

Indice des précipitations antérieures et prédiction des crues au Sahel

Luc SEGUIS ⁽¹⁾

RÉSUMÉ

Une statistique de l'« Indice des Précipitations Antérieures » (IPA) est menée sur cinq chroniques pluviométriques journalières du Sahel. Sa dépendance vis-à-vis de la hauteur et de la date de la précipitation associée est soulignée. Puis, à travers les données disponibles d'une vingtaine de petits bassins sahéliens, l'auteur dégage une fonction de prédiction multilinéaire de l'écoulement journalier à partir de la lame précipitée journalière et de IPA correspondant. Il est cependant montré le faible rôle de cet indice dans la prédiction.

MOTS-CLÉS : Indice des précipitations antérieures – Sahel – Fonction de production.

ABSTRACT

ANTECEDENT PRECIPITATION INDEX AND FLOOD PREDICTION IN SAHEL

A statistical study of the « Antecedent Precipitation Index » (API) is carried out on five Sahelian daily rainfall series. Its dependence on the magnitude and the date of the associated rainfall is shown.

There after, through the available data for about twenty Sahelian catchments, the author draws a multilinear prediction model for daily runoff from daily rainfall and corresponding API. Nevertheless, the weakness of this index as a predictor is shown.

KEY WORDS : Antecedent Precipitation Index – Sahel – Yield function.

INTRODUCTION

Depuis une trentaine d'années, des hydrologues de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) ont équipé et étudié de petits bassins versants (inférieurs à 100 km²) au Sahel. La masse de données acquises a permis progressivement d'établir des synthèses relatives à l'estimation des débits de crues décennales pour de petits bassins (RODIER et AUVRAY, 1965) et à l'évaluation de l'écoulement annuel (RODIER, 1975). En ce qui concerne l'événement averse-crue des relations graphiques (méthode des déviations résiduelles, cf. BRUNET-MORET, 1965) furent établies dans le passé, entre lame écoulee journalière, lame précipitée journalière sur le bassin et un « Indice des Précipitations Antérieures » (IPA) pouvant revêtir de multiples formes (CHEVALLIER, 1983). Plus récemment, à travers les expérimentations au minisimulateur de pluie (CASENAVE, 1982), une méthode de prédiction de la lame écoulee journalière en fonction des mêmes facteurs explicatifs a été mise au point par CHEVALLIER (1982) puis ALBERCEL et TOURI (1982).

Ces méthodes ayant pour point commun de faire appel à un IPA qui sous les climats tempérés de la France (CEMAGREF, 1982) est apparu comme un élément mineur dans la prédiction des lames écoulées, il convenait d'apporter précisions et justifications quant à l'utilisation de cet indice au Sahel. Des résultats ont été obtenus en recherchant une fonction de production journalière (lame précipitée – lame écoulee) à partir des données recueillies

1) Hydrologue, Centre ORSTOM de Lomé, BP 375, Togo.

sur petits bassins (SEGUIS, 1986). Ces résultats sont de deux ordres. Ils visent tout d'abord à caractériser IPA en tant que variable définie par rapport au régime des précipitations dont il est issu. Ils montrent, ensuite, la nature et le rôle de cet IPA à travers les fonctions de production obtenues.

1. DISTRIBUTION DE L'«INDICE DES PRÉCIPITATIONS ANTÉRIEURES » AU SAHEL

Comme énoncé en introduction, les IPA ont souvent été utilisés dans des modèles simples de prédiction des crues. Ainsi, par définition (RODIER et RIBSTEIN, 1986), « une » lame écoulée décennale est obtenue à partir d'une lame précipitée décennale tombant sur un sol aux conditions d'humectation moyennes. IPA caractéristique de ces conditions est souvent obtenu en recherchant IPA moyen du milieu de la saison des pluies. Par abus de langage, cet IPA était dit médian. Il nous a donc paru utile d'analyser plus à fond sur un plan statistique le comportement de la variable IPA en fonction de sa définition. Puis, on a étudié la liaison hauteur précipitée journalière-IPA et la distribution temporelle des IPA au Sahel.

