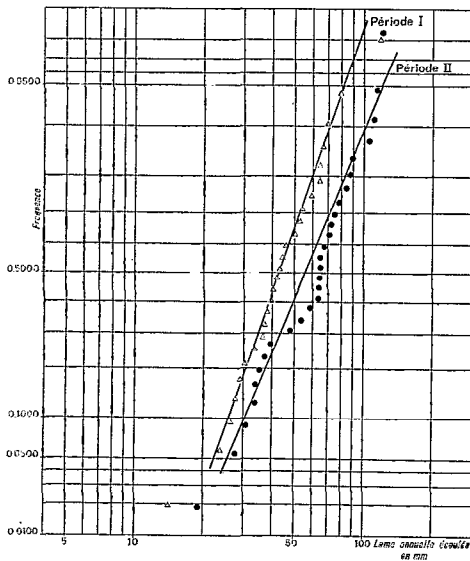


Fig. 12. — Distribution des lames annuelles simulées pour le bassin de Kountkouzout à partir du poste pluviométrique de Tahoua (Niger)

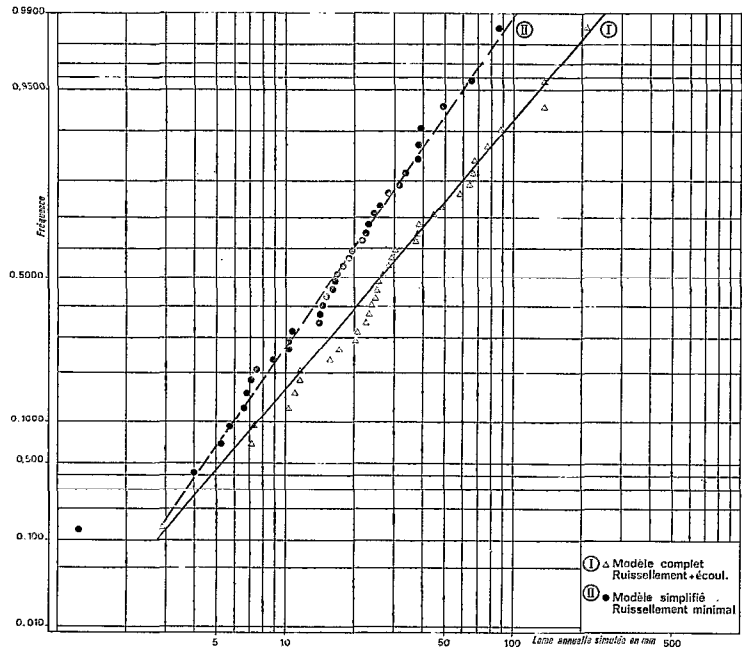


Fig. 13. — Distribution des lames annuelles simulées sur le petit bassin versant d'Abou Goulem à partir de la station pluviométrique d'Abéché (Tchad)

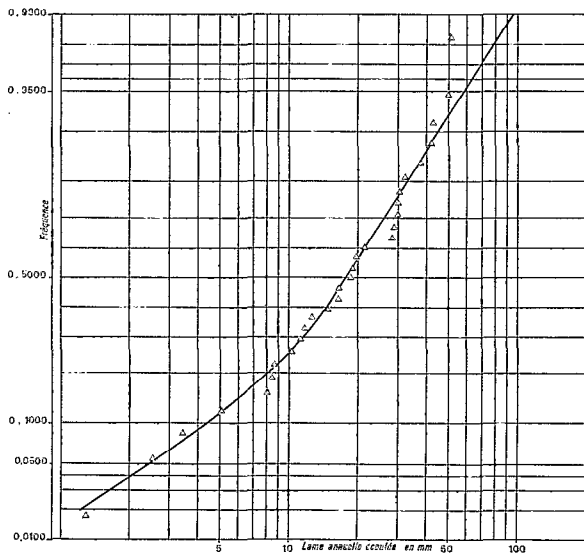


Fig. 14. — Distribution des lames annuelles simulées sur le petit bassin versant d'Abou Goulem (Tchad) à partir du poste de Gouré (Niger)

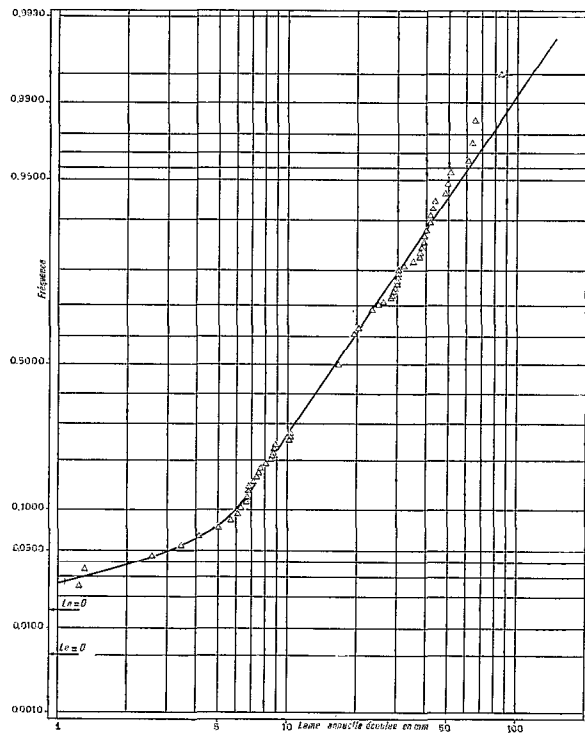


Fig. 15. — Distribution des lames annuelles simulées sur le petit bassin versant d'Abou Goulem (Tchad) à partir des postes pluviométriques d'Abéché d'Ati et de Gouré

TABLEAU VI

SIMULATION DES LAMES ANNUELLES SUR LE BASSIN VERSANT D'ABOU GOULEM (R. DU TCHAD)
A PARTIR DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES DE ABÉCHÉ, ATI ET GOURÉ (NIGER)

