

ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE

PROJET AGRHYMET

OMM / PNUD - SEN / 86 / 009

CONTRAT 17.532 / A / PEX DU 31.1.1992

ETUDE DE L'IMPACT DU BARRAGE DE
MANANTALI SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE
DU SENEGAL AU NIVEAU DE BAKEL

J.C. BADER
ORSTOM
DAKAR, OCTOBRE 1992

INTRODUCTION

Le barrage de Manantali, implanté sur la rivière Bafing qui fournit environ la moitié du débit du fleuve Sénégal, influence le régime de ce dernier depuis 1987. Les premières années de son fonctionnement ont été consacrées au remplissage de la retenue (11301 millions de m³ pour la cote de déversement, soit le débit moyen interannuel du Bafing pendant plus d'un an), et au test des différents organes de l'ouvrage. L'usine hydroélectrique, qui constitue une des parties essentielles de l'aménagement, n'est par ailleurs toujours pas installée à ce jour.

Toutes ces raisons font que la gestion réalisée jusqu'à présent ne peut être considérée comme représentative du fonctionnement normal de l'ouvrage, et il a donc été décidé d'étudier l'impact de celui-ci sur le régime du fleuve Sénégal, non pas en se référant aux observations faites depuis 5 ans, mais en simulant une gestion opérationnelle du barrage sur une longue série de données relatives au régime naturel. Cette méthode offre l'avantage de fournir des résultats exploitables en termes de statistiques, et permet de tester l'effet de différents types de gestion, par comparaison avec le régime naturel.

Le logiciel utilisé pour faire les simulations ayant été mis au point préalablement dans le cadre d'une collaboration entre l'OMVS et l'ORSTOM, sur financement du FAC, le contenu de la présente étude a consisté dans un premier temps à réviser l'étalonnage de la station de Bakel, au vu de nouveaux résultats de jaugeages, ainsi que le calage du modèle de propagation de débits utilisé dans les calculs. Différents types de gestion, définis de façon arbitraire à partir des objectifs généraux assignés à l'ouvrage, d'ores et déjà connus, ont ensuite été testés avec le logiciel de simulation. Les résultats obtenus, concernant les débits du Sénégal à Bakel, ont enfin été analysés de façon statistique, et comparés aux valeurs du régime naturel.

Les simulations ont été effectuées sur la période allant de 1951 à 1985, qui comporte à la fois des séries d'années humides et d'années sèches. Il aurait certes été possible de faire les calculs sur une période plus longue (remontant jusqu'en 1904), préférable pour l'analyse statistique. Mais les résultats obtenus auraient été moins fiables, du fait qu'une partie importante des données hydrométriques des années antérieures à 1951 ne sont que des valeurs reconstituées, et non observées.

1 REVISION DES ETALONNAGES DE LA STATION DE BAKEL

1-1 ETAT DES LIEUX

Du fait de la très faible pente générale du fleuve Sénégal, les stations situées de Bakel à l'embouchure ont un étalonnage non bi-univoque [1]. On y remarque que pour une même cote à l'échelle, le débit est plus fort à la crue qu'à la décrue, ce caractère augmentant de l'amont vers l'aval.

De nombreuses mesures de débit (cf annexe), effectuées entre 1950 et 1962 d'une part, et entre 1973 et 1987 d'autre part, ont permis de définir deux étalonnages distincts pour la station de Bakel, par la méthode dite du gradient limnimétrique [2]. Cette méthode consiste à relier le débit à la cote et à la vitesse de variation de celle ci, de la façon suivante:

$$Q = Q_0(H) \cdot \text{racine}(1 + K(H) \cdot DH)$$

avec:

$Q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	:	débit
$H \text{ (cm)}$	:	cote à l'échelle limnimétrique
$DH \text{ (cm.jour}^{-1}\text{)}$	:	gradient limnimétrique
$K(H) \text{ (jour.cm}^{-1}\text{)}$	:	coefficient de correction de gradient pour la cote H
$Q_0(H) \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	:	débit correspondant au régime permanent théorique pour la cote H

Les deux étalonnages ainsi définis, que nous noterons désormais A et B, sont présentés dans le tableau 1. Lors de leur établissement, du fait de l'absence de données de jaugeages entre 1963 et 1972, la date du détarage n'avait pas été déterminée.

Tableau 1: étalonnages A (1951-1962) et B (1973-1989) de la station de Bakel par la méthode du gradient limnimétrique

Etalonnage A du régime permanent théorique:

H	15	20	40	50	60	70	80	100	120	150	180	220	270	330	350	400	450	500	550	600	650	700	800	900	1000	1100	1200	1299
Q_0	0.0	0.3	2.0	5.3	10.0	16.5	23.5	38.3	54.9	81.0	114	171	274	432	492	655	822	1000	1190	1380	1583	1785	2210	2680	3550	4830	6200	7690

Etalonnage B du régime permanent théorique:

H	15	30	50	60	70	90	110	140	170	200	230	270	300	350	400	450	500	550	600	650	800	850	900	950	1000	1050	1079
Q_0	0.0	0.3	2.3	4.6	7.6	17.1	34.1	72.3	123	181	248	356	440	596	781	981	1215	1449	1692	1953	2825	3200	3640	4103	4589	5077	5370

Variations du coefficient de correction de gradient pour les étalonnages A et B:

H	0	320	360	400	440	480	520	560	600	640	720	900	1000	1100	1200	1300	1400
$100 \cdot K$	1.00	1.00	0.87	0.76	0.60	0.52	0.47	0.44	0.42	0.41	0.40	0.40	0.44	0.50	0.59	0.67	0.74

1-2 DETERMINATION DE LA DATE PROBABLE DU DETARAGE

1-2-1 EVOLUTION DES RELATIONS LIANT LES COTES ENTRE STATIONS

Les relations existant entre les cotes moyennes journalières observées aux stations de Kayes, Bakel, Matam et Kaédi, ont été définies entre 1951 et 1989 pour une plage de cotes assez large, sur laquelle elles sont néanmoins linéaires: Kayes (169 - 441 cm); Bakel (235 - 570 cm); Matam (200 - 600 cm); Kaédi (193 - 637 cm). Ces plages de cotes sont par ailleurs entièrement couvertes chaque année par la crue naturelle du fleuve.

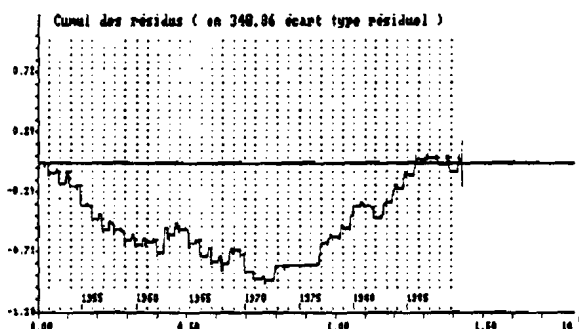
Les résultats obtenus ont été analysés par la méthode du cumul des résidus [3], qui a permis de détecter des modifications dans les régressions, intervenant dans la plupart des cas entre 1971 et 1972, comme le montre la figure 1. Si on prend comme base la station de Kayes, dont on est sûr que le zéro de l'échelle n'a pas changé, et qui est peu susceptible de s'être détarée, on obtient les résultats moyens (et approximatifs) suivants:

pour une même cote à la station de Kayes (entre 169 et 441 cm),

- la cote correspondante à Bakel sur la période 1972-1989 est inférieure de 3 cm à celle de la période 1951-1971;
- la cote correspondante à Matam sur la période 1972-1989 est inférieure de 16 cm à celle de la période 1951-1971;
- la cote correspondante à Kaédi sur la période 1972-1989 est inférieure de 31 cm à celle de la période 1951-1971.

En conclusion, on peut distinguer deux périodes nettement distinctes du point de vue de la propagation des crues entre Kayes et les stations de Bakel, Matam et Kaédi: 1951-1971 d'une part, et 1972-1989 d'autre part. Parmi les causes possibles du changement constaté à partir de 1972, on peut évoquer bien sûr la sécheresse qui provoque un amenuisement des apports intermédiaires, et un accroissement des pertes entre stations, mais également de possibles détarages.

Figure 1: tracé du cumul des résidus des régressions entre cotes des différentes stations, pour les plages suivantes: 169-441cm (Kayes), 235-570 cm (Bakel), 200-600 cm (Matam).



$$KAEDI = F(MATAM)$$

$$H_{kaedi}(j) = 1.109 * H_{matam}(j-2) - 28.7$$

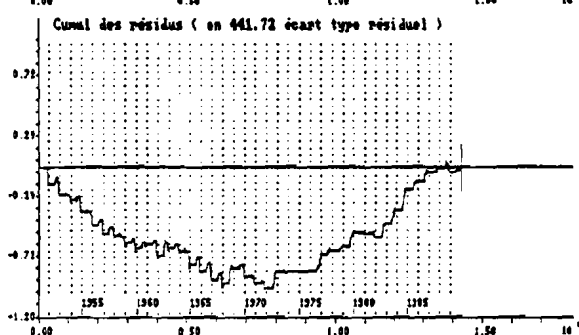
$$R = 0.977 \quad \text{écart type résiduel} = 28.0 \text{ cm}$$

1951-1971: 1833 points 1972-1989: 1412 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -12 cm à Kaédi, pour une même cote à Matam

soit de 11 cm à Matam, pour une même cote à Kaédi



$$KAEDI = F(BAKEL)$$

$$H_{kaedi}(j) = 1.388 * H_{bakel}(j-5) - 138$$

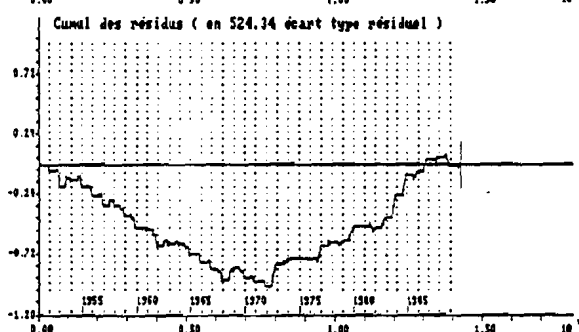
$$R = 0.936 \quad \text{écart type résiduel} = 48.3 \text{ cm}$$

1951-1971: 1919 points 1972-1989: 1409 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -26 cm à Kaédi, pour une même cote à Bakel

soit de 19 cm à Bakel, pour une même cote à Kaédi



$$KAEDI = F(KAYES)$$

$$H_{kaedi}(j) = 1.689 * H_{kayes}(j-7) - 94.2$$

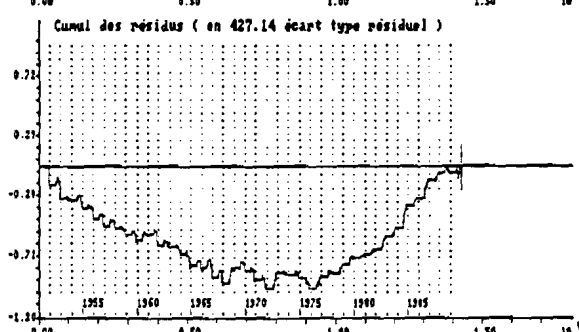
$$R = 0.917 \quad \text{écart type résiduel} = 57.9 \text{ cm}$$

1951-1971: 1717 points 1972-1989: 1467 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -38 cm à Kaédi, pour une même cote à Kayes

soit de 23 cm à Kayes, pour une même cote à Kaédi



$$MATAM = F(BAKEL)$$

$$H_{matam}(j) = 1.237 * H_{bakel}(j-3) - 94.2$$

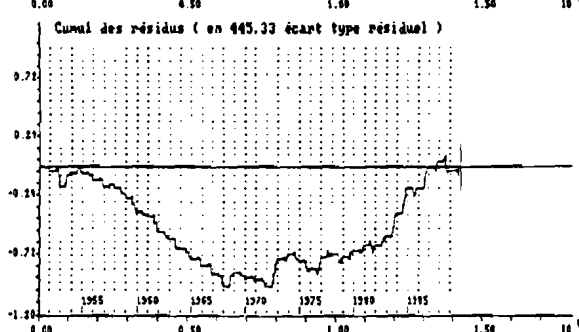
$$R = 0.974 \quad \text{écart type résiduel} = 27.1 \text{ cm}$$

1951-1971: 2148 points 1972-1989: 1654 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -12 cm à Matam, pour une même cote à Bakel

soit de 10 cm à Bakel, pour une même cote à Matam



$$MATAM = F(KAYES)$$

$$H_{matam}(j) = 1.533 * H_{kayes}(j-5) - 62.5$$

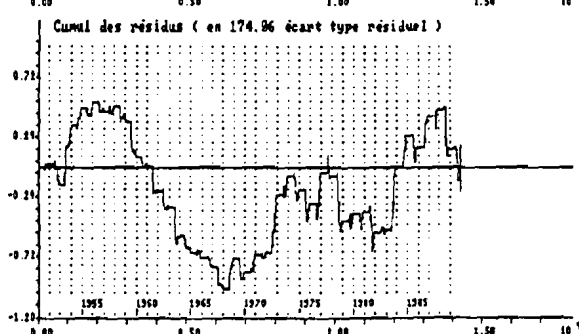
$$R = 0.946 \quad \text{écart type résiduel} = 41.9 \text{ cm}$$

1951-1971: 1865 points 1972-1989: 1750 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -21 cm à Matam, pour une même cote à Kayes

soit de 13 cm à Kayes, pour une même cote à Matam



$$BAKEL = F(KAYES)$$

$$H_{bakel}(j) = 1.254 * H_{kayes}(j-2) + 22.8$$

$$R = 0.966 \quad \text{écart type résiduel} = 26.6 \text{ cm}$$

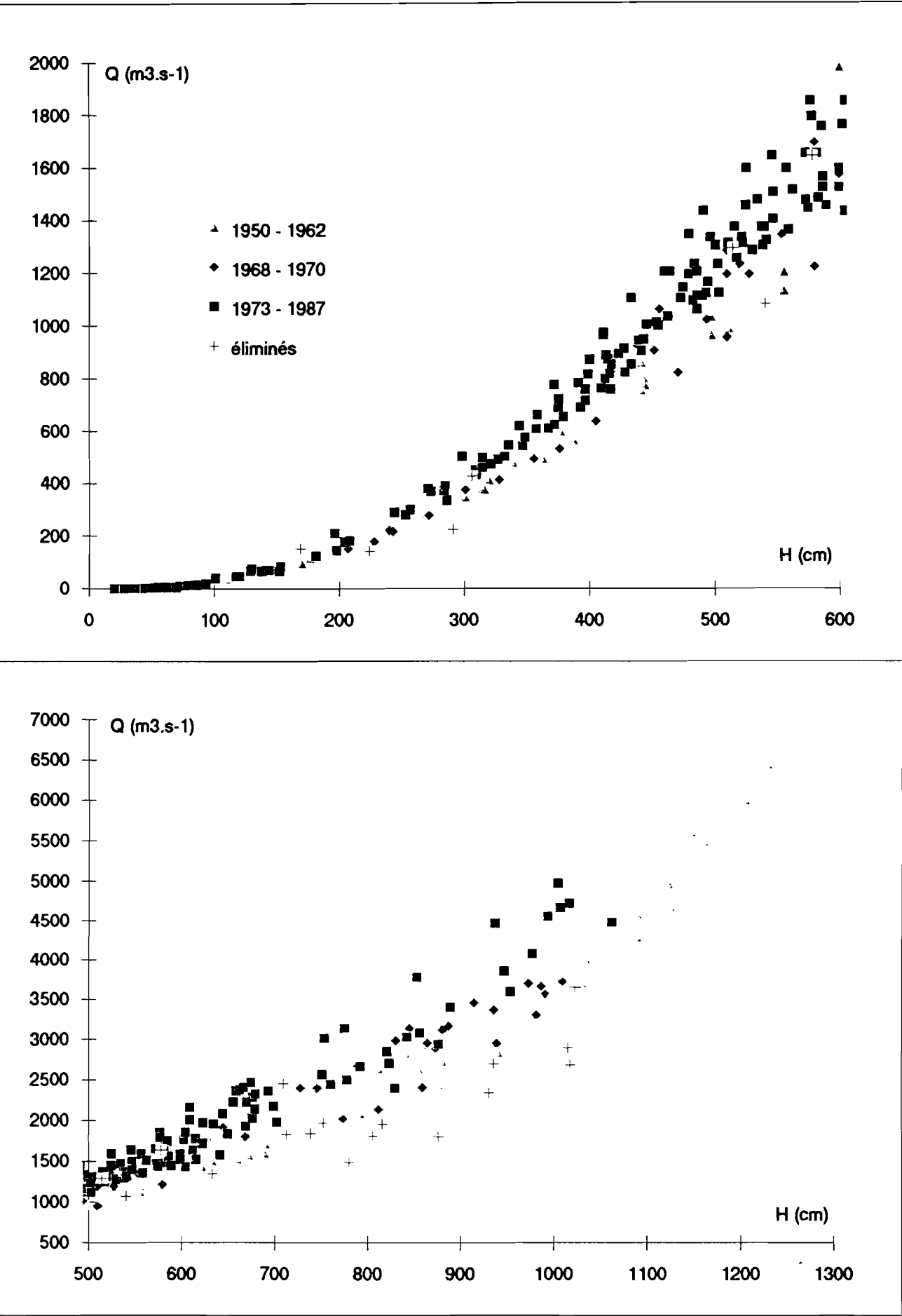
1951-1971: 1896 points 1972-1989: 1793 points

Les cotes de 1972 à 1989 sont décalées par rapport à celles de la période 1951-1971:

soit de -4 cm à Bakel, pour une même cote à Kayes

soit de 3 cm à Kayes, pour une même cote à Bakel

Figure 2 : Ensemble des mesures de débit effectuées sur le Sénégal à Bakel



1-2-2 PRISE EN COMPTE DE MESURES DE DEBIT SUPPLEMENTAIRES.

Les résultats d'une série de 54 jaugeages effectués de 1968.à 1970, non pris en compte lors de l'établissement des étalonnages A et B [2], mais figurant dans la banque de données informatisée de la DGRH du Sénégal (Section d'Hydrologie), on été comparés aux résultats des séries de 1951 à 1962, et de 1973 à 1987. Comme on peut le constater sur la figure 2, ces jaugeages concordent avec ceux de la période 1951-1962. Ceci, ajouté à l'analyse menée plus haut, nous permet de positionner la date probable du détarage de la station de Bakel entre 1971 et 1972.

1-3 ANOMALIE CONSTATEE ENTRE LES ETALONNAGES A ET B

Un modèle de propagation de crue [4] permet de déterminer au pas de temps journalier, le débit passant à la station de Bakel en fonction des débits transitant à Gourbassy sur la Falémé et à Kayes sur le Sénégal. Son principe consiste en une série de régressions par tronçons de débit, faisant intervenir des temps de propagation variables suivant ces tronçons.

A priori, la propagation des débits est peu susceptible d'avoir été modifiée de façon importante entre les trois stations, par les variations d'hydraulicité du fleuve (en tous cas, certainement pas dans le sens d'une augmentation des débits propagés pendant la période sèche des années postérieures à 1971, comme on verra plus loin). Ce mode de propagation doit par ailleurs être indépendant des éventuels détarages des stations. Pour ces deux raisons, il a été décidé d'utiliser un unique calage du modèle de propagation, qui doit être valable sur la totalité de la période étudiée: 1951-1985.

Tableau 2 : modèle de propagation des débits journaliers entre Kayes, Gourbassy et Bakel

QKayes(t) + QGourbassy(t) [m³.s⁻¹]	0	10	20	29	40	50	58	69	79	91	200	300	500	850	1180	2150	3050	3500	3810	5000
QBakel(t+Temps) [m³.s⁻¹]	0	8	14	21	35	48	61	75	88	107	244	355	575	970	1355	2530	3500	4080	4500	5720
Temps [jours]	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	2.5	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1.5	1.5	1.5	3.5

Le modèle (tableau 2), calé sur des données de débits postérieures à 1971 (utilisant donc pour Bakel l'étalonnage B), donne une bonne reconstitution des débits à Bakel sur cette même période. Par contre pour la période antérieure, on constate qu'il donne des valeurs nettement trop fortes, ou inversement, que les débits calculés avec l'étalonnage A sont nettement trop faibles (figures 3 et 4). Avec les étalonnages A et B, tout se passe donc comme si, pour une même somme de débit passant à Kayes et Gourbassy, le débit propagé résultant au niveau de Bakel avait été sensiblement plus élevé sur la période 1972-1989 que sur la période 1951-1971, ce qui, comme on l'a vu, est inacceptable.

figure 3 : comparaison des valeurs de débit calculées à partir des étalonnages A et B (en trait plein), avec les valeurs données par le modèle de propagation (en pointillés)

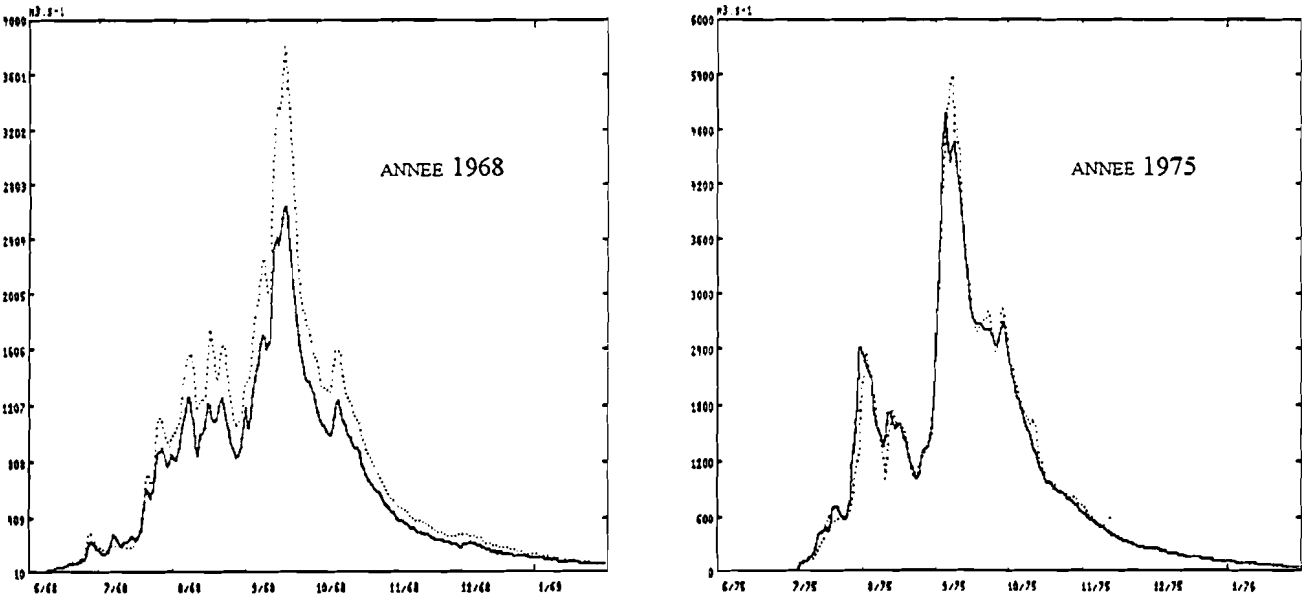
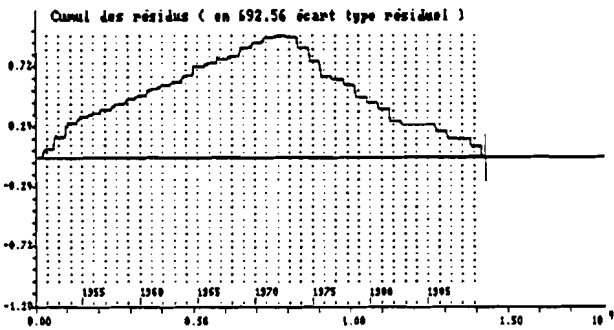


figure4 : tracé du cumul des résidus de la régression entre les débits journaliers passant à Bakel (calculés avec les étalonnages A et B), et les valeurs obtenues par le modèle de propagation, sur la plage 1000-3000 m³.s⁻¹



Q_b : débit à Bakel (étalonnages A et B)
 Q_p : débit à Bakel, calculé par le modèle de propagation
 $Q_p = 0.776 \cdot Q_b + 156 \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
 $R = 0.899$ écart type résiduel = $211 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1951-1971: 1189 points 1972-1989: 880 points
Les débits Q_b de la période 1972-1989, sont supérieurs à ceux de la période 1951-1971, de $289 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en moyenne, pour une même valeur de Q_p .

Manifestement, les étalonnages A et B présentent entre eux un écart trop important, et méritent d'être repris.

1-4 PROPOSITION D'UN NOUVEL ETALONNAGE

Une analyse des résultats de jaugeages a été menée de la même façon que pour l'établissement des étalonnages A et B, aux différences près suivantes:

- utilisation des 54 jaugeages de la période 1968-1970;
- choix légèrement différent des points à éliminer (indiqués dans la liste de l'annexe 1 et sur les figures 2 et 5);
- volonté délibérée de resserrer les courbes.

Les résultats obtenus permettent de remplacer les étalonnages A (1951-1971) et B (1972-1989) par les étalonnages C et D (tableau 3) respectivement, valables sur les mêmes périodes. Les courbes $Q_0(H)$ du régime permanent théorique, correspondant à ces étalonnages, sont représentées sur la figure 5.

tableau 3 : étalonnages C (1951-1971) et D (1972-1989) de la station de Bakel

Etalonnage C du régime permanent théorique

H (cm)	20	26	36	47	58	72	85	100	120	140	160	180	210	240	280	320	350	380
$Q_0 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0	0.5	2	5	10	17	25	36	50	68	88	117	164	225	318	430	514	610
H (cm)	440	510	590	690	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1265	1300			
$Q_0 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	845	1130	1480	1975	2550	2815	3090	3415	3830	4300	4850	5500	6180	7100	7600			

Etalonnage D du régime permanent théorique

H (cm)	20	40	54	66	72	84	90	104	120	140	156	170	190	204	226	250	280	300	336
$Q_0 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0	1	2	5	7	15	20	32	48	69	90	112	147	175	220	280	360	417	527
H (cm)	375	410	450	500	550	600	700	750	800	850	900	1000	1100	1200	1265	1300			
$Q_0 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	650	780	945	1170	1400	1640	2170	2450	2750	3110	3510	4360	5265	6270	7100	7600			

Variations du coefficient de correction de gradient pour les étalonnages C et D

H (cm)	0	220	350	900	1300
$100 \cdot K$	1.5	1.5	0.9	0.5	0.5

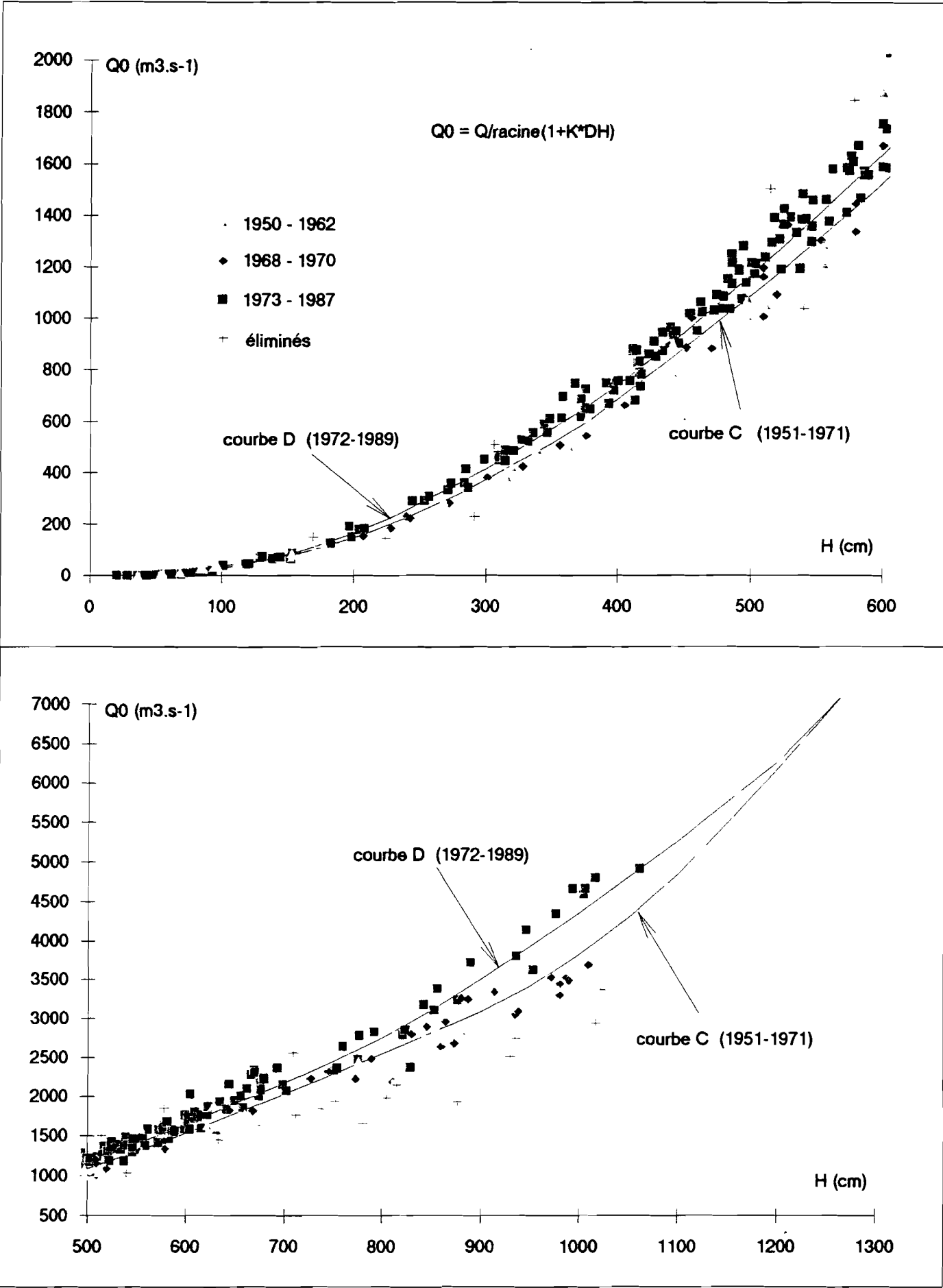
1-5 REVISION DU CALAGE DU MODELE DE PROPAGATION

Après traduction des cotes de la station de Bakel en débits, à partir des étalonnages révisés C et D, on a procédé à un nouveau calage du modèle de propagation entre Kayes, Gourbassy et Bakel, en prenant en compte la totalité des données disponibles sur la période 1955-1985. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.

tableau 4 : modèle de propagation des débits entre Kayes, Gourbassy et Bakel. Coefficients révisés.

