

# Bilan hydrologique en Guinée et Togo-Bénin

John V. SUTCLIFFE <sup>(1)</sup> et B.S. PIPER <sup>(2)</sup>

## RÉSUMÉ

*Les estimations régionales de l'écoulement se corrént au mieux à la pluviométrie, et une approximation de bilan hydrologique peut être utilisée là où l'on assiste à une seule saison de pluie suivie d'une longue période de sécheresse. L'alimentation annuelle en eau du sol peut être considérée comme constante et l'écoulement peut être rapporté simplement à la pluviométrie nette de la saison. Cette approximation, examinée à l'occasion des recherches régionales faites en Guinée et Togo-Bénin, s'est montrée plus appropriée à la situation d'une seule période de pluie, qui existe en Guinée, qu'au modèle pluie bimodale du Sud Togo-Bénin.*

**MOTS-CLÉS :** Bilan hydrologique – Alimentation en eau du sol – Écoulement – Guinée – Togo – Bénin.

## SUMMARY

### WATER BALANCE IN GUINEA AND TOGO-BENIN

*Regional estimates of runoff are best related to rainfall, and a simplified water balance approach is possible where a single concentrated rain season is followed by a long dry season. Annual soil moisture replenishment can be considered constant, and runoff may be simply related to seasonal net rainfall. This approach was tested in regional studies of Guinea and Togo-Benin, and was found more appropriate to the single rainfall season of Guinea than the bimodal rainfall pattern of Southern Togo and Benin.*

**KEY WORDS :** Water balance – Soil moisture replenishment – Runoff – Guinea – Togo – Benin.

## 1. INTRODUCTION

Pour évaluer les ressources en eau disponibles en un certain nombre de points d'une région donnée, il faut estimer l'écoulement moyen et ses variations saisonnières et annuelles, tant aux sites non jaugés qu'à ceux où les débits sont mesurés. Là où des sites de retenue existent pour fournir un stockage saisonnier, l'évaluation de l'eau disponible peut se baser principalement sur les séries de l'écoulement annuel car les variations mensuelles du débit sont moins importantes pourvu que l'on en connaisse en gros la répartition saisonnière.

Les estimations régionales de l'écoulement peuvent facilement être mises en rapport avec les précipitations, la répartition géographique des précipitations pouvant aisément être décrite par une carte des isohyètes. L'estimation de l'écoulement, à partir des précipitations, peut aller de la corrélation statistique entre l'écoulement moyen et les caractéristiques du bassin versant, telles que la superficie et les précipitations, à l'utilisation d'un modèle conceptuel destiné à la prédétermination des écoulements mensuel et journalier à partir des précipitations sur le bassin, en passant par un bilan hydrologique annuel. Cette fourchette s'étend d'une simple corrélation empirique à un modèle complexe et difficile à appliquer à des zones non jaugées.

L'attrait de la méthode du bilan hydrologique réside en ce qu'elle combine la réalité physique à une simplicité relative. Elle est facile à appliquer dans des régions humides où l'évaporation réelle correspond étroitement à

(1) Actuellement, Hydrological Consultant, Sir Alexander Gibb & Partners, Reading (Royaume Uni).

(2) Institute of Hydrology, Wallingford (Royaume Uni).

l'évaporation potentielle, de sorte que l'écoulement se déduit en tant qu'excédent des précipitations par rapport à l'évaporation. A l'autre extrémité, dans les régions arides – où l'évaporation réelle est bien inférieure à l'évaporation potentielle – l'on se trouve presque contraint à utiliser la méthode empirique. Toutefois, il est possible d'adopter une méthode simplifiée du bilan hydrologique dans le cas de la mousson où une seule saison des pluies est concentrée sur une petite partie de l'année, le reste de l'année étant sec. Cette méthode est inopérante dans les régions très arides, au désert par exemple.

Cette approche a été développée au cours d'un programme de recherches réalisé dans le centre de l'Inde (SUTCLIFFE *et al.*, 1981) et a été par la suite mise à l'épreuve en Afrique de l'Ouest, en deux études régionales des ressources hydroélectriques (TOMSON, 1985). Ces études régionales ont eu lieu en Guinée et au Togo-Bénin, où l'on assiste à une alternance des saisons humide et sèche. La méthode du bilan hydrologique, dans laquelle les précipitations nettes sont comparées au ruissellement sur une base saisonnière, est plus directe sur le plan physique que le rapport du ruissellement aux précipitations et à un coefficient de ruissellement. Toutefois, les contrastes entre les deux exemples ne portent pas uniquement sur la hauteur des précipitations, mais encore sur la répartition saisonnière, et cette dernière a pour effet d'accentuer la nature simplificatrice d'une seule saison des pluies.

TABLEAU I  
Statistiques des stations de jaugeages sélectionnées (r : coefficient de corrélation).

	Superficie (km <sup>2</sup> )	Nombre d' années	Pluie Moyenne P (mm)	Pluie Nette PN (mm)	Écoulement R (mm)	σ <sub>PN</sub>	σ <sub>R</sub>	r
<i>GUINEE</i>								
TINKISSO à Tinkisso	6 370	30	1 529	724	400	174	133	.87
NIGER à Tiguibery	67 600	30	1 649	786	515	124	130	.87
NIGER à Kouroussa	16 560	30	1 665	772	460	144	108	.77
MILO à Kankan	9 620	30	1 877	958	652	177	144	.80
KONKOURE au Pont de Téliélé	10 250	30	2 017	1 261	1 063	260	267	.87
KOLBENTE à Badéra	2 750	15	2 005	1 123	839	226	250	.81
<i>TOGO - BENIN</i>								
KARA à Lama-Kara	1 560	25	1 470	574	479	169	217	.85
OTI à Mango	35 650	21	1 000	306	121	71	50	.88
ALIBORI à Route de Kandi-Banikoara	8 150	21	1 150	385	149	100	69	.83
MONO à Corrékopé	9 952	24	1 240	433	179	163	102	.93
OUENE au Pont de Savé	23 600	29	1 200	404	171	161	100	.94
SIO à Kpédji	1 812	22	1 220	322	132	138	99	.93
ZOU au Pont d'Atchérigbé	6 950	19	1 170	298	117	111	83	.90