1.1. RAPPEL DES FORMES DE IPA ÉTUDIÉES

Nous reprenons la forme la plus fréquemment rencontrée et définie par KOHLER et LINDSEY (1951) :

$$IPA_i = (IPA_{i-1} + P_{i-1})k^{\frac{t}{T}}$$

avec IPA_{i-1} et IPA_i « Indices des Précipitations Antérieures » (dimension : L) avant les lames précipitées P_i et P_{i-1}

t intervalle de temps entre $i-1$ et i

T base de temps permettant de rendre adimensionnel le coefficient de décroissance k.

k est pris égal à 0,61, valeur utilisée arbitrairement dans les expérimentations au minisimulateur de pluie au Sahel, ou à 0,90, valeur utilisée, sous climat équivalent, dans le Nordeste brésilien (CADIER, 1984) ou même sous climat tempéré, aux États-Unis (SAXTON *et al.* 1967).

1.2. CONSTITUTION DE L'ÉCHANTILLON

Pour augmenter la taille des échantillons, nous avons appliqué aux IPA la méthode des stations années (utilisée par ROCHE (1963) sur les précipitations journalières). Cette méthode consiste à regrouper les IPA obtenus sur plusieurs postes pluviométriques comme si ils avaient été calculés au même poste. Les IPA sont calculés avant chaque précipitation.

Le critère de regroupement des stations a été la précipitation médiane interannuelle avec comme hypothèse sous-jacente que pour une même précipitation médiane interannuelle, les hauteurs et la répartition temporelle des événements pluvieux étaient identiques au Sahel.

Les stations choisies sont :

STATION		Années d'exploitation	
MANGA (BURKINA FASO)	11°40N - 01°06W)	1949 à 1951	1953 à 1982
BOUSSO météo (TCHAD)	10°29N - 16°43E)	1946 à 1948	1950 à 1951
GOROM (BURKINA FASO)	14°27N - 00°14W)	1956 à 1983	
FILINGUE (NIGER)	14°21N - 00°03E)	1932 à 1967	1970 à 1979
BOUZA (NIGER)	14°25N - 06°03E)	1955 à 1979	
ABECHE (TCHAD)	13°51N - 20°41E)	1948 à 1978	

Les IPA des deux premières stations, de précipitations médianes interannuelles comprises entre 850 et 900 mm, forment la station année « 875 ». Les IPA des quatre suivantes, de précipitations médianes interannuelles comprises entre 400 et 450 mm, forment la station année « 425 ».

Les coefficients de détermination interstations des précipitations journalières (cf. tableau I), montrent l'indépendance des données aux postes pluviométriques, et justifient donc le regroupement des stations.

TABLEAU I
Coefficients de détermination interstation des précipitations journalières

STATIONS	r^2
MANGA - BOUSSO météo	0,15
GOROM - ABECHE	0,15
GOROM - FILINGUE	0,18
GOROM - BOUZA	0,17
FILINGUE - BOUZA	0,27
FILINGUE - ABECHE	0,15
BOUZA - ABECHE	0,18

1.3. LIAISON IPA – HAUTEUR PRÉCIPITÉE JOURNALIÈRE

Nous avons reporté sur les graphes 1 et 2 les IPA obtenus avec un coefficient de décroissance k égal à 0,61 en fonction des hauteurs précipitées journalières associées pour les 2 stations années.

On observe une décroissance des valeurs les plus fortes de IPA avec l'augmentation des hauteurs précipitées journalières : les forts IPA sont la conséquence de fortes précipitations qui sont statistiquement rarement consécutives.

Observer conjointement un IPA important et une forte précipitation est très exceptionnel.

1.4. DISTRIBUTION DES IPA

Du fait de la dépendance IPA – hauteur précipitée journalière, les échantillons d'IPA de chaque station année sont définis par classes de précipitation (cf. fig. 1 et 2).