Année	Pluie à Abéché	lame écoulée		Pluie à Ati	Lame écoulée à partir de Ati	Pluie à Gouré	Lame écoulée à partir de Gouré
		modèle complet	modèle simplifié				
1932	414	25,1	14,7				
1935	155 inc.						
1936	476	22,6	17,8	407	29,2	340,7	30,6
1937	412	54,2	26,0	467	39,4	418,8	21,3
1938	589,7	182,7	61,5	360,8	6,1	528,8	37,9
1939	388,9 inc.			250,8	(6,7)	472,4	32,0
1940	325,5	4,2	4,1	288,0	(12,9)	373,5	16,7
1941	435,5	28,6	21,5	213,7	0	236,4	1,3
1942	392,6	23,3	15,2	0		330,8	10,2
1943	460,3	38,4	21,9	393,1	11,7	462,4	19,2
1944	388,2	7,2	7,5	548,5	39,9	440,2	42,2
1945	367,7	29,3	18,9	123,6		608,6	51,0
1946	898,5	209,7	85,2	492,4	16,6	471,0	30,1
1947	441,5 inc.			417,5		253,0	3,4
1948	341,7	23,9	17,0	299,7	13,8	305,7	11,4
1949	366,5	30,4	16,9	256,0	10,3	210,3	5,0
1950	811,8	135,2	65,2	530,4	35,4	391,1	14,8
1951	665,3	64,2	38,0	385,0	7,4	319,8	8,7
1952	521,2	38,1	23,2	397,3	12,5	655,9	43,0
1953	655,4	67,7	38,5	593,5	19,0	561,0	50,0
1954	551,2	25,8	14,4	521,5	12,9	595,1	28,4
1955	409,6	11,6	8,9	516,7	17,3	433,2	18,8
1956	436,2	24,8	16,2	466,9	8,4	406,1	8,5
1957	552,6	44,5	24,3	444,5	16,9	411,2	16,6
1958	429,6	48,8	22,7	568,3	41,2	402,3	12,7
1959	605,4	135,2	48,8	359,1	8,6	501,9	30,4
1960	405,1	58,2	28,2	226,6	6,3	286,3	8,1
1961	540,3	66,6	31,8	598,1	43,5	475,5	28,9
1962	504,8	20,6	10,6	517,7	42,1	418,5	19,7
1963	411,8	20,5	14,3	373,4	7,6	305,5	2,6
1964	660,2	87,9	39,2	683,4	63,6	413,9	11,8
1965	354,4	10,4	6,6	381,4	11,6		
1966	405,7	17,2	10,5	460,8	20,7		
1967	339,5	26,8	10,7	478,4	30,2		
1968	320,9	11,7	6,8	268,4	6,7		
1969	366,3	11,1	5,4	360,3	12,9		
1970	307,2	2,9	1,2	411,7	21,7		
1971	342,7	37,6	19,4	279,7	10,9		
1972	313,2	7,3	7,1	195,6	0		
Moyenne	\bar{M} 463,3	46,0	24,8	410	19,5	411,3	21,2
Ecart-type	σ 137,3	48,5	18,5	121,4	15,09	114,3	14,2
Coefficient de variation	0,30	1,06	0,8	0,3	0,8	0,3	0,7

Calage du modèle

Dans l'impossibilité d'obtenir un calage valable pour chacune des années d'observations, nous avons pris la décision de caler le modèle sur la lame moyenne observée au cours de la période. Les écarts entre simulation sont importants pour les trois premières années. Ils deviennent acceptables pour la dernière année.

TABLEAU VII
PLUVIOMÉTRIE ANNUELLE AU POSTE DE MOKOLO ET LAME ANNUELLE SIMULÉE
SUR LE BASSIN DU MAYO TSANAGA A MOKOLO

Année	Pluviométrie annuelle (mm)	Lame écoulée simulée (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
1948	854	151,6	
1949	> 995	(265,0)	
1950	958	161,6	
1952	947	141,2	
1953	1 017	143,4	
1954	1 042	159,2	
1955	> 1 028 (1 088)	280,0	
1956	803	136,5	
1957	915	112,6	
1958	836	90,4	
1959	1 030	232,9	
1960	1 163	246,9	
1961	958	238,8	
1962	1 076	228,9	
1963	1 255	334,4	
1964	864	150,4	
1965	658 (juil.-août-sept.)	> 168,6	
1966	1 051	251,2	
Moyenne	991	194,0	19,6
Ecart-type	119	66,6	
Coefficient de variation	0,103	0,344	
Valeur maximale	1 255	334	26,7
Valeur minimale	803	90,4	11,2

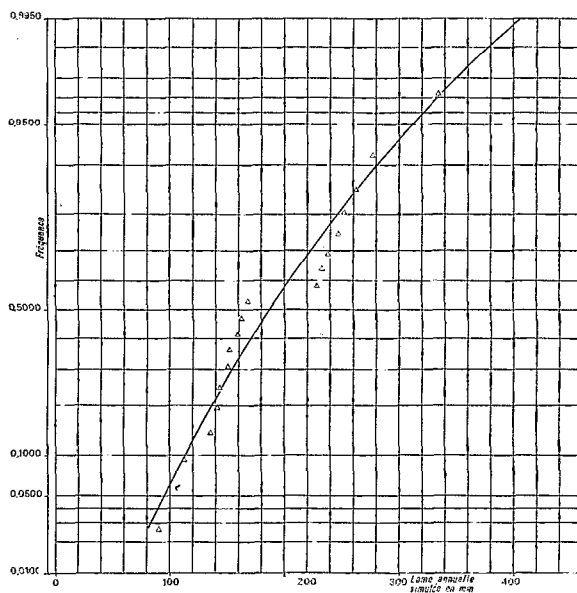


Fig. 16. — Distribution des lames annuelles simulées pour le bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo à partir du poste pluviométrique de Mokolo (Cameroun)

En voici les résultats :

	Pluviométrie (mm)	Lame observée (mm)	Lame calculée (mm)
1966	680,2	176,2	290,9
1967	858,2	265,1	343,6
1968	904,6	509,9	351,4
1969	869,7	248,3	230,6
Moyenne	828,1	299,9	304,1

Indiquons que les lames journalières de jours de crue simulées pour les deux premières années sont très nettement et systématiquement surestimées par rapport à celles observées. Par contre, c'est l'inverse que nous observons pour les lames de crue de la troisième année. La dispersion des lames de crue pour la dernière année varie dans des proportions tout à fait acceptables.

Résultats obtenus

Compte tenu du calage très approximatif de ce modèle, les résultats de la simulation des lames journalières et annuelles obtenues à partir des données pluviométriques journalières des quatre postes de référence cités ci-dessous doivent être interprétés comme étant simplement des ordres de grandeur.