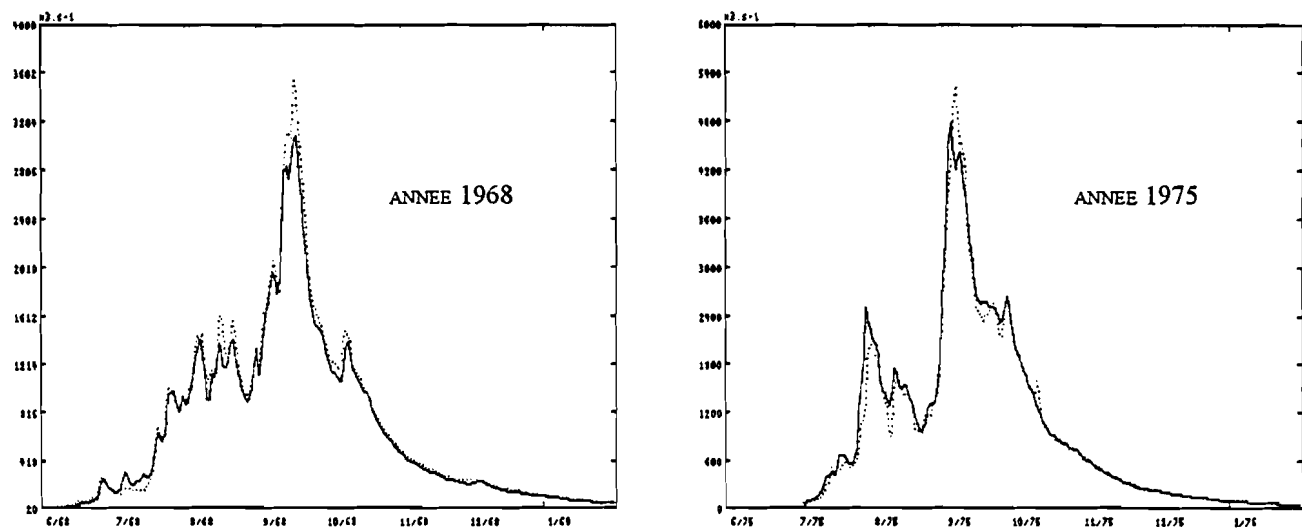
$Q_{\text{Kayes}}(t) + Q_{\text{Gourbassy}}(t) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	0	125	250	375	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
$Q_{\text{Bakel}}(t+\text{Temps}) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	0	137	275	402	521	765	1034	1320	1598	1869	2136	2652	3158	3752	4390	5006	5611	6077	6515
Temps [jour]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2

figure 5 : Etalonnages révisés, relatifs au régime permanent théorique du Sénégal à Bakel



Le modèle ainsi recalé donne une reconstitution correcte des débits à Bakel, à la fois avant et après la date du détarage, comme le montre la figure 6 que l'on pourra comparer à la figure 3.

figure 6 : comparaison des valeurs de débit calculées à partir des étalonnages C et D (en trait plein), avec les valeurs données par le modèle de propagation révisé (en pointillés)

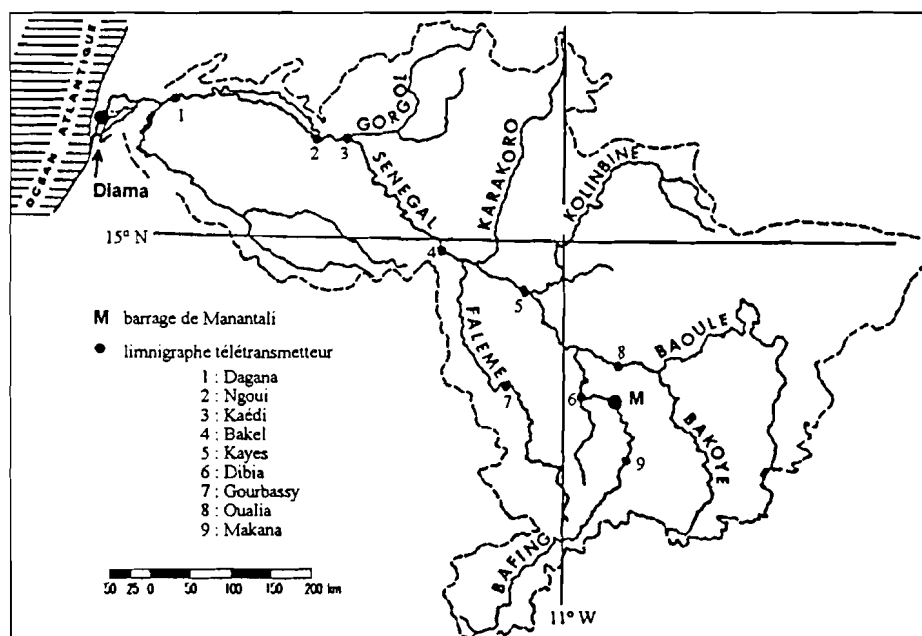


2 PRINCIPE DES CALCULS SIMULANT L'EFFET DU BARRAGE DE MANANTALI SUR LE REGIME DU SENEGAL AU NIVEAU DE BAKEL

2-1 FONCTIONS DE L'AMENAGEMENT DE MANANTALI, ET PRINCIPES DE SA GESTION

Deux barrages importants, Diama et Manantali (figure 7), permettent depuis 1987 de maîtriser largement la ressource en eaux de surface dans la vallée du fleuve Sénégal. Le premier, implanté près de l'embouchure du fleuve, permet à la fois de garantir un niveau suffisant dans la basse vallée et d'éviter la remontée de la langue salée, favorisant ainsi le remplissage du lac de Guiers et l'irrigation. Le second, implanté sur le Bafing en amont du bassin, et contrôlant environ la moitié des volumes d'eau transitant dans la vallée, est à vocation multiple: production d'électricité; soutien d'étiage permettant la navigation ou l'irrigation à grande échelle dans la vallée; laminage des fortes crues afin de protéger les ouvrages; soutien des faibles crues pour permettre une inondation suffisante du lit majeur dans la vallée, indispensable aux cultures traditionnelles de décrue.

figure 7 : plan de situation des ouvrages de Diama et Manantali sur le bassin du fleuve Sénégal



L'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur de la Vallée du Fleuve Sénégal), regroupant le Mali, la Mauritanie et le Sénégal, est le gestionnaire de ces ouvrages. L'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), a réalisé pour le compte de cet organisme, sur financement du FAC (Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française), un certain nombre de travaux visant à permettre une gestion optimale du barrage de Manantali. On peut citer entre autres les réalisations suivantes:

- réalisation et mise à jour d'une banque informatisée de données hydrométriques des stations du bassin du fleuve Sénégal (logiciel HYDROM);
- étalonnage de stations hydrométriques [2];
- modèle numérique de propagation des débits dans le fleuve [4] (présenté plus haut au 1-3);
- installation d'un système automatique de collecte de données, constitué de 9 limnigraphes télétransmetteurs et d'une station de réception satellitaire (système ARGOS), permettant de connaître les débits transitant en différents points du réseau hydrographique, en temps quasi réel (fig. 7);
- logiciel PROGESEN [5], permettant de prévoir en temps réel les lâchures à effectuer à Manantali, en fonction des données reçues sur la station de réception satellitaire et du débit désiré dans la vallée;
- homogénéisation de la banque de données hydrométriques du haut bassin du Sénégal, et reconstitution des données manquantes [6];
- logiciel SIMULSEN [7], destiné à simuler la gestion de la retenue de Manantali au pas de temps journalier, à partir de la banque de données hydrométriques homogénéisée, et permettant de tester l'impact de différentes règles de gestion sur le degré de satisfaction des objectifs assignés à la retenue.

Certains des objectifs assignés au barrage de Manantali sont concurrents entre eux, parfois même contradictoires. Il se présentera inmanquablement des cas où, du fait de l'état de remplissage de la retenue et de la situation hydrologique, tous ne pourront être satisfaits simultanément. Quel que soit le type de gestion retenu, il sera donc parfois indispensable de faire un choix entre ces différents objectifs, ce qui revient à les classer selon un ordre de priorité. C'est ce classement, ajouté à la définition numérique des objectifs retenus, qui caractérise un type de gestion donné, pouvant être simulé à l'aide de SIMULSEN.

La présente étude va consister à intégrer dans la banque de données hydrométriques et dans SIMULSEN, les modifications d'étalonnage et de modèle de propagation décrites dans le paragraphe 1, puis à utiliser SIMULSEN pour un certain nombre de types de gestion. Les résultats obtenus au niveau des débits à Bakel seront alors analysés sous un angle statistique, permettant de les comparer aux caractéristiques du régime naturel.

2-2 DESCRIPTION SOMMAIRE DES FONCTIONS DU LOGICIEL SIMULSEN

2-2-1 BUTS DU LOGICIEL

SIMULSEN est un logiciel destiné à évaluer l'effet de différentes règles de gestion du barrage de Manantali sur le Bafing, sur le degré de satisfaction des demandes suivantes:

- production d'hydroélectricité;
- débit transitant au niveau de Bakel sur le Sénégal, correspondant à la somme des besoins en irrigation, consommation humaine et autres besoins éventuels;
- débit transitant au niveau de Bakel, permettant à la fois la navigation et l'inondation annuelle nécessaire à la culture de décrue dans la vallée du Sénégal («crue artificielle»);
- laminage des crues au niveau de la sortie de la retenue;
- laminage des crues au niveau de Bakel.

Ce logiciel permet de simuler numériquement la gestion de la retenue selon différentes règles laissées au choix de l'utilisateur, et de calculer ce qui résulte de cette gestion en matière de propagation de débit (jusqu'au niveau de Bakel), d'évolution du niveau de la retenue et de production d'électricité. Les simulations sont faites au pas de temps journalier, sur une période de durée quelconque fixée entre 1904 et 1989. Elles utilisent les chroniques de débits journaliers de la banque de données homogénéisées du haut bassin du Sénégal, et permettent donc de reproduire les résultats qui auraient été obtenus si le barrage avait existé sur la période examinée, selon les modes de gestion retenus.

2-2-2 PRINCIPALES FONCTIONS DU LOGICIEL

2-2-2-1 GESTION DE PARAMETRES

SIMULSEN permet à l'utilisateur de gérer la totalité des paramètres intervenant dans les calculs de simulation, à savoir:

- caractéristiques du lac de retenue, des organes du barrage et de l'usine hydroélectrique;
- paramètres décrivant la propagation des débits entre les différentes stations utilisées pour la simulation. Ces stations, ainsi que la façon dont elles doivent être utilisées dans les calculs (selon la configuration du réseau de limnigraphes télétransmetteurs), sont laissées au choix de l'utilisateur.

- Paramètres décrivant les différents besoins en débits exprimés au niveau de Bakel (irrigation, soutien de crue, navigation, alimentation humaine);
- hydrogrammes limites à respecter dans le lac, permettant de limiter les risques de défaillance pour la fourniture de débits au niveau de Bakel (niveau limite inférieur), ou pour le laminage des crues (niveau limite supérieur). Ce type d'hydrogrammes peut être élaboré par une procédure particulière de SIMULSEN, évoquée plus bas.

2-2-2-2 CALCUL DE SIMULATION

Avant le lancement du calcul, l'utilisateur choisit dans une liste un certain nombre de règles de gestion, dont chacune doit être assortie d'un rang de priorité.

A chaque pas de temps de la simulation, les différentes règles retenues sont alors prises en compte par ordre de priorité décroissante, pour déterminer le débit journalier total à lâcher du barrage (vidangé + déversé + turbiné). L'application successive de ces règles se traduit par le resserrement d'une fourchette de valeurs limites pour ce débit total, jusqu'à ce que toutes les règles aient été prises en compte, ou que l'une d'entre elles s'avère incompatible avec la fourchette obtenue à partir des règles de priorité supérieure.

Une fois déterminé le débit journalier lâché par le barrage, la simulation détermine l'évolution du niveau dans le lac et la production d'électricité qui en résultent, ainsi que la propagation des débits en aval, avant de passer au pas de temps suivant.

Les différentes règles de gestion proposées à l'utilisateur sont les suivantes:

- Respect des limites physiques imposées par le barrage sur les lâchers**
Cette contrainte prend en compte les caractéristiques des différents organes d'évacuation du barrage pour déterminer les valeurs minimale et maximale de débit qu'il est physiquement possible d'évacuer.
- Respect du niveau maximal admissible pour la sécurité de la retenue**
- Respect d'une limite inférieure du niveau de la retenue**
Cette contrainte prend en compte le respect d'un hydrogramme limite inférieur dans la retenue, correspondant à une réserve compatible avec la satisfaction d'une demande de débit exprimée au niveau de Bakel, avec un certain niveau de risque de défaillance.
- Respect d'une limite supérieure du niveau de la retenue**
Cette contrainte prend en compte le respect d'un hydrogramme limite supérieur dans la retenue, garantissant, avec un certain niveau de risque de défaillance, la possibilité de laminar les crues au niveau de Bakel ou à la sortie de la retenue.
- Laminage des crues au niveau de Bakel (en débits moyens journaliers)**
- Laminage des crues au niveau de la sortie du barrage (en débits moyens journaliers)**
- Demande de production électrique**
Pour cette contrainte, l'utilisateur doit définir la puissance à produire ainsi qu'un seuil de turbinage, niveau limite dans le lac en dessous duquel on estime que la production d'électricité n'est pas rentable. Il est ensuite proposé un certain nombre d'options, détaillées dans la notice du logiciel.
- Satisfaction de différents types de besoins en eau, exprimés à Bakel**
La prise en compte de ce type de contrainte se traduit par un calcul du débit total à lâcher au niveau de Manantali, pour que le débit qui en résulte un certain temps après au niveau de Bakel, coïncide avec l'hydrogramme des demandes considéré.

2-2-2-3 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats d'un calcul de simulation se présentent sous forme de fichiers de pas de temps journaliers s'étendant sur la période simulée, comportant les valeurs de débits aux stations situées en aval du barrage, les cotes dans le lac et les productions d'électricité. Les valeurs contenues dans ces fichiers peuvent être examinées soit en tant que chroniques, soit en termes statistiques décrivant leurs fonctions de répartition. Ces examens peuvent être faits par édition de tableaux de chiffres ou par tracés graphiques. Il est possible également de déterminer les fonctions de répartition des moyennes annuelles et des valeurs caractéristiques des différents paramètres reconstitués, et de caractériser les taux d'échecs obtenus pour la satisfaction des besoins exprimés au niveau de Bakel.

Un module spécial permet d'élaborer la chronique des niveaux limites minimaux ou maximaux dans le lac, compatible avec la réalisation de la chronique de débits totaux lâchés par la retenue, obtenue par le calcul de simulation. Cette chronique de niveaux limites peut, elle aussi, être examinée en termes de fonction de répartition, et ainsi générer des règles de gestion utilisables par les calculs de simulation, consistant en des hydrogrammes de niveaux limites à respecter dans le lac [8].

3 DESCRIPTION DES REGLES DE GESTION RETENUES

3-1 REGLE A : LAMINAGE DES CRUES AU NIVEAU DE BAKEL (4500 M³.S⁻¹)

Cette règle consiste à définir chaque jour une limite supérieure, puis une limite inférieure, pour le débit moyen journalier total pouvant être évacué du barrage. La limite supérieure correspond à un débit dont la propagation, associée aux débits de la Falémé et du Bakoye, produit un débit moyen journalier de 4500 m³.s⁻¹ à Bakel, un certain nombre de jours plus tard. La limite inférieure correspond au débit qu'il est nécessaire de lâcher pour que, compte tenu des apports prévus dans le lac pour la journée, le niveau de celui-ci reste inférieur ou égal à une valeur limite -déterminée précédemment de façon statistique sur la période 1904-1989 (cf 2-2-2-3)- dont le respect garantit la possibilité de réussir le laminage souhaité 49 années sur 50.

3-2 REGLE B : LAMINAGE DES CRUES DU BAFING (1500 M³.S⁻¹)

Cette règle consiste à définir chaque jour une limite supérieure, puis une limite inférieure, pour le débit moyen journalier total pouvant être évacué du barrage. La limite supérieure correspond à la valeur 1500 m³.s⁻¹. La limite inférieure correspond au débit qu'il est nécessaire de lâcher pour que, compte tenu des apports prévus dans le lac pour la journée, le niveau de celui-ci reste inférieur ou égal à une valeur limite déterminée précédemment de façon statistique sur la période 1904-1989 (cf 2-2-2-3)- dont le respect garantit la possibilité de réussir le laminage souhaité 49 années sur 50.

3-3 REGLE C : SATISFACTION DES DEMANDES EN EAU EXPRIMEES AU NIVEAU DE BAKEL, POUR DIFFERENTS TYPES DE CONSOMMATION

Cette règle consiste à définir chaque jour une limite inférieure, puis une limite supérieure, pour le débit moyen journalier total pouvant être évacué du barrage. La limite inférieure correspond à un débit dont la propagation, associée aux débits de la Falémé et du Bakoye, produit au niveau de Bakel, un certain nombre de jours plus tard, un débit égal à la demande exprimée. La limite supérieure correspond à un débit évacué qui, compte tenu des apports prévus dans le lac pour la journée, abaisse le niveau de celui-ci jusqu'à une valeur limite déterminée précédemment de façon statistique (cf 2-2-2-3). Ce niveau limite correspond à une réserve en eau suffisante pour garantir la possibilité de satisfaire la demande exprimée avec un certain niveau de risque d'échec. Deux règles de type C, correspondant à des besoins en eau différents, ont été envisagées.

Règle C1 : satisfaction des besoins relatifs à l'irrigation de 200000 hectares de terres dans la vallée, et à une consommation diverse supplémentaire de 15 m³.s⁻¹, garantie 49 années sur 50.

Le tableau 5 indique les valeurs des besoins en eau exprimés au niveau de Bakel, correspondant à ce cas de figure, conformément à certaines hypothèses concernant les différents types de cultures envisagées [9].

Tableau 5 : consommation d'eau pour 200000 ha irrigués et 15 m³.s⁻¹ de besoins divers

mois	janv	fev	mar	avr	mai	jui	jui	aou	sep	oct	nov	dec
débit (m ³ .s ⁻¹)	66.8	163.2	201.6	203.9	179.7	155.6	146.2	276.4	339.4	309.3	207.4	96.8

Règle C2 : satisfaction des besoins relatifs à l'irrigation de 300000 hectares de terres dans la vallée, et à une consommation diverse supplémentaire de 25 m³.s⁻¹, garantie 9 années sur 10.

Le tableau 6 indique les valeurs des besoins en eau exprimés au niveau de Bakel, correspondant à ce cas de figure, conformément à certaines hypothèses concernant les différents types de cultures envisagées [9].

Tableau 6 : consommation d'eau pour 300000 ha irrigués et 25 m³.s⁻¹ de besoins divers

mois	janv	fev	mar	avr	mai	jui	jui	aou	sep	oct	nov	dec
débit (m ³ .s ⁻¹)	102.7	247.3	304.9	308.3	272.0	235.9	221.8	417.1	511.6	466.5	313.6	147.8

3-4 REGLE D : DEMANDE DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

Cette règle consiste à définir chaque jour une limite inférieure Qmin, puis éventuellement une limite supérieure Qmax, pour le débit moyen journalier total pouvant être évacué du barrage. Ces deux valeurs limites sont déterminées de la façon suivante:

Soit Pd la puissance électrique demandée, et S le seuil de turbinage, niveau limite du lac en dessous duquel on estime que la production électrique n'est pas suffisamment rentable. La puissance P à produire est choisie égale au maximum productible dans le cas où le niveau dans le lac dépasse le seuil de déversement par évacuateur de crue, et égale à Pd dans le cas contraire. On note respectivement Q1 et Q2 les valeurs minimale et maximale de débit total évacué du barrage permettant de produire la puissance P, avec Q1=Q2=0 dans les cas où P est impossible à produire. La valeur de Qmin est alors définie par:

Qmin = 0 si le niveau dans le lac est inférieur à S
Qmin = Q1 si le niveau dans le lac est supérieur ou égal à S

Quatre règles différentes de type D ont été retenues, se différenciant par les valeurs de Pd et S retenues, et par la définition de la valeur de Qmax.

Règle D11 : Pd = 200 Mw; S = 197 m IGN

La valeur de Qmax est définie par:

Qmax = 0 si le niveau dans le lac est inférieur à S
Qmax = Q2 si le niveau dans le lac est supérieur ou égal à S

Règle D12 : Pd = 200 Mw; S = 197 m IGN

Dans ce cas, la demande de production électrique ne fait pas intervenir de limite supérieure pour le débit total à évacuer du barrage.

Règle D21 : Pd = 150 Mw; S = 195 m IGN

La valeur de Qmax est définie par:

Qmax = 0 si le niveau dans le lac est inférieur à S
Qmax = Q2 si le niveau dans le lac est supérieur ou égal à S

Règle D22 : Pd = 150 Mw; S = 195 m IGN

Dans ce cas, la demande de production électrique ne fait pas intervenir de limite supérieure pour le débit total à évacuer du barrage.

3-5 REGLE E : SOUTIEN DES CRUES AU NIVEAU DE BAKEL, ET SOUTIEN DES DEBITS FAIBLES POUR LA NAVIGATION

Cette règle consiste à définir chaque jour une limite inférieure Q_{min} pour le débit moyen journalier total pouvant être évacué du barrage. Cette limite correspond à un débit dont la propagation, associée aux apports de la Falémé et du Bakoye, produit au niveau de Bakel, un certain nombre de jours plus tard, un débit égal à la plus grande des deux demandes correspondant au soutien des crues d'une part et au soutien des faibles débits d'autre part. Deux cas de figure ont été envisagés:

Règle E1 : soutien de crue permettant la culture de décrue sur une superficie de 50000 hectares dans la vallée (scénario "Gibb A"), et soutien des débits au niveau 200 m³.s⁻¹ pour la navigation

Les hydrogrammes minimaux, permettant la culture de décrue sur 50000, 75000 et 100000 hectares dans la vallée, ont été évalués par le bureau d'études "Alexander Gibbs and partners" [9]. L'hydrogramme "Gibb A" correspondant au cas des 50000 hectares, est décrit dans le tableau 7.

Tableau 7 : crue type "Gibb A" au niveau de Bakel, permettant la culture de décrue sur 50000 hectares

date débit (m ³ .s ⁻¹)	1er août 300	4 septembre 500	15 septembre 2500	20 septembre 2500	1er octobre 1500	26 octobre 300	15 novembre 300
--	-----------------	--------------------	----------------------	----------------------	---------------------	-------------------	--------------------

Règle E2 : soutien des débits au niveau 200 m³.s⁻¹ pour la navigation

3-6 REGLES DE GESTION LIEES AUX DIMENSIONS DES ORGANES, ET A LA SECURITE DU BARRAGE

Ces règles de gestion sont mentionnées pour mémoire. Elles interviennent en première priorité dans toutes les simulations, précédant la combinaison des règles A à E qui caractérise chaque type de gestion testé.

Les dimensions des organes du barrage imposent en fonction du niveau du lac, une limite inférieure et une limite supérieure en dehors desquelles le débit total lâché du barrage ne peut physiquement pas se situer. La sécurité de la retenue impose quant à elle une limite inférieure à ce débit, en fonction des apports prévus dans la retenue pour la journée, afin que le niveau dans le lac reste en dessous du seuil de submersion des digues.

4 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

4-1 GENERALITES

Seize types de gestion ont été testés, en simulant le fonctionnement du barrage entre 1951 et 1985, période sur laquelle la banque de données hydrométriques est très fiable et correspond au régime naturel. Les valeurs des différentes caractéristiques du barrage et du lac, utilisées dans les calculs, sont indiquées en annexe. Le cas de figure retenu pour le calcul journalier des lâchures correspond à la situation actuelle du réseau de limnigraphes télétransmetteurs de l'OMVS, qui permet de connaître en temps quasi-réel les débits transitant au niveau de Makana sur le Bafing, Gourbassy sur la Falémé, et Oualia sur le bakoye (fig. 7). Le détail des modèles de propagation utilisés est donné en annexe, avec la configuration des paramètres relatifs aux différentes stations. Toutes les simulations ont été faites en fixant arbitrairement la cote initiale du lac de Manantali, le 1^{er} janvier 1951, à 200.00 m IGN. Cette cote est tout à fait acceptable puisqu'il s'avère qu'elle se situe dans tous les cas testés, entre la valeur médiane et la valeur quinquennale sèche ou humide obtenues pour le 1^{er} janvier.

Précisons enfin que les types de gestion testés ne présument en rien des règles qui seront adoptées en définitive par l'OMVS. Il ne s'agit ici que de tester quelques types de consignes, choisis de façon assez arbitraire parmi une infinité de possibilités.

Afin d'introduire un minimum de biais dans l'analyse des résultats, le régime du Sénégal à Bakel obtenu pour les différentes simulations est comparé non pas au régime naturel observé, mais au régime naturel reconstitué à partir des modèles de propagation et des données relatives aux stations de Soukoutali (ancienne station située à l'emplacement actuel du barrage), Oualia et Gourbassy. Les inévitables imperfections des modèles de propagation interviennent ainsi pour une moindre mesure dans les écarts constatés entre régime naturel et régime influencé. L'analyse des effets des différentes règles de gestion, s'en trouve facilitée.

Le régime naturel est reconstitué à l'aide de SIMULSEN, en imposant comme règle unique de gestion de la retenue (fictive dans ce cas), une égalité stricte entre débit sortant et débit entrant. Le régime ainsi obtenu au niveau de Bakel est très proche du régime naturel observé, avec toutefois des valeurs un peu plus faibles pour les très forts débits (>5500 m³.s⁻¹).

Les fonctions de répartition des débits caractéristiques de crue et d'étiage à Bakel, sur 10, 30 et 60 jours, sont représentées pour l'ensemble des simulations et pour le régime naturel reconstitué, sur le tableau 8 (réurrences 2 et 10ans) et sur la planche de figures 8 (réurrences 2,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55 et 60 ans).

La fonction de répartition des débits moyens annuels à Bakel est représentée pour chaque simulation et pour le régime naturel reconstitué, sur la planche de figures 8 (réurrences 2,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55 et 60 ans), ainsi que celles des débits moyens journaliers (réurrences 2, 5, 10 et 25 ans).

Enfin, le tableau 9 décrit pour chaque simulation, la répartition des débits moyens annuels à Bakel et de la puissance électrique moyenne annuelle produite, et donne les valeurs moyennes des débits évacués par le barrage et perdus par évaporation dans le lac, ainsi que le taux d'années présentant des pénuries importantes pour la satisfaction des besoins exprimés au niveau de l'irrigation, du soutien de crue et du soutien des faibles débits pour la navigation. En pratique, sont considérées comme graves les pénuries correspondant à un déficit de fourniture par rapport à la demande, supérieur à la fois à 10% de cette dernière, et à $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il s'avère en effet que les pénuries de fourniture localisées sur des durées plus courtes correspondent non pas à une pénurie de ressource en eau dans la retenue, mais à une imprécision sur le calcul journalier des lâchures à effectuer, inévitable dans le cas où les débits de la Falémé à Gourbassy ne font pas l'objet d'une prévision à partir de l'amont. En effet, un débit lâché le jour j au niveau de Manantali se combinant à celui du même jour passant à Oualia, et à celui d'un jour $j+n1$ passant à Gourbassy, pour produire le débit passant à Bakel un jour $j+n1+n2$, il est donc nécessaire, pour calculer cette lâchure au jour j , de faire une prévision du débit à Gourbassy au jour $j+n1$. Faute d'information en provenance de l'amont, on ne peut faire mieux qu'estimer ce débit par autorégression, ou tout simplement le prendre égal à celui du jour j . Les pénuries de fourniture localisées correspondant à ces imprécisions devraient donc pouvoir être en partie éliminées par l'installation d'un limnigraphe télétransmetteur en amont de Gourbassy, et ne sont donc pas prises en compte dans l'analyse des résultats.

4-2 CAS DE GESTION PRODUISANT DES RESULTATS IDENTIQUES

Sur les seize cas étudiés, on remarque quatre cas de similitude des résultats: simulations 5 et 8, 13 et 16, 6 et 7, 14 et 15.

Pour les deux premiers cas (5 et 8; 13 et 16), l'explication est la suivante:

En fonction du niveau dans le lac et des limites imposées par les règles prioritaires A, B et C2: soit il est possible de produire la puissance électrique demandée, et dans ce cas le débit à turbiner est de toute façon supérieur aux $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ demandés par la règle E2 (pour la cote 208.05 m correspondant à la limite de déversement du barrage, le débit turbiné vaut respectivement: 428, 319 et $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour produire une puissance de 200, 150 et 95 Mw); soit la puissance demandée ne peut pas être produite, et c'est la limite maximale du débit à évacuer imposée par les règles A, B et C2 qui empêche la fourniture du débit nécessaire pour produire $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Bakel. Dans les deux cas, la prise en compte de la règle E2 en dernière priorité ne peut se faire sentir.

Pour les deux derniers cas (6 et 7; 14 et 15), l'explication est légèrement différente:

En fonction du niveau dans le lac et des limites imposées par les règles A, B et C2: soit il est possible de produire la puissance électrique demandée, et alors la limite maximale du débit à évacuer imposée par la règle D est supérieure à la demande exprimée par la règle E1, dont la satisfaction ou non dépend alors seulement de la limite maximale imposée par les règles A, B et C2; soit la puissance demandée ne peut pas être produite, et c'est alors cette même limite qui empêche la fourniture du débit demandé par la règle E1. Dans les deux cas, la prise en compte d'une limite maximale de débit à évacuer, au niveau de la règle D, est sans effet sur la satisfaction de la demande exprimée par la règle E1.

4-3 PERTES PAR EVAPORATION

Le calcul du débit moyen perdu par évaporation dans le lac (Q_{evap}) est effectué de la façon suivante:

$$Q_{\text{evap}} = Q_a - Q_{\text{man}} + (V_i - V_f)/T$$

avec:	Q_{man}	débit moyen évacué à la sortie du barrage de Manantali
	Q_a	débit moyen des apports dans la retenue (= Q_{man} du régime naturel)
	V_i	volume initial stocké dans la retenue
	V_f	volume final stocké dans la retenue
	T	temps écoulé entre l'instant initial et l'instant final du calcul

Les valeurs obtenues se situent pour tous les types de gestion entre 10.9 et $12.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tableau 9), ce qui représente environ 4 % du débit moyen apporté par le Bafing dans la retenue, ou encore un peu moins de 2% du débit moyen annuel passant à Bakel.

Tableau 8 : Evaluation concernant les débits caractéristiques de crue et d'étiage du Sénégal à Bakel

rang	règles de gestion du barrage de Manantali	Q1 crue			Q10 crue			Q30 crue			Q60 crue			Q60 étiage			Q30 étiage			Q10 étiage			Q1 étiage		
		D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS	D H	M	DS
	régime naturel	6311	4071	1701	4801	3132	1252	3483	2332	884	2515	1488	595	42	7	0	32	1	0	18	0	0	13	0	0
1	A B C1 D11	4482	<u>3225</u>	1011	3364	2293	861	2493	1606	602	1883	901	305	204	181	104	182	160	92	161	154	65	142	103	64
2	A B C1 D11 E1	<u>4484</u>	3177	1738	3369	<u>2345</u>	877	2492	1827	611	1889	<u>917</u>	294	204	181	100	182	160	92	161	152	65	136	93	64
3	A B C1 D12 E1	4414	2925	<u>2186</u>	3375	2337	<u>1221</u>	2494	1696	435	1894	<u>917</u>	317	210	200	163	202	200	92	200	199	66	189	159	66
4	A B C1 D12 E2	4410	3150	820	3368	2241	665	2493	1612	514	1885	907	279	210	201	<u>200</u>	203	200	199	200	200	197	190	174	131
5	A B C2 D11	4423	3098	722	3384	2248	508	<u>2503</u>	1618	475	<u>1898</u>	<u>917</u>	399	308	272	147	273	178	106	240	145	102	209	136	101
6	A B C2 D11 E1	4423	3056	722	<u>3390</u>	2337	508	<u>2503</u>	<u>1839</u>	458	<u>1898</u>	<u>917</u>	399	308	272	147	273	147	106	239	103	102	209	103	101
7	A B C2 D12 E1	4423	3056	722	<u>3390</u>	2337	508	<u>2503</u>	<u>1839</u>	458	<u>1898</u>	<u>917</u>	399	308	272	147	273	147	106	239	103	102	209	103	101
8	A B C2 D12 E2	4423	3098	722	3384	2248	508	<u>2503</u>	1618	475	<u>1898</u>	<u>917</u>	399	308	272	147	273	178	106	240	145	102	209	136	101
9	A B C1 D21	4292	3120	864	3277	2138	731	2406	1445	<u>619</u>	1818	892	<u>443</u>	<u>376</u>	246	108	365	175	92	<u>356</u>	156	65	148	120	65
10	A B C1 D21 E1	4295	3125	2025	3279	2337	754	2417	1725	484	1881	893	291	374	218	100	365	164	92	354	156	65	148	116	64
11	A B C1 D22 E1	4203	3127	<u>2186</u>	3277	2284	<u>1221</u>	2417	1678	435	1881	894	317	373	226	163	363	200	92	228	200	66	193	159	65
12	A B C1 D22 E2	4203	3122	774	3279	2148	651	2406	1446	433	1818	887	297	<u>376</u>	288	<u>200</u>	362	201	<u>200</u>	<u>356</u>	200	<u>199</u>	197	<u>177</u>	<u>141</u>
13	A B C2 D21	4297	3122	722	3279	2143	508	2409	1446	464	1818	820	399	374	<u>307</u>	147	<u>368</u>	<u>240</u>	106	<u>356</u>	<u>229</u>	102	<u>217</u>	157	101
14	A B C2 D21 E1	4204	3128	722	3277	2337	508	2421	1728	458	1871	895	399	373	272	147	365	164	106	277	164	102	213	139	101
15	A B C2 D22 E1	4204	3128	722	3277	2337	508	2421	1728	458	1871	895	399	373	272	147	365	164	106	277	164	102	213	139	101
16	A B C2 D22 E2	4297	3122	722	3279	2143	508	2409	1446	464	1818	820	399	374	<u>307</u>	147	<u>368</u>	<u>240</u>	106	<u>356</u>	<u>229</u>	102	<u>217</u>	157	101

Qn crue (m3.s-1) : valeur maximale du débit dépassé pendant n jours consécutifs dans l'année

Qn étiage (m3.s-1) : valeur minimale du débit non atteint pendant n jours consécutifs dans l'année

DH : valeur correspondant à la récurrence décennale humide (1952-1984)

M : valeur médiane (1952-1984)

DS : valeur correspondant à la récurrence décennale sèche (1952-1984)

Tableau 9 : Evaluation concernant les modules du Sénégal à Bakel, du Bafing à Manantali (sortie du barrage), les pertes par évaporation, la production d'électricité, et la satisfaction des besoins en eau exprimés au niveau de Bakel

rang	règles de gestion du barrage de Manantali	débit moyen annuel passant à Bakel (m3.s-1)							Qevap (m3.s-1)	Qman (m3.s-1)	puissance électrique moyenne annuelle produite (Mw)							satisfaction des besoins en eau		
		DH	QH	M	QS	DS	Moy	CV			DH	QH	M	QS	DS	Moy	CV	P1	P2	P3
	régime naturel	985	926	666	384	278	651	0.404		308										
1	A B C1 D11	<u>930</u>	856	627	358	264	618	<u>0.390</u>	12.3	300	156	<u>146</u>	<u>133</u>	<u>76.0</u>	65.5	<u>115.8</u>	0.308	0		
2	A B C1 D11 E1	928	848	655	367	271	622	0.380	12.2	299	154	142	123	61.7	50.2	109.1	0.365	0	31	100
3	A B C1 D12 E1	921	847	650	396	290	<u>625</u>	0.366	10.9	<u>304</u>	153	142	123	31.9	21.0	98.7	0.546	3	23	26
4	A B C1 D12 E2	928	849	629	356	267	617	<u>0.390</u>	12.1	300	<u>157</u>	144	131	73.0	63.8	114.7	0.325	0		0
5	A B C2 D11	910	845	635	342	<u>300</u>	617	0.384	11.9	302	155	144	123	67.2	63.9	112.4	0.367	3		
6	A B C2 D11 E1	910	845	<u>657</u>	342	<u>300</u>	618	0.380	11.8	302	155	142	113	67.2	63.4	109.1	0.372	3	34	57
7	A B C2 D12 E1	910	845	<u>657</u>	342	<u>300</u>	618	0.380	11.8	302	155	142	113	67.2	63.4	109.1	0.372	3	34	57
8	A B C2 D12 E2	910	845	635	342	<u>300</u>	617	0.384	11.9	302	155	144	123	67.2	63.9	112.4	0.367	3		54
9	A B C1 D21	926	862	611	382	280	611	0.389	<u>12.8</u>	300	152	145	131	73.5	<u>67.9</u>	114.7	0.300	0		
10	A B C1 D21 E1	926	838	625	369	273	617	0.380	12.5	300	150	145	129	58.4	53.1	107.4	0.379	0	31	86
11	A B C1 D22 E1	924	837	628	<u>398</u>	290	621	0.367	11.3	<u>304</u>	150	<u>146</u>	128	31.5	19.7	97.8	<u>0.552</u>	3	26	29
12	A B C1 D22 E2	925	<u>863</u>	610	381	274	611	0.388	12.6	300	152	145	132	71.9	63.5	113.7	0.322	0		0
13	A B C2 D21	924	860	610	356	<u>300</u>	613	0.387	12.6	302	152	<u>146</u>	132	73.3	64.0	112.7	0.354	3		
14	A B C2 D21 E1	923	837	642	342	<u>300</u>	616	0.383	12.4	302	150	<u>146</u>	124	69.8	63.4	109.4	0.367	3	34	49
15	A B C2 D22 E1	923	837	642	342	<u>300</u>	616	0.383	12.4	302	150	<u>146</u>	124	69.8	63.4	109.4	0.367	3	34	49
16	A B C2 D22 E2	924	860	610	356	<u>300</u>	613	0.387	12.6	302	152	<u>146</u>	132	73.3	64.0	112.7	0.354	3		43

DH : valeur correspondant à la récurrence décennale humide (1952-1984)

QH : valeur correspondant à la récurrence quinquennale humide (1952-1984)

M : valeur médiane (1952-1984)

QS : valeur correspondant à la récurrence quinquennale sèche (1952-1984)

DS : valeur correspondant à la récurrence décennale sèche (1952-1984)

Moy : valeur moyenne (1952-1984)

CV : coefficient de variation (1952-1985)

Qevap : débit moyen des pertes nettes par évaporation à la surface du lac de Manantali (1952-1985)

Qman : débit moyen passant au niveau de la sortie du barrage de Manantali (1952-1985)

P1 : pourcentage d'années présentant une pénurie pour les besoins de l'irrigation et des autres consommations (1951-1985)

P2 : pourcentage d'années présentant une pénurie pour les besoins du soutien de crue de type "Gibb A" (1951-1985)

P3 : pourcentage d'années présentant une pénurie pour les besoins de la navigation (1951-1985)

4-4 DEBIT MOYEN ANNUEL DU SENEGAL A BAKEL

Les seize types de gestion étudiés présentent tous une régularisation du débit moyen annuel observé à Bakel, avec une diminution systématique du coefficient de variation de celui-ci (tableau 9), qui passe de 0.404 pour le régime naturel à une valeur comprise selon les cas entre 0.366 et 0.390.