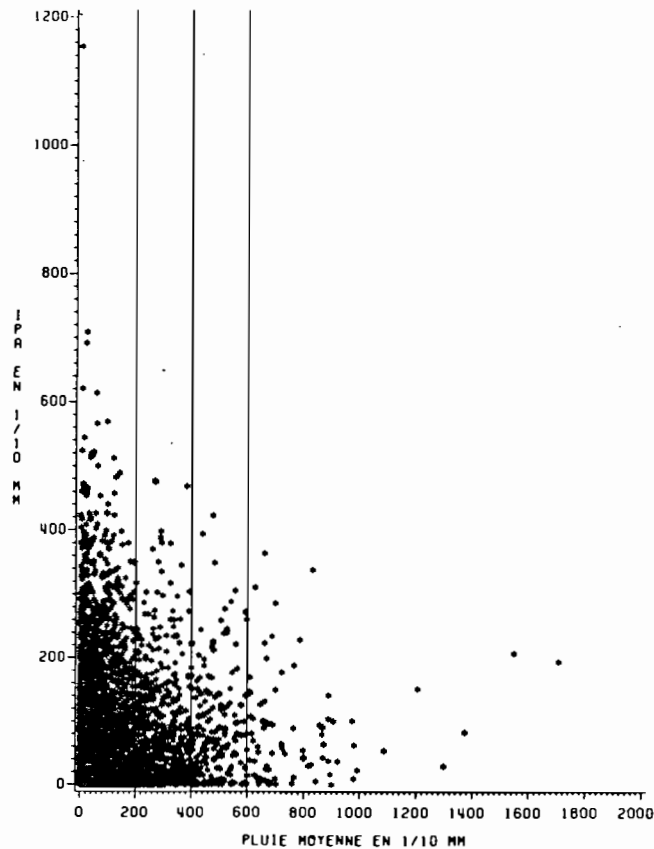


Fig. 1. – Station année « 875 »

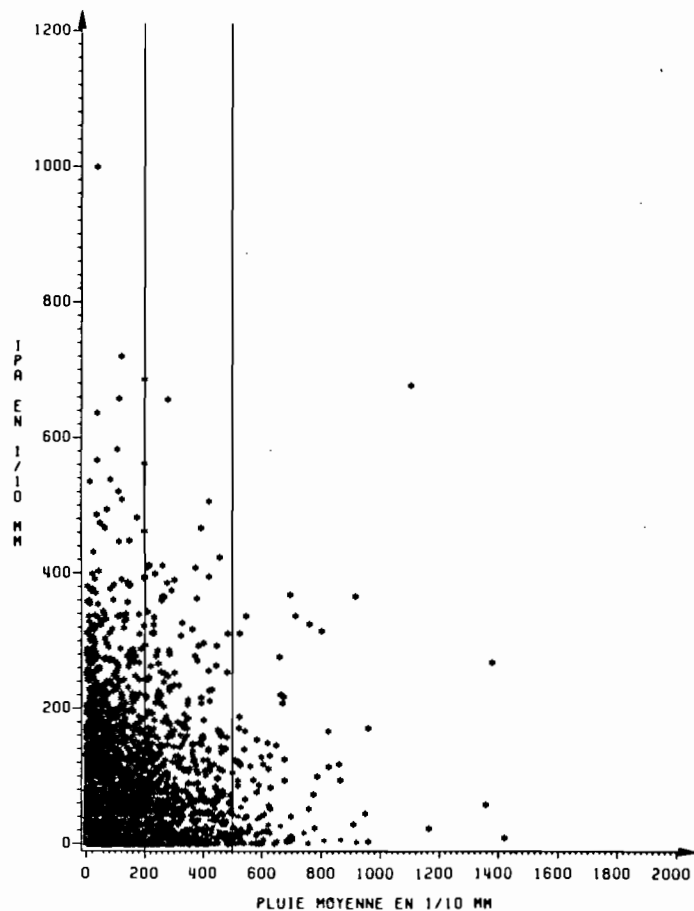


Fig. 2. - Station année « 425 »

L'ajustement se fait sur une loi exponentielle tronquée avec troncature (BRUNET-MORET, 1974) et d'expression :

$$F(\text{IPA} > x) = (1 - F_0) \exp - \left(\frac{x}{s}\right)^{1/\delta}$$

δ est le paramètre de forme

s est le paramètre d'échelle

F_0 est le paramètre de troncature. Il est assimilable, physiquement, à la probabilité au non dépassement de 0. Mais les techniques d'ajustement peuvent conduire à des valeurs négatives.

Enfin, l'ajustement est calculé sur l'échantillon de IPA supérieurs au seuil de troncature, défini comme paramètre de calage.

En fonction des classes de précipitations établies sur les figures 1 et 2, nous avons obtenu les paramètres d'ajustement consignés dans les tableaux II et III.