- Poste de Kaélé.
- Poste de Maroua-Station.
- Poste de Maroua-Salak.
- Poste de Maroua-Agriculture.

Le tableau VIII donne un récapitulatif des résultats obtenus.

La pluviométrie moyenne interannuelle sur le bassin tirée du rapport de E. CADIER est de 850 mm. Les lames simulées à partir des stations de Maroua-Salak et de Maroua-Agriculture peuvent être groupées pour fournir une série de 44 valeurs, y comprises celles effectivement observées, puisque ces deux stations ont des pluviosités proches de 850 mm.

La courbe de distribution de cette série est présentée sur la figure 17. Sur ce même graphique ont été reportés les points représentatifs de la série obtenue en groupant toutes les lames simulées aux quatre postes utilisés. On ne constate aucune modification de la courbe de distribution.

3.8. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET AU BASSIN VERSANT DE GODOLA-MOTORSOLO (RÉPUBLIQUE UNIE DU CAMEROUN)

Calage du modèle

Pour ce bassin versant de 42 km² le modèle utilisé est celui précédemment calé pour assurer la simulation des lames sur le bassin versant de Leleng qui est un sous-bassin de celui-ci. Quelques modifications ont été nécessaires au niveau de la diminution du ruissellement, de l'accroissement de la quantité d'eau mobilisable par évapotranspiration dans le sol et de la reprise par évapotranspiration d'une partie de l'eau souterraine d'écoulement.

Les résultats des observations réalisés en 1968 et 1969 ont permis de caler convenablement le modèle tout en respectant les débits journaliers des jours de crue et l'allure du tarissement pour ces deux années.

	Lame observée (mm)	Lame calculée (mm)
1968	299	282,9
1969	147	175,8

TABLEAU VIII
 PLUIES ANNUELLES ET LAMES ANNUELLES SIMULÉES POUR LE BASSIN VERSANT DE LELENG
 (MOTORSOLO, RÉPUBLIQUE UNIE DU CAMEROUN)

Année	Poste de Kaélé		Postes de Maroua					
	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Station		Salak		Agriculture	
			Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)
1939			716,7	144,1				
1940			636,1	—				
1941			719,0	181,5				
1942			606,0	151,3				
1943			599,3	—				
1944			548,1	136,2				
1945			934,3	—				
1946			1 016,5	—				
1947			665,0	198,5				
1948	934,8	312,6	753,6	242,0			807,3	289,4
1949	846,6	257,0	644,2	195,9			604,4	154,3
1950	802,6	137,8	825,2	252,2			849,5	280,2
1951	942,8	253,3	1 016,7	389,0			1 083,9	421,8
1952	1 034,9	375,7	827,0	284,2			779,7	250,8
1953	1 056,9	440,6	778,8	187,2	802,6	219,5	733,0	157,3
1954	839,8	138,5	746,6	178,4	831,7	169,9	877,9	298,4
1955	1 162,9	481,5			801,0	210,5	763,0	163,5
1956	794,9	232,1			1 119,0	452,8	868,5	356,3
1957	903,2	229,9			1 019,1	336,5	705,1	127,3
1958	1 086,4	389,2			948,0	261,6	814,6	185,9
1959	1 027,4	365,9			914,9	293,2	678,3	111,6
1960	935,8	358,4			1 105,9	479,9	756,8	228,5
1961	1 043,3	504,4			808,0	283,2	891,8	375,1
1962	938,8	343,1			938,1	347,9	1 011,2	413,8
1963	885,9	228,8			821,3	217,9	884,4	311,5
1964	776,3	155,3			617,6	80,0	817,3	246,7
1965	988,4	366,9			853,8	202,6	736,7	169,7
1966					811,3	299,6	921,3	269,4
1967					839,0	328,1	594,4	160,1
1968					759,2	184,5	792,4	231,5
1969					939,4	277,2	925,0	245,5
1970								
1971	669,7	192,3						
1972	654,3	69,2			872,0	212,3		
Moyenne	914,7	291,6	708,3	211,7	877,9	269,8	813,5	247,7
Écart-type	137,0	120,9	220,3	71,5	122,2	98,0	119,0	90,2
Coefficient de variation	0,150	0,415	0,311	0,337	0,139	0,363	0,146	0,364

Résultats de la simulation

L'extension de la série hydrologique à partir des séries pluviométriques journalières des postes de référence — Maroua-Salak, Maroua-agriculture et Kaélé — et par utilisation du modèle précédemment calé, ne présente aucune difficulté et conduit à des valeurs de lame écoulée satisfaisantes. Celles-ci sont consignées dans le tableau IX.

Moyennes, écart-types et coefficients de variation des séries obtenues et des séries pluviométriques d'origine, nous permettent, étant donné la valeur de la précipitation moyenne sur le bassin estimée à 850 mm, de grouper les deux dernières séries de lames écoulées. La distribution gaussio-logarithmique de cette série groupée est présentée sur la figure 18.

TABLEAU IX
RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES LAMES ANNUELLES ÉCOULÉES
SUR LE BASSIN VERSANT DE GODOLA-MOTOROLO
A PARTIR DES POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DE KAELE, MAROUA-SALAK, MAROUA-AGRICULTURE

Année	Poste de Kaélé		Postes de Maroua			
	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Salak		Agriculture	
			Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)
1948	934,8	193,7			807,3	187,9
1949	846,6	162,6			604,4	90,5
1950	802,6	67,8			845,9	175,4
1951	942,8	156,9			1 083,8	305,7
1952	1 034,1	237,1			779,7	173,4
1953	1 056,9	291,9	802,6	144,5	733,0	89,7
1954	839,8	72,1	831,8	94,7	877,9	195,9
1955	1 162,9	331,8	801,0	129,9	753,0	89,7
1956	794,9	155,0	1 119,0	324,4	868,5	258,1
1957	903,2	141,2	1 019,1	211,2	705,1	74,3
1958	1 086,4	263,7	948,0	156,6	814,6	108,2
1959	1 027,4	234,3	914,9	178,4	678,3	56,1
1960	935,8	238,7	1 105,9	354,4	756,8	142,7
1961	1 043,3	367,2	808,0	187,5	891,8	253,9
1962	938,8	239,3	938,1	234,5	1 011,2	295,9
1963	885,9	135,8	821,3	135,6	884,4	215,6
1964	746,3	80,2	617,1	40,0	817,3	158,6
1965	988,4	246,8	853,8	116,5	736,7	93,7
1966			811,3	202,2	921,3	167,3
1967			839,0	229,0	594,4	98,3
1968			759,2	116,9	792,8	148,5
1969			939,4	160,3	925,0	153,1
1970						
1971	669,7	122,0				
1972	654,3	28,2	872,0	115,8		
Moyenne	914,7	188,3	877,9	174,02	813,5	160,6
Ecart-type	137,0	91,6	122,2	77,92	119,0	71,7
Coefficient de variation	0,150	0,487	0,139	0,448	0,146	0,447