## 2. MÉTHODE DU BILAN HYDROLOGIQUE SOUS UN CLIMAT DE MOUSSON

Dans une région où les précipitations sont concentrées sur une courte saison et où l'on peut admettre que, pendant toute cette période, les précipitations sont supérieures à l'évaporation potentielle, l'on peut simplifier le

bilan hydrologique annuel en considérant le cycle saisonnier comme une seule période d'excédent d'eau pendant la saison des pluies et une seule période de déficit pendant le reste de l'année. Sous un tel climat, les précipitations mensuelles sont généralement supérieures à l'évapotranspiration potentielle pendant quatre mois successifs, ou plus, et l'évaporation réelle peut être considérée comme très proche du taux potentiel; pendant le reste de l'année, l'évapotranspiration potentielle est supérieure aux précipitations sauf de temps en temps pendant un mois exceptionnel.

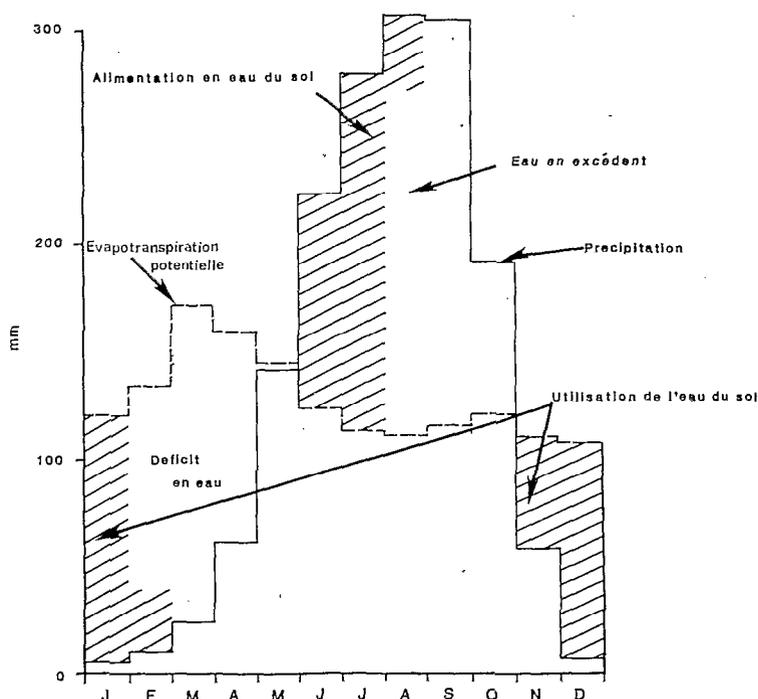


FIG. 1. - Schéma saisonnier type.

Le bilan d'une année moyenne est illustré à la figure 1, qui montre la période excédentaire et la période déficitaire qui le suit. En simplifiant les phénomènes qui dans la réalité physique sont un peu plus complexes, on peut admettre que la recharge en eau du sol au début de la saison des pluies et son épuisement à la fin de ladite saison peuvent être compris comme sur la figure 1, et la quantité d'alimentation en eau du sol doit, bien évidemment, être égale à celle de l'épuisement ultérieur. Sous un tel climat, la capacité de stockage en eau du sol étant généralement à saturation à la fin de la saison des pluies et correspondant au point de flétrissement pendant la saison sèche, la recharge en eau annuelle du sol amènera le stockage du point de flétrissement à la capacité au champ sur toute la profondeur du système de racines. Cette recharge annuelle en eau du sol devrait être à peu près constante d'une année à l'autre en l'absence de modifications du couvert végétal et peut être considérée comme une première ponction sur les précipitations nettes.

Si l'on accepte que, dans une zone soumise à une seule saison des pluies prononcée, l'alimentation en eau du sol représente une ponction fixe sur les précipitations nettes, l'évapotranspiration potentielle étant déjà déduite, il est possible d'en déduire la quantité en comparant les précipitations saisonnières nettes à l'écoulement annuel, comme indiqué à la figure 2. Supposons qu'une quantité importante de la recharge de la nappe phréatique n'évite pas la station de jaugeage, l'écoulement en fonction des précipitations serait représenté par une droite à 45° à une distance de la courbe  $y = x$  égale à la quantité de l'alimentation annuelle.

Cette méthode s'applique le plus facilement à un bassin où le couvert végétal est assez homogène, car la profondeur du système de racines et, par là-même, l'alimentation en eau du sol et l'évaporation réelle devraient y être uniformes. Si l'on veut utiliser cette méthode pour calculer l'écoulement aux sites non jaugeés, il est également souhaitable que la végétation et les sols soient relativement uniformes sur toute la région. Toutefois, la succession de saisons humides et sèches prononcées tend à produire une végétation boisée ou broussailleuse à feuilles caduques dont la chute a lieu vers la fin de la saison sèche.

