

11811

DT 3.48

Delta Sénégal Hydrologie

ETUDE DES CRUES-TYPE DU SENEGAL A BAKEL

Juin 1971

NT. 1665

O. CAYLA

SOMMAIRE

<u>CHAPITRE 1 - BUT, DEFINITION ET CONCLUSION DE L'ETUDE</u>	1
1.1 BUT DE L'ETUDE	1
1.2 DEFINITION DE L'ETUDE	1
1.3 METHODE UTILISEE	2
1.4 CONCLUSION DE L'ETUDE	3
 <u>CHAPITRE 2 - ETUDE DU SENEGAL A BAKEL</u>	4
2.1 DONNEES PRISES EN COMPTE	4
2.11 Origine	4
2.12 Critique rapide de ces données	4
2.2 METHODE STATISTIQUE UTILISEE	
2.21 Statistique des débits de pointe	5
2.22 Statistique des durées de dépassement d'un seuil Q_o	6
2.23 Corrélations entre niveaux, et niveaux et sommet	6
2.24 Positionnement des divers niveaux dans le temps	7
2.3 RESULTATS DES ETUDES SUR LES DEBITS DE POINTE (Fig. 1 et 2)	8
2.31 Débits de pointe à Bakel	8
2.32 Débits de pointe à Kayes	8
2.33 Débits de pointe à Kidira	9
2.34 Composition de ces divers débits de pointe	9
2.35 Conclusions sur les débits de pointe	11
2.4 HYDROGRAMME DES CRUES A BAKEL	11
2.41 Forme de l'hydrogramme	11
2.42 Durées de dépassement des seuils Q_o	12

2.42 Corrélation entre le débit de pointe et la durée de dépassement du seuil Q_0	12
2.44 Critique de ces résultats	13
2.45 Conclusion	15
<u>CHAPITRE 3 - RECONSTITUTION DE L'HYDROGRAMME A BAKEL A PARTIR DES HYDROGRAMMES A KAYES ET DE LA FALEME A KIDIRA</u>	17
3.1 HYDROGRAMME A KAYES	17
3.11 Validité des données	17
3.12 Hydrogramme	17
3.2 HYDROGRAMME A KIDIRA	19
3.21 Validité des données	19
3.22 Forme de l'hydrogramme	19
3.23 Durées de dépassement des seuils Q_0	20
3.24 Hydrogramme à Kidira	21
3.3 COMPOSITION DES DEUX HYDROGRAMMES	21
3.4 CONCLUSION	22

000

Chapitre 1

BUT, DEFINITION ET CONCLUSIONS DE L'ETUDE

1.1 BUT DE L'ETUDE

Dans le cadre de l'Aménagement du delta du Sénégal SOGREAH a mis en œuvre l'élaboration et l'exploitation d'un modèle mathématique fluvial du Sénégal entre Bakel et la mer.

Afin de déterminer les caractéristiques aval de crues dangereuses du Sénégal, il convient d'introduire à l'amont du modèle des crues-type rares qui seront propagées ensuite par ce modèle.

Les crues-type retenues sont les crues des temps de retour probable cent ans et mille ans.

Le but de cette étude hydrologique est donc de fournir une estimation aussi précise et exacte que possible de ces deux crues - type à Bakel, à partir du débit 500 m³/s.

1.2 DEFINITION DE L'ETUDE

Deux études du Sénégal à Bakel ont précédé la nôtre.

La première est l'étude effectuée par l'OKSTOM*, qui consiste essentiellement à recréer à partir des mesures existantes et grâce à quelques tâches complémentaires un ensemble cohérent de données de débit et de hauteurs d'eau en de multiples stations du fleuve. Quelques synthèses ont été effectuées, mais aucune extrapolation ou extension de ces données n'est fournie. En particulier le temps de retour 1000 ans n'est nulle part pris en considération et aucun hydrogramme-type n'est proposé.

* Monographie hydrologique du fleuve Sénégal : 1964 à 1968, 10 volumes.

Mais cette étude fournit une masse de données suffisantes pour que des recherches ponctuelles approfondies puissent être menées à bien.

La seconde a été entreprise par Sénégal-consult et fournit les données dont le modèle fluvial a besoin, à partir des études de l'ORSTOM.

Notre étude pouvait donc consister en une critique et si besoin était en une correction des résultats des travaux de Sénégal-Consult.

Malheureusement nous n'avons pu obtenir à temps l'ensemble du rapport, mais seulement des fragments trop dispersés pour qu'une critique sérieuse puisse être élaborée.

Cependant il paraît probable :

- que les hydrogrammes-type proposés n'ont pas toute la précision souhaitable, la méthode de calcul utilisée n'étant pas aussi élaborée que celle que nous proposons;
- que ces hydrogrammes ne sont pas définis à partir du débit 500 m³/s mais à partir d'un débit plus fort et ne sont donc pas utilisables tels quels.

Nous avons donc repris, à partir des données de l'ORSTOM, l'étude complète des crues du Sénégal à Bakel, étude proposant les hydrogrammes-type de ces crues pour les temps de retour 10, 100 et 1000 ans.

1.3 METHODE UTILISEE

La méthode suivie ici est une méthode statistique de reconstitution d'un hydrogramme-type par définition des durées de dépassement d'une série de seuils de débits.

données

On considère un nombre de seuils :

- suffisant pour que l'interpolation entre ces seuils ne soit pas source d'erreurs;
- pas assez important pour alourdir les calculs par une recherche illusoire de précision.

Pour chacun de ces seuils on analyse :

- les durées de dépassement de toutes les crues qui ont au moins atteint ce niveau;
- la corrélation entre les durées de dépassement et les débits de pointe atteint par ces crues.

Pour une pointe de crue donnée, on peut ainsi définir les durées de dépassement les plus probables de chacun de ces seuils.