3.9. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET AU BASSIN VERSANT DE BINNDÉ-MANGA (RÉPUBLIQUE DE HAUTE-VOLTA)

Calage du modèle

Le modèle complet a été utilisé d'une manière globale sur le bassin versant de Binndé de superficie 9,5 km². Les résultats obtenus sur ce bassin au cours de la période 1963-1965 et consignés dans le rapport définitif de J. C. KLEIN (1967) ont permis le calage de ce modèle à l'échelle journalière. La phase tarissement de fin d'année reste relativement excédentaire dans le modèle.

On obtient le calage suivant :

Année	Pluie	Lame observée	Lame calculée
1963	602,7	74,9	78,2
1964	895,5	192,8	207,5
1965	798,3	76,3	81,2

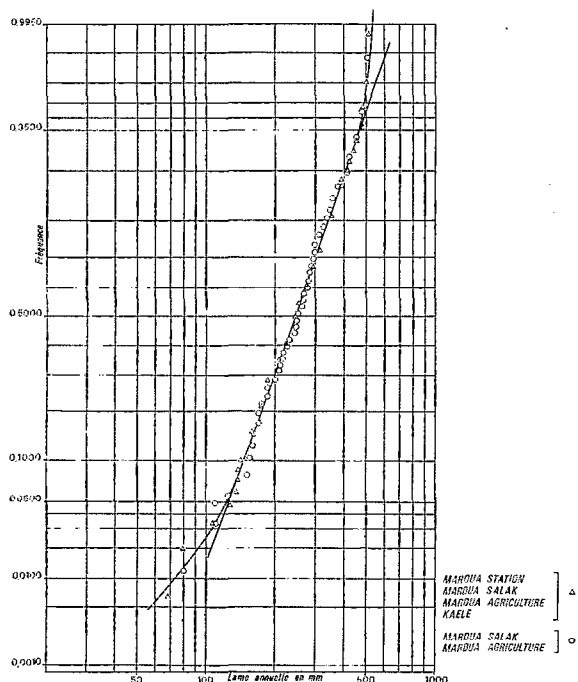


Fig. 17. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Leleng-Motorsolo (Cameroun) à partir de stations pluviométriques

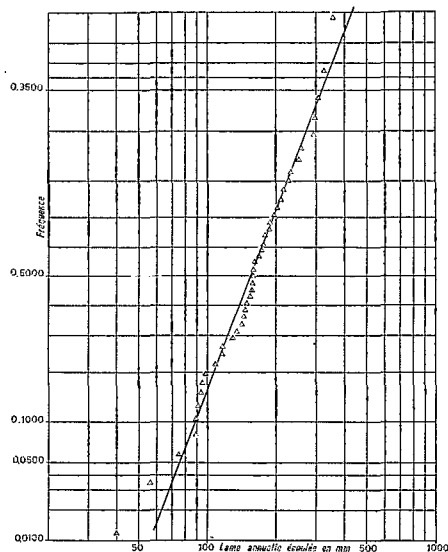


Fig. 18. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Godola-Motorsolo à partir des données pluviométriques de Maroua-Salak et de Maroua-Agriculture

Résultats obtenus

La station pluviométrique utilisée comme station de référence longue durée est celle indiquée, dans le recueil des bassins versants représentatifs de l'ORSTOM, Fada N'Gourma. Les résultats obtenus par la simulation des lames journalières de l'année 1920 à l'année 1972 présentent une anomalie exceptionnelle de l'année 1951 à l'année 1964. La courbe de simple cumul des lames annuelles simulées pour des années successives comporte trois segments de droites (fig. 19). Les deux segments externes parallèles, indiquent une homogénéité des lames simulées pour ces deux périodes. Nous rejetons donc les lames simulées pour la période intermédiaire d'autant plus qu'il y a discordance entre les lames observées sur le bassin versant et celles simulées pour les années 1963 et 1964.

La correction à faire sur les lames annuelles serait de 0,53 pour obtenir une série de lames homogènes. L'origine de cette anomalie est à rechercher dans la mesure des précipitations au poste de Fada N'Gourma pour les années 1951 à 1964. Pour cette station, le rapport entre la moyenne des précipitations annuelles des périodes externes à celle valable pour la période intermédiaire est de 0,766.

Le tableau X fournit les valeurs des précipitations annuelles et les lames annuelles simulées ainsi que les caractéristiques des séries pluviométriques et hydrologiques pour les différentes périodes.

La figure 20 donne la représentation sur papier gaussien-logarithmique des lames annuelles simulées pour les périodes homogènes 1920-1950 et 1965-1972.

Une étude plus approfondie du poste de référence pluviométrique valable conduit à recommander, avant d'utiliser les données présentées ci-dessus, de consulter le paragraphe 3.10. se rapportant aux lames du bassin versant de Kazanga-Manga.