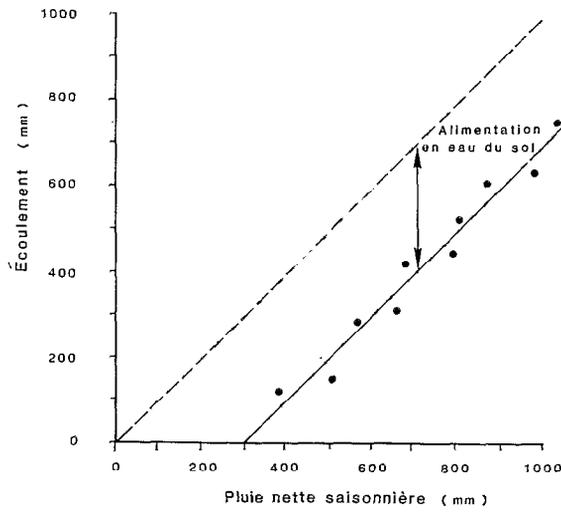


FIG. 2. - Comparaison schématique de l'écoulement annuel et de la pluie nette saisonnière.

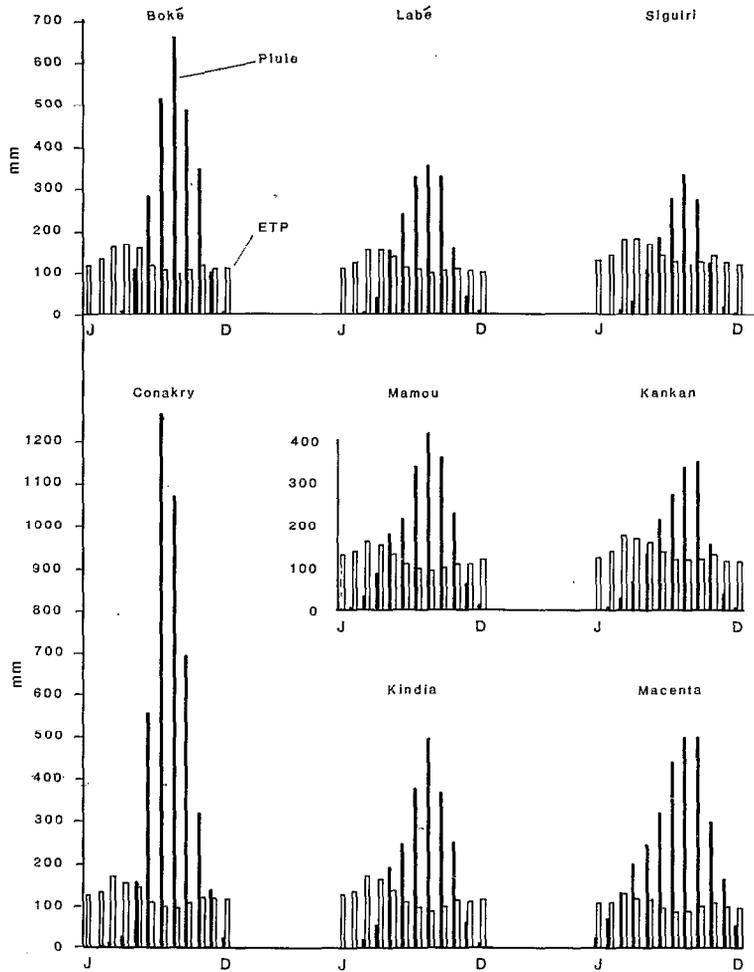


FIG. 3. - Précipitations moyennes mensuelles (P) et évapotranspiration potentielle (ETP). Guinée.

## 3. PRÉCIPITATIONS DANS LES RÉGIONS DE L'ÉTUDE

On dispose, aussi bien pour la Guinée que pour le Togo-Bénin, d'un certain nombre de chroniques de précipitations qui ont servi de base au calcul des moyennes pour les années 1951-1980. Lesdites moyennes peuvent être exprimées sous la forme d'histogrammes des répartitions mensuelles sélectionnées (fig. 3 et 4) et utilisées pour l'établissement des cartes d'isohyètes (fig. 5.1 et 5.2) concernant respectivement les précipitations totales et les précipitations nettes. Les histogrammes mensuels révèlent que la répartition saisonnière des précipitations est relativement uniforme en Guinée, quoique la pointe de la saison des pluies survienne avec un léger retard dans le nord-est ; l'extrême sud-est de la Guinée forestière – où la saison des pluies prolongée permet le développement de la forêt tropicale humide et où l'évapotranspiration a lieu pendant toute l'année – fait exception à cette règle. Par ailleurs, les précipitations totales illustrées par la carte des isohyètes (fig. 5.1) varient de 4 000 mm sur le littoral à environ 1 300 mm à l'endroit où le fleuve Niger pénètre au Mali.

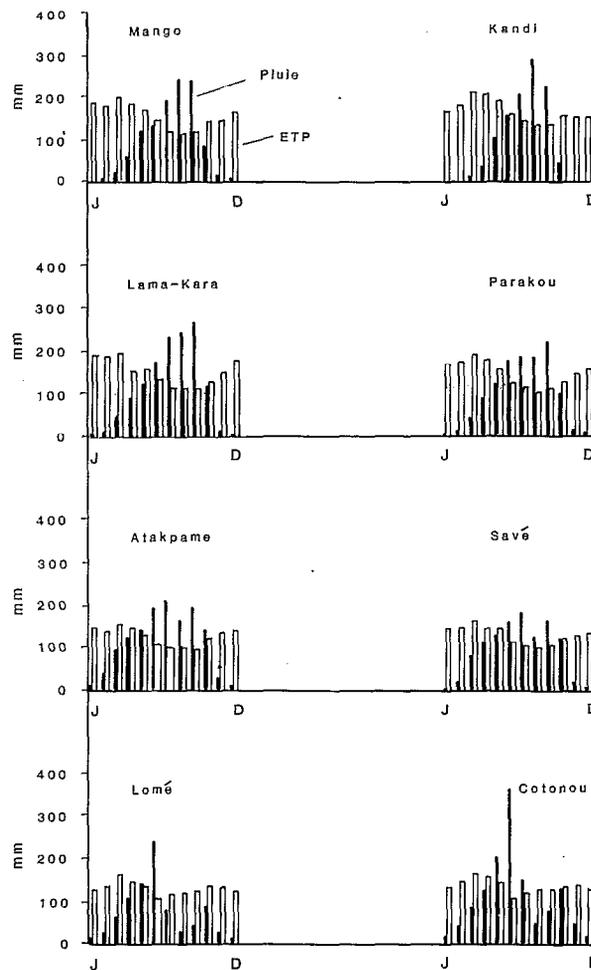


FIG. 4. – Précipitations moyennes mensuelles (P) et évapotranspiration potentielle (ETP). Togo-Bénin.