TABLEAU II
Ajustement des IPA ($k = 0,61$) par classe de précipitation de la station année « 875 »

Classe de précipit.	Seuil (mm)	δ	s	F_0	Nbre de IPA	IPA >seuil
0-20	1,2	1,0888	3,4817	0,1167	3333	2494
20-40	1,2	1,0364	7,4436	0,0956	648	497
40-60	1,2	0,8822	9,5227	0,0942	198	163
60 et +	1,2	0,8864	9,6507	0,1227	84	67

TABLEAU III
Ajustements des IPA ($k = 0,61$) par classe de précipitation de la station année « 425 »

Classe de précipit. (mm)	Seuil (mm)	δ	s	Fo	Nbre de IPA	IPA >seuil
0-20	0,9	1,2281	5,8414	0,2029	3751	2404
20-50	1,2	1,2788	6,3734	0,0847	904	631
50 et +	0,6	1,2996	7,4238	0,0575	114	93

Par un test du X^2 (au seuil de 5 %), l'hypothèse nulle suivante : « les lois obtenues sur les échantillons de IPA de la station année « 875 » sont applicables à ceux de la station années « 425 » » a toujours été rejetée. Ceci a permis de vérifier l'inadéquation des lois d'une station sur l'autre station année.

Nous donnons dans les tableaux IV et V quelques quantiles obtenus à partir des ajustements précédents.

TABLEAU IV
Quantiles de IPA ($k = 0,61$) à la station année « 875 »

Classe de précipitation (mm)	médiane	1 jour/10ans
0 - 20	4,6	61,0
20 - 40	4,5	37,3
40 - 60	6,0	27,8
60 et +	5,8	21,5

TABLEAU V
Quantiles de IPA ($k = 0,61$) à la station année « 425 »

Classe de précipitation (mm)	médiane	1 jour/10ans
0 - 20	2,3	46,6
20 - 50	3,3	36,6
50 et +	4,1	19,6

Pour chacun des tableaux IV et V, nous vérifions la liaison importante entre IPA avant l'averse et hauteur précipitée : plus la précipitation est forte, plus IPA décennal correspondant est faible.

De ces tableaux, nous dégagons également l'homogénéité des distributions des IPA avec les distributions des précipitations journalières en des stations situées sur des isohyètes différentes.

Des résultats analogues (SEGUI, 1986) ont été obtenus pour des IPA calculés en fonction d'un coefficient de décroissance k de 0,90.

D'autre part, comme statistiquement les averses importantes se produisent au cœur de la saison des pluies (mi-juillet, fin août), les distributions des IPA ont une forte variation saisonnière.

Ceci est mis en évidence dans les tableaux VI et VII où les quantiles choisis ont été calculés sur des échantillons de IPA associés aux précipitations d'une classe de hauteurs et d'une période données. Pour ne pas réduire trop les échantillons, nous n'avons distingué, arbitrairement, que deux périodes : le corps de la saison des pluies (du 15 juillet au 31 août) et les débuts et fins de saison regroupés (appelés « bords »).

En conclusion, il ressort de cette étude statistique, que toute notion de récurrence pour IPA n'est envisageable qu'en terme de probabilité conditionnelle, en hauteur et en date, vis-à-vis des précipitations associées.

TABLEAU VI

Quantiles de IPA ($k = 0,61$) en fonction de la hauteur et de la date de la précipitation associée, à la station année « 875 »

Classe de précipitation (mm)		médiane	1 jour/10 ans
0-20	Corps	9,2	56,5
	Bords	3,5	48,5
20-40	Corps	8,4	35,0
	Bords	2,8	25,6
40-60	Corps	8,3	25,3
	Bords	4,1	20,5
60 et +	Corps	7,4	20,2
	Bords	4,0	11,4

TABLEAU VII

Quantiles de IPA ($k = 0,61$) en fonction de la hauteur et de la date de la précipitation associée, à la station année « 425 »

Classe de précipitation (mm)		médiane	1 jour/10 ans
0-20	Corps	5,6	44,2
	Bords	0,9	27,7
20-50	Corps	5,4	37,4
	Bords	1,4	17,7
50 et +	Corps	5,9	19,8
	Bords	1,2	1,3

2. IPA ET FONCTIONS DE PRODUCTION OBTENUES SUR UN ÉCHANTILLON DE BASSINS SAHÉLIENS

Comme rappelé en introduction, de nombreuses méthodes ont employé IPA et lame précipitée journalière, pour prédire la lame écoulee journalière. Ces méthodes n'ont été appliquées que sur un nombre restreint de bassins sahéliens à des fins d'analyse. Nous avons entrepris une synthèse sur un échantillon de 21 bassins sahéliens, ruraux, inférieurs à 100 km². Ils se répartissent entre les isohyètes interannuelles 300 et 850 mm à l'exception du bassin d'Agassaghas recevant moins de 150 mm annuellement.