3.10. APPLICATION DU MODÈLE COMPLET AU BASSIN VERSANT DE KAZANGA-MANGA (RÉPUBLIQUE DE HAUTE-VOLTA)

Calage du modèle

Le modèle complet utilisé d'une manière globale sur le bassin versant de Kazanga de superficie 54,3 km² comporte les mêmes variables climatologiques que celui calé pour le bassin versant de Binndé. De plus tous les

TABLEAU X
RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES LAMES ANNUELLES ÉCOULÉES SUR LE BASSIN DE BINNDÉ-MANGA,
(RÉPUBLIQUE DE HAUTE-VOLTA)
OBTENUE A PARTIR DU POSTE PLUVIOMÉTRIQUE DE FADA N'GOURMA

Année	Pluviométrie (mm)	Lame écoulee (mm)	Cumul des lames écoulees	Année	Pluviométrie (mm)	Lame écoulee (mm)	Cumul des lames écoulees	
Période I				Période II (suite)				
1920	945,1	195,2		1953	1 096,2	232,4	4 493,7	
1921	662,9	46,3	241,5	1954	933,6	162,4	4 656,1	
1922	730,8	115,2	356,7	1955	1 030,1	214,3	4 870,4	
1923	751,4	94,3	451,1	1956	969,2	167,5	5 037,9	
1924	839,3	105,2	556,3	1957	978,4	160,9	5 198,7	
1925	874,9	130,3	686,6	1958	1 084,2	288,2	5 486,9	
1926	682,1	63,6	750,2	1959	1 314,1	423,1	5 910,0	
1927	938,1	164,8	915,0	1960	984,8	220,0	6 130,1	
1928	880,9	145,4	1 060,3	1961	1 028,8	243,5	6 375,5	
1929	770,4	139,8	1 200,2	1962	1 068,6	256,2	6 629,7	
1930	1 003,1	133,1	1 333,3	1963	1 083,9	206,7	6 836,4	
1931	796,0	99,6	1 432,9	Période III				
1932	850,6	204,6	1 637,5	1964	1 059,8	271,3	7 107,7	
1933	954,3	130,2	1 767,7	1965	770,6	98,1	7 205,9	
1934	773,1	135,9	1 903,6	1966	922,6	157,2	7 363,0	
1935	838,4	130,8	2 034,4	1967	867,0	145,2	7 508,3	
1936	755,7	80,1	2 114,5	1968	986,5	119,2	7 627,4	
1937	766,8	87,1	2 201,6	1969	913,4	162,3	7 789,8	
1938	967,0	172,7	2 374,3	1970	732,4	132,0	7 921,7	
1939	771,7	107,3	2 481,6	1971	739,0	95,1	8 016,8	
1940	670,3	78,4	2 550,1	1972	389,8	107,0	8 123,9	
1941	728,8	78,6	2 638,7	Moyenne Ecart-type Coefficient de variation				
1942	706,2	82,1	2 720,8	Période I	Lame	122,8	42,1	0,343
1943	1 001,3	196,2	2 917,0		Pluie	807,5	106,7	0,132
1944	569,3	64,5	2 981,5	Période II	Lame	235,7	66,9	0,29
1945	763,2	167,3	3 148,8		Pluie	1 064,6	94,2	0,089
1946	783,4	130,3	3 279,1	Période I + III	Lame	123,7	39,1	0,316
1947	796,6	132,2	3 411,3		Pluie	815,5	104,1	0,198
1948	896,7	145,0	3 557,0					
1949	707,7	78,2	3 635,3					
Période II								
1950	857,4	172,0	3 807,3					
1951	1 146,6	251,3	4 058,6					
1952	1 040,5	202,7	4 261,3					

paramètres du modèle précédemment calés ont été conservés sauf celui qui règle la valeur du ruissellement. Pour ce bassin de plus grande superficie, le ruissellement est cependant nettement plus important.

Notons que lors de la phase calage de ce modèle, la plus grande difficulté a été de tenir compte des observations faites au cours de l'année 1965 vis-à-vis de celles des années 1963 et 1964.

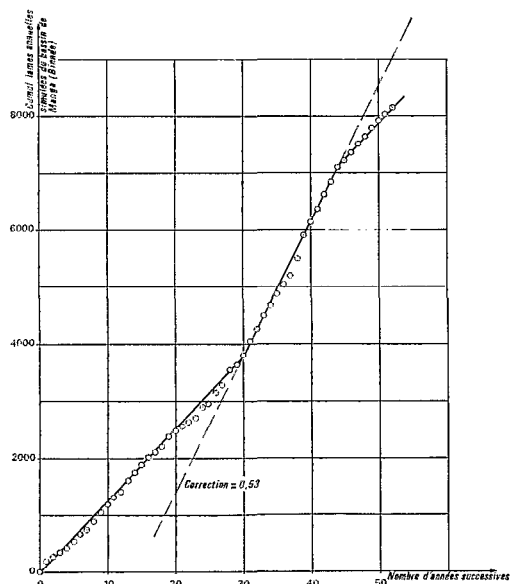


Fig. 19. — Simple cumul des lames annuelles simulées sur le bassin de Binndé-Manga à partir du poste pluviométrique de Fada N'Gourma (Haute-Volta)

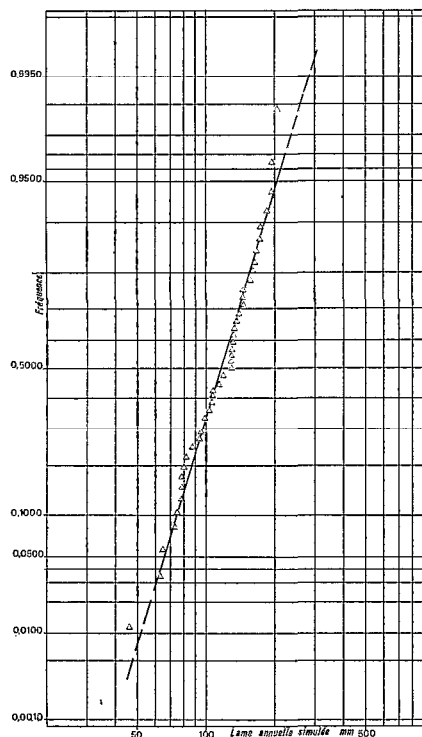


Fig. 20. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Binndé-Manga (Haute-Volta) à partir du poste de Fada-N'Gourma

Les résultats du calage sont les suivants :

	Pluviométrie moyenne	Lame observée	Lame calculée
1963	656,5	151,4	137,5
1964	786,2	218,4	188,3
1965	775,8	88,3	127,3

Résultats obtenus

La station pluviométrique de référence, Fada N'Gourma, a été également utilisée pour ce bassin versant de Kazanga. Le tableau XI présente l'ensemble des résultats obtenus, seuls ceux des périodes 1920-1950 et 1965-1972 sont homogènes. La figure 21 donne la distribution des lames de ces deux périodes. Le rapport entre les moyennes des précipitations pour les périodes I et II est de 0,768, tandis que le rapport des lames annuelles pour ces mêmes périodes atteint 0,54.

Afin de contrôler la validité des résultats obtenus par cette simulation, nous avons utilisé plusieurs autres stations pluviométriques de référence puisque celle de Fada N'Gourma présente l'anomalie déjà signalée au cours de la seconde période 1951-1964.