On remarque également que les valeurs moyennes interannuelles sont systématiquement plus faibles que dans le cas du régime naturel. Ceci est dû d'une part à la diminution du débit moyen qui transite au niveau de Manantali (écart entre Q_{man} relatif à la simulation et Q_{man} relatif au régime naturel), liée elle-même à l'évaporation et au stockage dans le lac, et d'autre part à un biais inhérent à la nature même du modèle de propagation utilisé entre les stations. Ce modèle intègre en effet automatiquement les apports intermédiaires dans l'évaluation de ses coefficients à partir des données du régime naturel. Globalement, ces apports sont d'autant plus forts que les débits transitant aux stations sont importants, du fait de la relative simultanéité des apports sur la totalité du haut bassin dans le régime naturel, caractérisé par une saison des pluies concentrée sur 5 mois de l'année (entre 73% et 93% des apports annuels sont obtenus sur 4 mois, selon les postes pluviométriques [10]). Les types de gestion retenus ayant tous un effet d'amortissement des crues du Bafing, il en découle un déficit artificiel des apports intermédiaires lié à une fréquence restreinte des forts débits, auxquels sont implicitement liés ces apports. Le déficit moyen ainsi introduit par le modèle peut être évalué par:

$$\text{Déficit} = Q_B - Q_{BN} + Q_{MN} - Q_M$$

avec: Q_B : débit moyen interannuel transitant à Bakel, relatif à la simulation
 Q_{BN} : débit moyen interannuel transitant à Bakel, pour le régime naturel
 Q_{MN} : débit moyen interannuel transitant au niveau de Manantali, pour le régime naturel
 Q_M : débit moyen interannuel transitant évacué par le barrage, relatif à la simulation

Les valeurs prises par ce déficit artificiel varient selon les types de gestion, entre 20 et 32 $m^3.s^{-1}$, soit 3 et 5% du débit moyen interannuel transitant à Bakel.

Compte tenu de ce qui précède, il est probable que la valeur du déficit est plus importante pour les années à faible écoulement moyen, que pour les autres années. En première approximation, on peut donc admettre pour amoindrir l'effet du biais, que les valeurs obtenues pour le débit moyen annuel à Bakel, doivent être augmentées d'une valeur supérieure au déficit moyen pour les années présentant un écoulement inférieur à la valeur médiane, et inférieure au déficit moyen pour les autres années. Ceci nous permet de dire, au vu des fonctions de répartition obtenues pour le module à Bakel (planche de figures 8), que dans tous les cas étudiés, les écoulements annuels des années humides sont inférieurs pour toutes les récurrences, à ceux du régime naturel, et que ceux des années sèches sont par contre supérieurs ou égaux à ceux du régime naturel. Ce résultat confirme la régularisation interannuelle du régime déjà entrevue avec la diminution du coefficient de variation du module annuel.

On retiendra comme ordre de grandeur, que le module décennal humide diminue de plus de 3 à 5 pourcent selon les cas, alors que le module décennal sec augmente de plus de 4 à 18 pourcent.

4-5 DEBITS JOURNALIERS DU SENEGAL A BAKEL

S'il était possible de faire une correction moyenne permettant de prendre en compte le biais introduit par la modélisation, pour l'analyse des débits moyens annuels, la même opération s'avère beaucoup plus délicate dans le cas des débits journaliers. On peut toutefois envisager une répartition approximative moyenne de l'erreur systématique commise, consistant en une surestimation négligeable des débits journaliers à Bakel pendant la saison sèche (décembre à juin), et une sous estimation très variable pendant les cinq mois de la saison des pluies, de valeur moyenne comprise selon les cas entre 48 et 77 $m^3.s^{-1}$ (respectivement : $20 \cdot 12/5$ et $32 \cdot 12/5$).

Tous les types de gestion envisagés, qui incluent toujours une consigne de fourniture de débit pour l'irrigation, produisent au niveau de Bakel, de décembre à juin, un débit beaucoup plus élevé que celui du régime naturel. Ceci est vérifié pour les temps de retour 2, 5, 10 et 25 ans, qu'il s'agisse des années sèches ou humides (planche de figures 8).

On remarque également que l'objectif de production électrique de 200 Mw (règles D1: simulations 1 à 8) entraîne une variabilité interannuelle des débits journaliers de décembre à avril beaucoup plus forte, que l'objectif de production de 150 Mw (règles D2: simulations 9 à 16). La production de 200 Mw entraîne également une irrégularité de débit journalier plus fréquente au cours de chaque saison sèche, du fait de l'épuisement prématuré du volume stocké dans la retenue. Cet épuisement, qui intervient à des dates variables selon les années (24 années sur 25 avant le mois de mai), se traduit par un arrêt de la production électrique, c'est-à-dire une chute brutale du débit évacué par le barrage. Dans le cas d'une production de 150 Mw, l'épuisement intervient selon les années soit plus tardivement, soit pas du tout, ce qui permet de maintenir un débit élevé plus fréquemment et plus longtemps pendant la saison sèche. On retiendra donc qu'une diminution de la puissance électrique demandée, qui correspond à une augmentation du niveau de garantie de sa fourniture, entraîne un accroissement de la régularisation des débits de saison sèche.

Pour toutes les simulations, les hautes eaux à Bakel qui présentent des débits bien inférieurs à ceux du régime naturel, restent centrées en moyenne sur le mois de septembre. On remarque toutefois un léger retard de la crue, dans les cas où intervient un soutien de crue de type "Gibb A" (cas 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, et 15). Il serait donc souhaitable d'avancer ce dernier d'une dizaine de jours pour le rendre moins consommateur d'eau au niveau de la retenue.

Comparés aux autres, les cas de gestion qui font intervenir le soutien de crues se caractérisent par un réhausser (léger) des valeurs des médianes des débits journaliers en septembre, et (plus nettement) de celles des quantiles inférieurs en septembre et octobre. Les valeurs des quantiles supérieurs ne sont pas affectées.

4-6 DEBITS CARACTERISTIQUES DE CRUE DU SENEGAL A BAKEL

On constate pour l'ensemble des cas de gestion étudiés, une diminution générale des débits caractéristiques de crue (d'environ 30% en moyenne, pour les valeurs médianes et décennales humides), d'autant plus prononcée que ceux-ci sont relatifs à un plus petit nombre de jours. Les fonctions de répartition des débits caractéristiques de crue sur 10 jours et 30 jours, se superposent plus ou moins selon les cas, à celles du régime naturel obtenues sur 30 jours et 60 jours respectivement (planche de figures 8).

Comparés à ceux qui font intervenir la règle C1 (irrigation de 200000 ha), les cas de gestion faisant intervenir la règle C2 (irrigation de 300000 ha) font chuter de façon remarquable (à moins de 50% des valeurs du régime naturel) les valeurs décennales sèches des débits caractéristiques de crue Q1 et Q10, sur 1 et 10 jours. Ces mêmes quantiles atteignent leur maximum dans les cas (3 et 11) où intervient un soutien de crue non limité par la préservation de stock à but de production électrique, et une demande modérée pour l'irrigation: on observe alors, par rapport au régime naturel, un déficit quasiment nul pour Q10 et un gain remarquable de 40% pour Q1.

A de rares exceptions près, les valeurs décennales sèches, médianes et décennales humides des débits caractéristiques de crue sont systématiquement supérieures ou égales dans les cas de gestion faisant intervenir une production de 200 Mw (règles D1), à celles obtenues dans les autres cas (production de 150 Mw, règles D2).

4-7 DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGE DU SENEGAL A BAKEL

Tous les cas de gestion testés faisant intervenir en priorité la fourniture de débit pour l'irrigation, dont les besoins s'expriment durant l'année entière, présentent une augmentation considérable des débits caractéristiques d'étiage. Cette augmentation est plus forte (nettement pour les valeurs décennales humides et médianes, et de façon moins sensible pour les valeurs décennales sèches) avec une production électrique de 150 Mw (règles D2) qu'avec une production de 200 Mw (règles D1), du fait de l'épuisement prématuré du stock d'eau qui se produit plus fréquemment dans ce dernier cas.

4-8 PUISSANCE ELECTRIQUE PRODUITE

Pour l'ensemble des simulations effectuées, les options retenues pour la production d'électricité (puissance demandée et seuil de turbinage élevés) visent plus à la production d'une puissance moyenne élevée qu'à la fourniture d'une puissance garantie. Le rang de priorité accordé à la demande de production électrique, inférieur à ceux du laminage des crues et de la fourniture de débit pour l'irrigation, diminuent encore le niveau de garantie de cette puissance. En pratique, on observe d'une façon plus ou moins fréquente selon les cas étudiés, des pénuries de fourniture électrique (puissance produite nulle ou inférieure à la puissance demandée) situées pendant la saison sèche (du fait d'un niveau trop bas dans la retenue, ou de la préservation du stock imposée par la règle C relative à la fourniture d'eau pour l'irrigation) et plus rarement pendant la saison des pluies (pour les mêmes raisons ou bien, parfois, quand le niveau du lac dépasse le seuil de déversement et que le débit lâché par le déversoir de crue n'autorise qu'un turbinage réduit ou nul pour le respect des consignes de laminage de crue).

Les autres règles de gestion étant égales par ailleurs, la puissance moyenne obtenue (tableau 9) est quasiment identique pour les règles D1 (demande d'une production de 200 Mw) et D2 (demande d'une production de 150 Mw), avec des valeurs supérieures de 1.2 Mw en moyenne pour D1 dans les cas où l'irrigation concerne 200000 ha (règle C1), et des valeurs supérieures de 0.3 Mw en moyenne pour la règle D2 dans les cas où l'irrigation concerne 300000 ha (règle C2).

La puissance électrique moyenne optimale P_{max} , obtenue pour une demande de production constante, a été déterminée en effectuant des simulations annexes (sur la période 1951-1985), ne comportant, outre les règles de gestion inhérentes aux dimensions des organes du barrage et à la sécurité de la retenue, qu'une règle de type D11 ou D21 pour laquelle étaient testées différentes valeurs du seuil de turbinage S . Les résultats obtenus donnent pour une demande de production de 200 Mw, un seuil optimal de turbinage de 197 m avec une puissance moyenne produite de 116.8 Mw, et pour une demande de 150 Mw, un seuil optimal de 195 m avec une production moyenne de 115.5 Mw. En les comparant avec les valeurs obtenues dans les 16 cas de figure testés, ces chiffres vont nous permettre d'évaluer le coût moyen de certaines consignes de gestion, exprimé en termes de perte de puissance électrique produite. On obtient ainsi les résultats suivants:

- la règle C1 (fourniture de débit permettant d'irriguer 200000 hectares et de satisfaire une demande supplémentaire de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le tout garanti 49 années sur 50) seule, coûte 0.9 Mw (0.8% du productible maximal P_{max}).
- l'ajout de la règle E1 (soutien de crue "Gibb A" et soutien d'étiage à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à la règle C1, coûte 7 Mw supplémentaires

(6% de P_{max}) dans les cas où elle est partiellement contrebalancée par la préservation du stock à but de production électrique (règle D11 ou D21), ou 10 Mw supplémentaires (9% de P_{max}) dans le cas contraire (règle D12 ou D22).
 --l'ajout de la règle E2 (soutien d'étiage à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à la règle C1, ne coûte que 1 Mw supplémentaire (0.9 % de P_{max}).
 --la règle C2 (fourniture de débit permettant d'irriguer 300000 hectares et de satisfaire une demande supplémentaire de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, le tout garanti 9 années sur 10) seule, coûte 3.6 Mw (3% de P_{max}).
 --l'ajout de la règle E1 (soutien de crue "Gibb A" et soutien d'étiage à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à la règle C2 ne coûte 3.3 Mw supplémentaires (3% de P_{max}), du fait que son expression se trouve le plus souvent réduite par la contrainte de préservation du stock liée à C2.

4-9 SATISFACTION DES BESOINS EN EAU EXPRIMES AU NIVEAU DE BAKEL

La règle de gestion C est placée en première priorité dans tous les cas étudiés, et prend en compte la préservation du stock d'eau nécessaire à la satisfaction des demandes correspondantes (avec un risque de pénurie de 1 année sur 50 pour la règle C1 et de 1 année sur 10 pour la règle C2). Il est donc logique de ne retrouver dans les résultats de simulation, contrairement au régime naturel où elles interviennent tous les ans pendant plusieurs mois- que de rares pénuries de fourniture d'eau pour l'irrigation et les besoins associés. Dans le cas de la règle C1 (200000 ha à irriguer et $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de besoins supplémentaires), une pénurie est observée une fois en 35 ans, pendant une durée d'un mois et demi, quand la règle de soutien de crue n'est pas limitée par la préservation de stock à but de production électrique (simulations 3 et 11). Dans le cas de la règle C2 (300000 ha et $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), cette pénurie est systématiquement observée, une fois en 35 ans également, mais sur une durée de 4 mois.

Le régime naturel présente un taux d'échec de 34 % quant à la production d'hydrogrammes supérieurs à l'hydrogramme théorique de type "Gibb A". Ce taux peut être ramené à 26% si l'on admet que la réalisation d'un tel hydrogramme, décalé dans le temps par rapport aux dates théoriques, ne correspond pas à un échec. Le tableau 9 nous montre que les cas de gestion incluant le soutien de crue de type "Gibb A", permettent d'obtenir un taux d'échec comparable à la première (simulations 2, 6, 7, 10, 14 et 15), voire à la deuxième de ces valeurs quand il n'est pas prévu de limitation de stock aux fins de production électrique (simulations 3 et 11).

Le soutien des débits à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la navigation, présente un taux d'échec élevé sur l'ensemble des cas étudiés, sauf quand il intervient avec une fourniture modérée pour l'irrigation (règle C1), soit sans soutien de crue associé (simulations 4 et 12, sans échec), soit avec soutien de crue mais alors sans limitation du stock d'eau à but de production électrique (simulations 3 et 11).

5 CONCLUSION

Le type de gestion envisagé dans cette étude pour le barrage de Manantali, consiste à prendre en compte les consignes suivantes, par ordre de priorité décroissante:

- laminage des crues au niveau de Bakel, avec un certain niveau de risque d'échec;
- laminage des crues au niveau de la sortie du barrage, avec un certain niveau de risque d'échec;
- satisfaction des demandes de débits exprimées au niveau de Bakel, par l'irrigation et d'autres types de consommation, avec un certain niveau de risque d'échec;
- satisfaction d'une demande de production électrique de puissance fixe;
- lâcher éventuel de débit destiné à soutenir les étiages pour la navigation, ainsi que les crues pour permettre les cultures de décrue.

L'impact de cette gestion sur le régime du Sénégal à Bakel, dépend des valeurs numériques et des éventuelles options, qui définissent précisément chacune des consignes. On retiendra les résultats suivants:

- Les pertes nettes moyennes par évaporation dans le lac représentent environ 1% du débit moyen du Bafing, soit un peu moins de 2% du débit moyen du Sénégal.
- Le Sénégal subit une régularisation interannuelle plus ou moins marquée selon les cas testés avec une diminution de 3 à 5 % du débit moyen annuel décennal humide, et une augmentation de 4 à 18% du débit moyen annuel décennal sec.
- La régularisation saisonnière est très marquée, avec une augmentation considérable des débits caractéristiques d'étiage, et une forte diminution des débits caractéristiques de crue. Les fonctions de répartition des débits caractéristiques de crue sur 10 et 30 jours, se superposent plus ou moins selon les cas, à celles du régime naturel obtenues sur 30 et 60 jours respectivement.
- Comparée à une demande de production électrique de 200 Mw, une demande de 150Mw, qui offre une garantie de fourniture supérieure, entraîne une meilleure régularisation saisonnière qui se traduit par des débits d'étiage plus réguliers et de valeurs caractéristiques plus élevées, et des débits caractéristiques de crue moins élevés.
- Le soutien de crue de type "Gibb A" habituellement envisagé, semble être situé d'une façon un peu tardive par rapport aux crues du régime naturel. Le même hydrogramme, situé une dizaine de jours plus tôt dans l'année, serait probablement moins consommateur d'eau au niveau de la retenue.

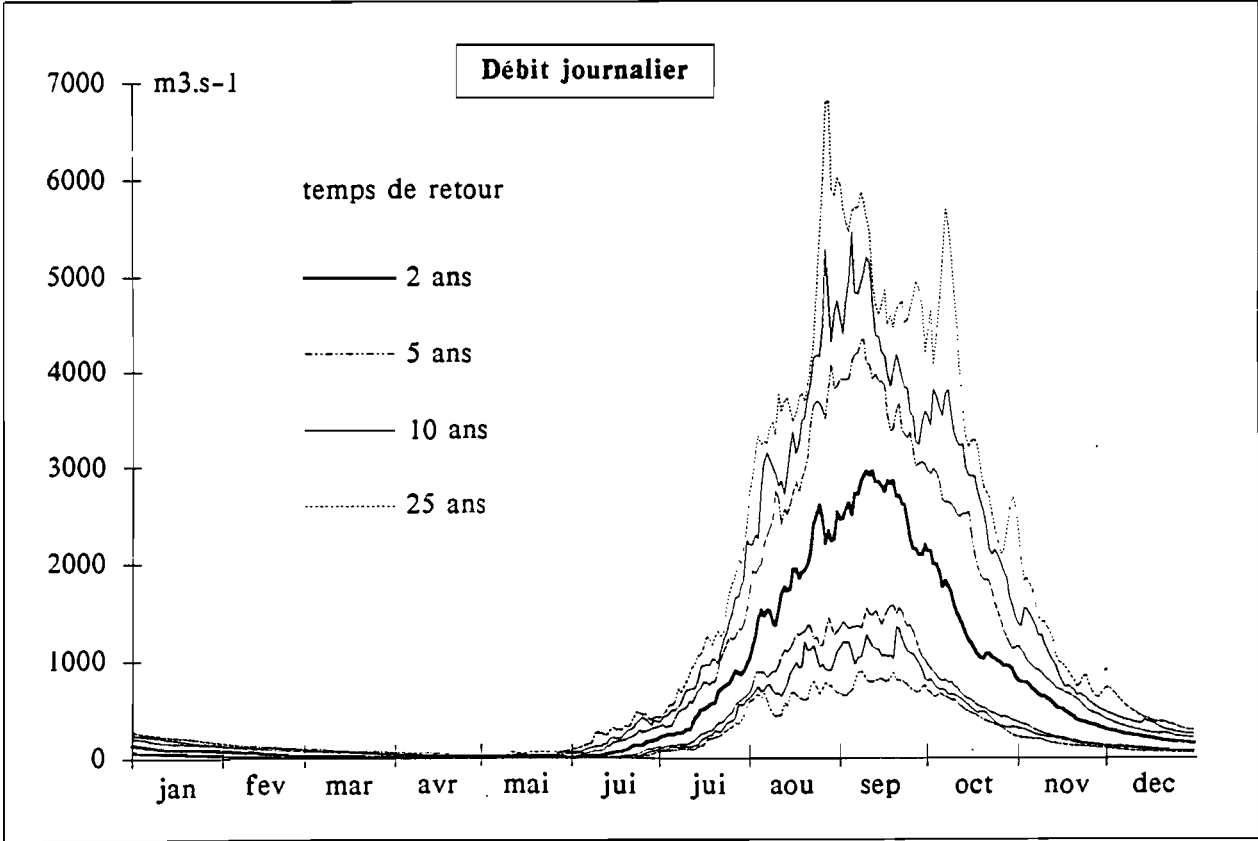
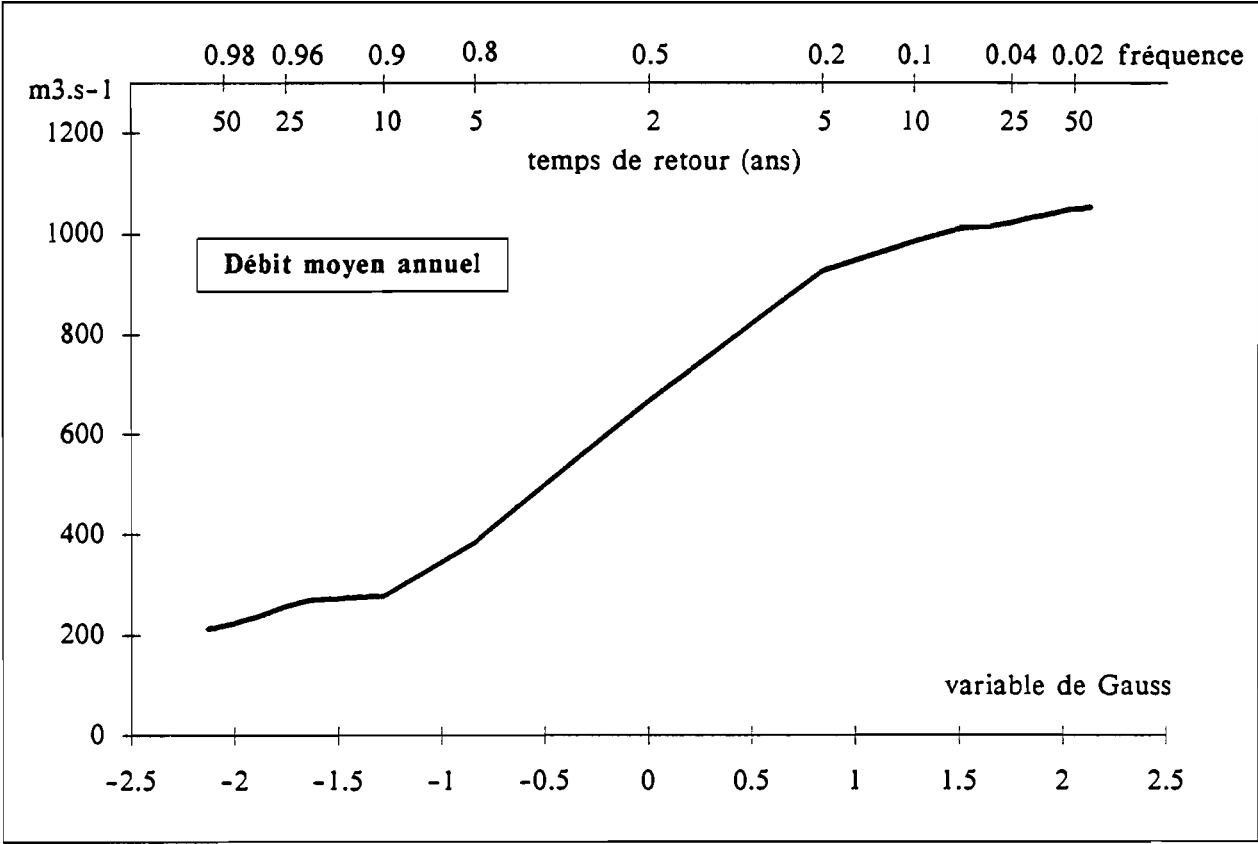
—La fourniture de débit nécessaire pour permettre d'irriguer 200000 ha de terres dans la vallée, et de satisfaire une demande supplémentaire de $15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ couvrant d'autres types de besoins, se traduit par une perte de production électrique de 0.9 Mw. Cette perte passe à 3.6 Mw dans le cas de 300000 ha et $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

—Le soutien de crue permettant d'obtenir des hydrogrammes de crue supérieurs ou égaux à l'hydrogramme "Gibb A", avec une fréquence comparable à celle du régime naturel, entraîne une perte supplémentaire de 10 Mw.

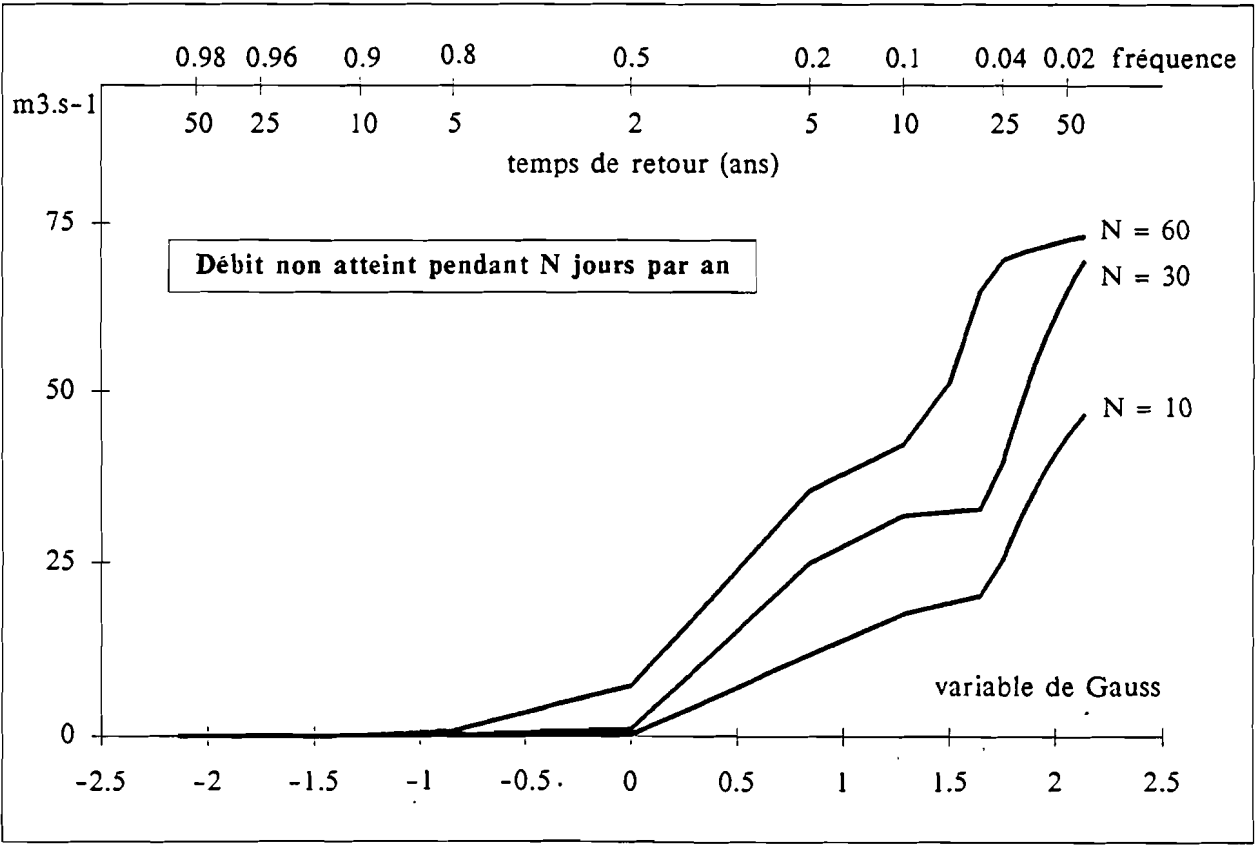
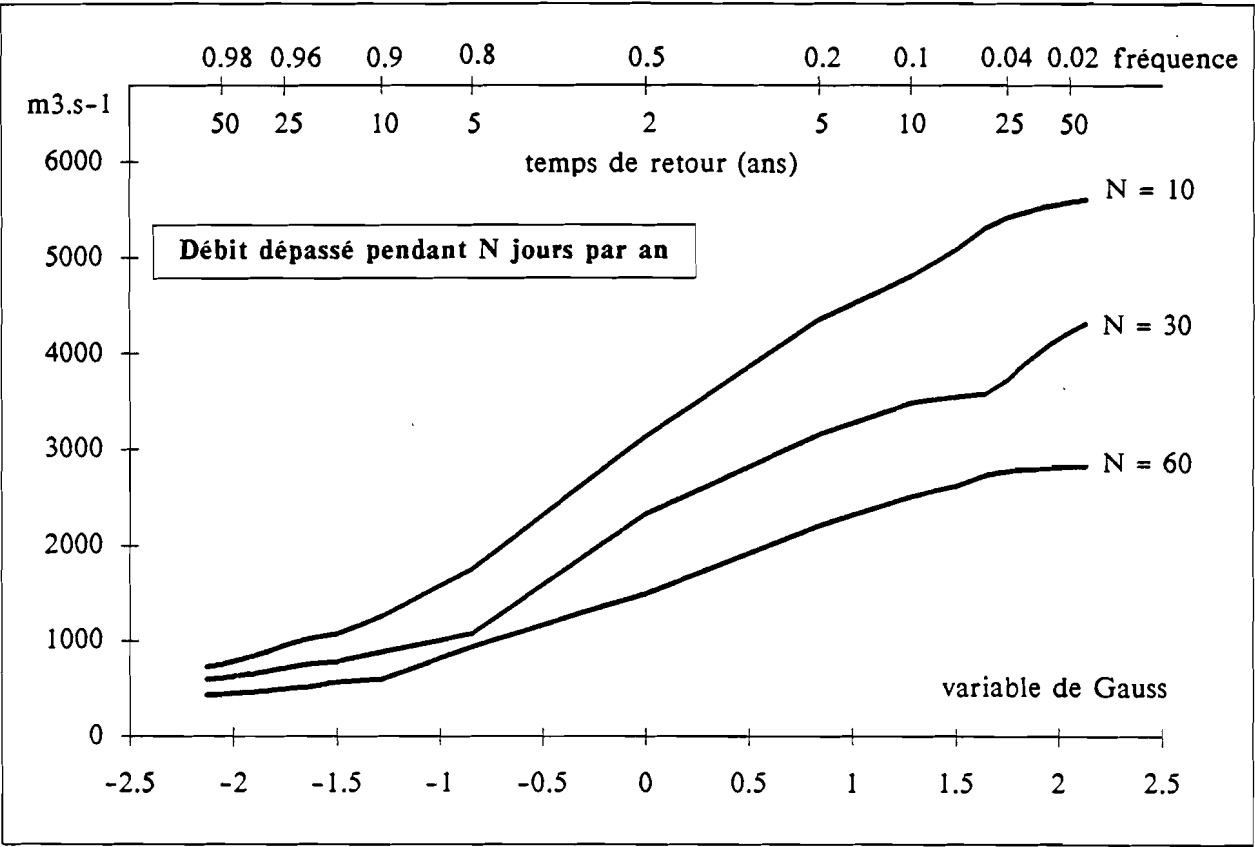
PLANCHE DE FIGURES 8

On trouvera dans les pages qui suivent, les graphiques donnant la fonction de répartition des débits moyens annuels et des débits caractéristiques de crue et d'étiage du Sénégal à Bakel, ainsi que les hydrogrammes fictifs constitués des débits moyens journaliers relatifs à différents temps de retour. Ces graphiques figurent pour chaque simulation effectuée, à l'exception des simulations 7, 8, 15 et 16, dont les résultats sont identiques à ceux des simulations 6, 5, 14 et 13 respectivement (cf 4-2).