Ces 21 bassins ont été choisis parmi la soixantaine de bassins versants étudiés par l'ORSTOM dans cette zone. Les critères de sélection ont été la présence de chroniques continues de lame précipitées journalières (nécessaires au calcul de IPA), et de lames écoulées. Ces chroniques devaient être suffisamment importantes (2 à 4 années en moyenne) et de qualité (réseau pluviométrique relativement dense, absence ou faible dégradation du réseau hydrographique).

Les données disponibles ont donc été la lame précipitée journalière (parfois, au pas de temps semi-journalier), la lame écoulee assimilable ici à la lame ruisselée du fait de l'absence d'écoulement de base et éventuellement l'intensité maximale (en 5 minutes) des averses les plus importantes.

2.1. MÉTHODOLOGIE

Nous avons étudié les relations lame précipitée-lame écoulee par la méthode des régressions multiples. En effet, cette méthode numérique permet, par des tests statistiques appropriés en association à une visualisation graphique des résultats, de cerner au mieux les facteurs les plus aptes à expliquer l'écoulement.

La lame écoulee (Le) est éventuellement explicable par :

- la lame précipitée (P) sur le bassin (évaluée par la méthode de Thiessen),
- des IPA de KOHLER aux coefficients de décroissance k que l'on fait varier de 0,05 à 1 par pas de 0,05, notation : IPA ($k = 0,50$) signifie IPA de KOHLER à coefficient de décroissance k égal à 0,50.

Le même indice lorsque la lame écoulee est soustraite à la lame précipitée sera noté : IPA* (k = 0,50).
- des IPA d'algorithme suivant

$$IH10_i = \sum_{j=1}^{10} \frac{P_{i-j}}{j}$$

Nous calculons également IH20, IH20* et IH30, IH30*.

- l'intensité maximale Imx en 5 minutes.

Les régressions multilinéaires testées sur chaque bassin sont :

$$Le = a X1 + b X2 + c X3 + d$$

$$\text{Log Le} = a \text{Log X1} + b \text{Log X2} + c \text{Log X3} + d$$

$$\text{soit } Le = e^d X1^a X2^b X3^c$$

$$Le = a \text{Log P} + b \text{Log X1} + c \text{Log X2} + d$$

$$\text{Log Le} = a \text{Log P} + b X1 + c X2 + d$$

$$\text{soit } Le = e^d \cdot e^{b X1 + c X2} \cdot P^a$$

$$Le = a P + b P \cdot X1 + c P \cdot X2 + d$$

Les Xi sont choisis parmi les variables ci-dessus, caractérisant divers algorithmes de calculs de IPA. La sélection s'effectue par méthode ascendante en privilégiant les variables qui augmentent le plus r². Les seuils de signification des coefficients de régression ont été fixés, après essais à 1 %. Les calculs sont menés à l'aide du logiciel de statistique S.A.S. (1982).

2.2. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES FONCTIONS DE PRODUCTION CALCULÉES

Les régressions obtenues sur les 21 bassins versants sont réunies dans le tableau VIII.

A l'aide de ce tableau, on constate que :

- la forme de régression majoritairement retenue est :

$$Le = a P + b X1 + c X2 + d$$

avec éventuellement X1, X2 de la forme P.IPA, IPA (Imx n'intervient jamais dans ces régressions car elle n'est connue que pour les averses les plus importantes).

TABLEAU VIII
Régressions obtenues pour chaque bassin sur tous les événements pluvieux