Il reste à définir :

- le débit de pointe attaché à un temps de retour donné : ajustement statistique classique ;
- un critère fixant les dates de dépassement des seuils ; nous avons choisi la "date milieu" du dépassement, c'est-à-dire la date à laquelle le seuil choisi était dépassé pendant la moitié de la durée totale de dépassement.

Cette étude étant effectuée à Bakel, nous l'avons vérifiée par la reconstitution de l'hydrogramme à Bakel à partir des hydrogrammes à Kayes et Kidira des crues du Sénégal et de la Fâlémé avant leur confluent. La concordance des résultats de ces deux études indépendantes est un critère de qualité.

1.4 CONCLUSION DE L'ETUDE

Ces conclusions sont résumées par les deux graphiques des pages suivantes : fig. 10 et 11, représentant les hydrogrammes type recherchés.

La sensibilité de la méthode utilisée, qui permet de mettre en évidence une erreur de tarage du Sénégal à Bakel annonce une précision des résultats qu'il paraît très difficile d'atteindre avec quelqu'autre méthode que ce soit : de l'ordre de quelques jours et indépendante du niveau du seuil. Il est bon à ce propos de noter que les hydrogrammes obtenus n'ont pas été lissés graphiquement et que chaque seuil a été étudié séparément.

La partie de cette conclusion afférente à la critique des études précédentes ne peut être développée faute de documents à critiquer.

Nous pouvons seulement apporter, à propos des débits de pointe de crues à Bakel :

- une critique des ajustements de l'ORSTOM qui, quoique de résultats acceptables jusqu'au temps de retour 100 ans, ne peuvent être extrapolés sans amener des contradictions importantes;
- une critique prudente des ajustements de Sénégal-Consult qui ne sont peut être pas très précis, et ne tiennent en particulier pas compte de certaines erreurs sur les données de débits.

Chapitre 2

ETUDE DU SENEGAL A BAKEL

2.1 DONNEES PRISES EN COMPTE

2.11 ORIGINE

La source de l'étude statistique est l'ensemble de tableaux de débits journaliers édité par l'ORSTOM* en décembre 1965 (révision décembre 1966)

Ces données recouvrent une période de 62 ans (1903-1964) et fournissent tous les débits supérieurs à 1500 m³/s. La série des débits supérieurs à 1000 m³/s est presque complète (il manque une partie de 1914 et 1910), ainsi que la série des débits supérieurs à 500 m³/s (les années 1910, 1911, 1914 et 1948 seulement sont inutilisables dans cette gamme).

On peut donc considérer que les données permettent une étude statistique sérieuse sur tous les débits supérieurs à 500 m³/s.

2.12 CRITIQUE RAPIDE DE CES DONNEES

Les valeurs de débits imprimés dans ces tableaux peuvent être fausses pour trois raisons :

- a. erreurs d'impression ;
- b. erreurs dans les données en hauteur d'eau à Bakel ;
- c. erreur dans le passage hauteur d'eau - débit.

Les erreurs d'impression sont absolument aléatoires et ne présentent en fait que peu d'importance dans une étude statistique portant sur une longue période. Nous avons pourtant relevé en 1905 un chiffre aberrant : débit supérieur au débit maximal de l'année, ce qui tend à prouver l'existence de cette gamme d'erreurs.

L'ORSTOM a effectué un travail considérable de reconstitution de hauteurs d'eau tout au long de la vallée, recalage des échelles limnimétrique, critique des lectures — par comparaison et recouplement de l'ensemble des données. Le modèle mathématique du fleuve, réalisé par SOGREAH par la suite confirme absolument l'ensemble des résultats, mais a montré l'existence de certaines erreurs résiduelles : par exemple une hauteur d'eau exagérée de 1 m en Août 1964. Ces erreurs résiduelles sont du même type aléatoire que les erreurs d'impression et n'ont pas plus d'importance statistique.

Par contre, la partie la plus criticable de ces données semble être la loi de tarage de la station.

L'ORSTOM a considéré une loi hauteur-débit univoque à Bakel en constatant que cette hypothèse n'était pas vérifiée et que les points de tarage étaient assez dispersés entre 7,50 et 10,5 m.

Cette dispersion des points équivaut à une incertitude sur les débits 1500 à 4000 m³/s.

Par contre le plus fort débit mesuré (6440 m³/s) est suffisamment important pour ne nécessiter qu'une courte extrapolation de la courbe de tarage, ce qui rend assez précise l'estimation de débits plus élevés.

Les études faites par la suite, à savoir l'ensemble des mesures effectuées par Sénégal-Consult d'une part et les résultats du modèle mathématique du fleuve, construit par SOGREAH d'autre part, tendent à prouver que la loi hauteur-débit n'est pas univoque à Bakel ; l'erreur à la montée de crue, par rapport aux estimations de l'ORSTOM, pourrait atteindre + 600 m³/s aux alentours des débits 3000 à 4000 m³/s*. Cependant cette erreur est à peu près nulle pour les débits supérieurs à 6000 m³/s ou inférieurs à 1500 m³/s.

Nous pouvons ainsi déterminer l'ordre de grandeur et le sens de l'erreur commise en utilisant les tableaux de données de l'ORSTOM pour une étude statistique ; elle provient essentiellement de la non univocité de la loi hauteur-débit à Bakel. Nous critiquerons donc nos résultats dans ce sens au fur et à mesure de leur attention.

2.2 METHODE STATISTIQUE UTILISEE

2.21 STATISTIQUE DES DEBITS DE POINTE

Nous avons adapté à l'ensemble des débits de pointe annuels à Bakel une loi de Galton (Gausso-logarithmique) en considérant :

- une loi 1 où la variable de Gauss est Log (Q_M), Q_M étant le débit de pointe ;

* Il est à noter en particulier que, sur l'ensemble des jaugeages pris en considération par l'ORSTOM, 3 seulement ont été effectuées pendant une période de montée des eaux.