Régime naturel reconstitué du Sénégal à Bakel

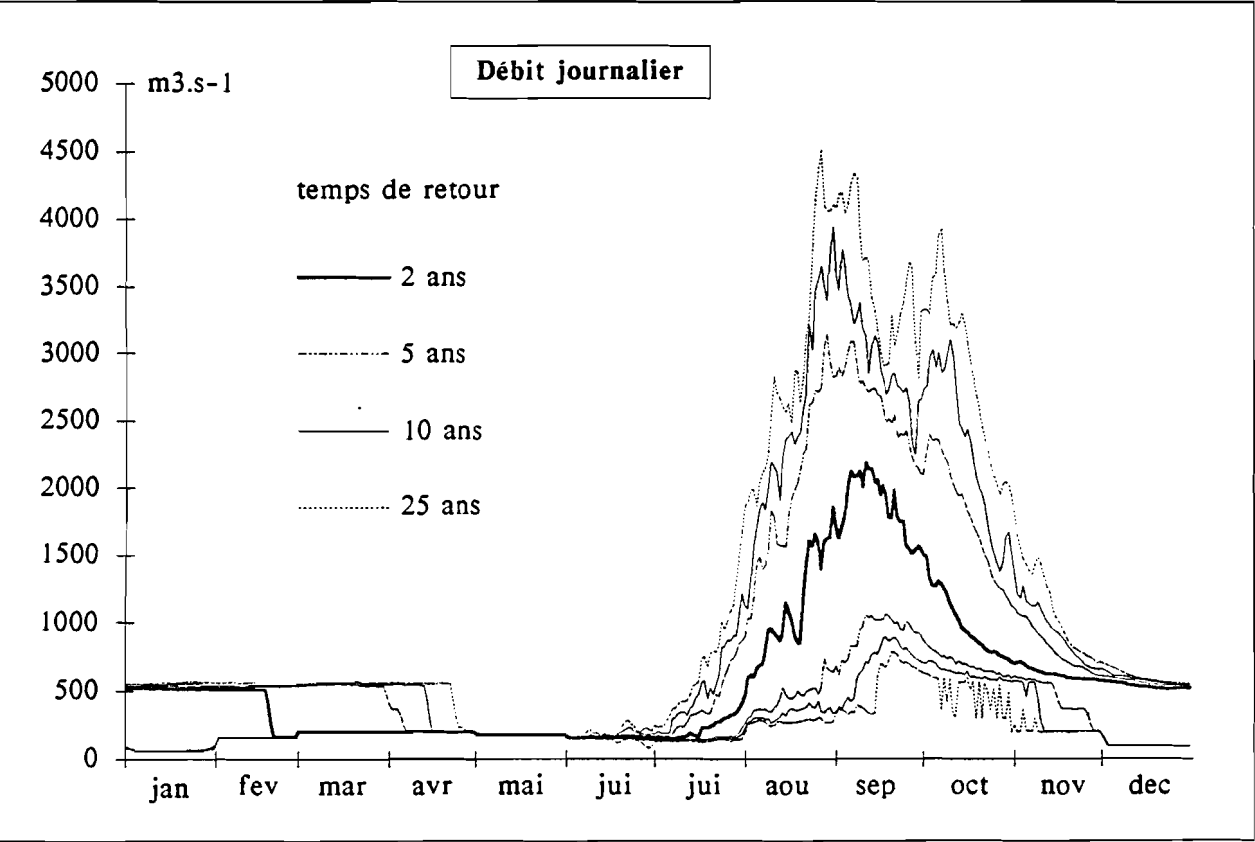
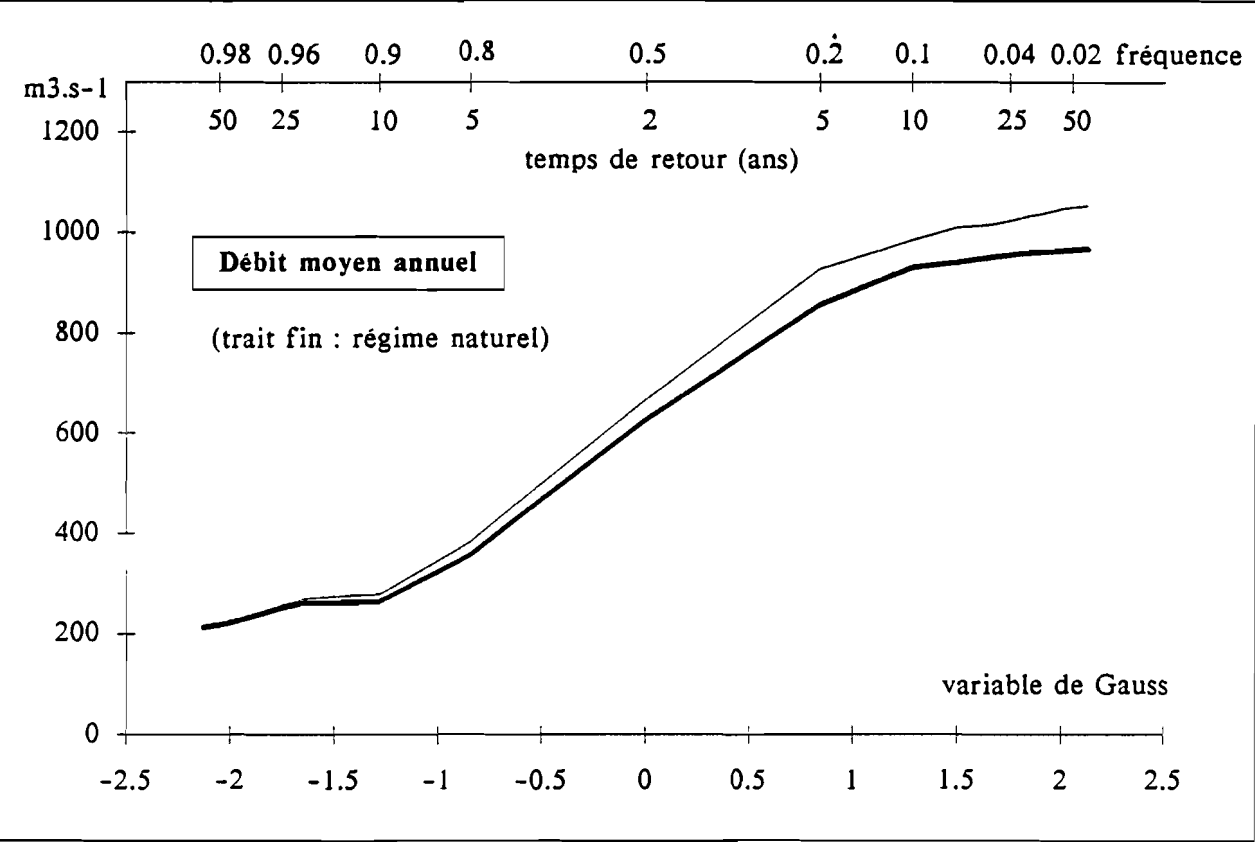


Régime naturel reconstitué du Sénégal à Bakel



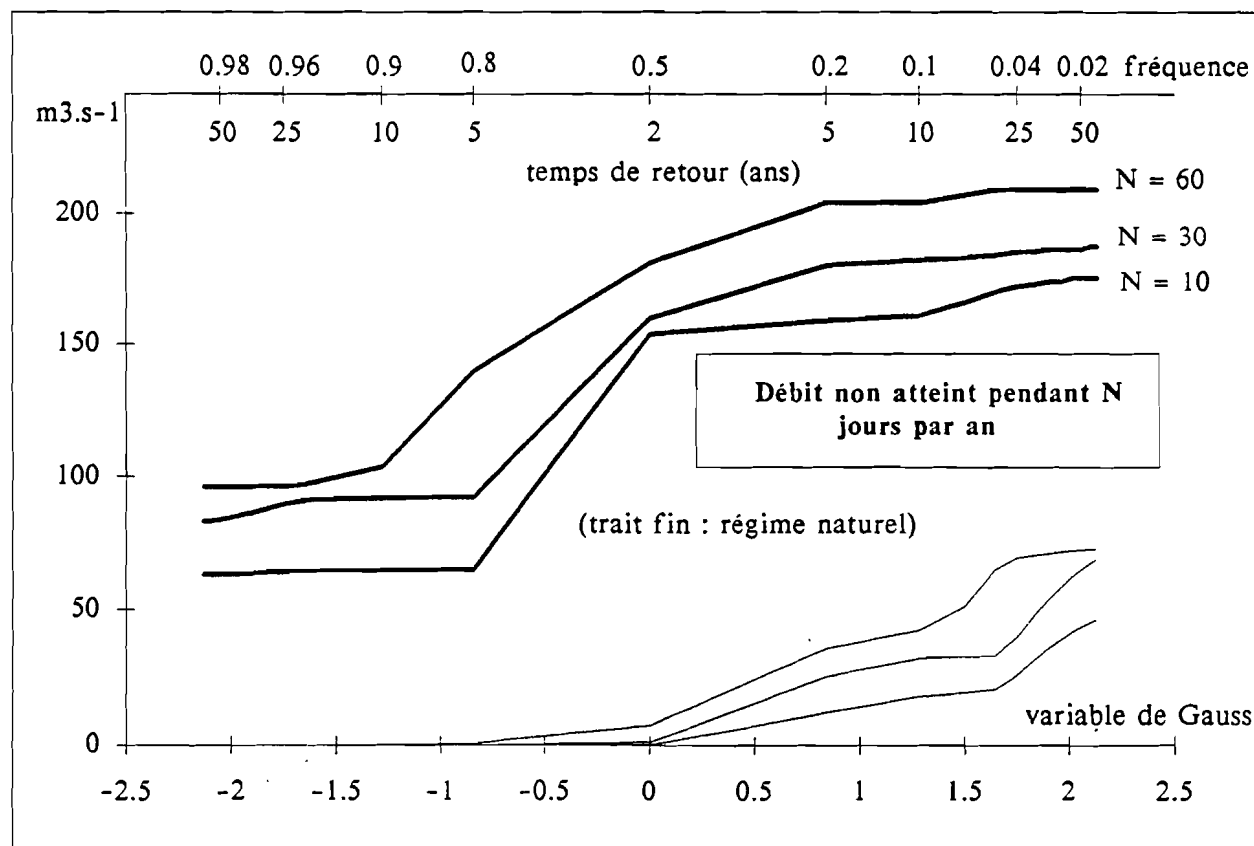
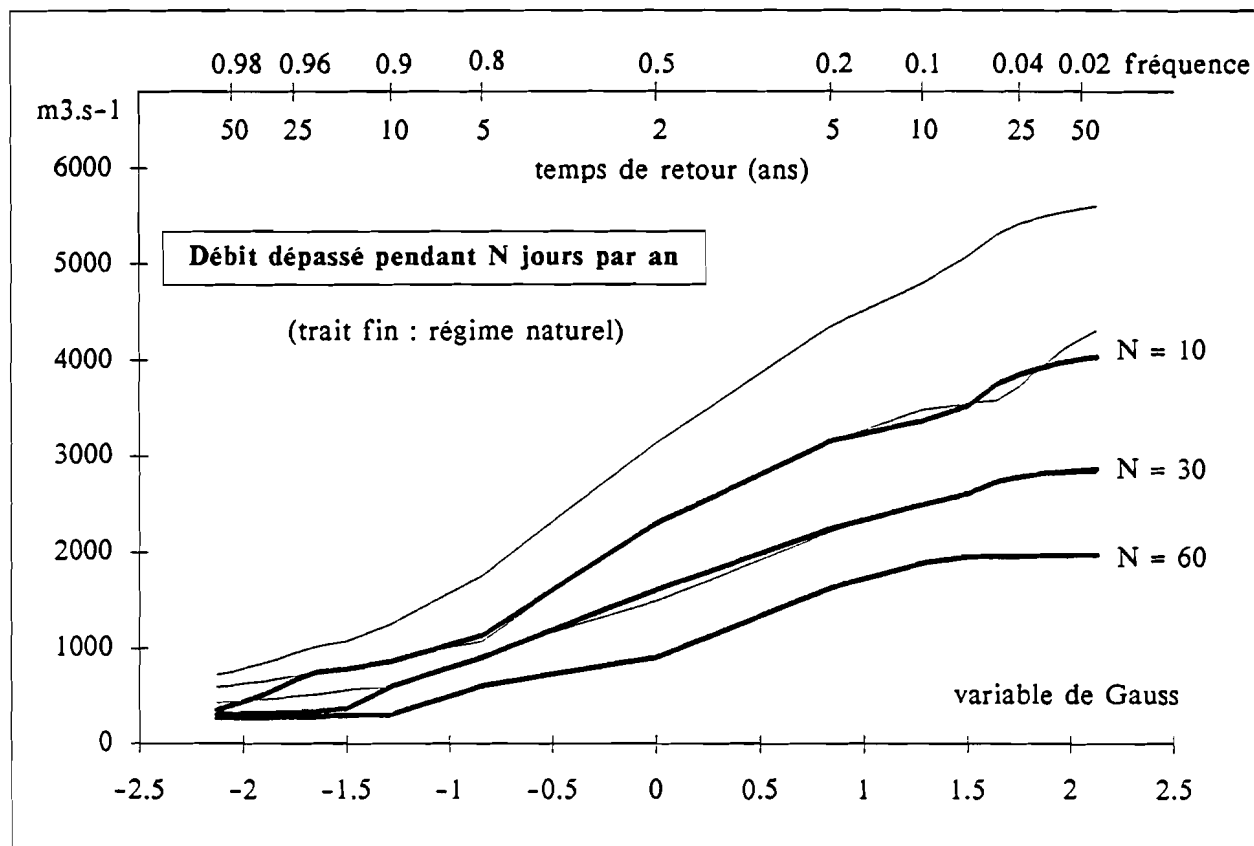
Simulation 1

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D11



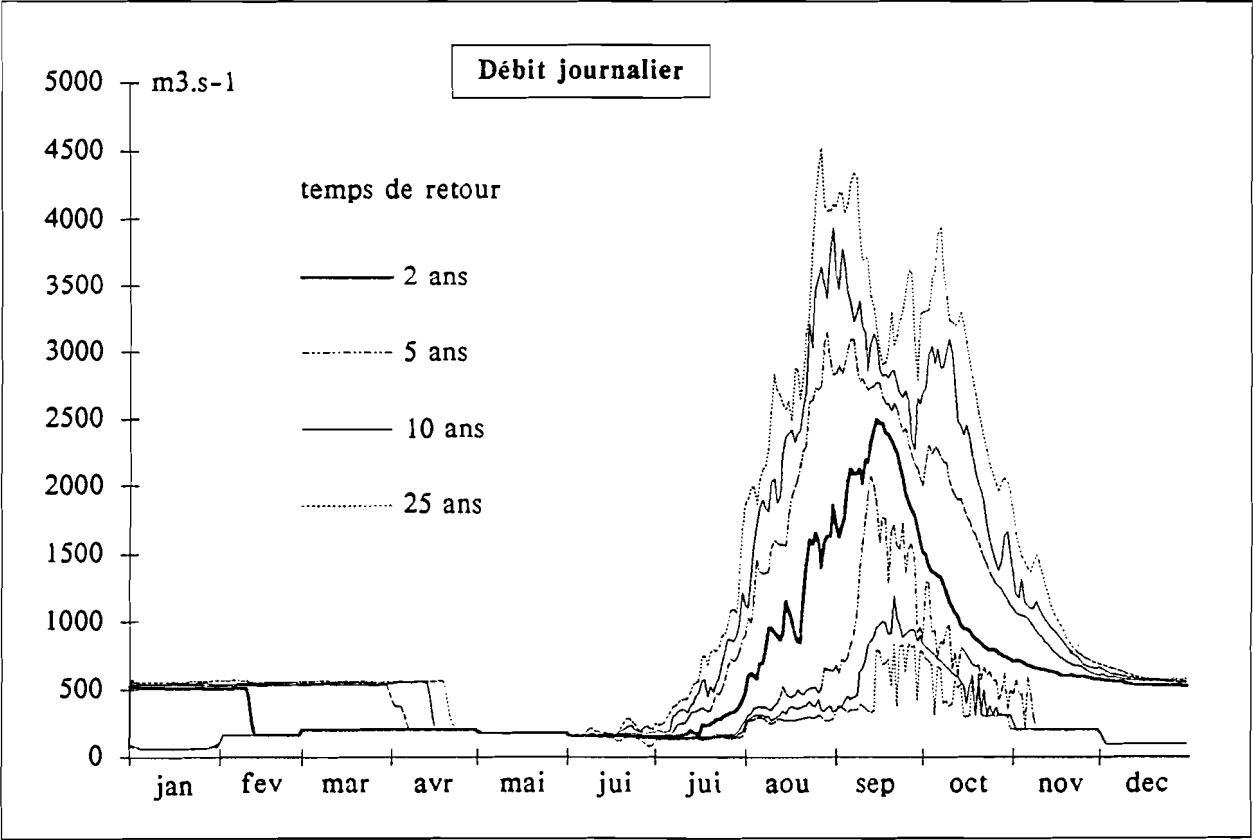
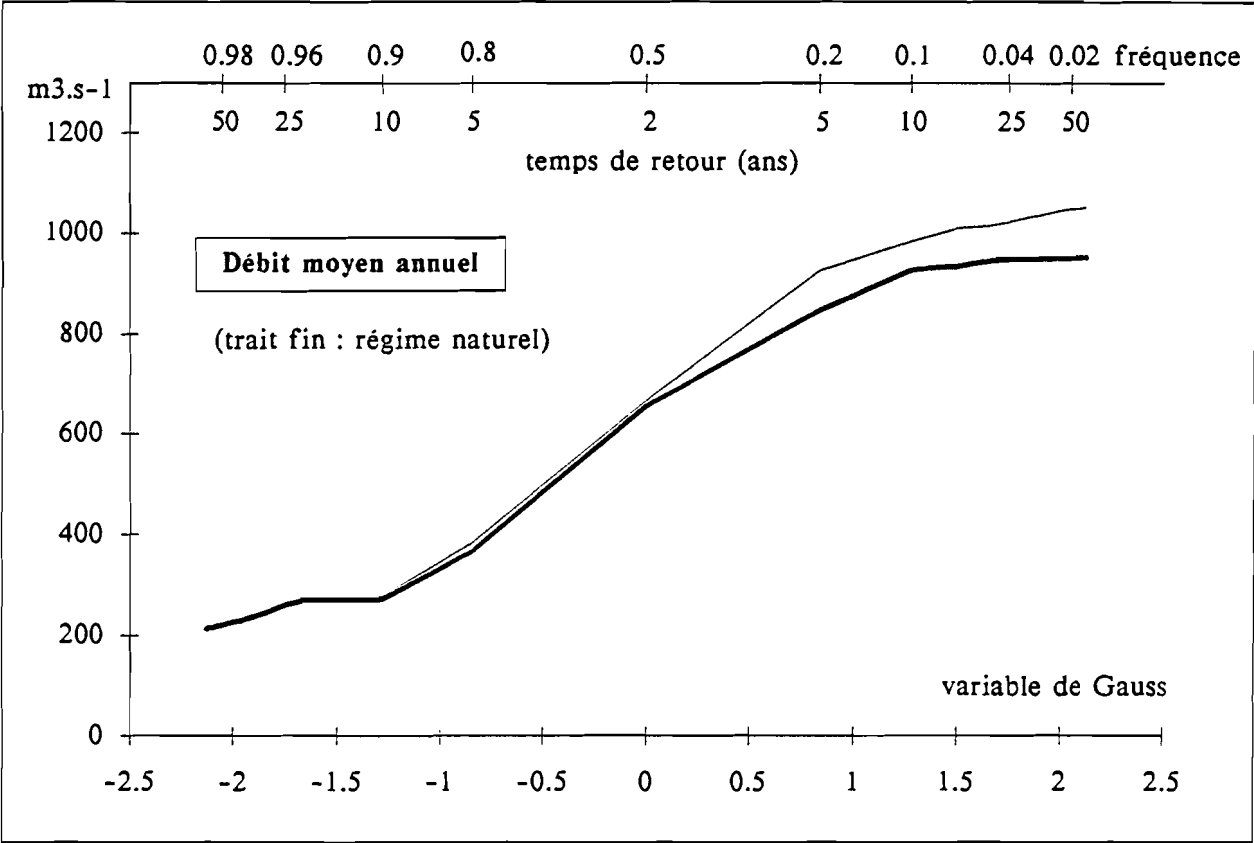
Simulation 1

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D11



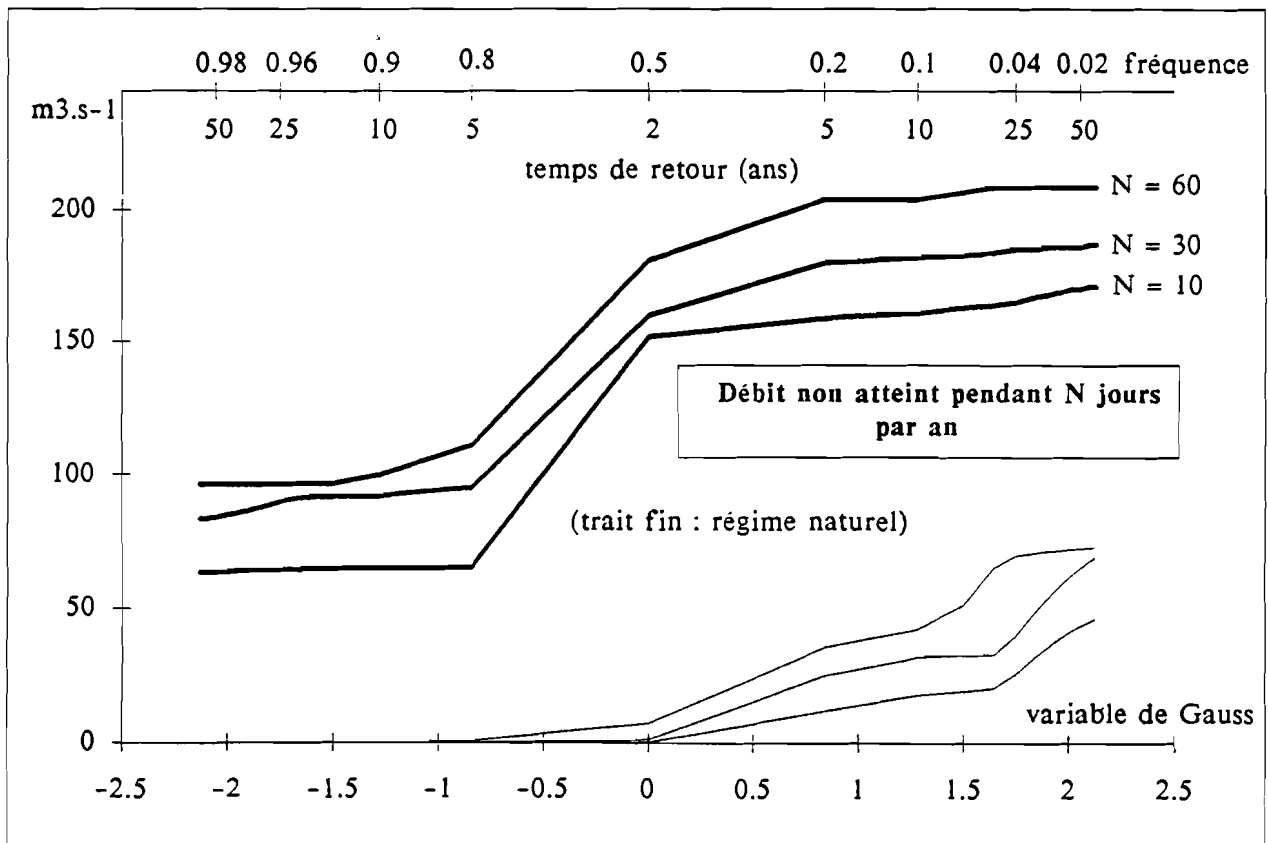
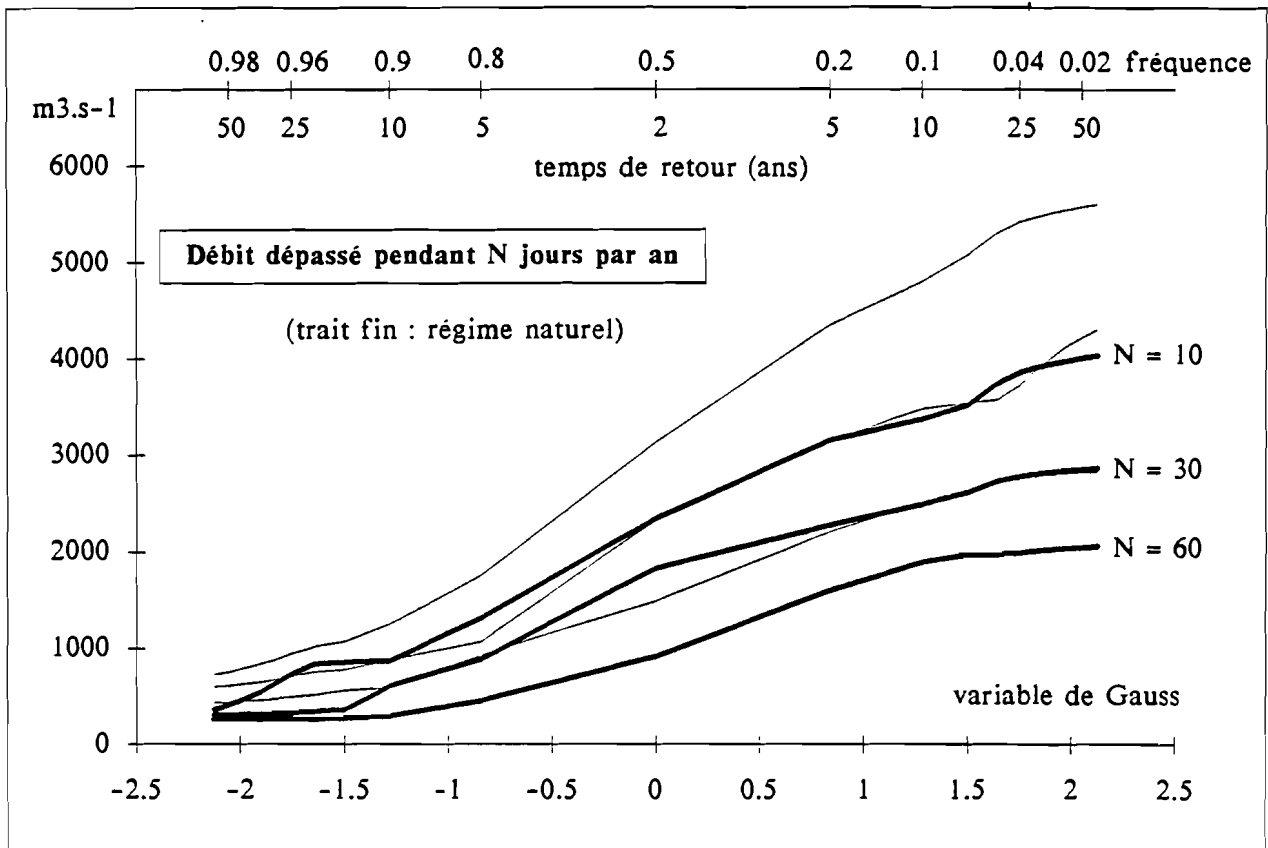
Simulation 2

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D11, E1



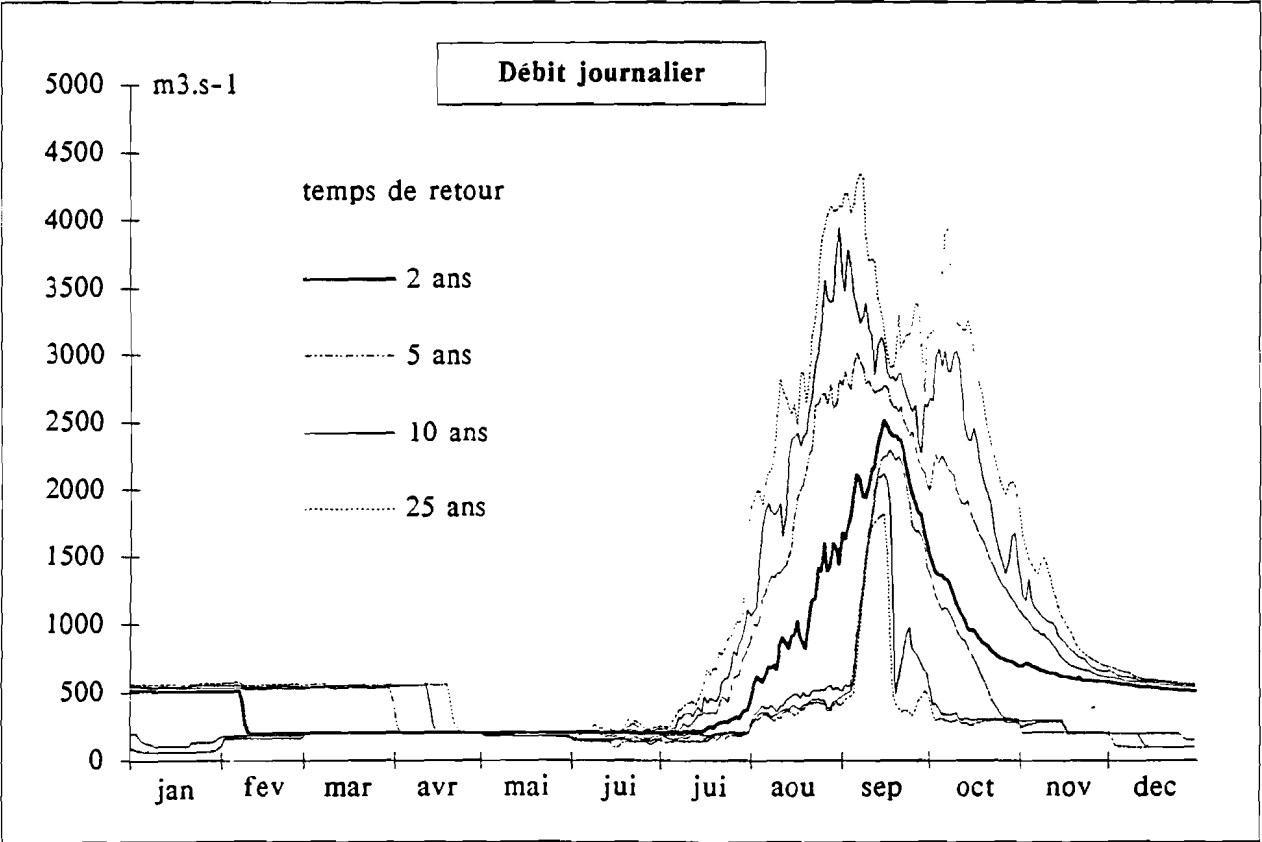
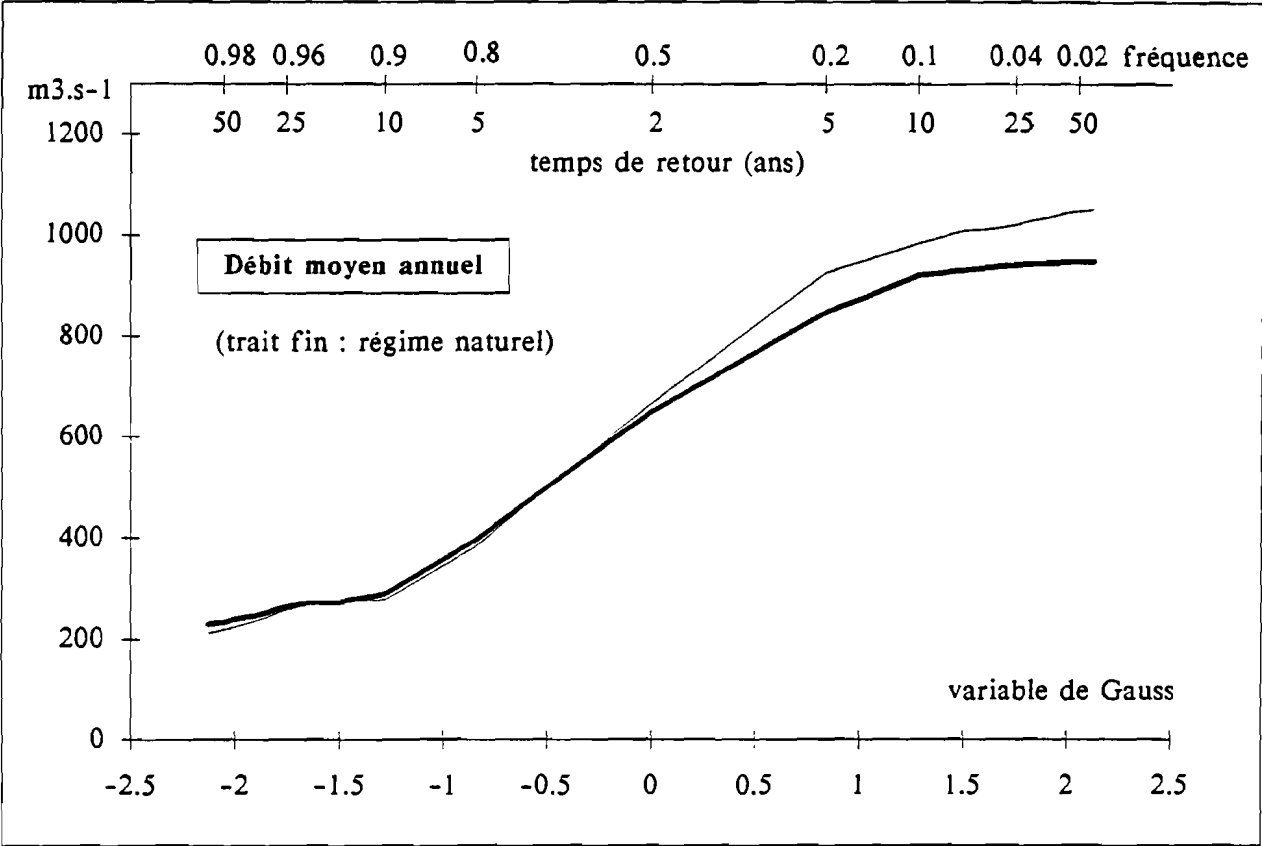
Simulation 2