Au Togo et au Bénin, pour leur part, les précipitations totales (fig. 6.1) ne varient qu'entre 1 600 mm et 900 mm, les précipitations les plus fortes étant relevées en altitude, à proximité d'Atakpamé et de Lama-Kara. Toutefois, la répartition saisonnière des précipitations n'est pas uniforme et présente des différences prononcées entre le nord et le sud. La saison des pluies unique de la partie septentrionale de la région cède la place à une tendance bimodale marquée par des précipitations maximales en juin et en octobre. Les relevés d'années individuelles révèlent plus clairement cette tendance bimodale ainsi que la période relativement sèche vers le mois d'août.

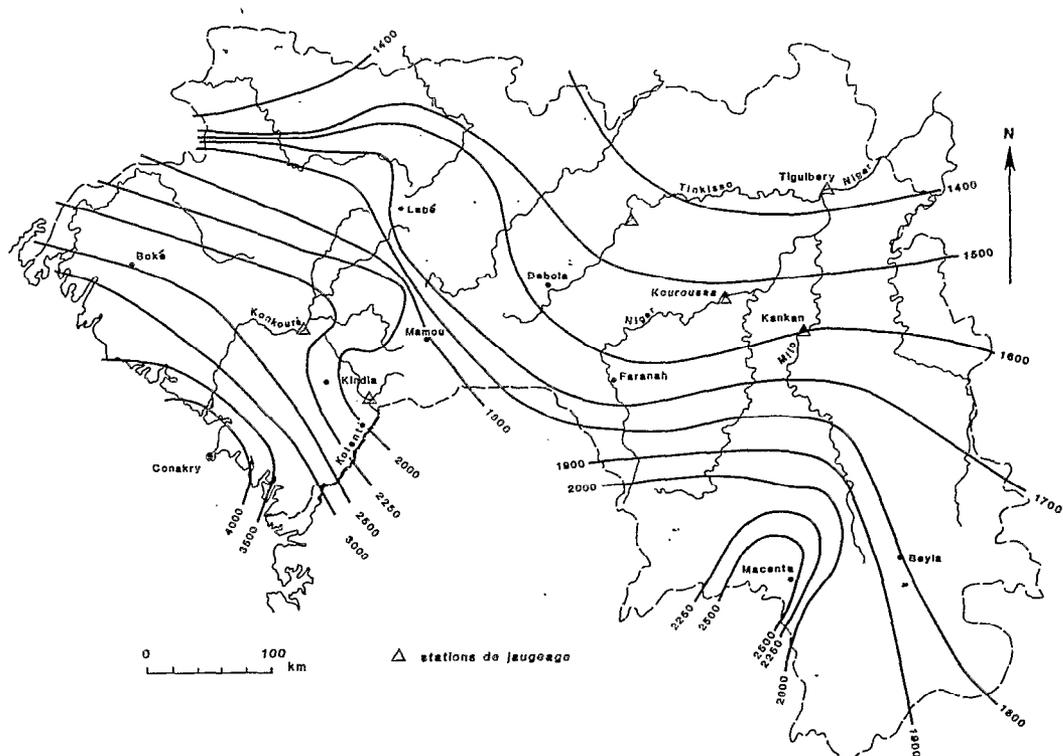


FIG. 5.1. - Précipitations moyennes annuelles : 1951-80. Guinée (mm).