- une loi 2 où la variable de Gauss est $\text{Log}(Q_M + 3000)$, loi utilisée par l'ORSTOM lors de son étude statistique des débits de pointe à Bakel et qui permet un alignement un petit peu meilleur des points expérimentaux.

Cette statistique porte sur 62 ans : 1903 - 1964.

Nous avons également utilisé les données de débit de pointe annuelles à Kayes et à Kidira pour établir une statistique sur ces débits.

Aux deux échantillons nous avons ajusté une loi de Galtón, du type 1.

Notons que l'échantillon de Kayes porte sur 62 ans : 1903 - 1964, mais que Kidira ne présente que 30 valeurs (de 1930 à 1942, 1944, 1946, de 1950 à 1964).

2.22 STATISTIQUE DES DUREES DE DEPASSEMENT D'UN SEUIL Q_o

Soit un certain débit Q_o fixé : lors d'une crue à Bakel, ce seuil sera dépassé pendant une durée totale $D(Q_o)$ exprimée en jours. Dans le cas d'une crue annuelle dépassant plusieurs fois le seuil Q_o , $D(Q_o)$ sera la somme des durées de chaque dépassement de Q_o .

Pour un seuil Q_o donné, nous obtenons donc NV valeurs de $D(Q_o)$, correspondant à NA crues annuelles, avec $NV \leq NA$.

Nous ramenons l'échantillon à NA valeurs en supposant que les NA - NV crues qui n'atteignent pas le débit Q_o dépassent 0 jours, ce qui nous fournit NA - NV valeurs nulles de $D(Q_o)$.

Nous avons ajusté ces NA valeurs de $D(Q_o)$ à une loi de Gauss, ce qui nous permet de déterminer la fréquence attachée à un certain nombre de jours $D(Q_o)$ de dépassement du seuil fixé Q_o . [L'ajustement linéaire s'effectue non pas avec $D(Q_o)$ directement mais avec $(D)^2$, qui constituera notre variable statistique]

En répétant cette opération pour un certain nombre de seuils Q_o différents, on obtient une analyse statistique des crues annuelles détaillées par niveaux indépendants.

Nous avons choisi les seuils Q_o , en m³/s:

500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000

2.23 CORRELATIONS ENTRE NIVEAUX, ET NIVEAUX ET SOMMET

Si on définit une crue par la fréquence F de la durée de dépassement d'un certain seuil de débit, la fréquence de la durée de dépassement de tout autre seuil de débit doit correspondre à un phénomène plus fréquent que celui décrit par F.

infinie

Supposons par exemple une crue où un débit de base soutenu est créé par un certain phénomène et où la pointe de crue résulte d'un phénomène indépendant du premier. La corrélation entre les durées de dépassement d'un seuil Q_1 , caractéristique du débit de base et les débits de pointe atteints sera donc nulle (corrélation crue par crue). Donc à un débit de pointe de fréquence F quelconque on devra adjoindre la durée de dépassement de Q_1 la plus probable, c'est-à-dire de fréquence 0,5. Réciproquement à une durée de dépassement D_1 de fréquence F quelconque, on adjoindra le débit de pointe le plus probable, de fréquence 0,5.

On obtiendrait donc deux hydrogrammes de fréquence F , l'un basé sur un débit de pointe de fréquence F , l'autre sur un débit de base de fréquence F .

Pour constituer un hydrogramme de fréquence F , on est donc amené à effectuer des corrélations crues par crues entre les durées de dépassement de différents seuils. La comparaison des droites de corrélation avec la droite de corrélation à fréquences égales permet de définir la "cohérence" des hydrogrammes de crue, c'est-à-dire la stabilité de l'hydrogramme de fréquence F suivant le critère choisi, et dans le cas où cette stabilité serait faible, de construire plusieurs hydrogrammes de même fréquence F .

2.24 POSITIONNEMENT DES DIVERS NIVEAUX DANS LE TEMPS

Pour certains seuils Q_o , nous avons déterminé la "date milieu" date à laquelle le niveau Q_o a été dépassé pendant la moitié de la durée totale D (Q_o).

Cette étude n'a été faite que lorsque la crue annuelle a dépassé franchement le seuil Q_o , sans osciller plusieurs fois autour de cette valeur ; pour les autres crues, cette date milieu n'aurait aucun sens. On n'a ainsi éliminé que peu de crues (moins de 10 %) ce qui laisse toute sa valeur à la statistique obtenue.

De même une étude de la date d'apparition du sommet a été effectuée. On peut ainsi positionner chaque niveau et le sommet indépendamment les uns des autres dans le temps, donc fixer la forme de l'hydrogramme le plus probable, et définir ses déformations possibles.

Les "dates milieu" ont été étudiées pour les seuils Q_o , m³/s :

1000, 2500

les autres seuils n'offrant pas de renseignements supplémentaires.

2.3 RESULTATS DES ETUDES SUR LES DEBITS DE POINTE (fig. 1 et 2)

2.31 DEBITS DE POINTE A BAKEL

Pour $T > 20$ ans la loi 1 donne des valeurs $Q_M(T)$ supérieures à celles de la loi 2 : en effet la loi 1 consiste à ajuster une droite sur une courbe dont la concavité est tournée vers le bas : les extrémités de la courbe sont donc situées en dessous de cette droite, et la droite surestime les débits de ces deux parties.

Or, nous avons vu au paragraphe 2.12 que les débits compris entre 1500 et 6000 m³/s sont sans doute sous-estimés, sous-estimation particulièrement importante vers 3000 à 4000 m³/s : corriger ceci revient à tracer la droite 3 .