Bassin	Equation	r ²	n
Kountkouzout			
Station principale	Le = 0,469 P - 4,260	0,859	50
Galmi 1	Le = 0,474 P - 2,284	0,700	128
Galmi 2	Le = 0,422 P - 1,847	0,775	246
Ibonamame	Le = 0,395 P - 0,976	0,623	198
Kountkouzout			
station secondaire	Le = 0,487 P - 2,207	0,776	145
Kountkouzout fosse			
F2	Le = 0,487 P + 0,01080 P.IPA(k=0,80) - 1,964	0,865	123
Kaoro Abdou	Le = 0,239 P + 0,02710 P.IPA(k=0,30) - 1,018	0,780	63
Kadiel	Le = 0,205 P - 0,786	0,588	45
Tikare 2	Le = 0,035 P + 0,01340 P.IPA(k=0,80) - 0,481	0,768	88
Kolel	Le = 0,201 P - 0,885	0,654	202
Tchalol	Le = 0,408 P + 0,206 IPA(k=0,15) - 1,491	0,789	190
Polaka	Le = 0,221 P + 0,098 IPA(k=0,20) - 0,834	0,770	178
Leleg	Lr = 0,453 P + 0,101 IPA(k=0,50) - 17,408	0,885	21
Jalafanka	Le = 0,361 P + 0,00091 P.IPA (k=1.) - 1,614	0,896	157
Outardes	Le = 0,238 P + 0,00817 P.IPA(k=0,70) - 0,930	0,758	172
Gountouré	Le = 0,307 P + 0,03088 P.IPA*(k=0,65) - 1,681	0,830	173
Toukoul	Lr = 0,00212 P.IPA (k=0,90) - 0,780	0,769	149
Bidjil	Lr = 0,00171 P.IPA (k=0,90)+0,0472 P.IPA(k=0,05) - 0,864	0,782	140
Boulsa Koghnerere	Le = 0,956 IPA(k=0,10) + 0,026 IPA(k=0,95)+0,135P - 4,837	0,808	22
kumbaka 2	Le = 0,219 P + 0,00044 P.IPA (k=1.) - 1,971	0,921	36
Agossagnas	Le = 0,188 P + 0,00267 P.IPA*(k=1.) - 0,642	0,754	93

Avec un, deux ou trois facteurs explicatifs, les régressions obtenues ont des r^2 qui varient de 0,59 à 0,90 soit des pourcentages de variation non expliqués par le modèle de 0,10 à 0,41. Ces valeurs expriment deux aspects très différents :

- soit le mauvais ajustement du modèle choisi aux données
 - soit les erreurs propres aux données lame précipitée, lame écoulee.
- Lorsqu'un IPA est retenu, c'est un IPA de KOHLER. Soustraire la lame écoulee à la lame précipitée n'a pas d'importance du fait de la faiblesse de la première par rapport à la seconde.

L'examen des coefficients de décroissance k sélectionnés permet de discerner deux groupes :

- le premier, formé de coefficients relativement forts (de 0,65 à 0,95), rend compte de mécanismes saisonniers (à l'échelle du mois).
- le second, formé de coefficients plutôt faibles (de 0,05 à 0,30) rend compte de mécanismes à l'échelle de la journée. Cela provient généralement d'une augmentation importante du coefficient de ruissellement, suite à une précipitation dans les heures qui précèdent l'averse considérée. Les IPA à faible coefficient de décroissance n'interviennent en fait que sur les échantillons d'étude où le pas de temps est de la demi-journée et où sont présentes des averses consécutives.

2.3. INFLUENCE DES FACTEURS SECONDAIRES DANS LA PRÉDICTION

Avec logique, le premier facteur explicatif est la lame précipitée, à l'exception des bassins de Tounkoul, Bidjir et Boulsa. Le produit $P \cdot IPA$ peut rendre compte de la forte dispersion des couples lame précipitée - lame écoulee pour les deux premiers. Un réseau hydrographique formé de réservoirs successifs qui sont rarement tous en eau explique l'absence de la lame précipitée comme premier facteur explicatif pour Boulsa.

Mis à part ces 3 bassins et ceux où la lame précipitée est l'unique variable explicative, nous donnons dans le tableau IX l'augmentation au r^2 lorsque l'on passe de une à deux variables explicatives, c'est-à-dire de P à $P + IPA$ et de P à $P + P \cdot IPA$.

TABLEAU IX
Amélioration de r^2 de une à deux variables explicatives

Forme $Le = a P + b IPA + c$	Δr^2
TCHALOL	0,011
LELENG	0,066
POLAKA	0,010
Forme $Le = a P + b P \cdot IPA + c$	
KOUNTKOUZOUT fosse F2	0,035
TIKARE 2	0,046
JALAFANKA	0,056
OUTARDES	0,061
GOUNTOURE	0,120
KUMBAKA 2	0,048
ACASSAGHAS	0,084

Cette amélioration est généralement inférieure à 10 %. Dans la première forme de régression, elle est de 4,5 % en moyenne et représente directement le gain apporté par IPA. Dans la seconde forme, elle est légèrement plus forte.