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D11, E1



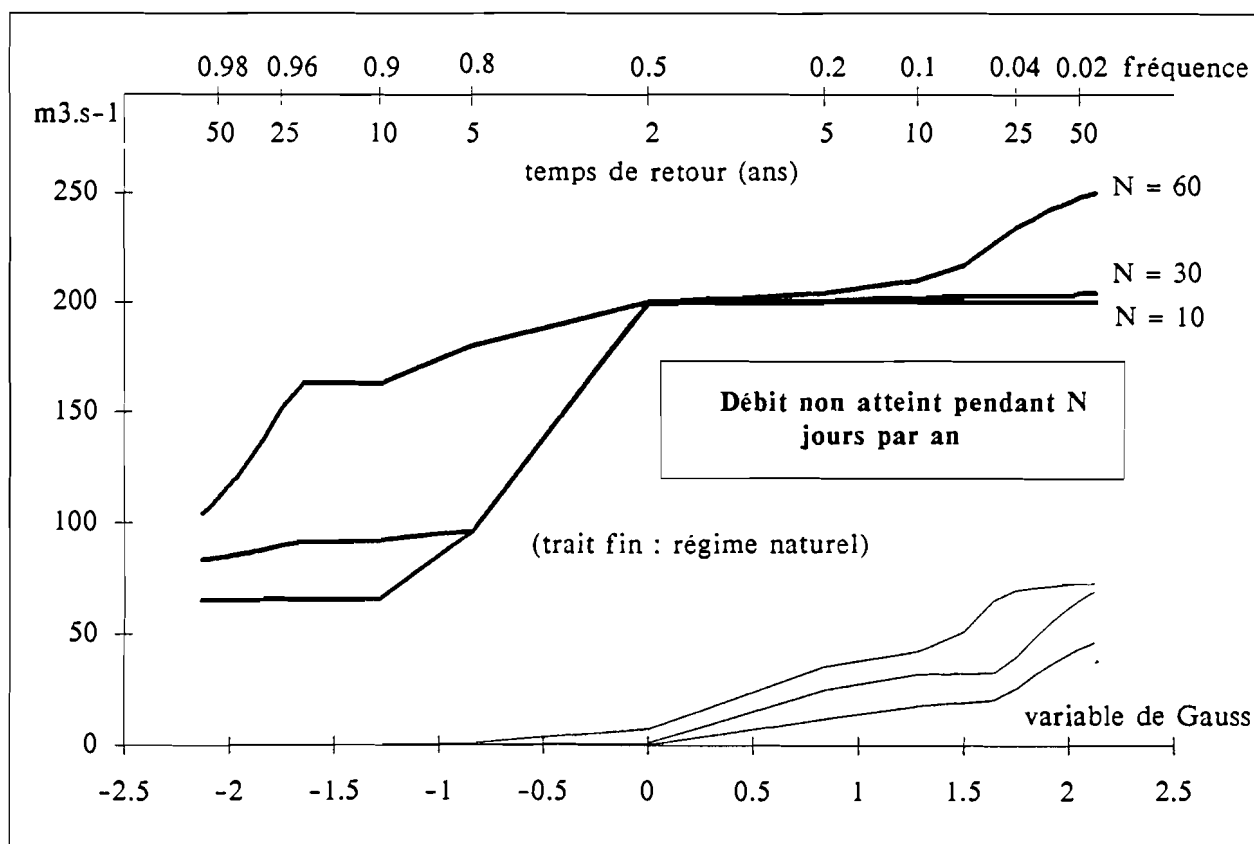
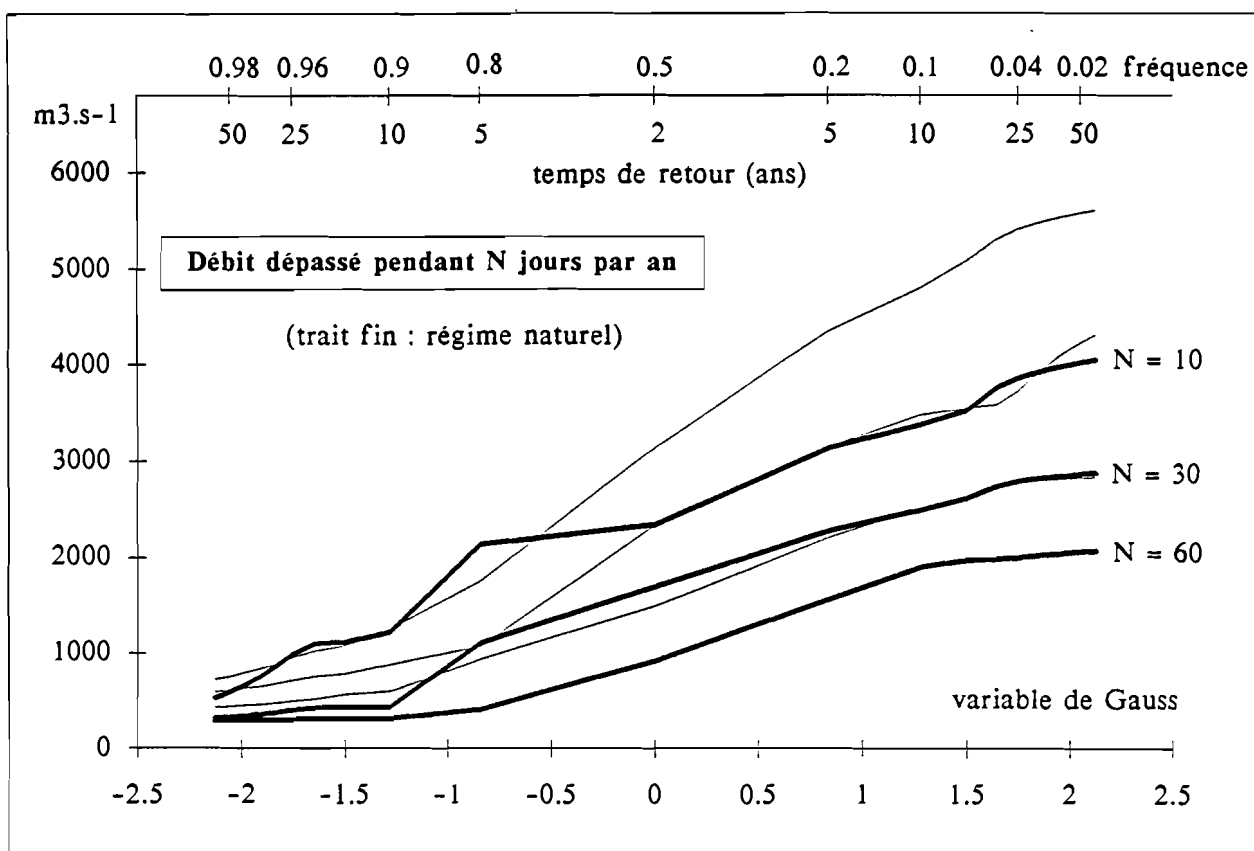
Simulation 3

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D12, E1



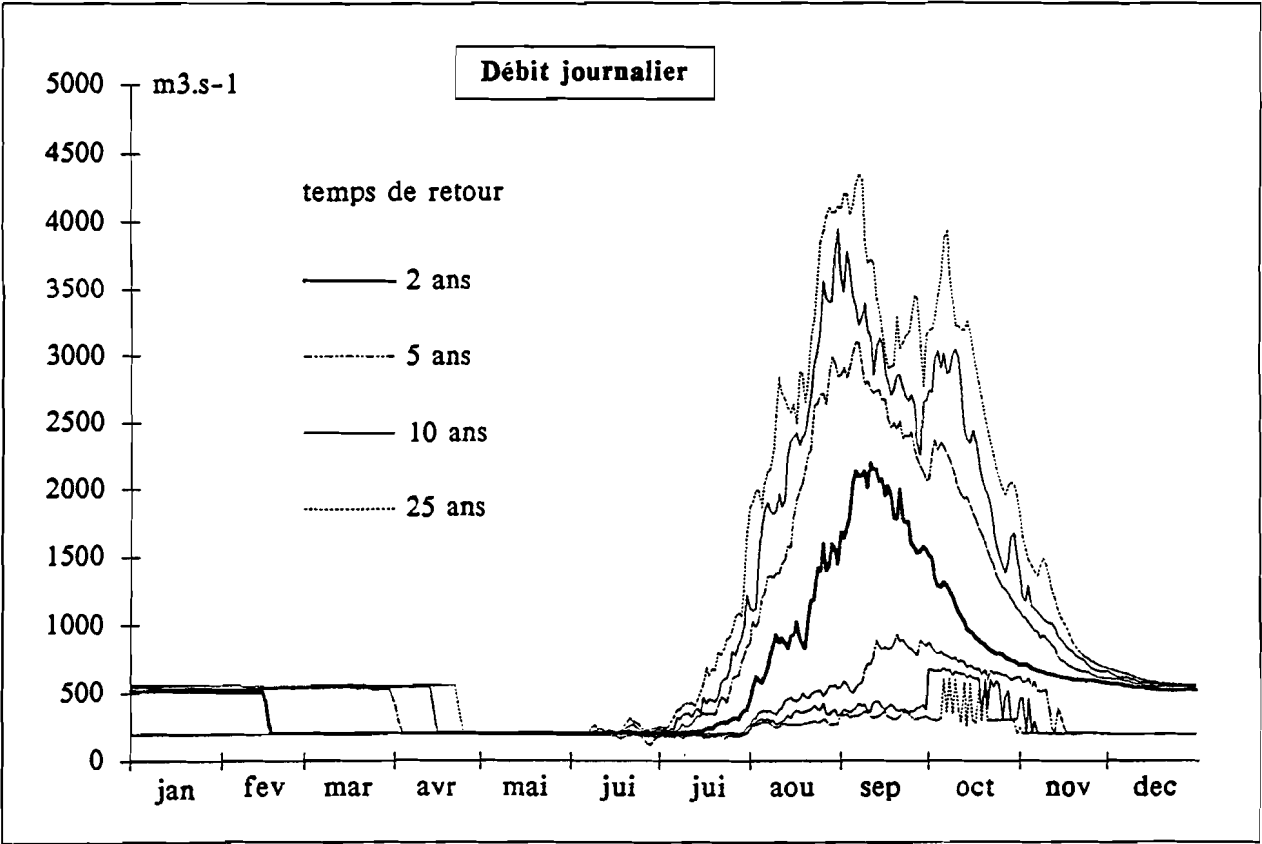
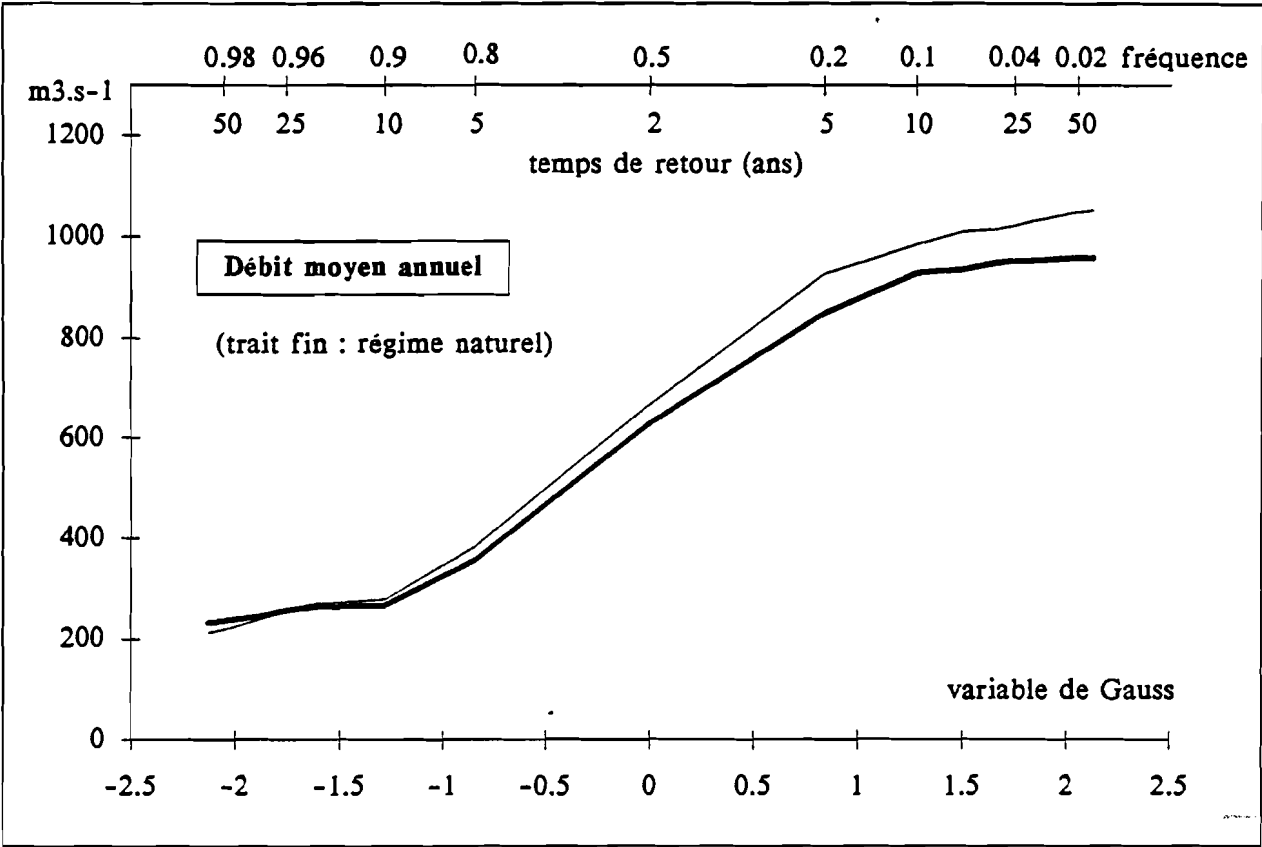
Simulation 3

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D12, E1



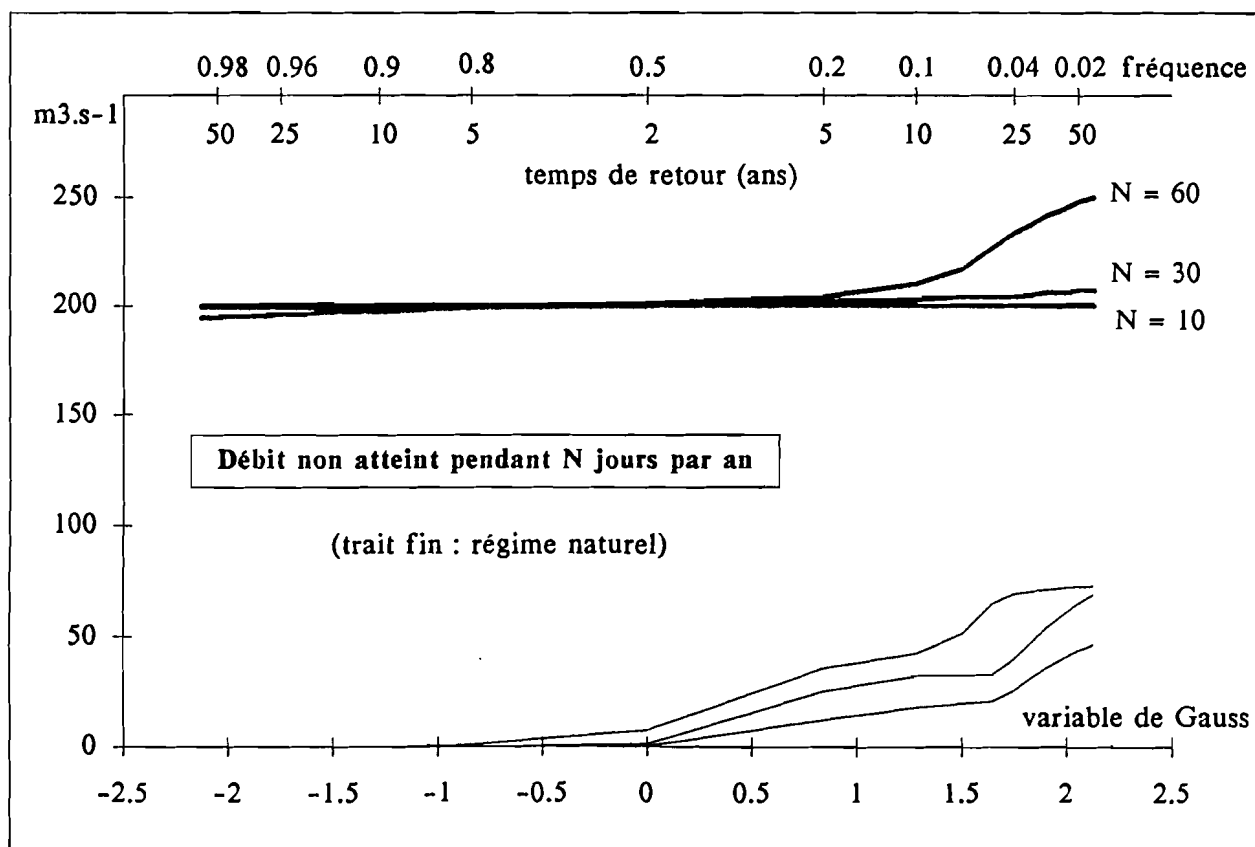
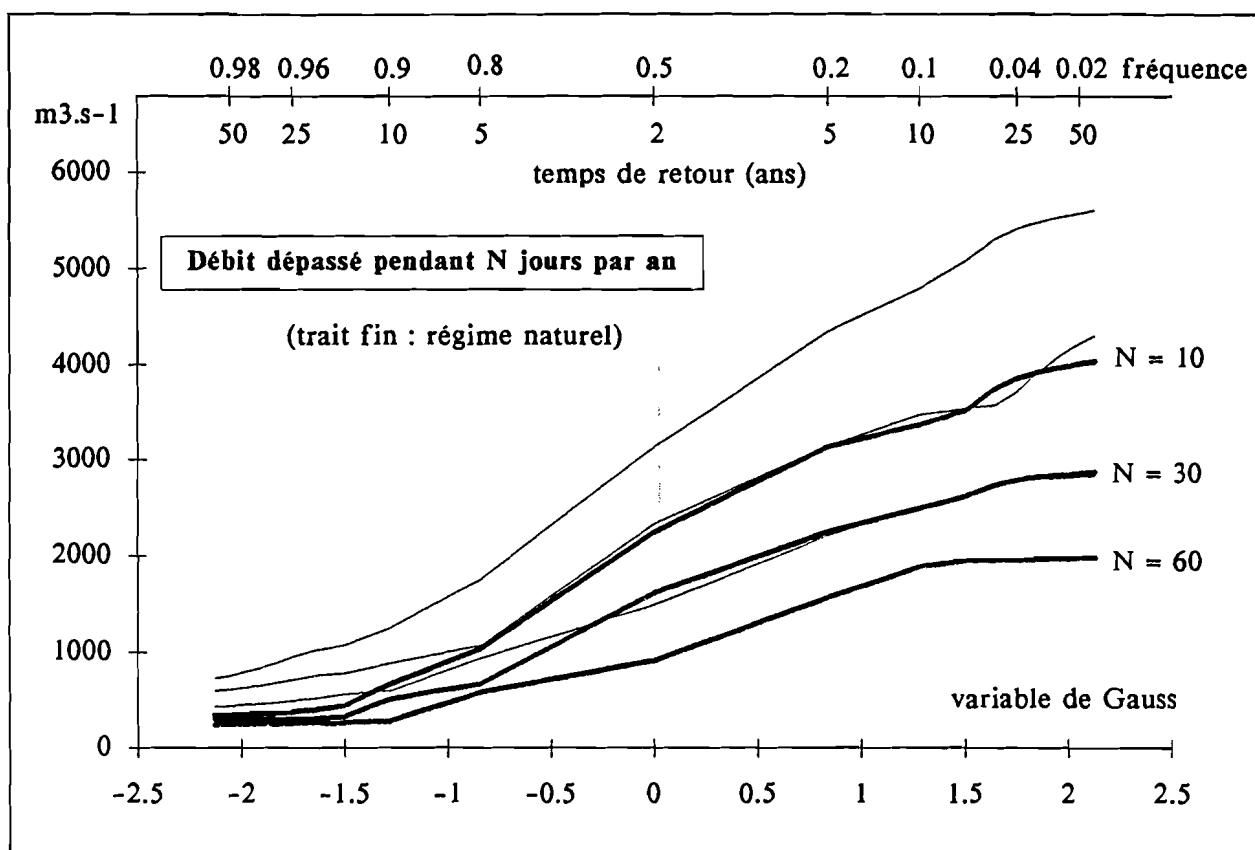
Simulation 4

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D12, E2



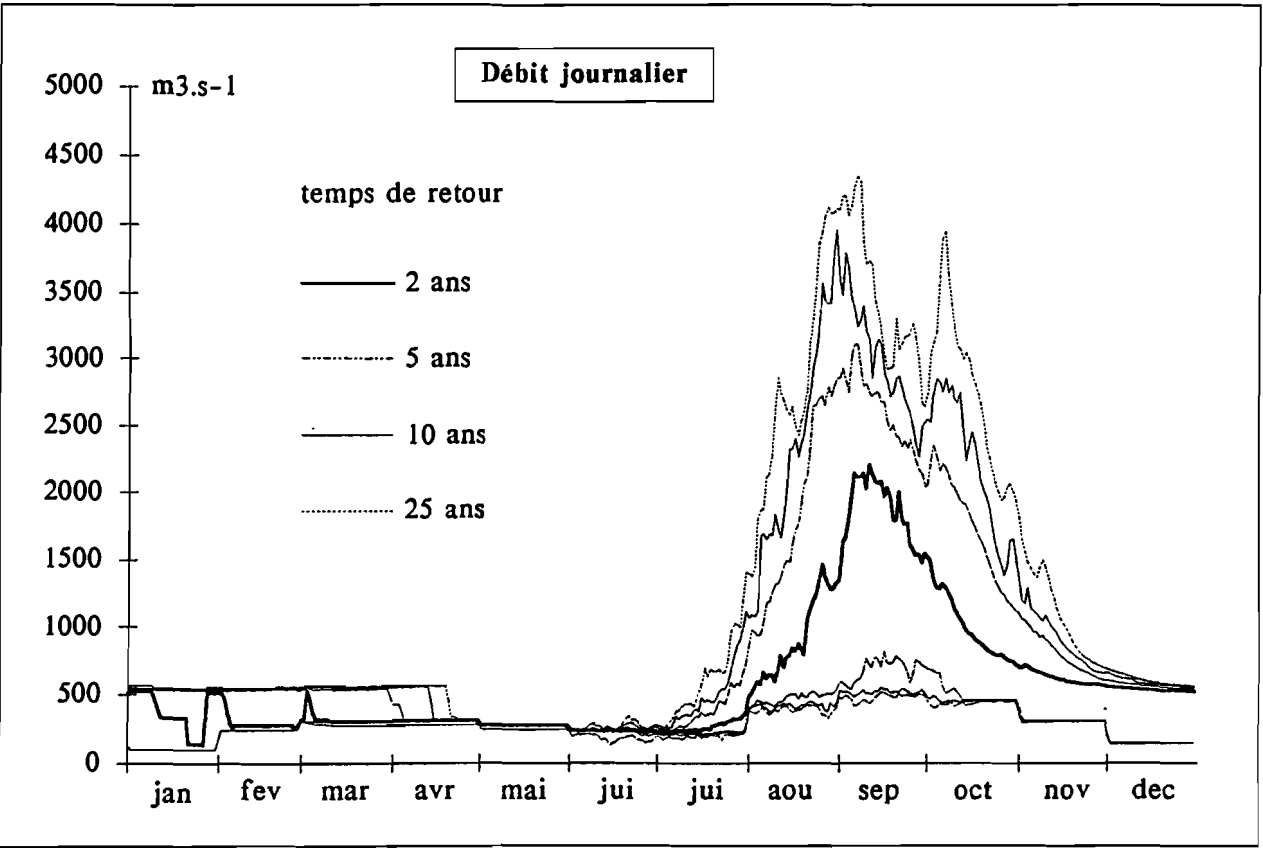
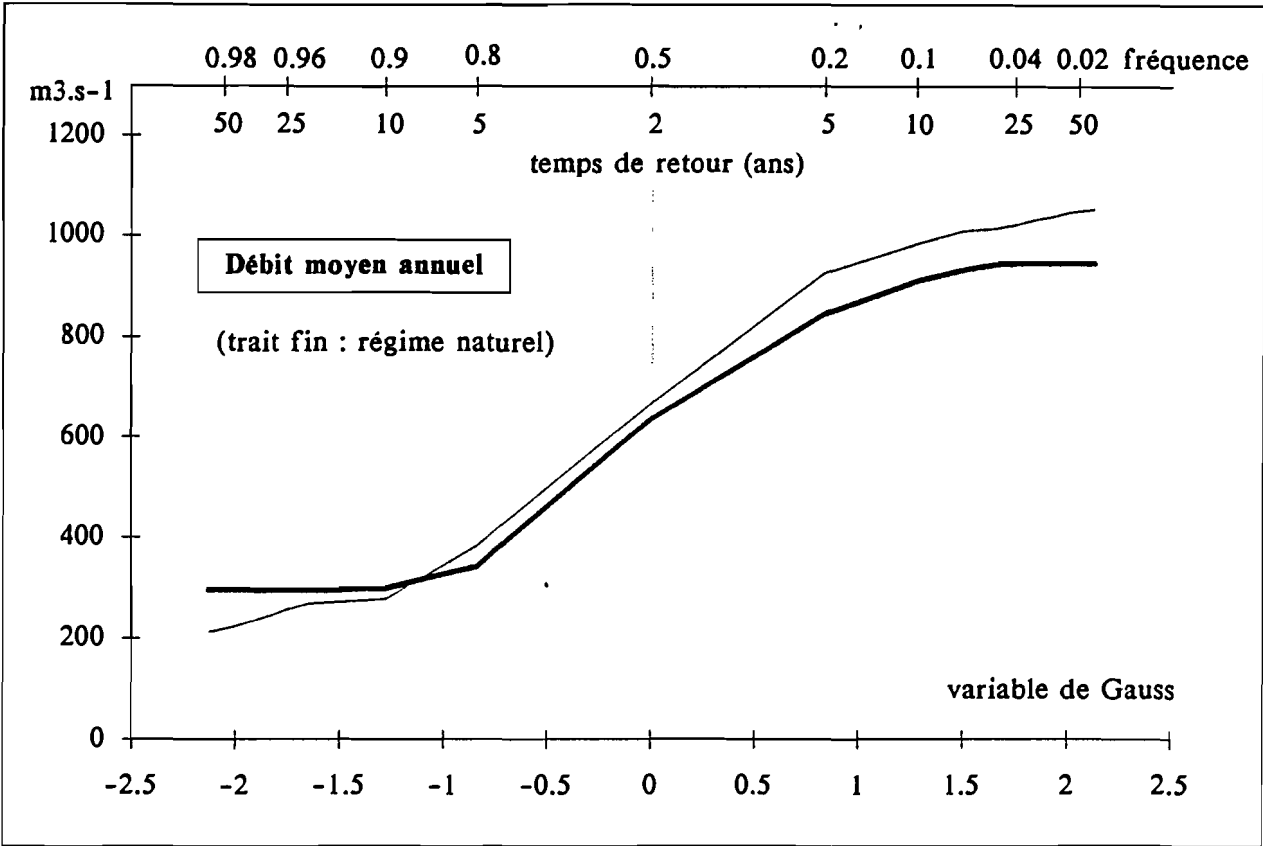
Simulation 4

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D12, E2



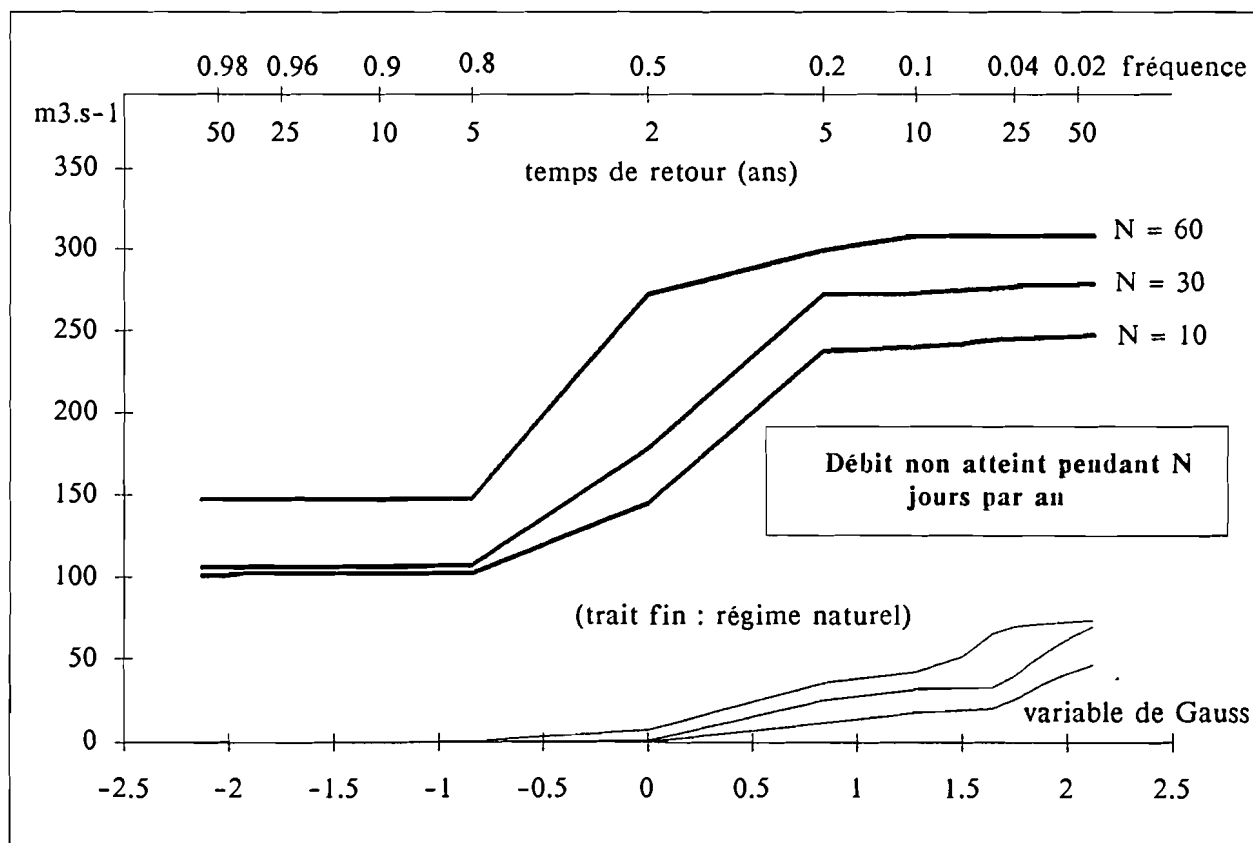
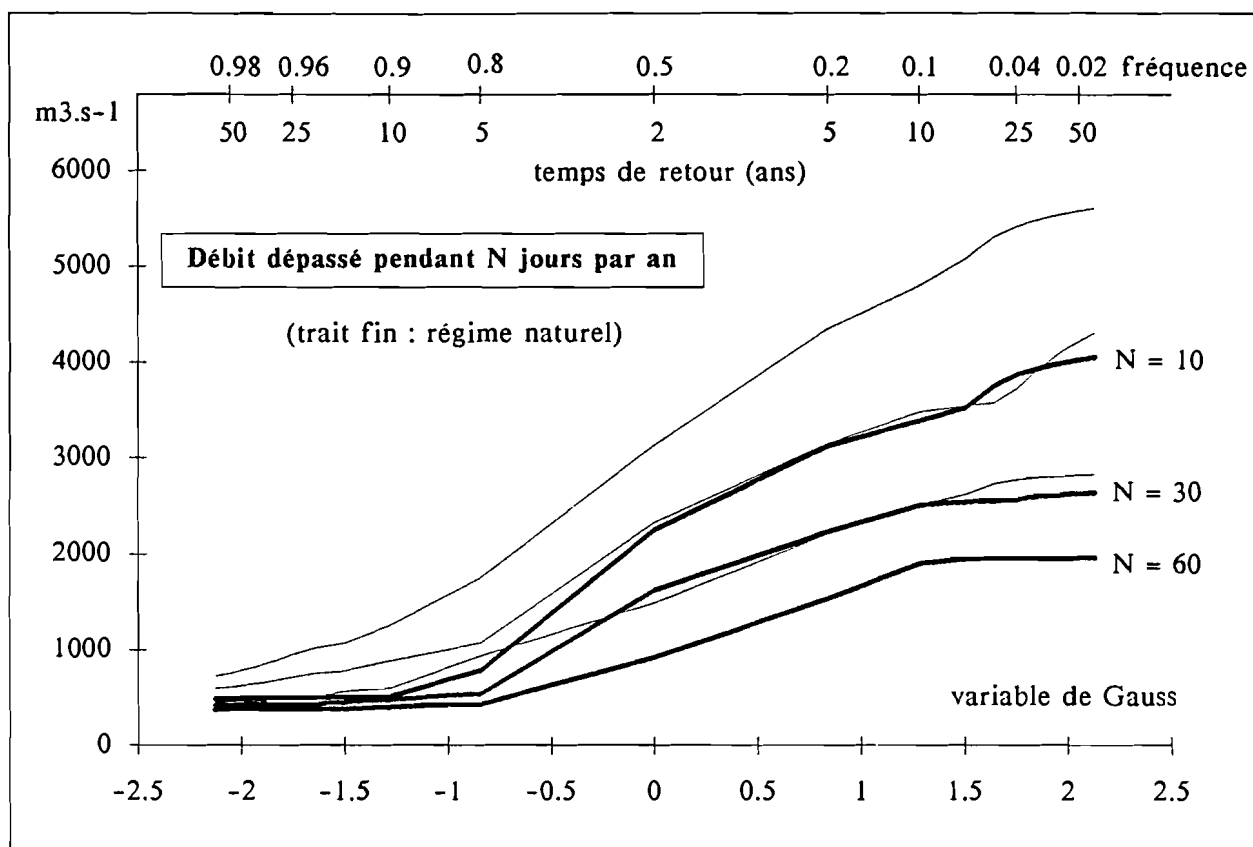
Simulation 5