Ce qui donne des résultats intermédiaires entre ceux de la loi 1 et ceux de la loi 2, résultats que nous accepterons :

Temps de retour T années	10 ans	100 ans	1 000 ans
Débit Q_M de Pointe à Bakel (m ³ /s)	7 300	10 100	13 000

Les résultats de l'étude faite par Sénégal-Consult paraissent donc nettement pessimistes pour $T = 1000$ ans : $Q_M(1000) = 14 100$ m³/s. Par contre les valeurs données pour $T = 10$ ans et $T = 100$ ans sont raisonnables :

$$Q_M(10) = 7 220 \text{ et } Q_M(100) = 10 700$$

2.32 DEBITS DE POINTE A KAYES

Dans son étude, l'ORSTOM préconisait d'utiliser une loi de Gauss à l'échantillon des débits de pointe à Kayes. L'ajustement est aussi bon avec une loi de Galton, à condition de considérer une brisure vers le débit 4 100 m³/s : la qualité de l'ajustement est équivalente et le procédé permet de mieux comparer les ajustements aux diverses stations. Les résultats pour $T = 100$ et $T = 1000$ ans sont un peu plus sévères que ceux de l'ORSTOM mais, compte tenu d'une possibilité de sous-estimation des forts débits, seront préférés (fig. 2)

Temps de retour T années	10	100	1 000
Débit de pointe (m ³ /s) à Kayes	5 400	6 800	8 100

Les évaluations de l'étude de Sénégal-Consult semblent encore une fois surestimés : l'ajustement statistique qu'ils ont effectué ne tient pas compte de la brisure nette que nous avons mise en évidence, comme le montre la fig. 2.

Aussi les résultats deviennent-ils : $Q_M(10) = 5\ 590\ m^3/s$ et $Q_M(100) = 7\ 600\ m^3/s$ et $Q_M(1000) = 9\ 500\ m^3/s$.

2.33 DEBITS DE POINTE A KIDIRA

Notons tout d'abord deux critiques essentielles des données de cette station :

- elles ne portent que sur 30 années, donc nous aurons une erreur d'échantillonnage assez importante et une extrapolation difficile;
- elles sont extrêmement peu sûres, les lectures de hauteur d'eau semblant souvent sujettes à caution : mêmes les données relevées par l'ORSTOM doivent être maniées avec précaution (voir chapitre 3).

L'ajustement présenté par l'ORSTOM sur une loi de Gauss fournit :

$$Q_{10} = 2\ 670\ m^3/s \text{ et } Q_{100} = 3\ 315\ m^3/s$$

Notre ajustement sur une loi de Galton ne paraît pas plus mauvais, mais conduit au tableau (fig. 2)

Temps de retour T années	10	100	1 000
Débit de pointe (m^3/s) à Kidira	2 750	4 000	5 200

Sénégal-Consult a ajusté à une loi de Galton les forts débits seulement, ce qui conduit ses résultats à être un peu plus faibles : $Q_M(10) = 2\ 800$ mais $Q_M(100) = 3\ 800$ et $Q_M(1000) = 4\ 760$ (fig. 2)

2.34 COMPOSITION DE CES DIVERS DEBITS DE POINTE

Le but de ce paragraphe n'est pas de faire la composition à Bakel des débits de la Faleme à Kidira et du Sénégal à Kayes, ce qui demande une étude beaucoup plus complète (chapitre 3).

Cependant nous pourrons observer que :

- Dans le cas de parfaite corrélation l'hydrogramme de temps de retour T à Bakel serait produit par la combinaison des hydrogrammes de même temps de retour T à Kayes et à Kidira. Si la corrélation

entre les crues à Kayes et à Kidira n'est pas très bonne, cet hydrogramme à Bakel proviendrait de la combinaison d'hydrogrammes de temps de retour inférieur à T à Kayes et Kidira.

- La pointe de crue à Kidira se produit généralement avec un certain retard sur la pointe de crue à Kayes. Compte tenu des temps de propagation de ces deux stations à celle de Bakel, la pointe de crue à Bakel n'est généralement pas la somme des deux pointes de crues de la Folème et du Sénégal.
- Enfin un amortissement des crues se produit entre Kayes et Bakel d'une part et Kidira et Bakel d'autre part. Les apports intermédiaires étant négligeables, on peut prévoir une certaine diminution de la pointe de crue.

De ces trois observations, nous pouvons déduire que, à temps de retour T donné la somme des débits maximaux à Kayes et à Kidira sera nettement supérieure au débit de pointe à Bakel.

Nous allons vérifier ainsi la concordance des résultats trouvés dans les études de l'ORSTOM, de Sénégal-Consult, ainsi que dans la nôtre.*

Etude	T	ORSTOM			Sénégal-Consult			Notre étude		
		10 ans	100ans	1000ans	10 ans	100 ans	1000ans	10 ans	100 ans	1000ans
Q _p (m ³ /s)	T									
Débit de pointe à										
Kidira		2 670	3 315	3 800	2 800	3 800	4 760	2 750	4 000	5 200
Kayes		5 395	6 575	7 500	5 590	7 600	9 500	5 400	6 800	8 100
Somme S = Kayes + Kidira		8 065	9 890	11 300	8 390	11 400	14 260	8 150	10 800	13 300
Bakel		7 140	9 825	12 500	7 220	10 700	14 100	7 300	10 100	13 000
Différence S - Bakel		925	65	-1 200	1 170	700	160	850	700	300

Les ajustements de l'ORSTOM sont incohérents : il est en effet surprenant d'obtenir des crues dont les pointes s'ajustent sur une loi de Galton à partir de deux systèmes de crues dont les débits de pointe respectifs s'ajustent sur une loi de Gauss.