Sur les bassins où l'intensité maximale des averses, génératrices des plus fortes crues, était connue, nous avons fait intervenir Imx dans les régressions. Dans le tableau X, nous donnons, pour ces bassins, l'augmentation de r^2 par ajout de Imx .

TABLEAU X
Augmentation de r^2 par ajout de Imx

BASSIN	Δr^2
KOUNTKOUZOUT Fosse F2	0,080
TIKARE 2	0,049
TCHALOL	0,022
LELENG	0,136
POLAKA	0,067
GOUNTOURE	0,027

On constate que l'apport de cette variable est du même ordre que celui de IPA. En effet, bien que l'intensité maximale soit un enregistrement expérimental, elle n'est tout comme IPA qu'un indicateur de l'averse, à l'échelle du bassin, du fait de son caractère ponctuel.

CONCLUSION

Toute notion de récurrence pour IPA n'est envisageable qu'en terme de probabilité conditionnelle vis-à-vis de l'importance et de la date d'occurrence des précipitations associées.

Eu égard aux variables disponibles sur le plus grand nombre de bassins, la fonction de production sous forme de régression, où l'apport de IPA est le plus important, a pour formule :

$$Le = a P + b P.IPA + c$$

Le meilleur algorithme pour IPA apparaît être celui de KOHLER. Le coefficient de décroissance k doit être important (de l'ordre de 0,90).

- Cependant, l'influence de IPA (ou de Im_x lorsqu'elle est disponible) nous semble certes non négligeable, mais mineure.

Ces variables associées à la lame précipitée sont encore loin de pouvoir expliquer à elles seules la forte dispersion des graphes lame précipitée-lame écoulée. Quelle que soit la méthode utilisée, prédire avec précision l'écoulement *au pas de temps journalier*, à partir de la lame précipitée et de IPA restera imprécis.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 24 juin 1987

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), TOURI (H.), 1982. - Un nouvel outil pour estimer le ruissellement sur un petit bassin versant : le minisimulateur de pluies. Expérimentation sur le bassin versant de Binnde. ORSTOM éd., Ouagadougou, 63 pp.
- BRUNET-MORET, 1965. - Influence du corps de l'averse sur le ruissellement d'un petit bassin (bassin du petit Boundjouk). *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, 3:32.
- BRUNET-MORET (Y.), 1974. - Distribution exponentielle généralisée. *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, vol XI, n° 4, 91 pp.
- CADIER (E.), 1984. - Metodo de avaliao dos escoamentos nas pequenas bacias do semi-arido. SUDENE-DRN. éd., Brésil, *Série Hidrologia* 21, 77 pp.
- CASENAVE (A.), 1982. - Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, vol XIX : 207-227.
- CEMAGREF, 1982. - Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Étude des caractéristiques averses-crues. CEMAGREF éd., 4, 45 pp.
- CHEVALLIER (P.), 1982. - Simulation de pluie sur deux bassins sahéliens (Mare d'Oursi. Haute Volta). *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, vol XIX : 283-297.
- CHEVALLIER (P.), 1983. - L'indice des précipitations antérieures. Évaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSTOM, série hydrol.*, vol XX : 179-189.
- KOHLER (M.A.), LINSLEY (R.K.), 1951. - Predicting the runoff from storm rainfall. Weather Bureau, U.S. Dep. of Commerce, Washington, *Research Pap.*, n° 34, 9 pp.
- ROCHE (M.), 1963. - Hydrologie de surface. ORSTOM Gauthier-Villars éd., Paris, 430 pp.
- RODIER (J.), 1975. - Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. *Trav. et doc. de l'ORSTOM*, n° 46, 117 pp.
- RODIER (J.), AUVRAY (C.), 1965. - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM, CIEH éd., 44 pp.
- RODIER (J.), RIBSTEIN (P.), 1986. - Transposition des données hydrologiques, utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel. ORSTOM, CIEH éd., Montpellier, 47 pp.
- SAS, 1982. - SAS user's guide : basics. SAS Institute éd., Cary, U.S.A., 921 pp.
- SAXTON (K.E.), ASCE (A.M.), LENZ (A.T.), 1967. - Antecedent retention indexes predict soil moisture. *J. Hydraul. Div.*, 4 : 223-241.
- SEGUIS (L.), 1986. - Recherche, pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée) et sa régionalisation. Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 326 pp.