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D11



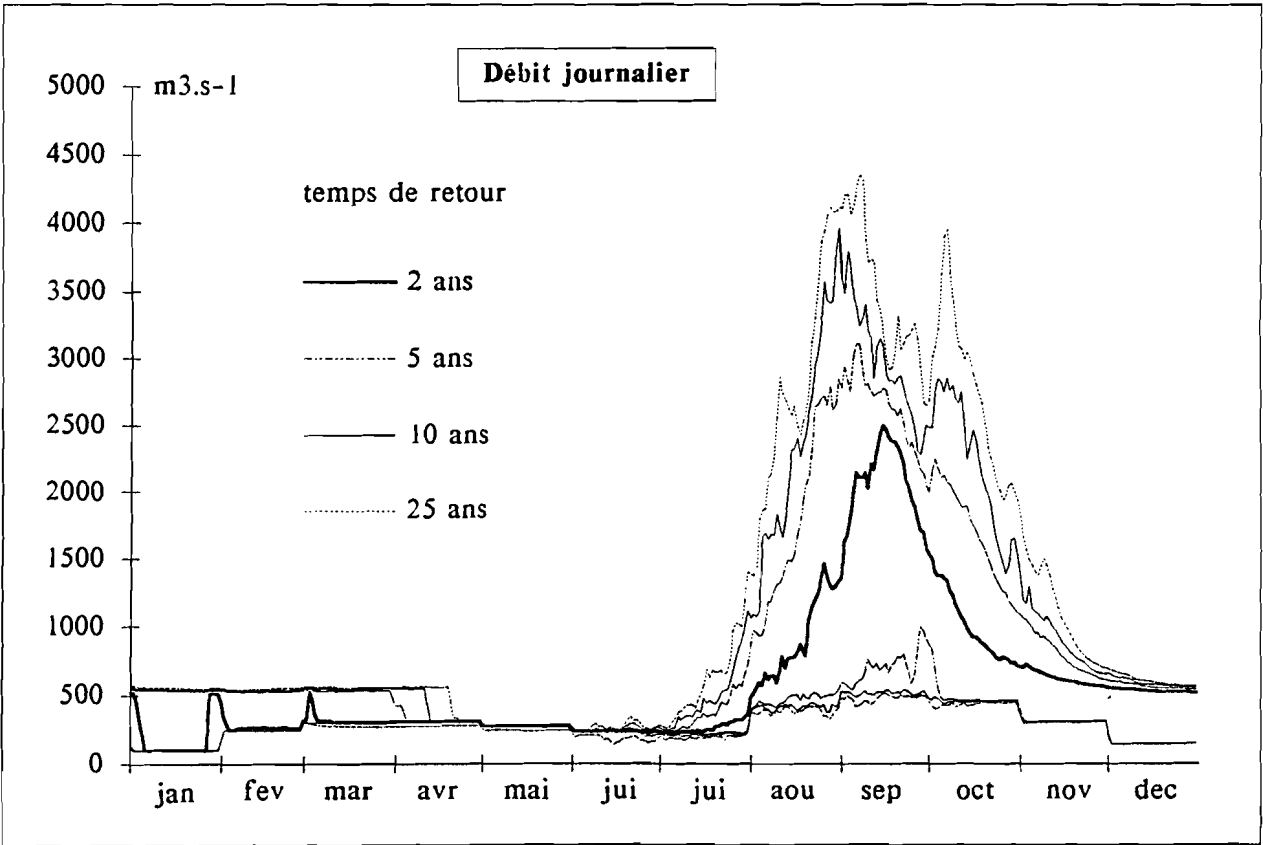
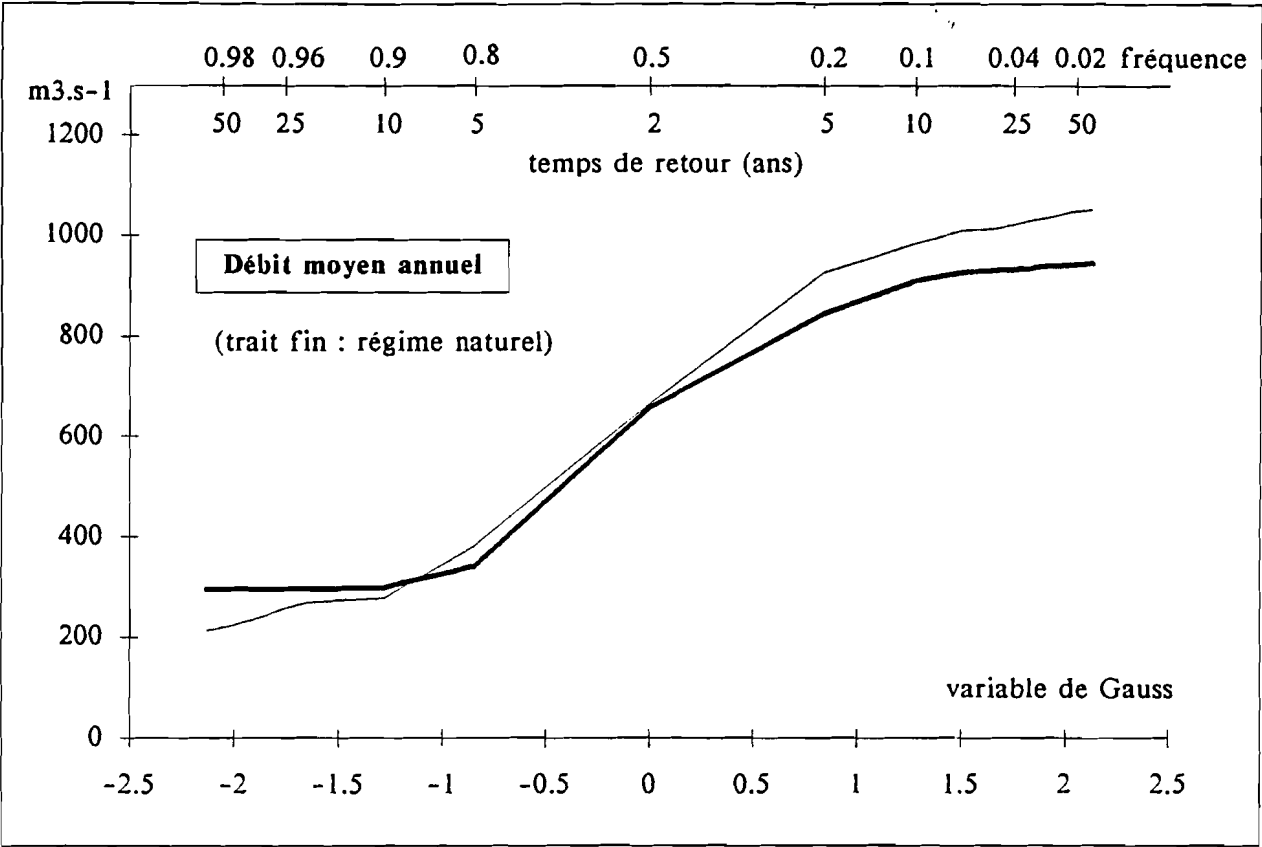
Simulation 5

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D11



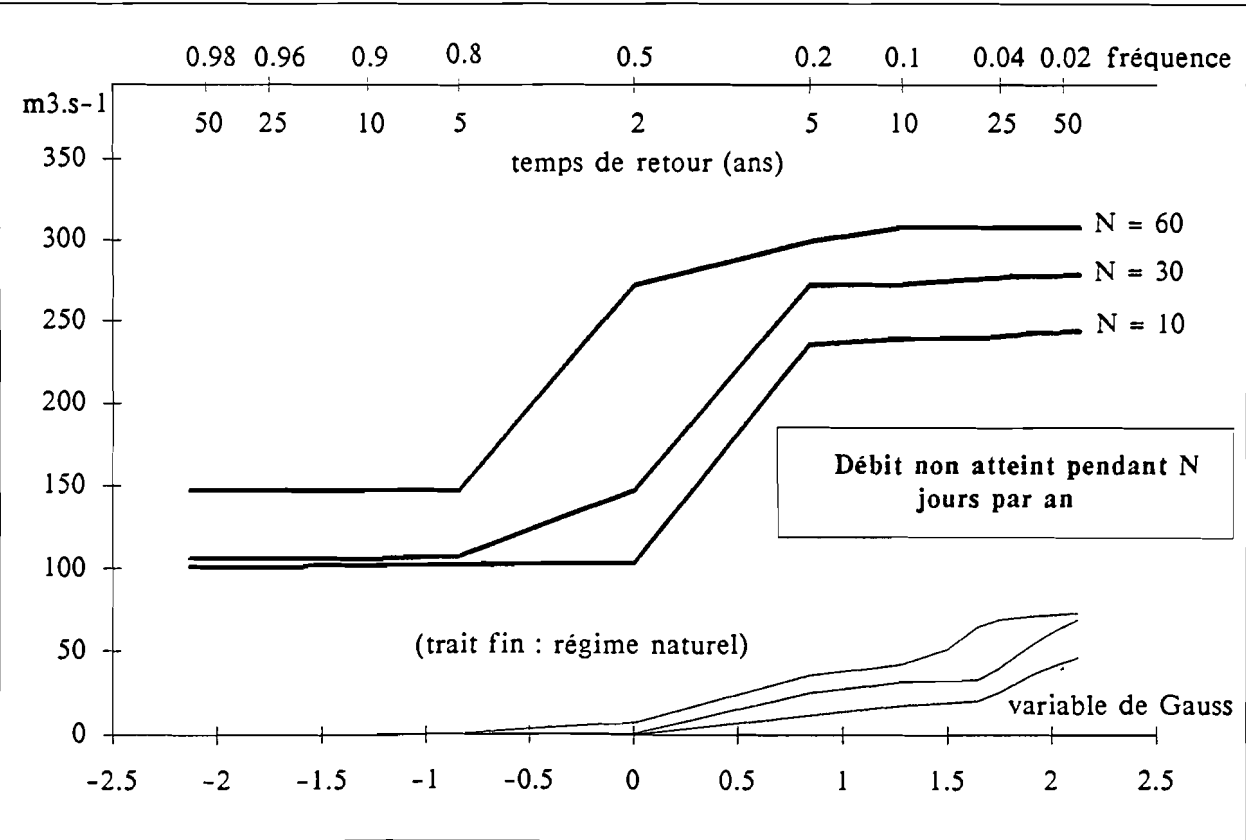
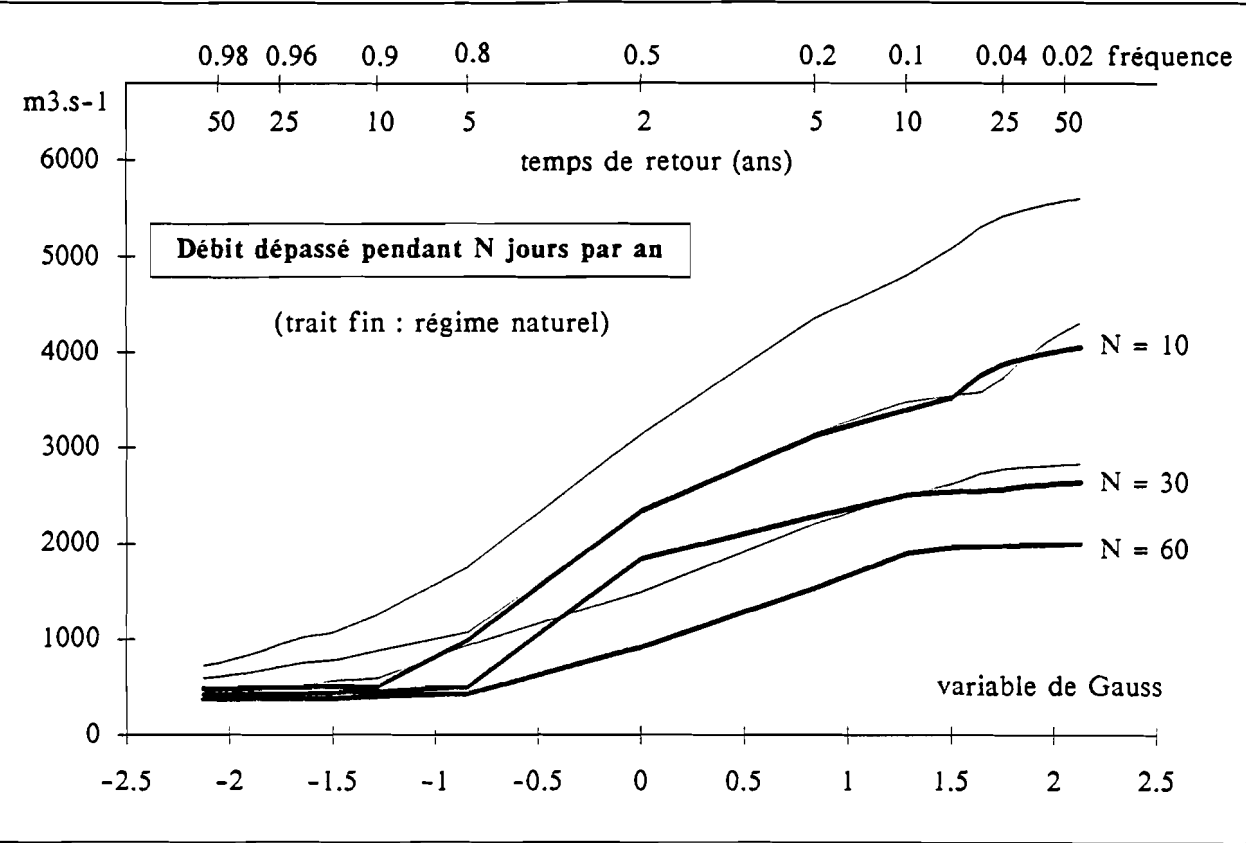
Simulation 6

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D11, E1



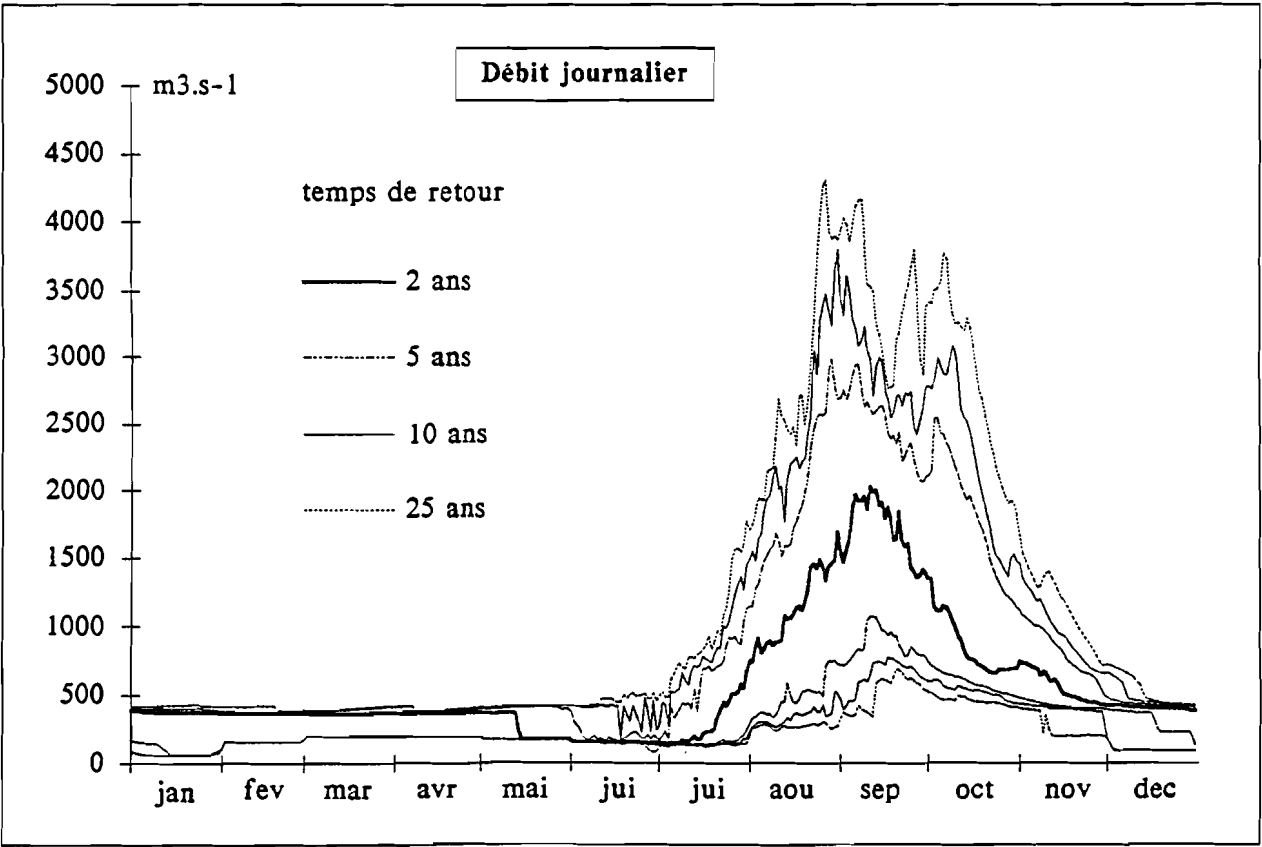
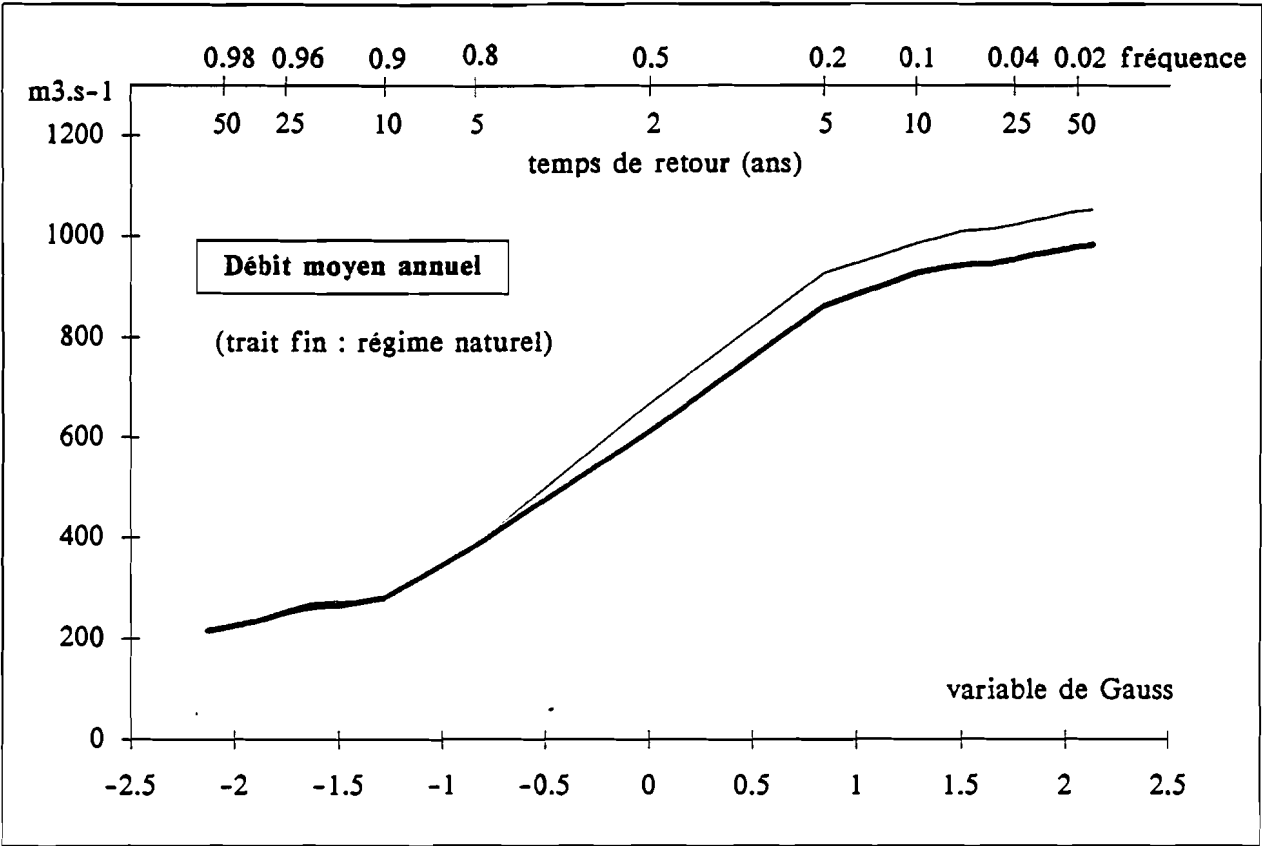
Simulation 6

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D11, E1



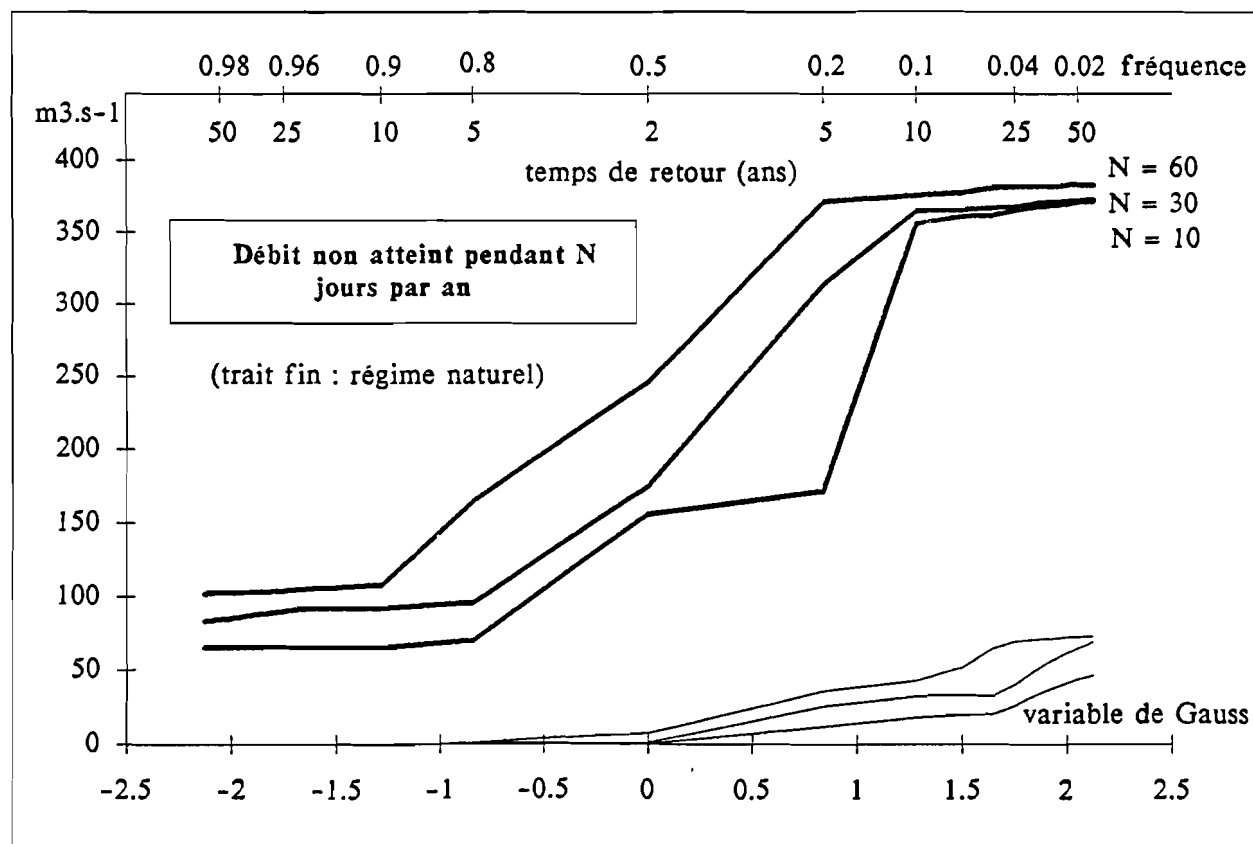
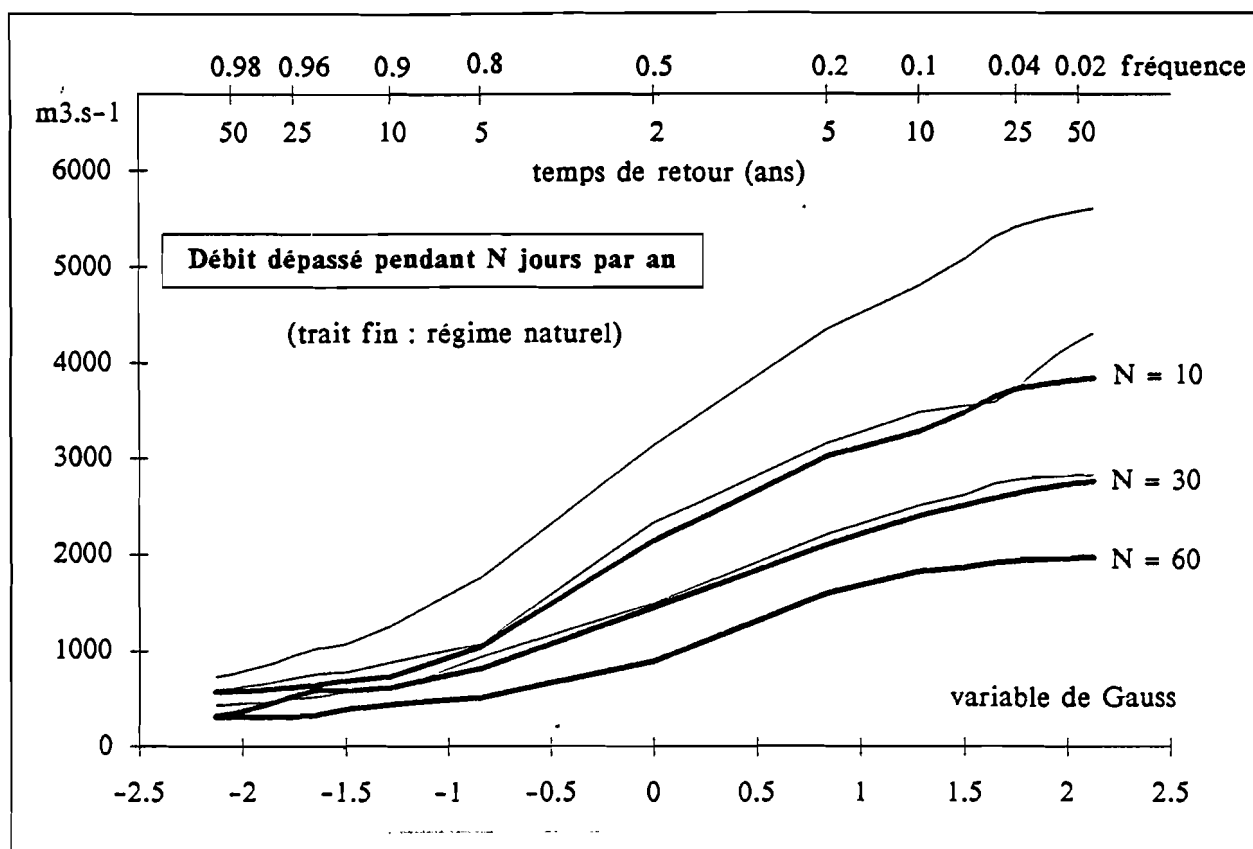
Simulation 9

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D21



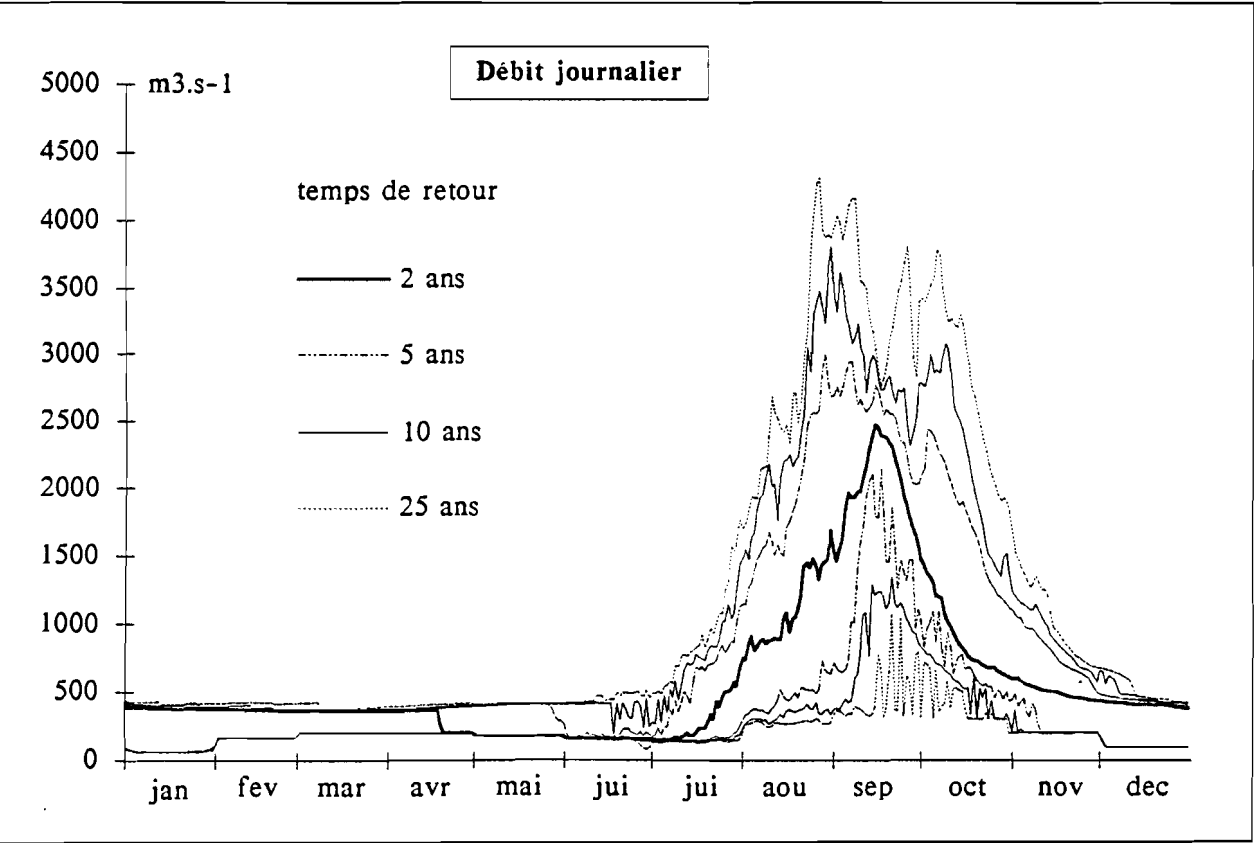
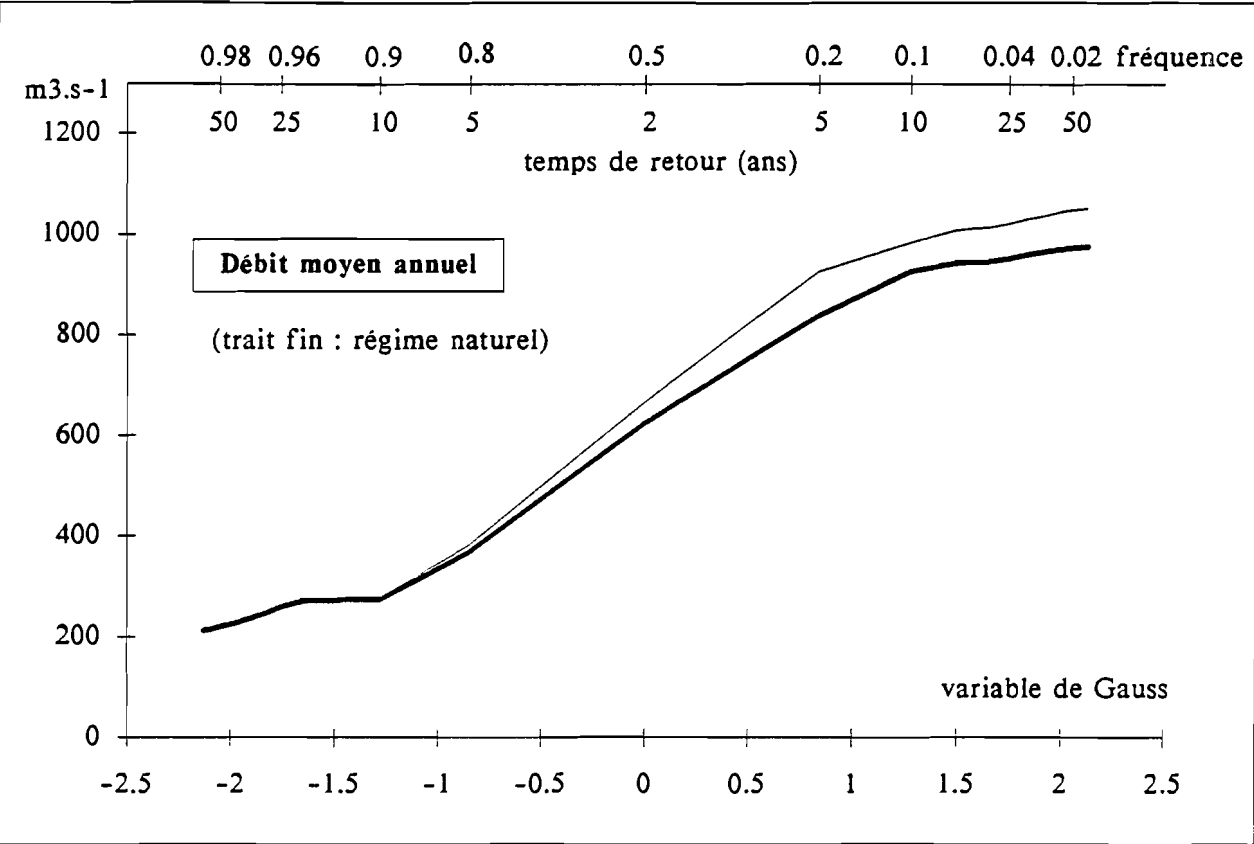
Simulation 9