Les résultats de cette étude sont donc impossibles à extrapoler vers T = 1000 ans, et même vers T = 100 ans. Il est par contre difficile de départager sur ce test les résultats de l'étude de Sénégal-Consult avec les nôtres. Pour T = 1000 ans la différence S - Bakel de 160 m³ est peut-être bien faible, mais la différence de 300 m³/s, qui résulte de nos propres estimations l'est aussi.

* A noter que l'ORSTOM n'a pas parlé dans son étude du temps de retour T = 1000 ans : nous l'avons obtenu par extrapolation de leurs ajustements.

Disons qu'aux approximations prises ces deux résultats sont équivalents. Ils ont en commun une caractéristique intéressante : les différences décroissent si la durée de retour du phénomène croît, ce qui semble indiquer que pour obtenir une crue importante à Bakel, il est nécessaire d'avoir une bonne concordance des pointes de crue en provenance de la Folème et du Sénégal. La faible différence résultante est largement expliquée par l'amortissement. Il est d'ailleurs à noter, après les études faites grâce au modèle élaboré par SOGREAH, qu'il existe certainement en amont de Bakel un champ d'épandage des très fortes crues provoquant une certaine diminution de la pointe des crues rares (observations sur les crues de 1964). Mais les très fortes crues à Bakel sont peut-être quelque peu renforcées par des apports du Karakoro, non pris en compte dans notre comparaison, ce qui compenserait en partie leur laminage*.

2.35 CONCLUSIONS SUR LES DEBITS DE POINTE

L'étude de Sénégal-Consult, si elle présente des résultats cohérents, nous paraît surrestimer sensiblement les débits de pointe de temps de retour $T = 1000$ ans à Bakel. Cela est confirmé par un ajustement des débits maximaux à Kayes (dont le tarage est plus sûr) qui ne tient pas compte d'une brisure dans l'alignement des points.

Cependant une surrestimation de 1000 m³/s au niveau 13 000 m³/s se situe dans la marge d'incertitude permise lors d'une extrapolation d'ajustement statistique. De plus une surrestimation va dans le sens de la sécurité : nous pouvons donc accepter les débits de pointes proposés pour Bakel par Sénégal-Consult.

2.4 HYDROGRAMMES DES CRUES A BAKEL

2.41 FORME DE L'HYDROGRAMME

Sur la fig. 3 nous avons représenté le diagramme des répartitions des dates d'apparition :

- du sommet : médiane le 9 septembre
1er et 3ème quartiles les 1er et 15 septembre;
1er et 9ème déciles les 24 août et 19 septembre
(statistique sur 62 valeurs).
- du milieu du seuil 2 500 m³/s
médiane le 10 septembre,
1er et 3ème quartiles les 5 et 15 septembre,
1er et 9ème déciles les 30 août et 12 septembre
(statistique sur 57 valeurs).

* L'ORSTOM estime qu'une crue moyenne du Klanbine ou du Karakoro peut débiter 500 m³/s en pointe.

. du milieu du seuil 1000 m³/s

médiane le 12 septembre,
1er et 3ème quartiles les 8 et 15 septembre,
1er et 9 déciles les 4 et 18 septembre
(statistique sur 60 valeurs).

On constate que l'hydrogramme médian est parfaitement symétrique à partir de 3000 m³/s, les faibles niveaux étant très légèrement en retard par rapport à cet axe de symétrie du 9 septembre.

On constate également que les faibles niveaux présentent une remarquable stabilité suivant les années, puisque 90 % des crues présentent le milieu de leur seuil 1000 m³/s entre le 4 et le 18 septembre (intervalle de deux semaines seulement). Cette stabilité décroît si le niveau considéré croît, puisque cet intervalle de deux semaines ne retient plus que 50 % des pointes de crues.

Il est également remarquable de noter que cette instabilité croissante se présente sous la forme d'une avance des dates d'affectation et non pas d'un élargissement symétrique, les courbes de la fig. 3 étant confondues à partir du 3ème quartile.

2.42 DUREES DE DEPASSEMENT DES SEUILS Q_o

L'ajustement statistique des échantillons afférents à chaque seuil choisi est présenté fig. 4.

On constate qu'à condition de porter en ordonnées les carrés des durées de dépassement, ces échantillons s'alignent correctement en diagramme de Gauss.

Pour les divers seuils choisis, de 500 m³/s à 6000 m³/s l'extrapolation est assez sûre. L'échelle choisie pour l'ajustement ne permet pas cependant d'affirmer avec précision les valeurs de durées inférieures à 20 jours.

2.43 CORRELATION ENTRE LE DEBIT DE POINTE ET LA DUREE DE DEPASSEMENT DU SEUIL Q_o

Pour obtenir une corrélation normale, nous avons utilisé les variables

$$X = [D(Q_o)]^2 \text{ et } Y = \log(Q_M)$$

La corrélation est assez bonne à partir de $Q_o = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$, mais les résultats ne sont pas valables pour $Q_o > 4000 \text{ m}^3/\text{s}$: en effet le nombre de crues ayant dépassé de façon notable ce seuil est trop faible pour que l'étude des corrélations ait un sens.

Sur la fig. 5 nous avons représenté à titre d'exemple les corrélations du débit de pointe avec les durées de dépassement des seuils 1 500 m³/s (corrération moyenne), 3 000 m³/s (bonne corrération) et 5 000 m³/s (inexploitable).

Nous pouvons en déduire les durées les plus probables de dépassement des divers seuils Q_o d'une crue de temps de retour T basée sur le débit de pointe $Q(T)$.

Ces résultats ainsi que les résultats des ajustements du paragraphe 1.42 sont résumés dans le tableau ci-dessous.