Station de Tenkodogo

L'ensemble des résultats obtenus à partir des précipitations journalières à cette station est présenté sur le tableau XII. La courbe représentative du cumul dans le temps des hauteurs de pluies annuelles indique une homo-

générité parfaite des données des années 1938 à 1972. Sur cette période la hauteur moyenne interannuelle est de 941,7 mm alors qu'elle est de 975,1 mm sur la période 1922-1937 et de 956,2 mm sur la période globale.

La lame écoulée interannuelle obtenue de valeur 238,9 mm n'est comparable ni à la valeur 299,2 mm de la lame moyenne obtenue par simulation à l'aide de la station de Fada N'Gourma sur la période non retenue 1951-1964, ni même à la valeur 161,0 admise comme représentative de la période acceptable. Compte tenu des incertitudes qui planent sur la valeur des précipitations moyennes dans cette région et donc sur les lames écoulées, nous avons eu recours aux deux autres stations de Manga et de Garango de création plus récente, pour préciser la série ou le groupement de séries valables.

Stations de Manga et de Garango

Le tableau XIII présente les précipitations annuelles et les lames simulées pour le bassin de Kazanga-Manga à partir des postes de Manga et de Garango.

Étant donné que les deux séries de lames sont issues de séries pluviométriques ayant la même moyenne, la méthode des stations années a été utilisée puisque la corrélation entre les mesures à ces deux postes est inférieure à 0,50.

Le tableau récapitulatif des résultats des diverses simulations présenté ci-dessous appelle quelques commentaires :

	Pluie moyenne	Coefficient de variation	Lame moyenne	Coefficient de variation	Nombre d'années
Garango	921,7	0,115	212,6	0,314	26
Manga	922,2	0,137	193,6	0,381	23
Tenkodogo	956,2	0,222	238,9	0,535	47
Fada N'Gourma					
Période I + III	815,5	0,128	161,0	0,390	43
Période II	1 064,6	0,086	299,2	0,259	14

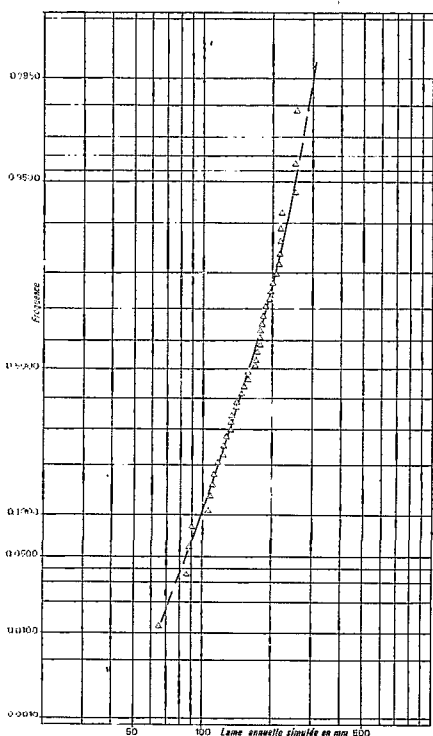


Fig. 21. — Distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Kazanga-Manga (Haute-Volta) à partir du poste de Fada N'Gourma

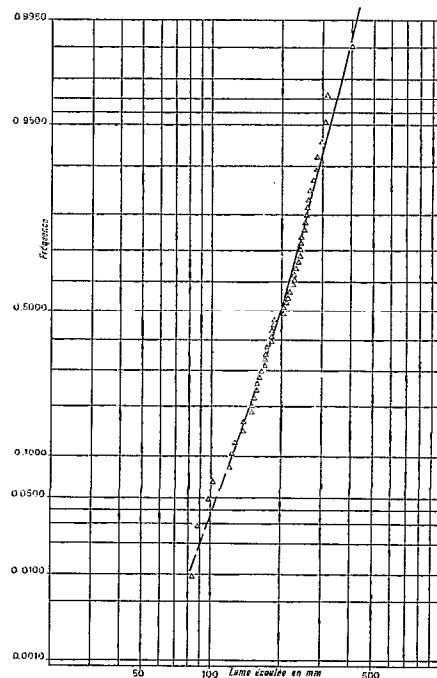


Fig. 22. — Diagramme de distribution des lames annuelles simulées sur le bassin versant de Kazanga-Manga à partir des postes de Manga et Garango

TABLEAU XI

RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES LAMES ANNUELLES ÉCOULÉES SUR LE BASSIN VERSANT DE KAZANGA-MANGA (RÉPUBLIQUE DE HAUTE-VOLTA) A PARTIR DU POSTE DE FADA N'GOURMA

Année	Pluie annuelle	Lame écoulée	Année	Pluie annuelle	Lame écoulée
Période I			Période II		
1920	945,1	249,9	1950	857,4	216,9
1921	662,9	65,1	1951	1 146,6	324,3
1922	730,8	156,7	1952	1 040,5	266,0
1923	751,4	123,1	1953	1 096,2	301,4
1924	839,3	139,8	1954	933,6	215,5
1925	874,9	172,5	1955	1 030,1	276,0
1926	682,1	89,6	1956	969,2	210,8
1927	938,1	220,5	1957	978,4	216,8
1928	880,9	194,5	1958	1 084,2	357,8
1929	770,4	134,3	1959	1 314,1	516,2
1930	1 003,1	183,4	1960	984,8	274,3
1931	796,0	133,6	1961	1 028,8	309,2
1932	850,6	254,9	1962	1 068,6	326,1
1933	954,3	180,9	1963	1 083,9	266,9
1934	773,1	177,1	Période III		
1935	838,4	169,3	1964	1 059,8	328,1
1936	755,7	112,3	1965	770,6	134,4
1937	766,8	124,4	1966	922,6	201,1
1938	967,0	218,0	1967	867,0	188,3
1939	771,7	140,6	1968	986,5	156,5
1940	670,3	106,6	1969	913,4	214,3
1941	728,8	117,0	1970	732,4	176,9
1942	706,2	111,3	1971	739,0	126,6
1943	1 001,3	251,2	1972	839,8	147,4
1944	569,3	85,8		<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
1945	763,2	208,2			<i>Coefficient de variation</i>
1946	783,4	169,7	Période I + III	Pluie 815,5	104,1
1947	796,6	178,9		Lame écoulée 161,0	51,2
1948	896,7	197,5	Période II	Pluie 1 064,6	94,2
1949	707,7	108,7		Lame écoulée 299,2	77,3

— Le poste de référence pluviométrique du bassin versant de Kazanga-Manga ne peut être ni celui de Fada N'Gourma ni celui de Tenkodogo, mais l'un des deux autres postes, Manga ou Garango.