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D21



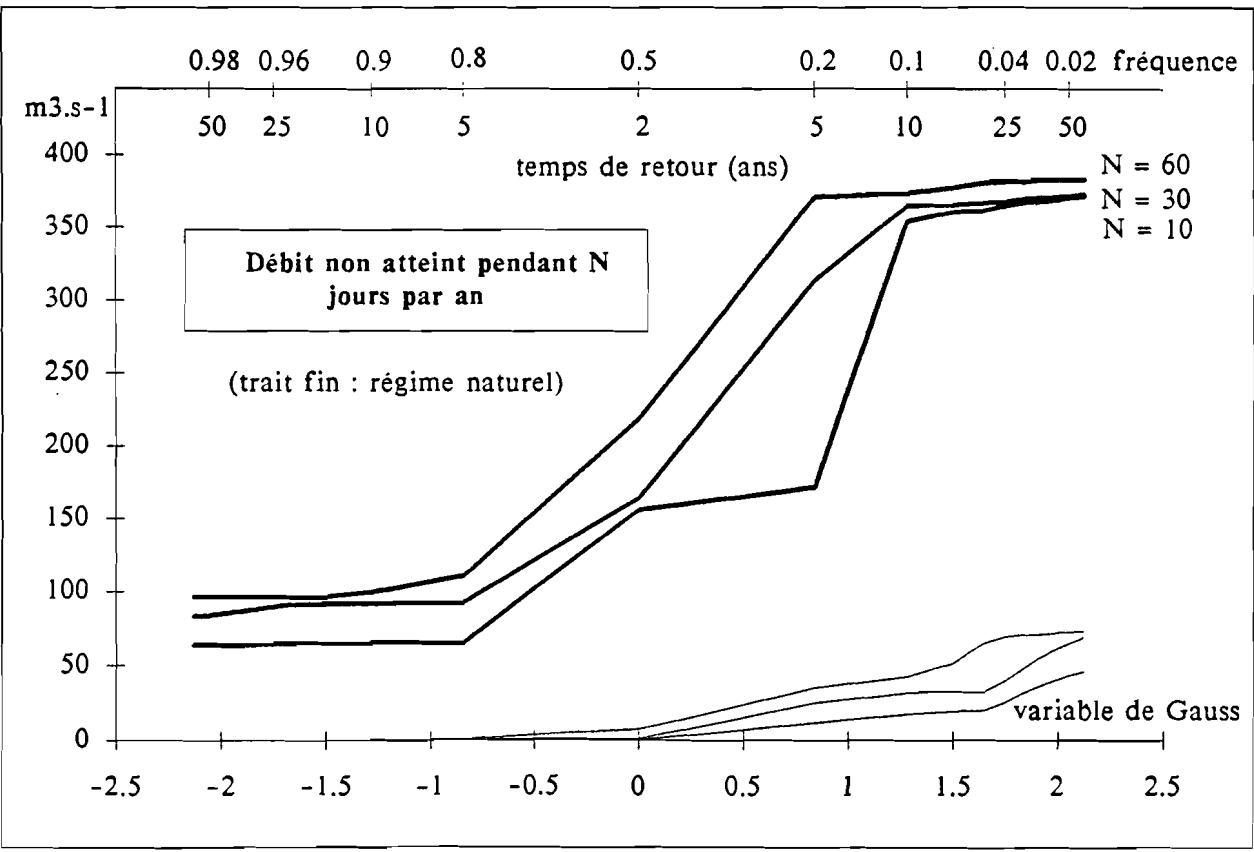
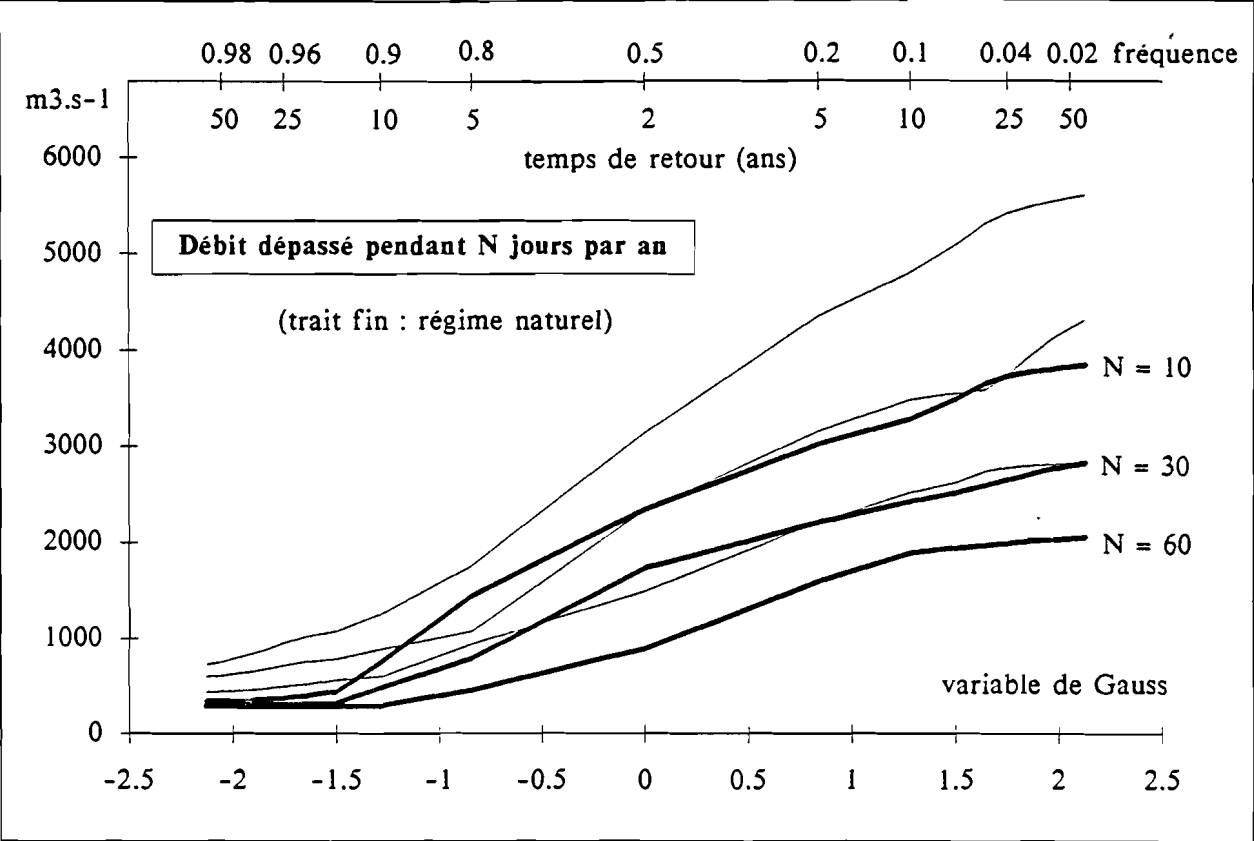
Simulation 10

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D21, E1



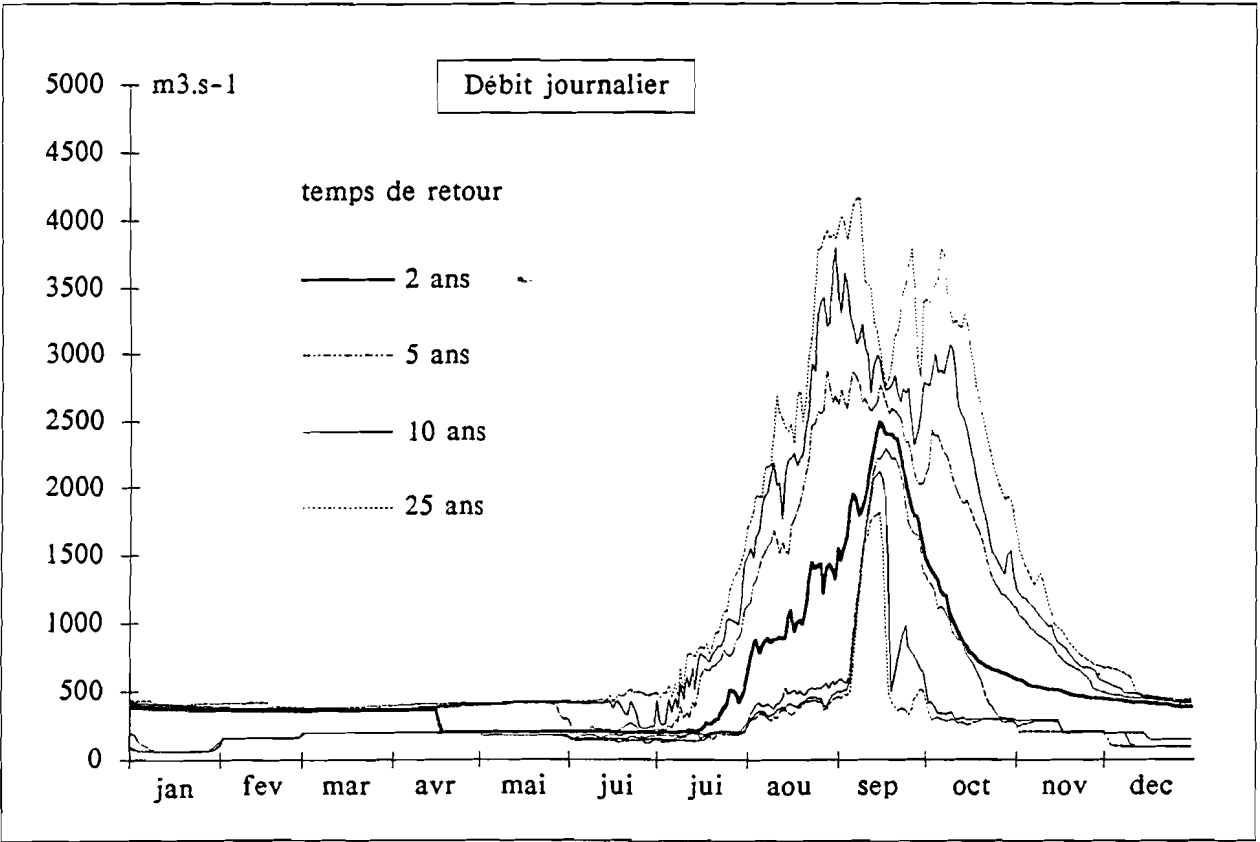
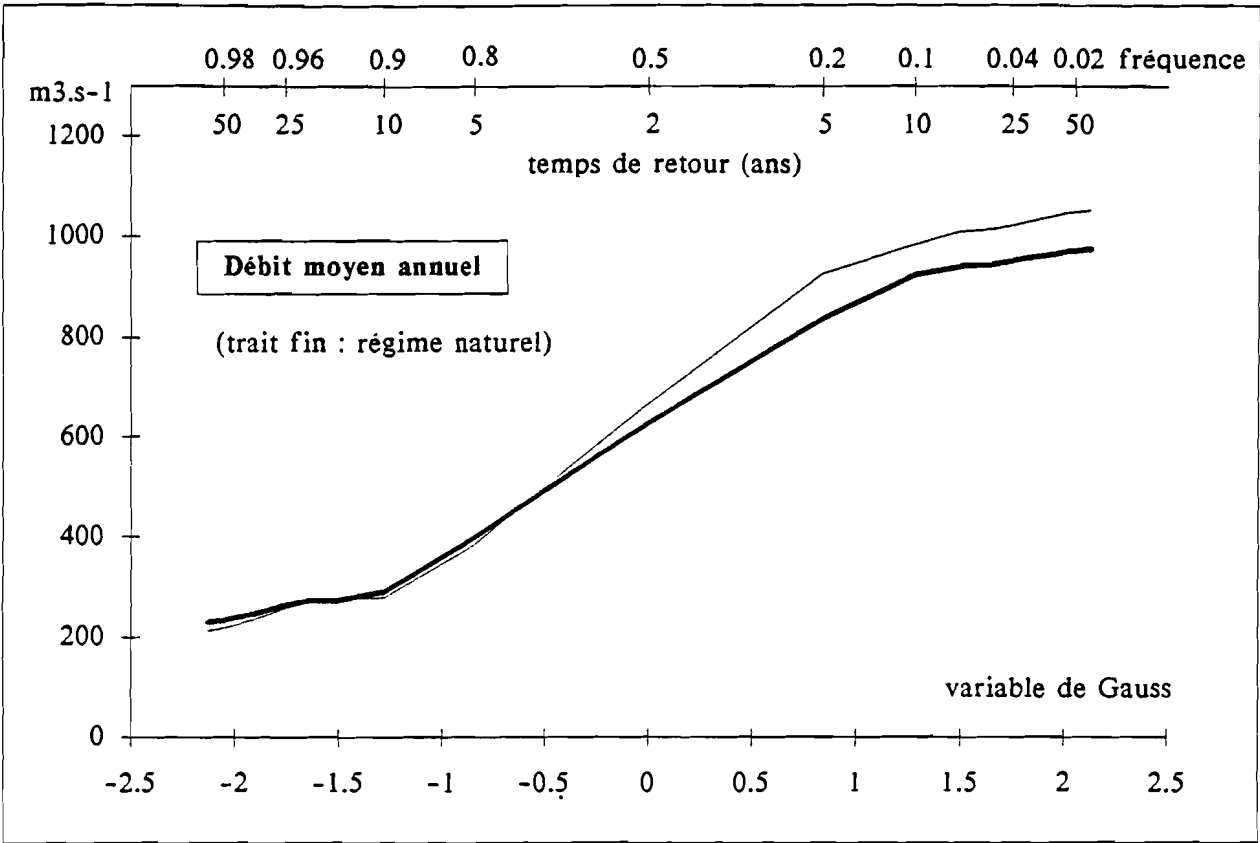
Simulation 10

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D21, E1



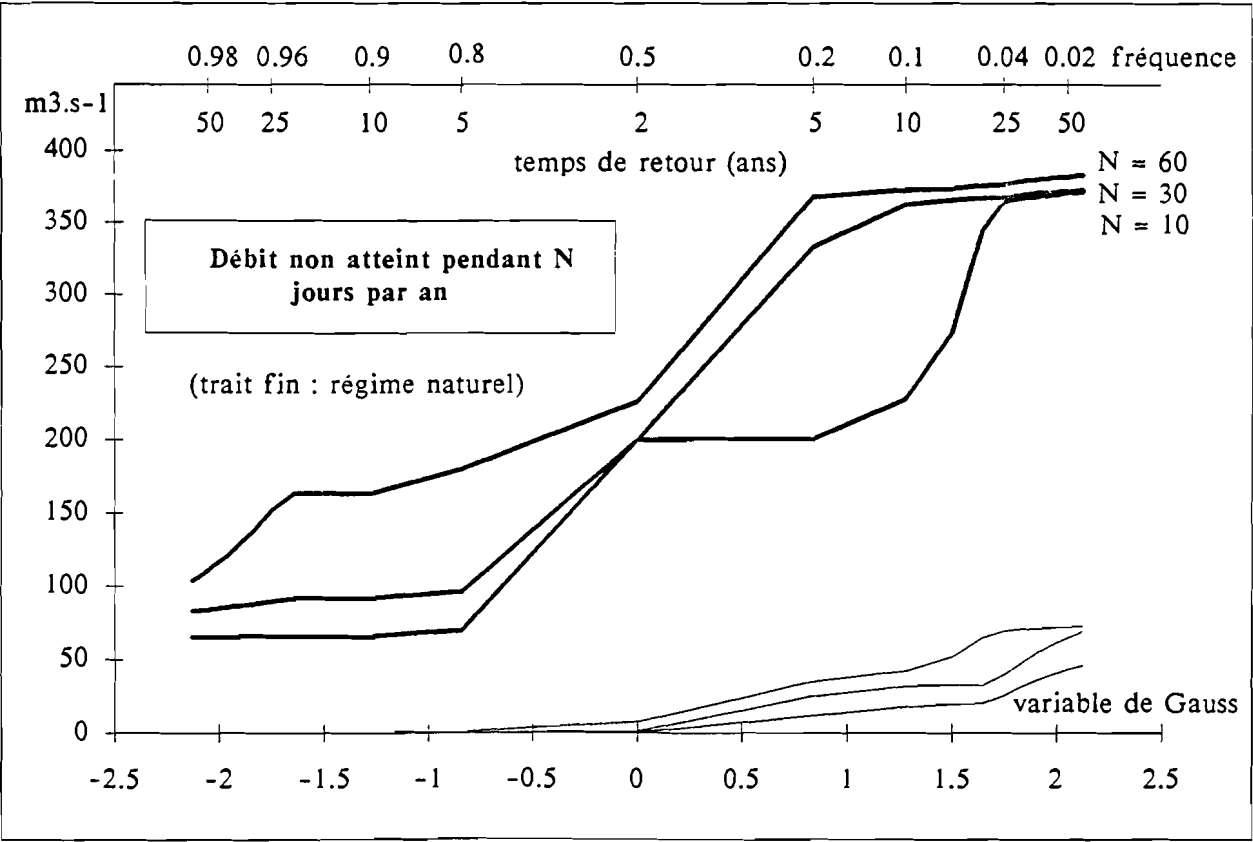
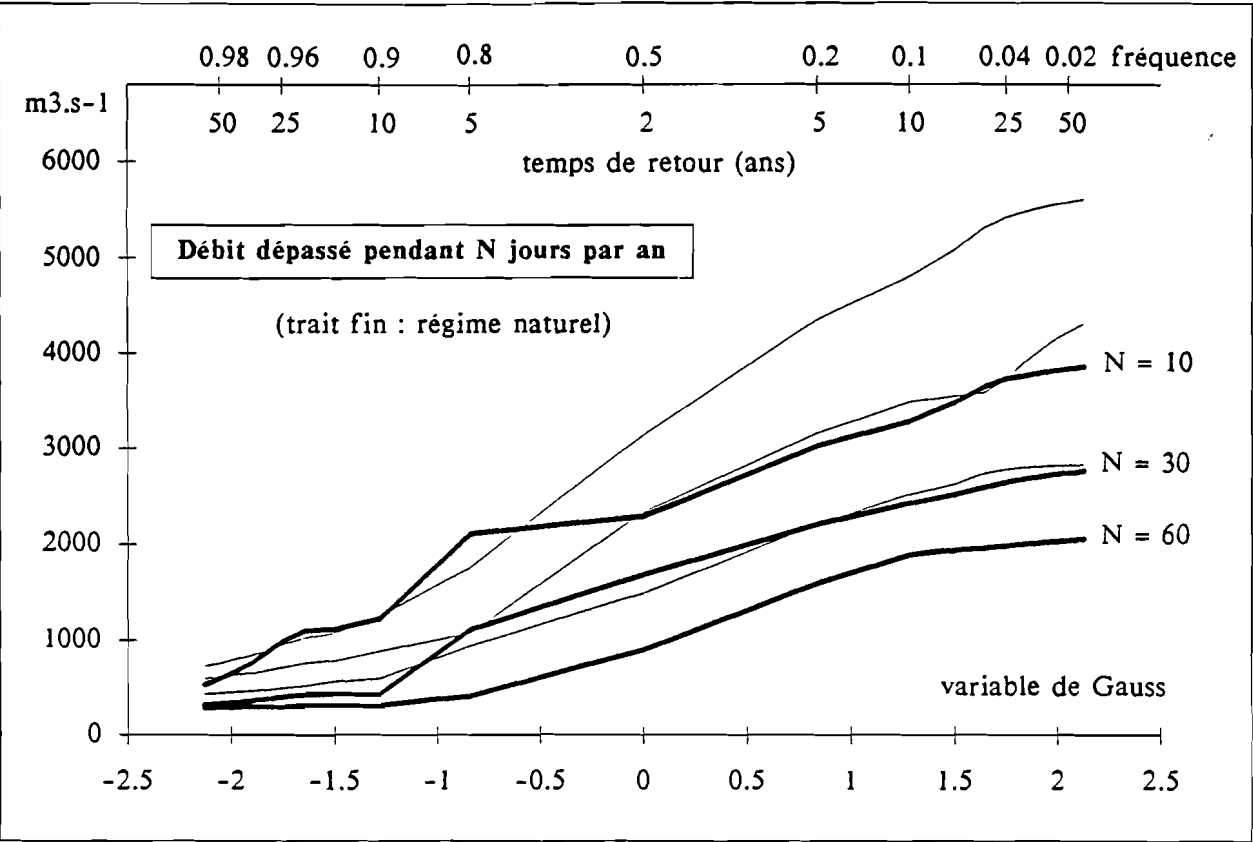
Simulation 11

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D22, E1



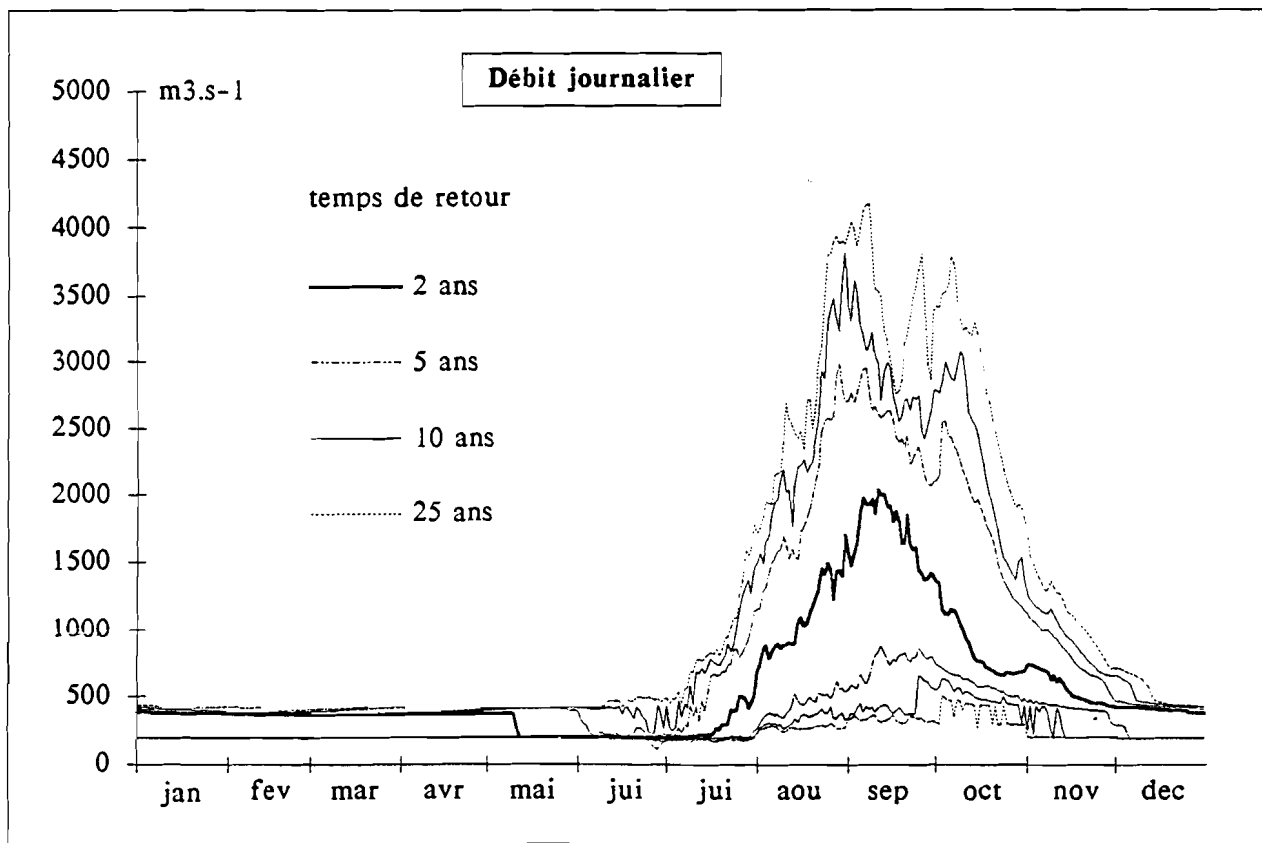
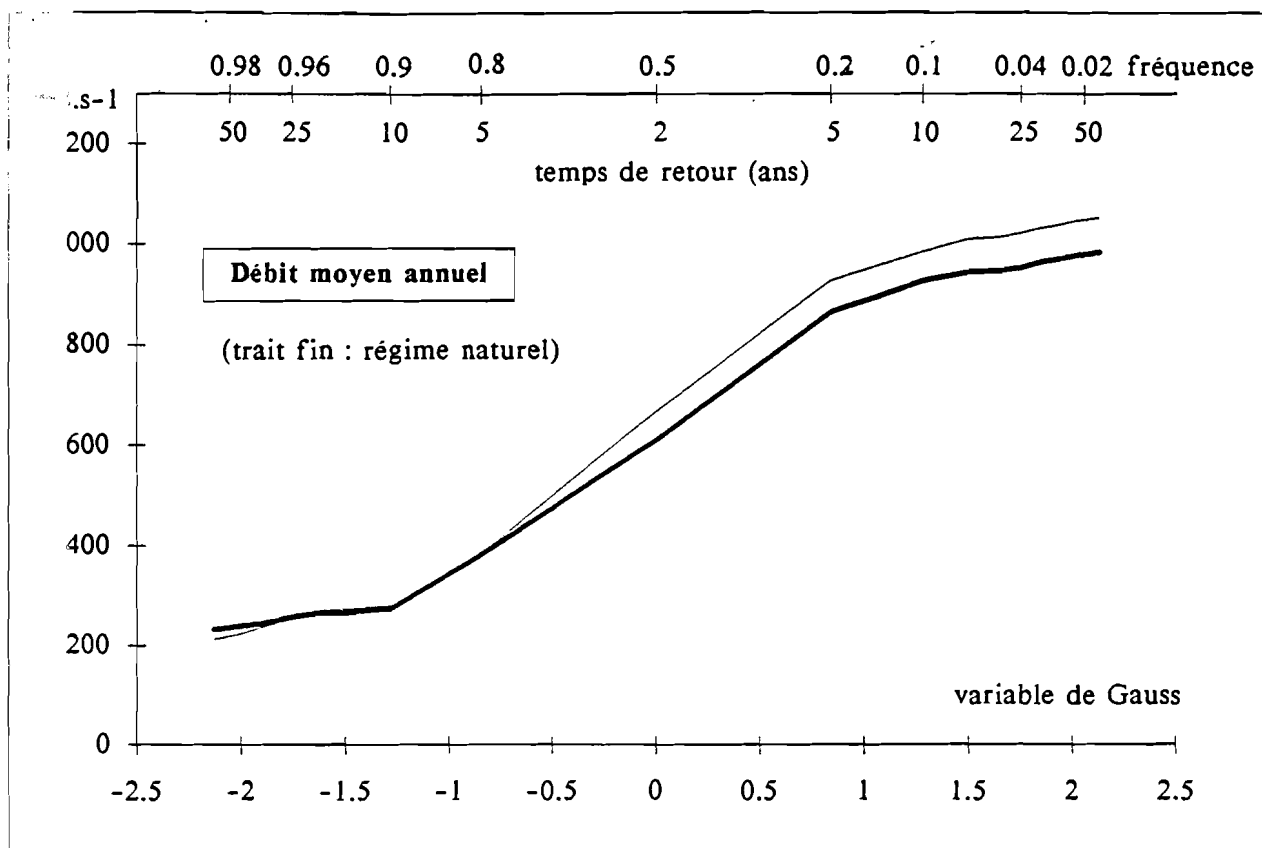
Simulation 11

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D22, E1



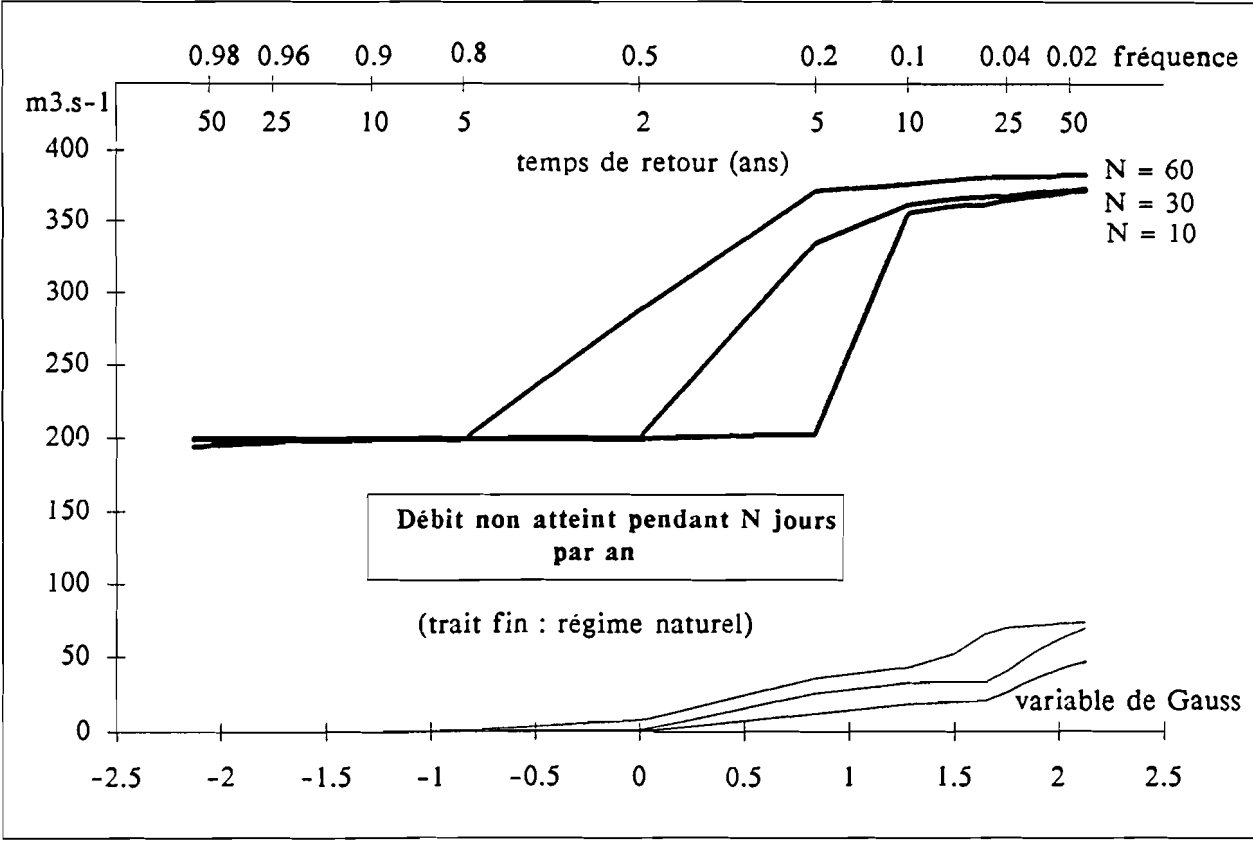
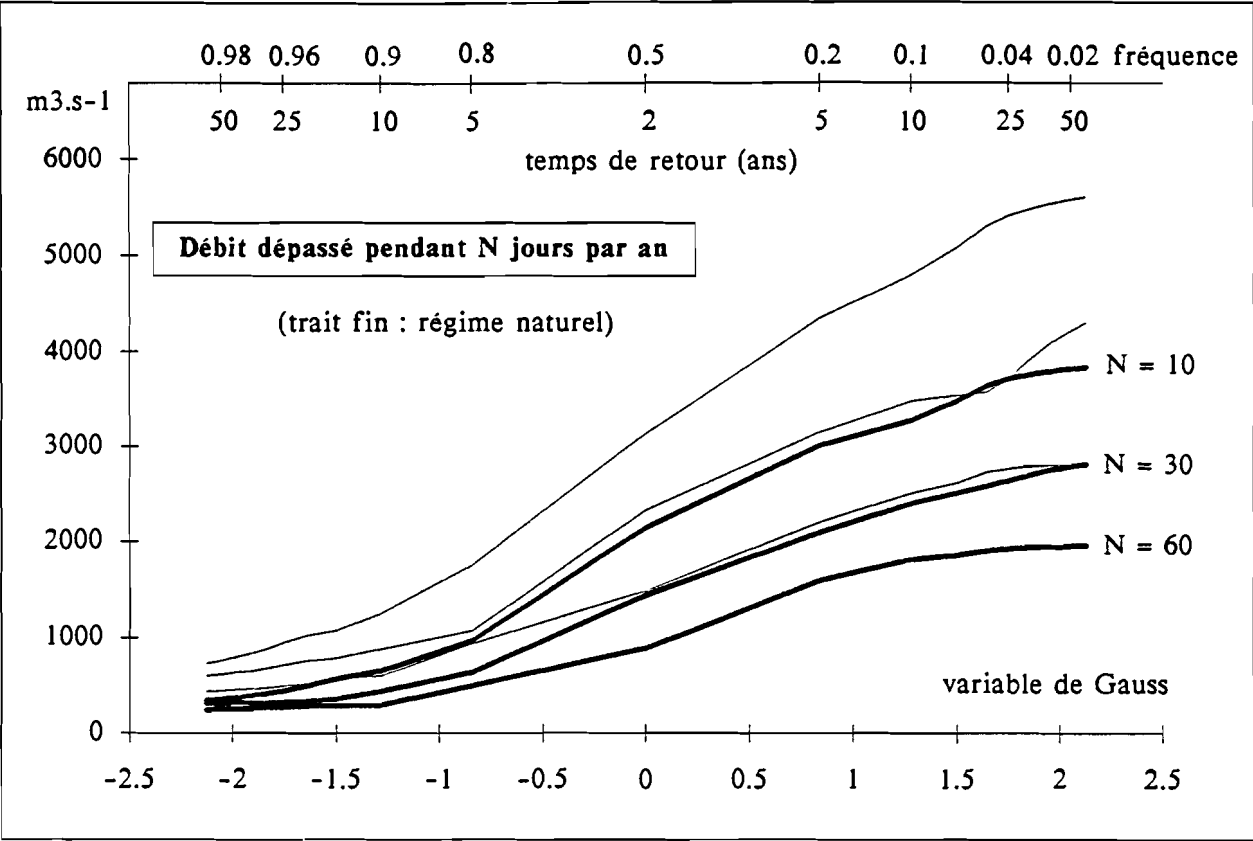
Simulation 12