T	1 000 ans		100 ans		10 ans		2 ans	
	Q_o m ³ /s	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé	Ajusté
500	172	154	163	147	148	138	125	125
1 000	133	118	124	111	109	101	87	87
1 500	109	96	101	90	87	81	68	68
2 000	95	86 *	87	79 *	74	70 *	55	55 *
2 500	86	79 *	78	72 *	64	61 *	42	42 *
3 000	78	72 *	70	65 *	56	54 *	30	30 *
4 000	62	59 *	54	51 *	39	38 *	9	9 *
5 000	47	45 *	40	39 *	27	27 *	0	0
6 000	34	34	26	26	11	11 *	0	0
Q_M m ³ /s	13 000		10 100		7 300		(4 900)	

Durée de dépassement (jours) d'un seuil de débit Q_o (m³/s)= pour diverses fréquences (exprimées par le temps de retour T années)

Ajusté : durées données par un ajustement statistique direct

Corrélé: durées à prendre en compte pour le tracé de l'hydrogramme basé sur un débit de pointe de temps de retour T.

2.44 CRITIQUE DE CES RESULTATS

a. Erreurs dues à la non univocité de la loi hauteur-débit

Nous avons vu précédemment que ces erreurs se manifestent entre les débits 1 500 m³/s et 6 000 m³/s ; il y a sous estimation du débit de crue, et surestimation des débits de décrue. Cependant, l'ORSTOM a tracé une courbe de tarage qui se place nettement dans la zone de sous-estimation. Donc les débits moyens seront sous-estimés. Cela revient à surestimer les durées de dépassement des seuils choisis : si l'erreur moyenne est de ΔQ m³/s, ce que nous avons appelé Q_o dans notre étude est ~~en fait~~ le seuil $Q_o + \Delta Q$;

ΔQ étant positif $Q_0 + \Delta Q$ sera dépassé moins longtemps que Q_0 .

Dans le tableau précédent nous avons étoilé ces valeurs surestimées. Sur la fig. 6 nous avons représenté les hydrogrammes obtenus pour les diverses valeurs de T , les débits étant répétés en ordonnée logarithmique (nous avons tracé ici un hydrogramme symétrique, sans tenir compte de la légère dissymétrie aux faibles débits).

Il se trouve que ces hydrogrammes sont représentés par des triangles (cassés au seuil $Q_0 = 1\ 500\ m^3/s$), à l'exception d'un certain "gonflement" entre 1 500 et 6 000 m^3/s .

Or, ce gonflement correspond exactement aux valeurs étoilées de Q_0 , c'est-à-dire aux seuils compris entre 1 500 et 6 000 m^3/s (ces deux valeurs étant exclues).

Aux environs de 3 000 à 4 000 m^3/s , cette surestimation serait de l'ordre de 6 jours.

Le seuil 3 000 m^3/s est dépassé pendant 72 jours.

Le seuil 4 000 m^3/s est dépassé pendant 59 jours.

Donc à ce niveau, 1 000 m^3/s de plus correspondent à 13 jours de moins : 6 jours correspondraient donc à une erreur sur Q_0 de l'ordre de 450 m^3/s , ce qui est tout à fait en conformité avec l'estimation du paragraphe 1.12 (+ 600 m^3/s en crue).

Nous pouvons donc accepter de considérer ce "gonflement" des hydrogrammes comme dû à une erreur systématique sur les données, et admettre un hydrogramme dont les courbes de crue et de décrue sont constitués :

- d'une branche d'exponentielle de 1 500 à $Q_M\ m^3/s$
- d'une seconde branche d'exponentielle de 500 à 1 500 m^3/s (qui se poursuit peut-être pour des débits inférieurs à 500 m^3/s , mais nous ne pouvons l'affirmer).

On peut remarquer sur l'hydrogramme $T = 2$ ans que ce "gonflement" conduit à un débit de pointe trop faible 4 500 m^3/s et que le débit de pointe 4 900 m^3/s que nous avons considéré dans l'ajustement de la fig. 1 (loi 3) est conforme à la rectification que nous venons d'envisager.

b. Autres hydrogrammes de temps de retour T

Les différences entre les valeurs corrélées et ajustées sont faibles dès que l'on atteint le seuil $Q_0 = 3\ 000\ m^3/s$.

A titre de vérification, déterminer quels hydrogrammes de temps de retour $T = 1000$ ans serait basé sur :

- . une durée de dépassement du seuil 3 000 m^3/s , de temps de retour 1000 ans
- . une durée de dépassement du seuil 1 500 m^3/s de temps de retour 1000 ans.

Seuil 3 000 m³/s :

$$T = 1 \text{ 000 ans} \Rightarrow D_{3\ 000} = 78 \text{ jours}$$

Du diagramme de la fig. 5 nous déduisons que le débit de pointe le plus probable sera $Q_M = 11\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Seuil 1 500 m³/s

$$T = 1 \text{ 000 ans} \Rightarrow D_{1\ 500} = 109 \text{ jours}$$

Le débit de pointe le plus probable sera alors $Q_M = 9\ 700 \text{ m}^3/\text{s}$.

Donc même si l'on se base sur un seuil Q_n assez faible, les hydrogrammes obtenus sont peu différents de l'hydrogramme considéré au paragraphe précédent : le débit de pointe reste du même ordre de grandeur, et les volumes de crue sont équivalents. Nous constatons donc une bonne cohérence des hydrogrammes de temps de retour T donné et nous considérerons que celui qui est basé sur le débit de pointe est représentatif de la crue réelle de temps de retour T .