— La lame moyenne annuelle écoulée sur le bassin versant de Kazanga est de l'ordre de 200 mm en moyenne par an.

— La courbe de distribution des lames annuelles simulées les plus vraisemblables est tracée en coordonnées gaussio-logarithmiques sur la figure 22.

Notons qu'une certaine homogénéité dans les lames simulées existe entre celles issues de l'exploitation des données au poste de Fada N'Gourma (période I) et celles des postes de Manga et de Garango. Les deux courbes de distribution de ces lames sont sensiblement parallèles. Le coefficient moyen de passage d'une série à l'autre est de l'ordre de 0,80 (voir fig. 20 et 22).

TABLEAU XII

RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES LAMES ANNUELLES ÉCOULÉES SUR LE BASSIN DE KAZANGA-MANGA
A PARTIR DU POSTE PLUVIOMÉTRIQUE DE TENKODOGO (RÉPUBLIQUE DE HAUTE-VOLTA)

<i>Année</i>	<i>Pluie annuelle</i>	<i>Lame écoulée</i>	<i>Année</i>	<i>Pluie annuelle</i>	<i>Lame écoulée</i>
1922	882,4	208,4	1949	918,7	202,0
1923	852,0		1950	929,0	238,2
1924	1 138,0		1951	930,8	194,6
1925	795,0		1952	1 014,1	262,4
1926	561,9	90,5	1953	818,5	188,2
1927	692,0		1954	854,1	148,3
1928	900,0	262,5	1955	1 192,5	388,0
1929	1 084,0	231,6	1956	975,7	247,4
1930	612,8	76,2	1957	1 202,8	330,3
1931	819,0	180,0	1958	931,2	291,7
1932	1 349,5	395,9	1959	839,6	248,1
1933	1 027,1	298,5	1960	660,7	62,3
1934	791,2	164,1	1961	999,1	263,7
1935	1 542,6	635,5	1962	1 108,8	265,1
1936	1 528,3	567,5	1963	838,9	142,3
1937	1 236,7	442,0	1964	946,7	234,5
1938	1 149,0	319,3	1965	864,0	172,4
1939	1 118,3	288,9	1966	895,6	125,4
1940	742,7	113,7	1967	1 216,5	484,3
1941	771,7	116,4	1968	1 005,1	155,9
1942	864,0	129,6	1969	960,0	283,4
1943	1 183,0	311,7	1970	1 021,9	341,3
1944	698,5	143,3	1971	1 016,0	258,2
1945	1 050,0	352,5	1972	919,8	150,6
1946	940,2	221,8			
1947	523,3	43,9	Moyenne	956,2	239,0
1948	857,7	198,9	Ecart-type	212,3	127,9
			Coefficient de variation	0,222	0,535

Si la lame moyenne reste comprise entre 161 et 239 mm selon les stations utilisées ne présentant aucune anomalie sur une période de plus de vingt-trois années, la vraie valeur moyenne à retenir est plutôt de 200 mm, obtenue à partir des postes de Manga et Garango.

Enfin, les résultats présentés au chapitre 3.9 pour le bassin versant de Binndé-Manga devraient être majorés de 24% pour tenir compte de la différence de précipitation moyenne entre la période I + III de Fada N'Gourma et la pluie moyenne aux stations de Garango et Manga. Ces deux derniers postes devant également être mieux représentatifs pour Binndé, sous-bassin inclus dans celui de Kazanga.

TABLEAU XIII

PLUIES ANNUELLES ET LAMES ANNUELLES SIMULÉES SUR LE BASSIN VERSANT DE KAZANGA-MANGA
A PARTIR DES POSTES DE MANGA ET GARANGO

Année	Poste de Garango		Poste de Manga	
	Pluie (mm)	Lame (mm)	Pluie (mm)	Lame (mm)
1946				
1947	791,0	164,1		
1948	782,2	137,5		
1949	721,9	83,6	729,9	157,04
1950	938,0	285,7	923,3	203,8
1951	853,7	137,0	117,3	312,9
1952	1 062,4	275,4		
1953	913,0	174,7	850,1	172,3
1954	1 008,5	263,1	765,8	125,2
1955	958,9	240,2	936,0	181,1
1956	946,4	181,9	1 107,2	298,1
1957	1 059,3	236,4	1 244,8	282,1
1958	925,9	255,1	855,8	171,1
1959	908,9	228,9	805,4	225,7
1960	760,5	119,7	945,7	252,2
1961	1 129,7	401,8	845,0	170,5
1962	956,4	205,1	882,4	149,3
1963	919,2	183,2	920,9	186,5
1964	819,8	244,4	936,3	260,0
1965	883,0	161,6	852,7	153,8
1966	890,0	157,1	872,9	122,5
1967	1 110,4	309,4	980,8	244,1
1968	1 043,4	210,5	888,9	99,9
1969	944,6	228,0	1 059,5	264,5
1970	793,6	215,6	878,7	258,6
1971	926,1	232,4	1 011,0	242,5
1972	916,4	186,4	70,45	102,4
Moyenne	921,7	213,0	922,2	194,0
Ecart-type	105,9	66,8	126,2	73,7
Coefficient de variation	0,115	0,314	0,131	0,381

4. CONTRAINTES D'APPLICATION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES DANS LE SAHEL

L'extension temporelle des séries hydrologiques de courte durée, obtenues lors des études hydrométéorologiques intensives sur les bassins représentatifs, est assurée grâce à l'utilisation d'un modèle hydrologique global convenablement calé pour cette période de courte durée et à l'aide d'une longue série pluviométrique journalière observée à la station de référence située dans une même zone pluviométriquement homogène.

Cette extension valable pour des bassins de petites superficies l'est encore pour de plus grands bassins, mais nécessite une connaissance plus approfondie des structures des précipitations journalières dans l'espace. Un tel essai a été réalisé pour le bassin de l'oued Chorfa. Limitons-nous dans ce chapitre aux contraintes d'application des modèles à de petits bassins versants.