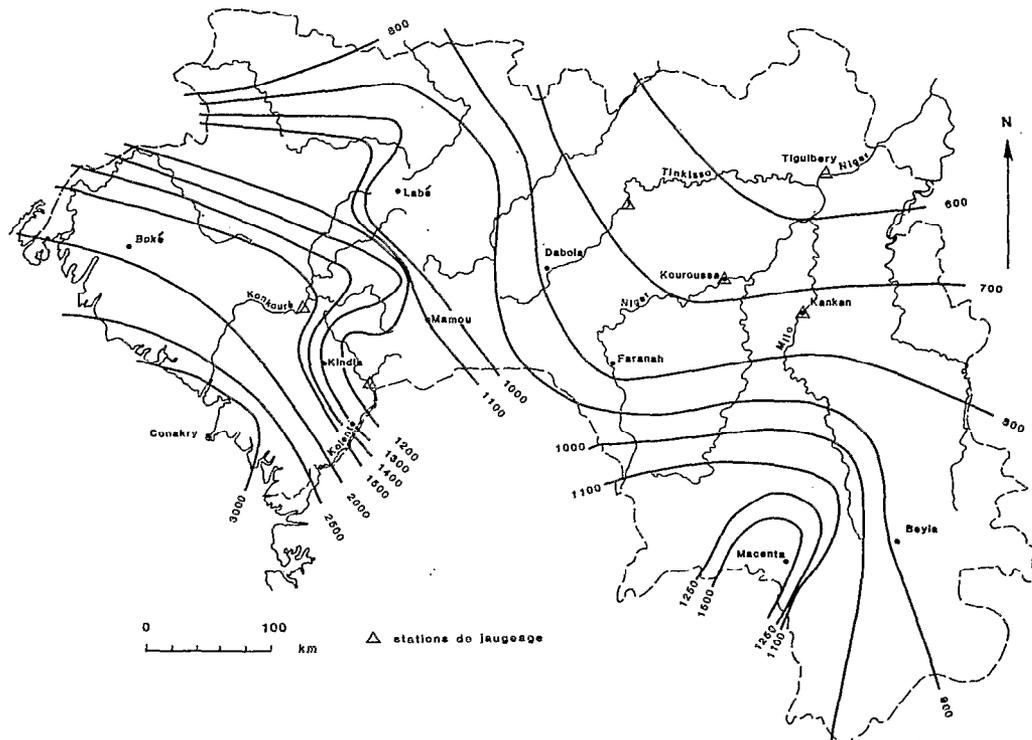
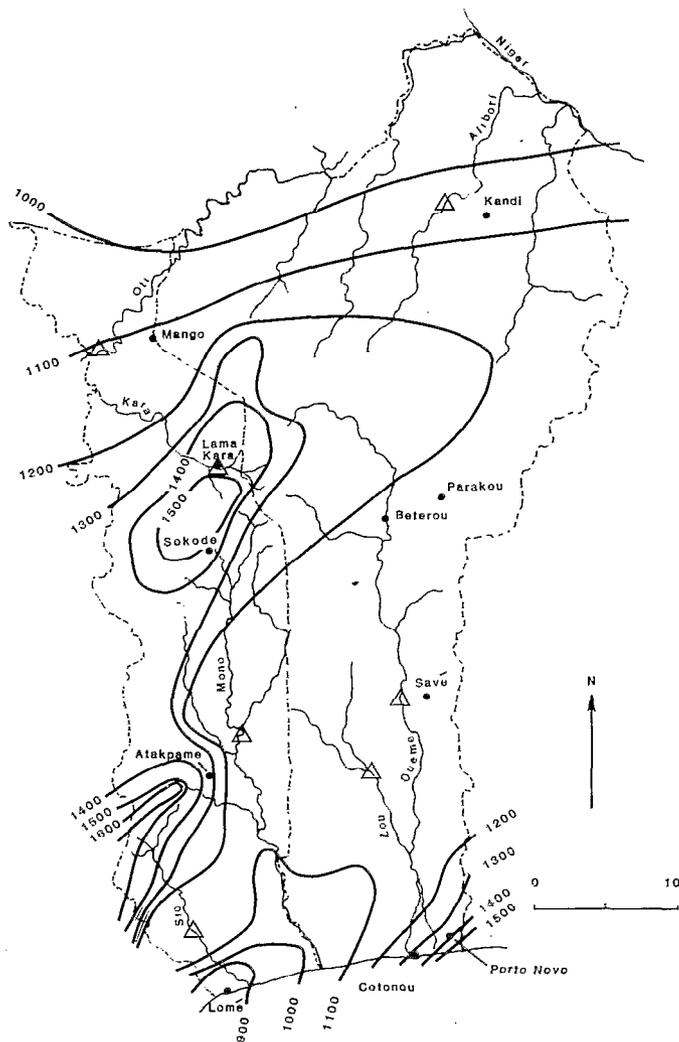
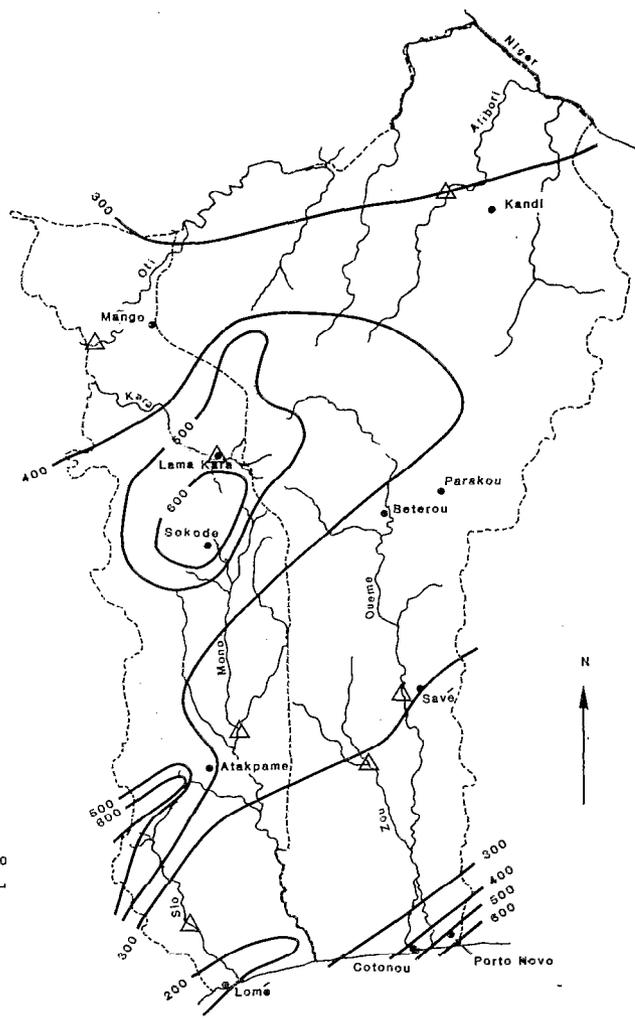


FIG. 5.2. - Précipitations nettes moyennes annuelles : 1951-80. Guinée (mm).



△ stations de jaugeage

FIG. 6.1. - Précipitations moyennes annuelles : 1951-80. Togo-Bénin (mm).



△ stations de jaugeage

FIG. 6.2. - Précipitations nettes moyennes annuelles : 1951-80. Togo-Bénin (mm).

La combinaison des cartes des isohyètes et des histogrammes des précipitations révèle le contraste entre, d'une part, la répartition saisonnière presque constante et l'extrême variation de la moyenne annuelle en Guinée et, d'autre part, les précipitations totales moins variables et la répartition saisonnière variable du nord au sud au Togo et au Bénin.