2.4E CONCLUSION

Les hydrogrammes-types de la crue annuelle du Sénégal à Bakel sont caractérisés par :

- La bonne cohérence des hydrogrammes type de temps de retour donné, conduisant à l'adoption d'un hydrogramme unique pour chaque temps de retour T ;
- leur symétrie dont l'axe est situé le 9 septembre pour toute la partie de l'hydrogramme située au-dessus de 2 500 m³/s, la partie inférieure de l'hydrogramme se décalant faiblement (deux à 5 jours) vers la droite (ce décalage est négligeable en regard de la durée de dépassement de ces faibles débits : à peine 1 %).
- la forme exponentielle remarquablement nette adoptée à la fois pour la crue et la décrue. Compte tenu de la correction des erreurs de tarage, l'hydrogramme peut en effet être déduit du tableau suivant

T ans	1 000			
	m ³ /s	13 000	10 100	7 300
6 000		34	26	11
5 000		42	36	24
4 000		53	45	32
3 000		66	59	48
2 500		74	67	56
2 000		83	76	67
1 500		96	90	81
1 000		118	111	101
500		154	147	138
	Q _n m ³ /s	Durées de dépassement des seuils Q _n (jours)		

Pour les temps de retour $T = 1000$ ans et $T = 100$ ans, cette "forme exponentielle" est constituée de deux arcs d'exponentielle se raccordant vers le débit $1\ 500\ m^3/s$. Pour $T = 10$ ans, les deux arcs sont confondus en un seul.

ooo

Chapitre 3

RECONSTITUTION DE L'HYDROGRAMME A BAKEL A PARTIR DES HYDROGRAMMES DU SENEGAL A KAYES ET DE LA FALEME A KIDIRA

3.1 HYDROGRAMMES A KAYES

Nous avons procédé suivant un schéma identique à celui que nous avons utilisé dans le chapitre 2 pour Bakel.

3.11 VALIDITE DES DONNEES

Les mesures à Kayes portent sur 62 années (1903-1964) et sont plus fiables que celles de Bakel, grâce à l'univocité de la loi hauteur-débit de la station.

Les mesures de hauteur d'eau, très étroitement corrélés avec celles de la station de Galongo, ont été remaniées de façon assez sûres.

On peut donc s'attendre à des résultats plus exacts que ceux que nous avons obtenus à Bakel.

3.12 HYDROGRAMME

Les calculs effectués - ajustement des durées de dépassement des débits $Q_o = 500, 1000, 2000, 3000, 4000 \text{ m}^3/\text{s}$

- ajustement des débits de pointe (cf. chap. 1)
- corrélations crue par crue des durées de dépassement des divers seuils avec le débit de pointe et réduction conséquente des valeurs de ces durées pour un hydrogramme basé sur un débit de pointe de fréquence F ,

étant identique à ceux que nous avons effectués pour la station de Bakel, nous en donnons directement le tableau des résultats.

T	1 000		100		10		2	
Q_0	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé
4 000	38	33	31	25	16	15	0	0
3 000	68	58	60	44	44	42	9	9
2 000	88	74	79	68	65	60	43	43
1 000	123	105	114	99	99	92	77	77
500	160	138	150	132	135	125	112	112

Durées de dépassement en jours des seuils Q_0 (m^3/s) à temps de retour T (années) donnés

- Ajusté : valeur donnée par l'ajustement statistique de Gauss
- Corrélé : valeur à prendre en compte dans l'hydrogramme de temps de retour T basé sur le débit $Q_M(T)$ de pointe.

Enfin, comme à Bakel, nous avons étudié les dates milieu de divers seuils de débit ; 3 000 m^3/s , 1 000 m^3/s , 500 m^3/s ainsi que la date d'apparition du sommet.

Cette analyse, représentée fig. 7 montre :

- que l'hydrogramme à Kayes n'est pas aussi symétrique que celui de Bakel ;
- mais que l'ordre de grandeur de dispersion des points est identique (50 % des points dans un intervalle de 15 jours pour le sommet et de 7 jours pour la base) ;
- que cette dispersion se fait de façon beaucoup moins dissymétrique autour de la valeur médiane qu'à Bakel.

Nous retenons :

Seuil	500 m^3/s	1 000 m^3/s	3 000 m^3/s	Sommet
Date milieu médiane	14/9	10/8	7/9	5/9

L'ensemble de ces résultats conduit aux hydrogrammes de temps de retour $T = 1000$ ans et $T = 100$ ans des fig. 8 et 9. On constate une montée de crue exponentielle jusqu'à 3 000 m^3/s .

Par contre, au voisinage du sommet et à la décrue, cette forme exponentielle est beaucoup moins parfaite. En particulier un aplatissement sensible de l'hydrogramme est visible au-dessus du seuil 3 000 m^3/s .

3.2 HYDROGRAMMES A KIDIRA

3.21 VALIDITE DES DONNEES

Sur l'ensemble de la Falemé les mesures de hauteur d'eau ont été effectuées avec extrêmement peu de soin. Les travaux de corrélation inter-station menés à bien par l'ORSTOM ont sensiblement réduit l'incertitude des mesures et les ont rendues utilisables. Cependant nous devons garder à l'esprit que les données sont nettement moins précises qu'à Bakel ou à Kayes.

Cela est d'autant plus regrettable que la station présente une remarquable stabilité dans le temps de sa courbe de tarage, et que les erreurs dues à la loi hauteur-débit sont très faibles.

Nous supposerons donc en cette station une incertitude aléatoire sur les données, mais pas d'erreur systématique notable.

Pour l'étude des débits de pointe, nous possédons 30 années de données, portant sur la période 1930 - 1964. L'échantillon constitué de ces valeurs est aussi représentatif que l'échantillon des 62 valeurs 1903 - 1964 de la population totale : l'ajustement à Bakel ou à Kayes donne les mêmes résultats avec ce sous-échantillon qu'avec l'échantillon complet.

Par contre nous ne possédons de renseignement utilisables sur l'ensemble des débits de crue que sur une période de 14 ans, de 1951 à 1964. Ceci nous a amené à étudier les durées de dépassement des seuils Q_o choisis à Kidira par une méthode différente (et moins précise) de celle que nous avons utilisée à Kayes ou Bakel. De même pour les dates milieu, l'échantillon 1951 - 1964 n'étant pas représentatif de la population totale.