Pour ces petits bassins versants, la presque totalité de l'écoulement provient du ruissellement provoqué par des averses de courte durée. La simulation de ce terme ruissellement demanderait, pour être comparable à la réalité, que soit connus dans le temps à une échelle très fine, quelques minutes par exemple, les intensités des précipitations. Si ces mesures d'intensité sont réalisées au cours des études intensives de courte durée, un modèle très précis pourrait être développé. Cependant l'utilité d'un tel modèle, en dehors de la compréhension du phénomène ruissellement, n'est pas évidente puisque nous ne disposons généralement pas de longues séries d'observations pour les intensités

des averses à un pas de temps très faible. La densité des stations pluviographiques dans ces régions ne dépasse pas un appareil pour 100 000 km² voire 400 000 km².

Seules les précipitations journalières étant suffisamment connues dans l'espace et dans le temps, l'extension des séries hydrologiques peut se réaliser à l'aide d'un modèle au pas de temps journalier en acceptant des imprécisions sur la détermination du terme ruissellement.

En utilisant l'ensemble des informations complètes obtenues sur les bassins représentatifs, il est possible, avec une marge d'erreur raisonnable, de représenter le ruissellement et donc l'écoulement sur les petits bassins versants de toute la zone sahélienne. Nous l'avons exposé au chapitre 2 avec le modèle simplifié.

Au sud de la zone sahélienne (plus de 750 mm de pluie) où l'influence sur le ruissellement de l'état d'humidité du bassin au moment de la précipitation devient très importante, l'utilisation d'un modèle plus complet devient nécessaire. Notons que l'influence des intensités des précipitations sur le terme ruissellement est loin d'être négligeable à conditions d'humidité égales.

Pour ce type de modèle la connaissance de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle devient nécessaire pour assurer la simulation aussi bien dans la phase calage que dans la phase exploitation. Généralement ces données sont disponibles pour une région homogène ; elles proviennent, soit des stations climatologiques, soit des mesures faites sur bac.

La phase calage du modèle adéquat pour la région est d'autant plus aisée que l'ensemble des mesures hydro-météorologiques présente une meilleure consistance dans le temps. Le calage ne peut être qu'approché lors des épisodes à fortes précipitations par suite du fait évoqué précédemment. Nous avons constaté une fois des écarts systématiques par excès pendant toute une année et de sens contraire l'année suivante, mais généralement la distribution aléatoire des écarts dans un sens et dans l'autre reste normale et d'ailleurs bien souvent ces écarts sont relativement faibles, inférieurs à 30%.

En résumé, au cours de la phase calage, les contraintes des modèles sont de deux ordres :

- contraintes dues à l'influence des intensités des précipitations sur la validité de la simulation du terme ruissellement,
- contraintes dues à la consistance des données hydro-météorologiques obtenues au cours de l'exploitation du bassin représentatif.

En ce qui concerne la phase exploitation du modèle à l'extension de la série hydrologique, nous avons remarqué plusieurs fois que le modèle amplifiait les anomalies contenues dans la série pluviométrique journalière de la station longue durée prise comme station de référence, puisque la variabilité des séries de lames est plus grande que celle des séries de pluie.

Il convient ainsi de ne procéder à la simulation que si, au préalable, l'homogénéité de la série pluviométrique a été vérifiée.

L'exemple qui est présenté au paragraphe 5.10., en ce qui concerne le choix de la série représentative pour le bassin de Kazanga, montre l'influence du choix de la station de référence, et la difficulté résultante dans le choix de la série de lames réellement représentative pour le bassin.

Pour obtenir avec sécurité la série de lames écoulées, nous voyons tout l'intérêt qu'il y a à posséder une série de précipitations journalières parfaitement valable, d'où l'utilité de créer à partir du fichier original des précipitations journalières le fichier critiqué et opérationnel de ces données.

CONCLUSION

L'outil qu'est le modèle mathématique hydrologique, pour réaliser l'extension des séries hydrologiques, présente d'énormes avantages sur les autres outils utilisés par l'hydrologue. En effet, le modèle fonctionnant en continu, utilise toute l'information pluviométrique et climatologique disponible. Il simule les séries continues des débits journaliers, de crue, de tarissement et d'étiage et la comparaison avec la série observée fournit d'énormes renseignements aussi bien sur les performances du modèle que sur la consistance des données tant pluviométriques qu'hydrologiques.

L'extension des séries hydrologiques à partir des séries pluviométriques est une des applications réellement positives, mais elle exige pour être valable que l'information de base soit dépourvue d'anomalies. Il faut donc soutenir fortement la collecte de données pluviométriques journalières d'excellente qualité et la mise au point d'un fichier opérationnel. L'accroissement de la densité de l'information pluviographique peut apporter également une valorisation rapide du potentiel hydropluviométrique actuel.

Tous les résultats d'application des deux modèles présentés dans cet article ont servi à l'élaboration d'un ouvrage de synthèse sur l'écoulement annuel dans le Sahel africain (J. RODIER, 1975).

BIBLIOGRAPHIE

- KLEIN (J. C.) – 1967 – « Etude hydrologique de bassins représentatifs dans le sud-est de la Haute-Volta, région de Manga ». *ORSTOM*, Paris, multigr.
- CADIER (E.) – 1971 – « Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun, bassin représentatif du Motorsolo ». *ORSTOM*, Yaoundé, multigr.
- TIXIER (J.) et BESLON (M.) – 1961 – « Bassin expérimental d'Abou-Goulem campagnes 1958-1959 ». *ORSTOM Service Hydrologique*, CSLT Fort-Lamy (publication CRT n° 6143) 66 p. multigr. + 35 pl.
- BRUNET-MORET (Y.) – 1960 – « Rapport sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et Tagant en 1959 ». *ORSTOM Service Hydrologique*, Paris, texte multigr. + fig.
- JACCON (G.) et CAMUS (H.) – 1967 – « Etude hydrologique des oueds Ghorfa et Niorde et des Oualos en amont de Kaédi. Rapport définitif 1964-1966 ». *ORSTOM Service Hydrologique*, Paris, 127 p. multigr. + fig. et annexe.
- VUILLAUME (G.) – 1968 – « Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de Kounkouzout (Niger). *Cahiers ORSTOM sér. Hydrologie*, vol. VI, n° 1.
- RODIER (J. A.) – 1975 – « Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain ». Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p. + fig.