Les totaux mensuels et annuels individuels sont nécessaires pour donner aux variations une dimension temporelle. Ceux-ci peuvent être comparés aux mesures de l'écoulement. La comparaison des tendances des variations sur la région démontre que les enregistrements locaux doivent être analysés pour reproduire les variations des précipitations.

## 4. PRÉCIPITATIONS NETTES

Le ruissellement étant lié au bilan des précipitations et de l'évaporation, la différence entre ces deux paramètres, ou précipitations nettes, a été calculée pour chaque station sur une base mensuelle pour toute la période d'enregistrement. Cet exercice avait pour objectif d'établir, pour chaque station et pour chaque année d'enregistrement, l'excédent saisonnier des précipitations par rapport à l'évapotranspiration potentielle qui constitue le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour le ruissellement.

L'évapotranspiration potentielle moyenne a été calculée pour chaque mois du calendrier à un certain nombre de stations météorologiques. La méthode d'estimation de PENMAN, qui utilise les relevés des températures et humidités minimales et maximales de l'air, des heures d'ensoleillement et de la vitesse du vent, a été adoptée. Cette évapotranspiration potentielle moyenne est comparée aux précipitations moyennes mois par mois aux figures 3 et 4 qui montrent comment sont réduites la période et la quantité des surplus de précipitations.

Pour chaque station et pour chaque mois de relevés, l'évapotranspiration potentielle à la station la plus proche, pour laquelle on disposait d'estimations, a été soustraite des précipitations ; le résultat représente les précipitations nettes. Le chiffre utilisé pour l'évapotranspiration correspondait à la moyenne du mois calendaire, les variations d'une année à l'autre étant relativement faibles. Lorsque, dans un mois donné, les précipitations étaient inférieures à l'évapotranspiration potentielle, les précipitations nettes ont été prises comme étant égales à zéro.

Ces précipitations nettes ont été calculées pour chaque station et pour chaque mois de la période type 1951-1980. Les moyennes mensuelles et annuelles ont été calculées pour permettre l'élaboration des cartes d'isohyètes des précipitations nettes (fig. 5.2 et 6.2) qui donnent une indication de l'écoulement potentiel moyen des zones à l'étude. Dans les régions où les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle, soit pendant toute l'année, soit pendant la majeure partie de l'année – exception faite d'une courte saison – l'évapotranspiration devrait se maintenir au taux potentiel et l'écoulement devrait être égal aux précipitations nettes.

Dans les régions étudiées où il existe une saison sèche prononcée et où le bilan hydrologique annuel peut être simplifié, en traitant le cycle saisonnier comme une seule période de surplus d'eau pendant la saison des pluies et une seule période de déficit pendant le reste de l'année, les précipitations nettes devraient être égales à la somme du ruissellement et de l'alimentation annuelle en eau du sol. La figure 7 illustre le rapport entre les précipitations

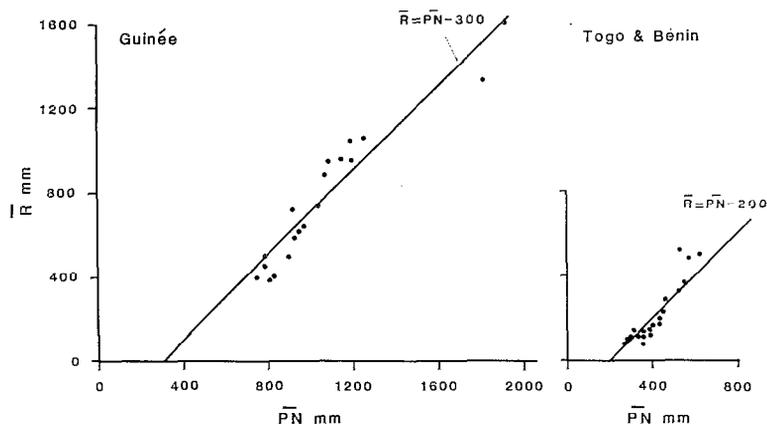


FIG. 7. – Rapport écoulement moyen annuel ( $\bar{R}$ ) et précipitation nette moyenne ( $\bar{PN}$ ). Stations en Guinée et au Togo-Bénin.

nettes moyennes établies d'après les cartes et l'écoulement moyen mesuré aux stations qui existent dans les deux zones, et démontre qu'il est possible d'utiliser les cartes des précipitations nettes pour établir les estimations régionales de l'écoulement. Les relevés des vingt stations de jaugeages en Guinée correspondent à  $\bar{R} = \bar{PN} - 300$  alors que la droite de  $\bar{R}' = \bar{PN} - 200$  représente la plupart des vingt-huit stations au Togo-Bénin.

### 5. VARIABILITÉ DE L'ÉCOULEMENT EN FONCTION DES PRÉCIPITATIONS NETTES

A de nombreuses fins, la variabilité de l'écoulement annuel, particulièrement lorsqu'il descend au-dessous de la moyenne, est aussi importante que l'écoulement moyen. Le concept des précipitations saisonnières nettes est donc utile s'il donne les moyens d'estimer l'écoulement pour chaque année individuelle. D'après la déduction selon laquelle la recharge saisonnière en eau du sol est constante d'une année à l'autre, le rapport entre l'écoulement annuel (R) et les précipitations saisonnières nettes (PN) devrait se présenter selon la formule  $R = PN - S$ , où S représente l'alimentation annuelle constante en eau du sol, cela si les précipitations, l'évaporation et l'écoulement sont correctement mesurés ou estimés.

Cette formule a été essayée pour toutes les stations de jaugeage des deux régions pour lesquelles on disposait de mesures adéquates des débits.