3.22 FORME DE L'HYDROGRAMME

Sur les échantillons des crues de la période 1951 - 1964, nous avons comparé :

- les dates d'arrivée du maximum à Kayes, Bakel et Kidira ;
- les dates milieu des seuils 500 et 1000 à Kidira, par rapport aux dates milieu 1 000 et 3 000 à Kayes et Bakel.

De cette comparaison il ressort :

- Une bonne correspondance avec les résultats trouvés indépendamment à Bakel et à Kayes prouvant la validité de la méthode ;
- les dates probables pour Kidira, résumées dans le tableau ci-dessous :

Seuil	500	1 000	Sommet
Date milieu médiane	9/9	7/9	7/9

- Un ordre de grandeur de la dispersion des valeurs réelles par rapport à la médiane : cette dispersion est plus forte que celle de Kayes, et assez symétriquement distribuée. Un réseau de courbes de distribution comme celui de la fig. 7 tracé à Kidira aurait donc la même physionomie, mais les courbes seraient un peu plus aplatis.

On constate donc que les hydrogrammes médianes de crue à Kidira sont relativement symétriques, comme il le sont à Bakel.

3.23 DUREES DE DEPASSEMENT DES SEUILS Q_o

On a choisi les seuils $Q_o = 200, 500, 1\ 000, 1\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sur les 14 années utilisables, la corrélation crue par crue entre les durées de dépassement de chacun de ces seuils à Kidira et les durées de dépassement de tout seuil à Kayes ou à Bakel est à peu près nulle.

D'autre part, si l'on ajuste l'échantillon portant sur ces 14 ans des durées de dépassement d'un seuil à Kayes ou à Bakel, on trouve un ajustement dont les résultats sont erronés, les 14 ans considérés n'étant pas représentatifs statistiquement.

Nous avons donc corrélé les valeurs classées des durées de dépassement à Kidira avec les valeurs classées des durées de dépassement à Kayes, les deux échantillons portant sur la même période de 14 ans.

Pour plus de sûreté, à chaque seuil Q_o à Kidira nous avons associé deux seuils Q_1 et Q_2 à Kayes, et nous avons pris une valeur intermédiaire des résultats.

Ayant trouvé une droite de corrélation donnant les valeurs à Kidira en fonction des valeurs à Kayes, nous avons déterminé quelles durées de dépassement de Q_o correspondaient aux valeurs de temps de retour T des durées de dépassement des seuils Q_1 et Q_2 à Kayes.

Ce schéma de calcul est évidemment assez grossier, mais il est encore celui qui donne les meilleurs résultats, compte tenu du peu de données à notre disposition.

Nous proposons donc les valeurs suivantes, à 20 ou 25 % près.

T	1 000 ans		100 ans		10 ans	
	Q_M	5 200		4 000		2 750
1 500	37	36	34	33	23	23
1 000	57	53	50	47	38	37
500	88	79	80	74	67	64
200	128	117	120	110	104	100
Q_o	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé	Ajusté	Corrélé

Bien entendu les valeurs corrélées n'ont pas été obtenues par corrélation directe - il faut au moins 50 à 100 valeurs pour que la méthode soit utilisable. Mais par comparaison avec les résultats à Kayes et à Bakel. Elles ont de plus été réajustées par un lissage de l'hydrogramme résultant.

3.24 HYDROGRAMME A KIDIRA

Nous avons tracé sur les fig. 8 et 9 les hydrogrammes des crues millénaires et centenales à Kidira.

Compte tenu des restrictions précédentes en ce qui concerne la précision obtenue, on peut constater :

- que la montée de crue est assez proche d'une exponentielle, alors que la décrue est constituée de deux arcs d'exponentielle raccordés vers le débit 1 000 m³/s ;
- contrairement aux hydrogrammes à Kayes, une pointe de crue assez effilée.

3.3 COMPOSITION DES DEUX HYDROGRAMMES

Nous avons recomposé les hydrogrammes à Bakel par superposition des hydrogrammes à Kayes et à Kidira (fig. 8 et 9).

Pour cela nous n'avons pas tenu compte de l'amortissement en amont à Bakel, ni des apports possibles.

Par contre nous avons mis en évidence le décalage dans le temps des hydrogrammes à Kayes et à Kidira, compte tenu d'une propagation de 2 jours entre Kayes et Bakel et de 1 jour entre Kidira et Bakel.

Sur ces fig. 8 et 9, nous avons reporté les hydrogrammes obtenus par l'étude directe à Bakel, compte tenu de leur légère dissymétrie.

La concordance des résultats est très bonne, malgré l'imprécision sur les hydrogrammes à Kidira.

On peut constater :

- que le "gonflement" que nous avions considéré comme dû aux erreurs sur les données entre 1 500 et 6 000 m³/s à Bakel est complètement supprimé dans cette nouvelle approche : on peut donc retenir cette hypothèse des erreurs de tarage et accepter l'hydrogramme exponentiel à Bakel ;

- que l'hydrogramme reconstitué à partir des crues à Kayes et à Kidira est sensiblement plus fort en pointe, mais moins large à la base : ceci met en évidence l'étalement entre Kayes et Bakel d'une part et entre Kidira et Bakel d'autre part, et confirme les résultats du chapitre 1.

3.4 CONCLUSION

Les résultats de l'étude de ce troisième chapitre sont moins précis que ceux du second chapitre, qui présentent les hydrogrammes-type définitif des crues de temps de retour 1 000, 100 et 10 ans du Sénégal à Bakel.

Mais ils permettent de lever le doute qui subsistait sur leur exactitude, doute provenant de l'erreur systématique sur la loi hauteur-débit de la station de Bakel : la correction effectuée au second chapitre du "gonflement" des hydrogrammes est en effet amplement justifiée par les résultats de la seconde approche, indépendante de la courbe de tarage à Bakel.

000