Les précipitations mensuelles et annuelles nettes sur le bassin de chaque station de jaugeage ont été estimées, à l'aide de la méthode du percentile, d'après les relevés de toutes les stations pluviométriques du bassin.

$$P_i = \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{PN_{ij}}{\overline{PN}_j} \right) \times \overline{PN}$$

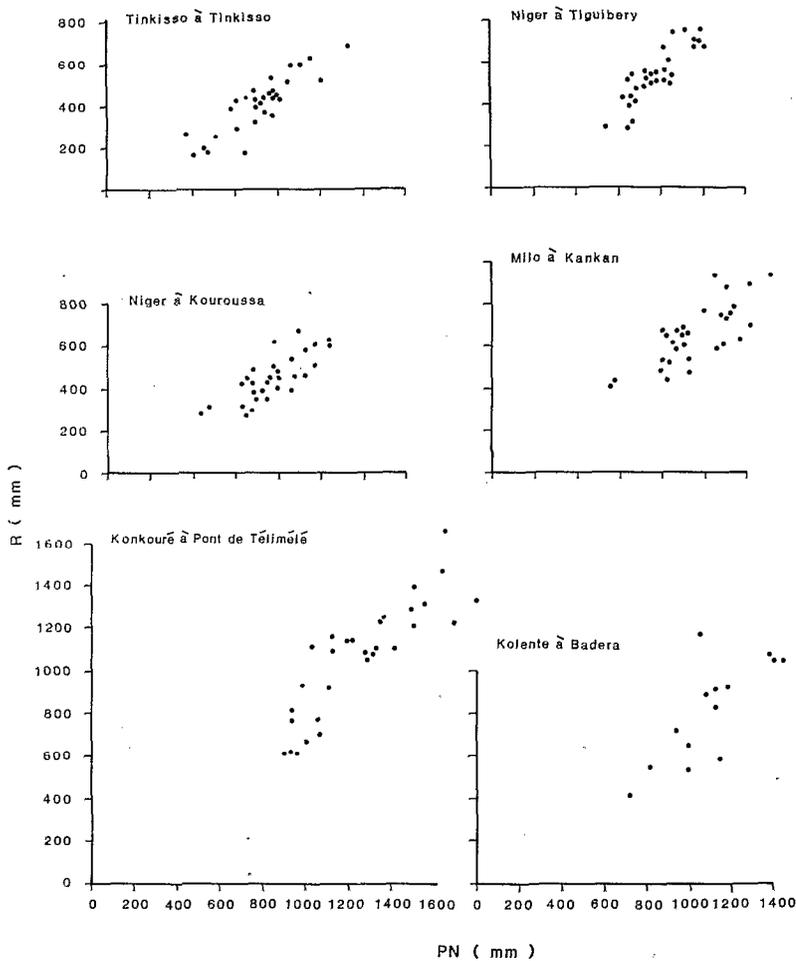


FIG. 8. - Écoulement (R) et précipitation nette (PN). Valeurs annuelles. Guinée.

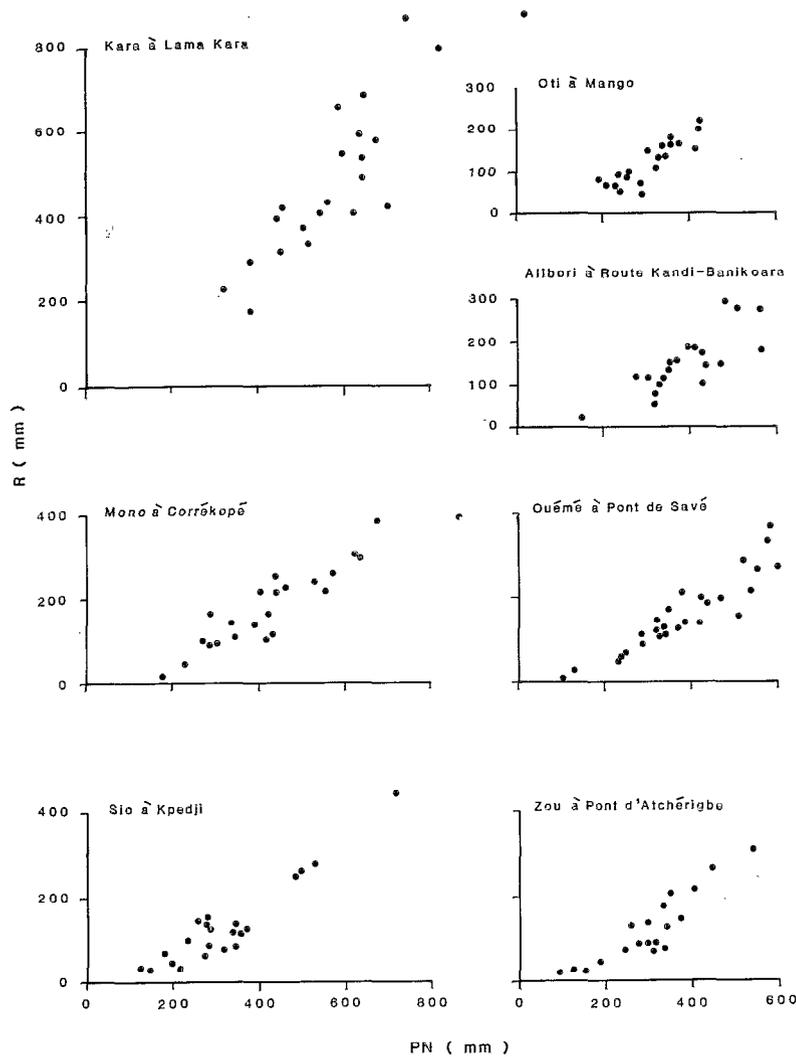


FIG. 9. — Écoulement (R) et précipitation nette (PN). Valeurs annuelles. Togo-Bénin.

où  $PN_{ij}$  = les précipitations nettes à la station  $j$  pendant l'année  $i$ ,  
 $\overline{PN}_j$  = la moyenne à long terme à la station  $j$   
 et  $\overline{PN}$  = la moyenne à long terme pour le bassin.

Cette méthode a pour avantage de s'adapter aisément à une situation qui voit un changement annuel du réseau de stations pluviométriques en service. La précision de l'estimation de la pluviométrie moyenne du bassin dépend évidemment du nombre de stations disponibles. Cette procédure a été adoptée pour les bassins de toutes les stations de jaugeage pour chacune des années 1951 à 1980.

A chaque station, et pour toutes les années d'observation de débits, l'écoulement annuel en mm sur le bassin est comparé aux précipitations annuelles nettes des années correspondantes dans une série de diagrammes. Les stations de jaugeages indiquées au figures 5 et 6 sont les exemples illustrés aux figures 8 et 9. Ce sont ceux pour lesquels on dispose d'un nombre suffisant d'années d'observation et où il y a assez de stations pluviométriques pour permettre l'estimation adéquate des précipitations sur le bassin.

Les figures révèlent que, en Guinée, les points rapportés correspondent assez bien à une droite à 45°, soit à la formule  $R = PN - S$ . Sur la plus grande partie du territoire de la Guinée,  $S$ , la recharge annuelle en eau

du sol, atteint 300 mm en moyenne quoiqu'elle soit quelque peu inférieure dans les régions de plus haute altitude de la moyenne Guinée et de la Guinée forestière. Ces résultats sont résumés à la figure 10 a qui indique que  $\sigma(R) \cong \sigma(PN)$ .

Au Togo-Bénin, par ailleurs, on constate un assez bon rapport entre les précipitations et le ruissellement, mais ce n'est que dans le nord-ouest, aux environs de Lama-Kara, que ce rapport est conforme à la formule  $R = PN - S$ , où la recharge en eau du sol  $S \cong 200$  mm. Dans le reste de la région, la variabilité annuelle à l'écoulement est inférieure à celle des précipitations nettes (fig. 10b) et le rapport annuel correspond mieux à la formule  $R = 0,6 PN - \text{constante}$ . Autrement dit, le concept selon lequel les précipitations nettes servent tout d'abord à alimenter le sol en eau en fonction d'une quantité constante, puis donnent lieu au ruissellement, qui est valable en Guinée, ne l'est pas sur la majeure partie du territoire du Togo et du Bénin.

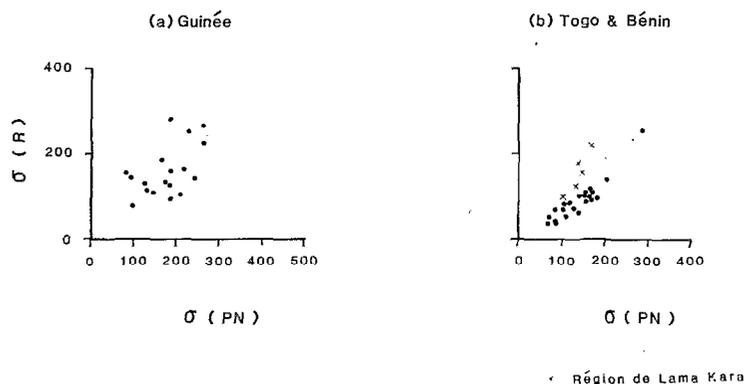


FIG. 10. -  $\sigma(R)$  v  $\sigma(PN)$ , stations en Guinée et au Togo-Bénin.

Ainsi, tandis qu'en Guinée on a pu déterminer les débits annuels en soustrayant tout simplement du total saisonnier des précipitations nettes, une quantité fixe correspondant à la recharge en eau du sol, ce même procédé ne fournirait pas une série réaliste de l'écoulement au Togo et au Bénin. Ici, il a fallu étendre les débits fluviaux à l'aide des relevés à long terme des précipitations en développant des modèles de régression qui mettent en rapport le débit fluvial mensuel, exprimé en lame d'eau écoulée sur le bassin, avec le débit du mois précédent et les précipitations nettes du mois en cours et du mois précédent.

Il est intéressant de se demander pourquoi la variabilité du ruissellement est inférieure à celle des précipitations nettes au Togo et au Bénin ou, autrement dit, pourquoi les pertes augmentent-elles pendant les années humides. Les principales différences entre les deux régions résident dans les précipitations plus faibles et la répartition bimodale des précipitations sur la majeure partie du territoire du Togo et celui du Bénin, qui se remarque particulièrement bien au cours des années individuelles. Lorsque deux périodes distinctes de précipitations sont séparées par une période plus sèche, l'on peut s'attendre à ce que l'évaporation se poursuive plus ou moins au taux potentiel pendant l'arrêt des précipitations au cours d'une année humide et à ce qu'elle descende au-dessous du taux d'évaporation potentiel au cours de la période sèche intermédiaire plus prononcée pendant les années marquées par des précipitations totales inférieures à la moyenne. D'où, l'évaporation réelle serait plus grande pendant les années humides dans les régions qui subissent une distribution bimodale. Cette différence entre le comportement d'une région subissant une seule saison des pluies bien définie et celui d'une région qui tend à subir deux saisons des pluies met en relief la simplification apportée à la méthode du bilan hydrologique par la concentration des précipitations annuelles sur une courte saison unique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 15.5.1986

## BIBLIOGRAPHIE

- SUTCLIFFE (J.V.), AGRAWAL (R.P.), TUCKER (J.M.), 1981. - The water balance of the Betwa Basin. India. *Hydr. Sci. Bull.*, 26 : 149-158.  
 TOMSON (H.R.), 1985. - Hydroelectric resource studies in Togo and Benin. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 1*, 78 : 1403-1420.