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D22, E2



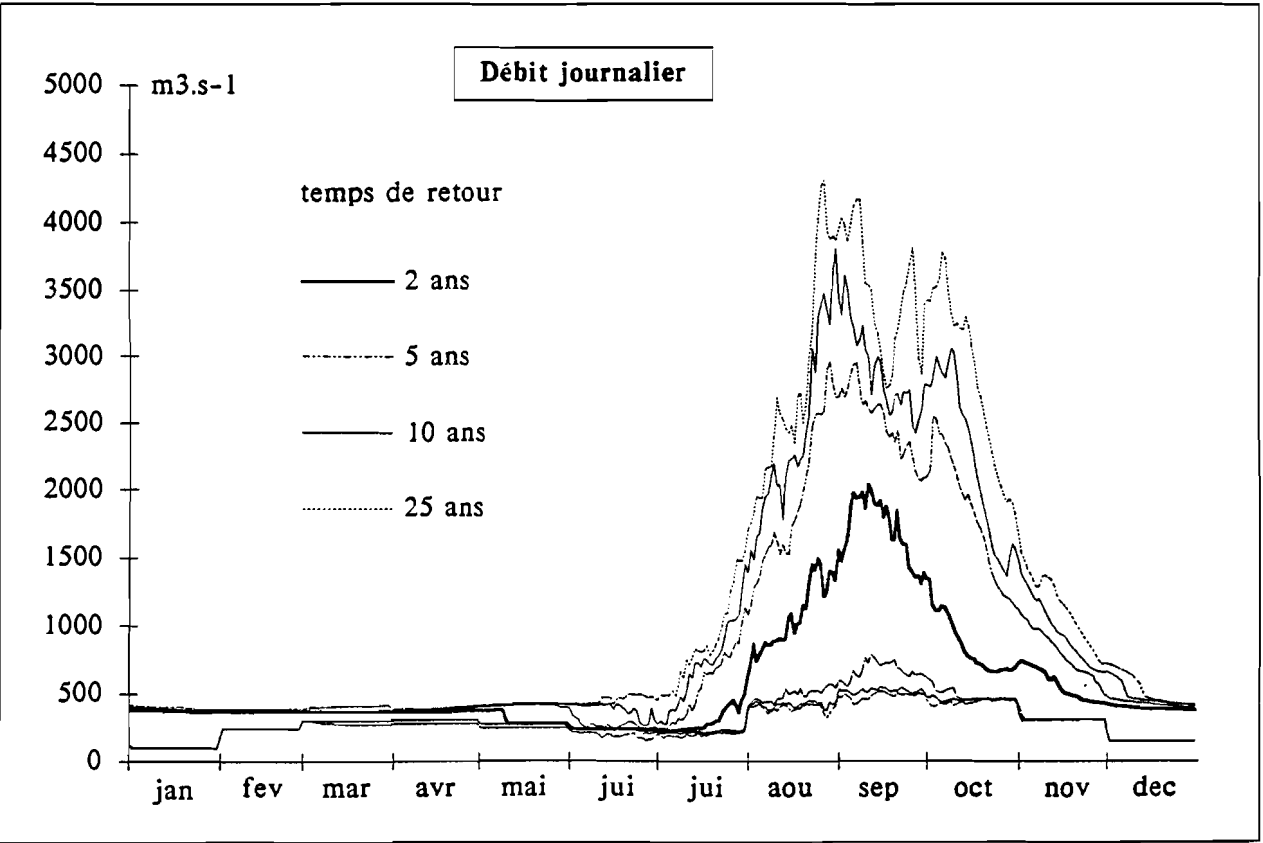
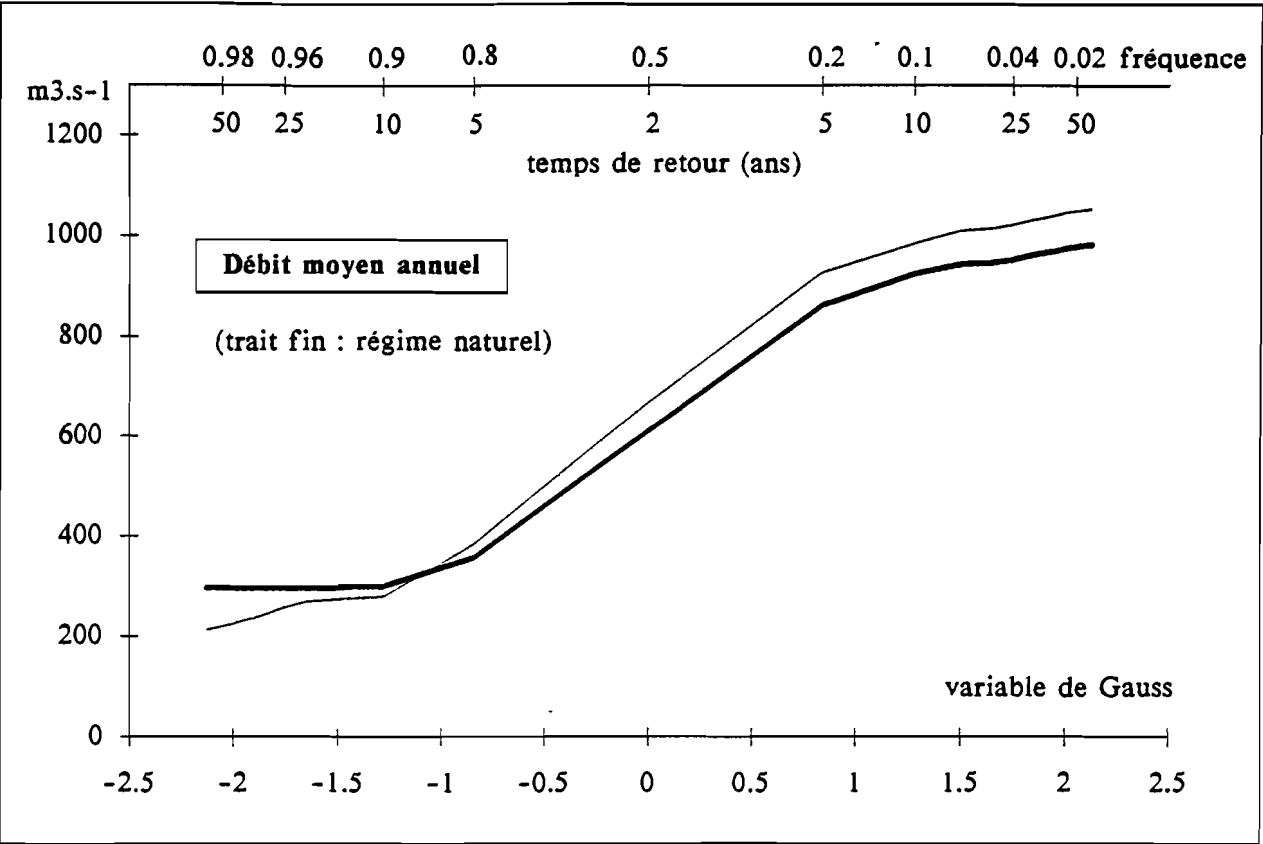
Simulation 12

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C1, D22, E2



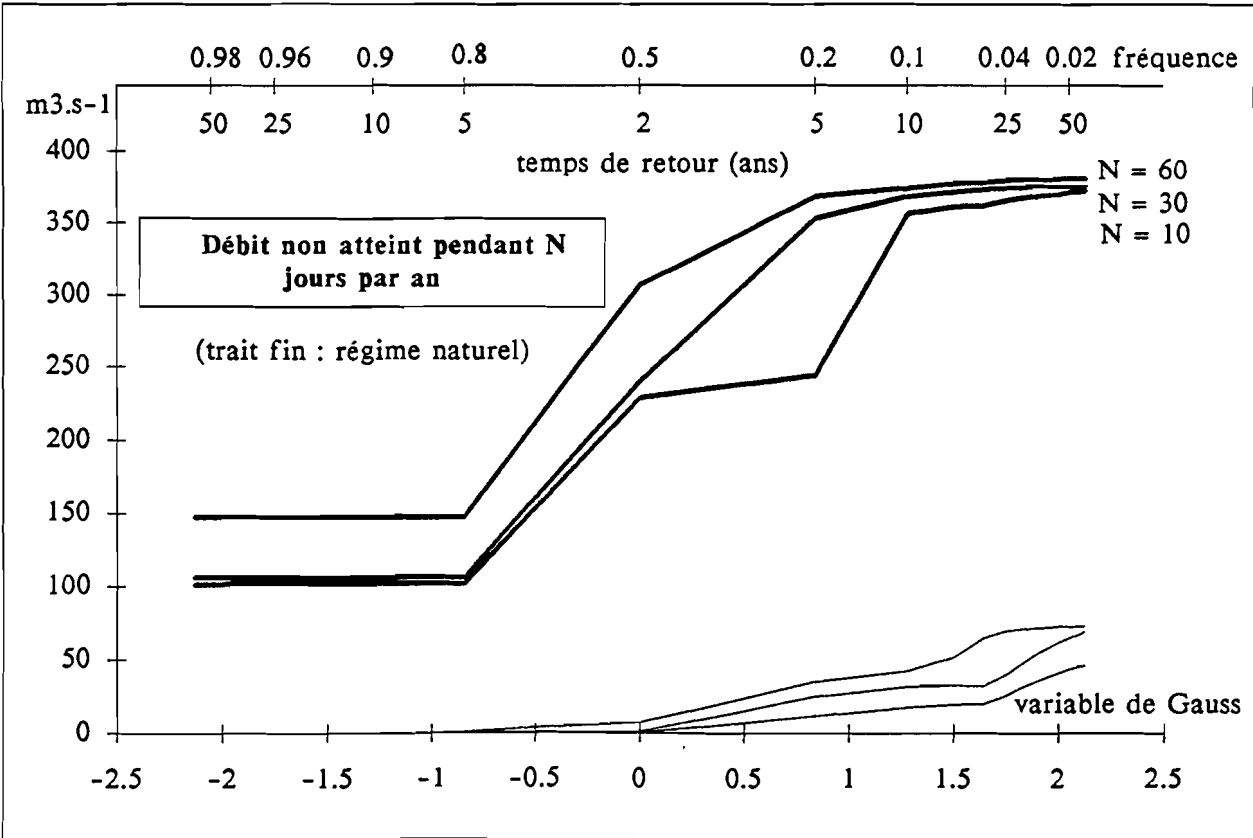
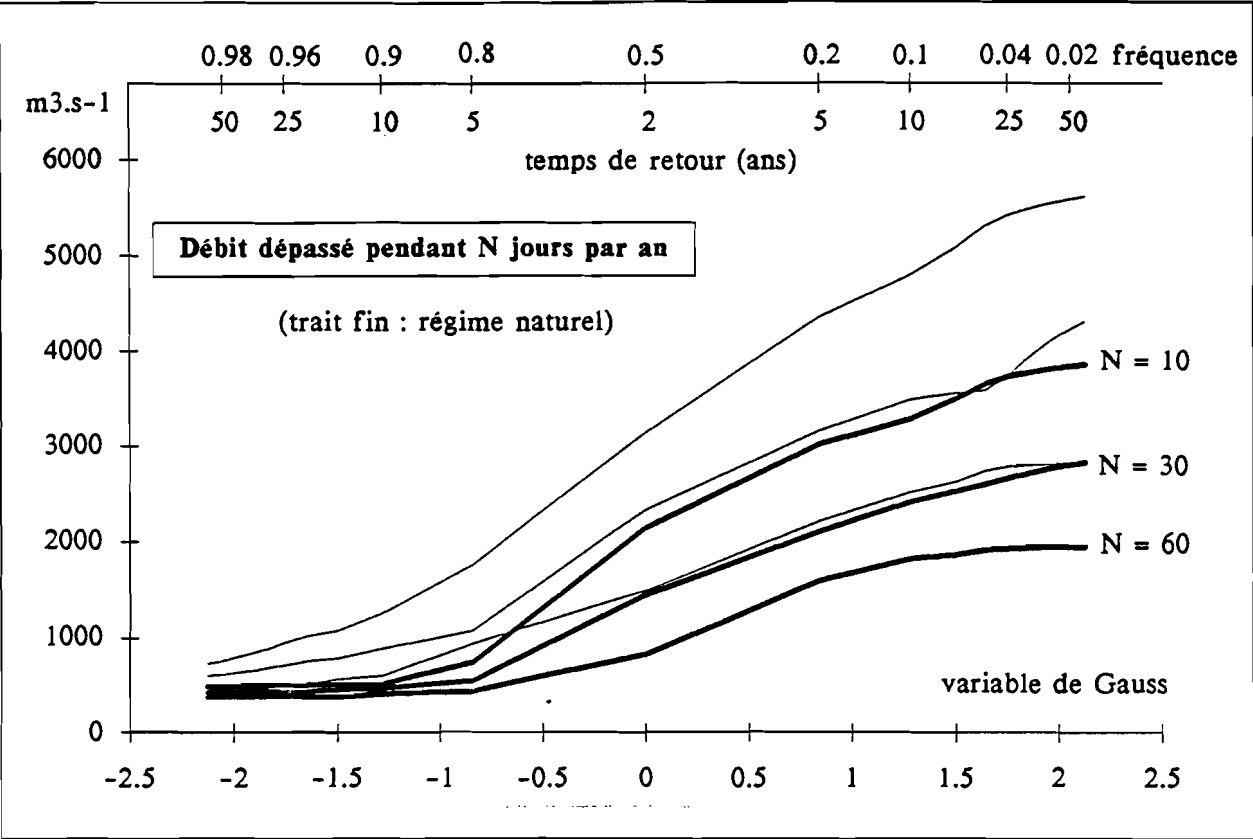
Simulation 13

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D21



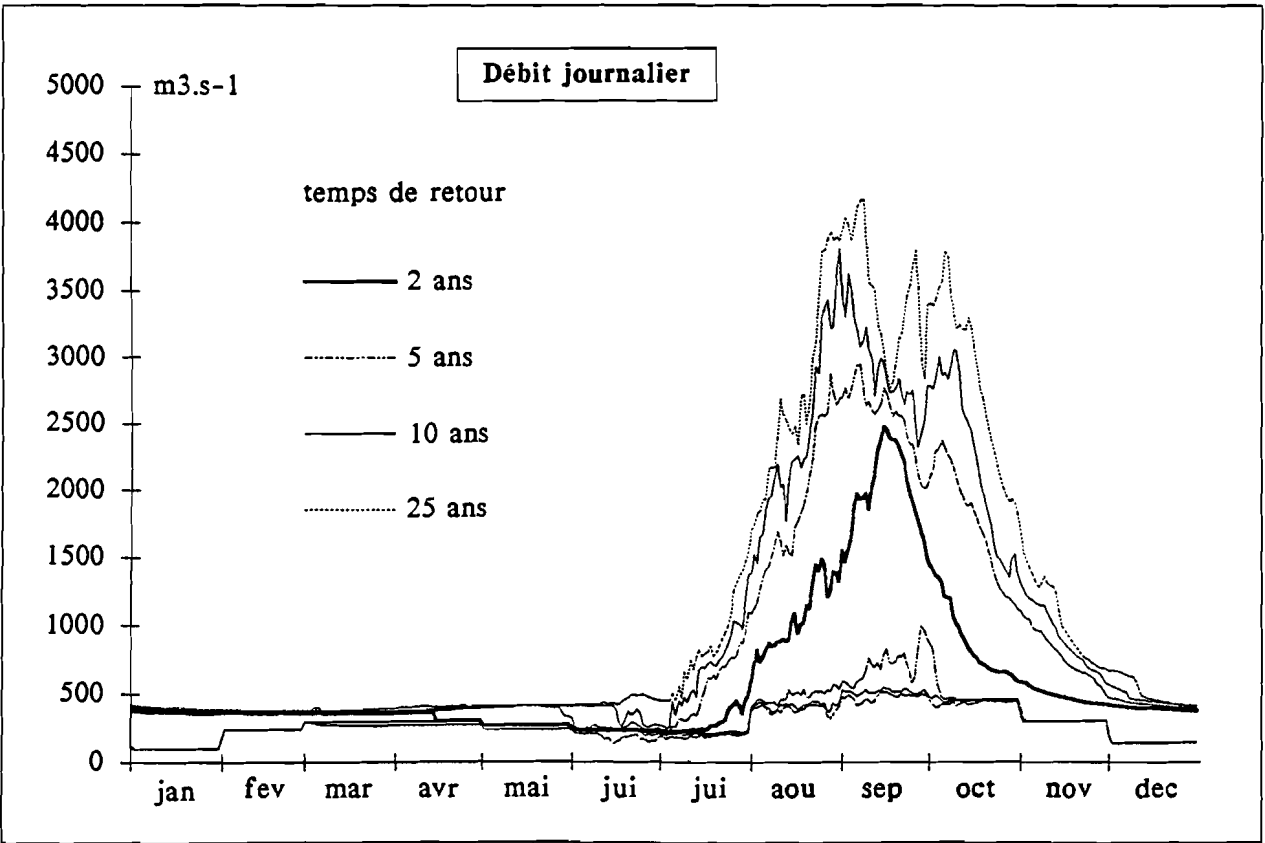
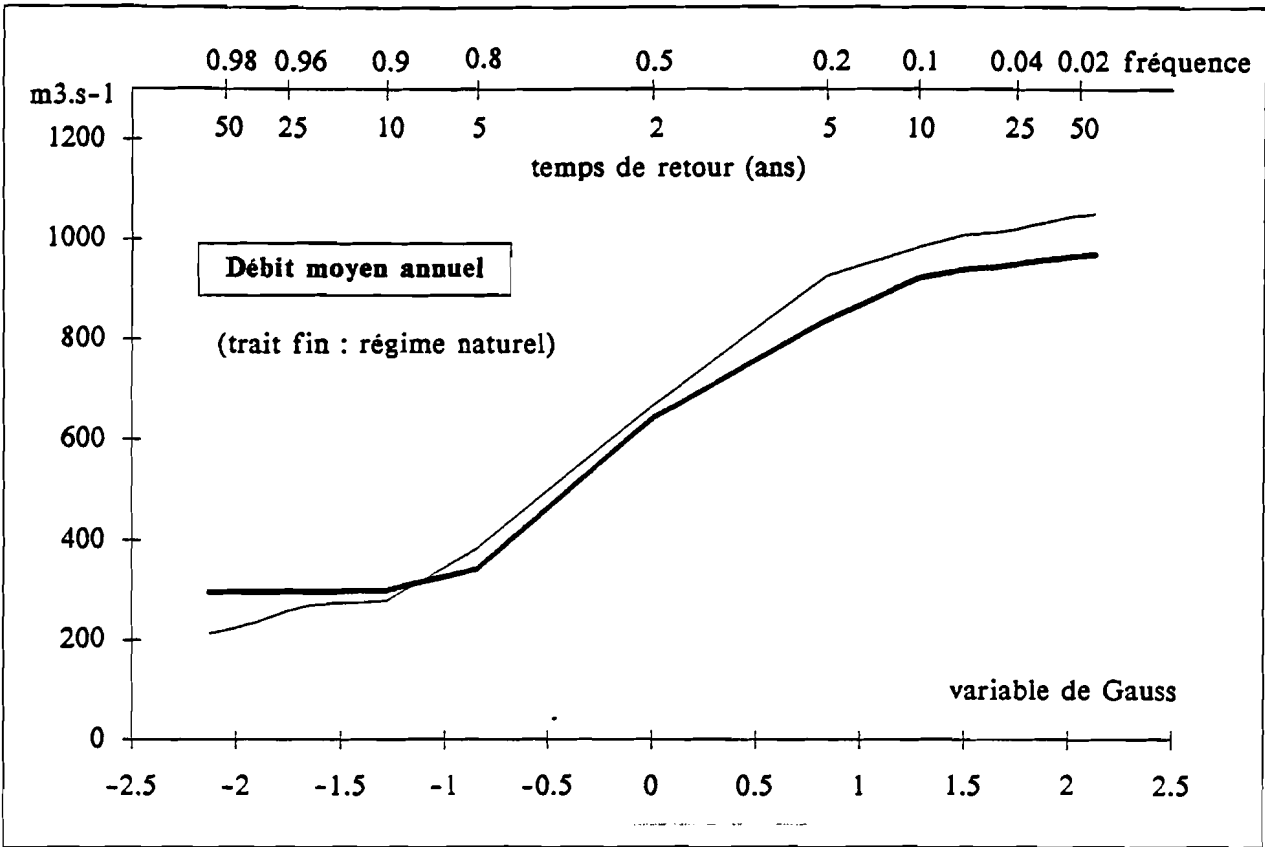
Simulation 13

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D21



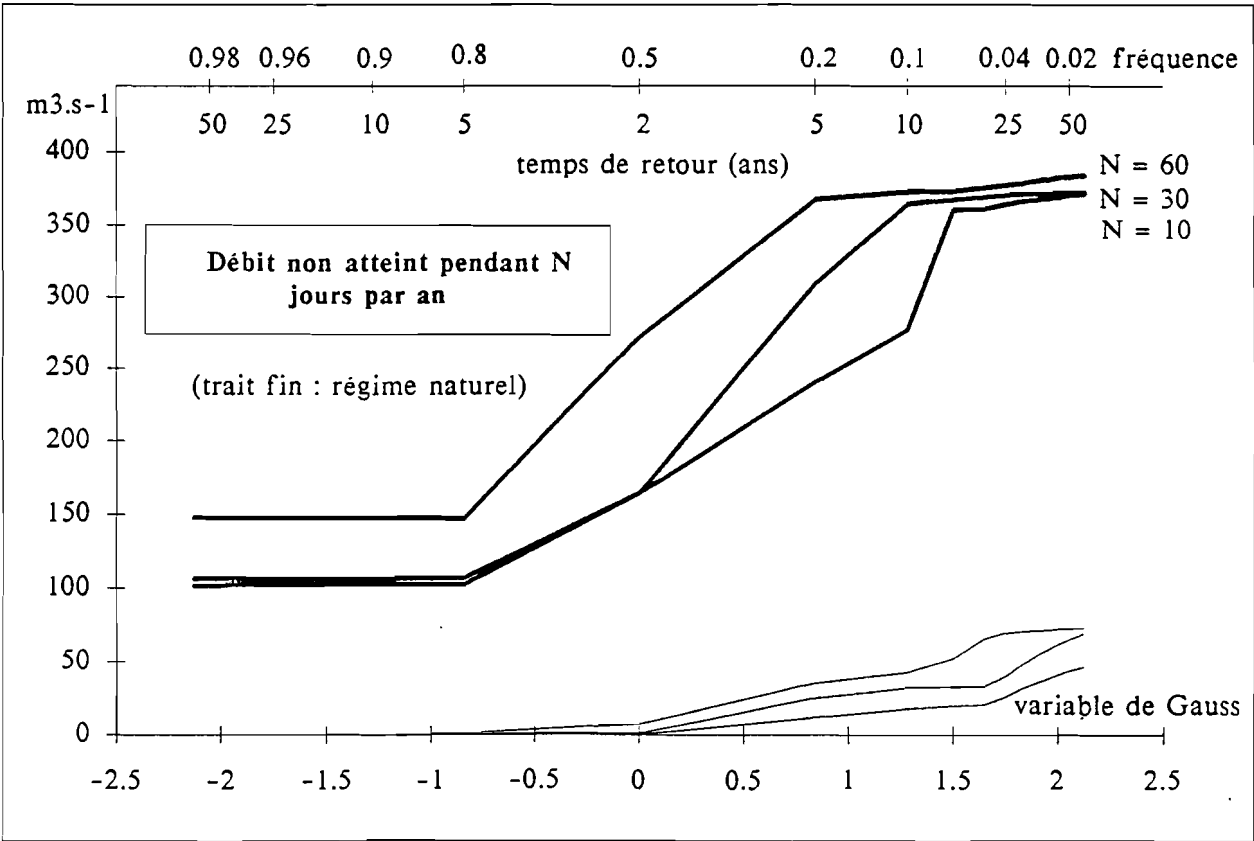
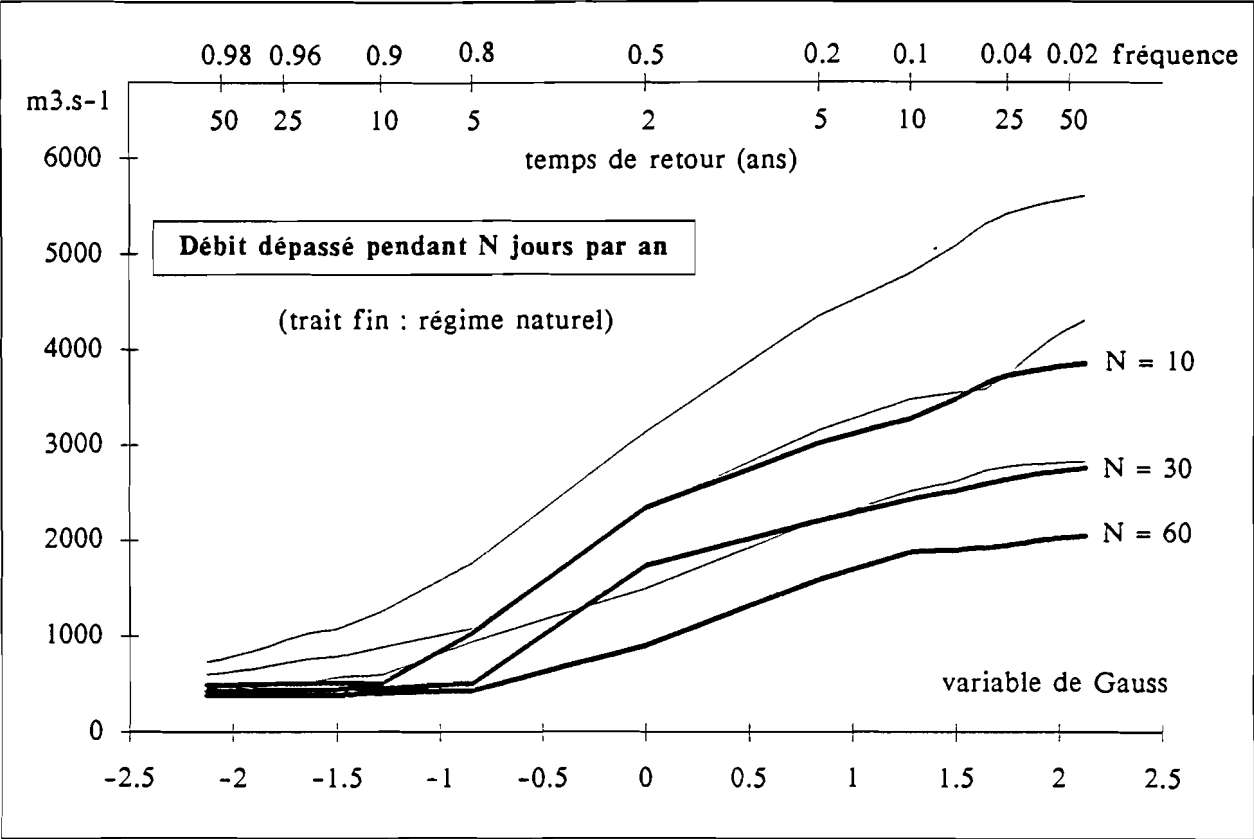
Simulation 14

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D21, E1



Simulation 14

Régime du Sénégal à Bakel pour les règles de gestion A, B, C2, D21, E1



BIBLIOGRAPHIE

- [1] ROCHETTE (C.), 1974 - Le bassin du fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques ORSTOM, Paris.
- [2] LAMAGAT (J.P.), 1989-1 - Prévision des débits de gestion des ouvrages communs de l'OMVS. Modèle de transformation des hauteurs en débits. OMVS, ORSTOM, Dakar.
- [3] BOIS (P.), 1980 - Hydrologie générale. Cours de l'ENSHG, Grenoble.
- [4] LAMAGAT (J.P.), 1989-2 - Modèle de propagation des crues du fleuve Sénégal. Calage des paramètres. OMVS, ORSTOM, Dakar.
- [5] SEGUIS (L.), 1991 - Notice d'utilisation du logiciel PROGESEN. OMVS, ORSTOM, Dakar.
- [6] BADER (J.C.), 1990 - Homogénéisation et complétement de la banque de données hydrométriques du bassin du Sénégal en amont de Bakel. OMVS, ORSTOM, Dakar.
- [7] BADER (J.C.), 1991 - SIMULSEN. Logiciel de simulation de gestion de la retenue de Manantali au pas de temps journalier. Notice d'utilisation. OMVS, ORSTOM, Dakar.
- [8] BADER (J.C.), 1992 (à paraître) - Consignes de gestion du barrage à vocation multiple de Manantali. Détermination des cotes limites à respecter dans la retenue. Hydrologie Continentale. ORSTOM, Paris.
- [9] GIBB (A.), ELECTRICITE DE FRANCE INTERNATIONAL. EUROCONSULT, 1987 - Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS, Volume 2A.
- [10] ALBERGEL (J.), LAMAGAT (J.P.), 1991 - Plan directeur de la haute vallée du Sénégal. Climatologie, hydrologie. Rapport final. ORSTOM, Dakar.

ANNEXE

On trouvera dans les pages qui suivent, une liste des jaugeages réalisés sur le Sénégal à Bakel, différents tableaux indiquant les valeurs retenues dans les calculs pour les caractéristiques de la retenue de Manantali et des organes du barrage, et enfin la configuration des paramètres caractérisant les stations hydrométriques dans les calculs effectués avec SIMULSEN.

Liste des mesures de débit effectuées sur le Sénégal à Bakel

	rang	date	DH	H	Q	Q0	K		rang	date	DH	H	Q	Q0	K
***	1	04/07/1950	0.0	153	86.0	86.0	0.0150		65	25/05/1955	-1.9	86	29.0	29.4	0.0150
	2	06/10/1950	-33.0	1017	2690	2944	0.0050		66	27/05/1955	0.4	84	29.3	29.2	0.0150
	3	15/10/1950	-2.6	1015	2900	2919	0.0050		67	28/05/1955	1.0	85	28.8	28.6	0.0150
	4	19/10/1950	-26.5	930	2340	2512	0.0050		68	12/09/1960	-20.3	812	2640	2804	0.0056
***	5	21/10/1950	-25.0	876	1800	1929	0.0052		69	10/03/1961	-2.4	110	37.3	38.0	0.0150
	6	23/10/1950	-30.0	815	1960	2149	0.0056		70	27/04/1961	-1.4	55	6.20	6.27	0.0150
	7	29/10/1950	-17.6	672	1580	1681	0.0066		71	10/06/1961	0.9	36	1.20	1.19	0.0150
	8	31/10/1950	-19.5	633	1350	1451	0.0069		72	13/08/1961	17.9	776	2580	2455	0.0059
*	9	31/10/1950	-19.5	633	1510	1623	0.0069		73	17/09/1961	-19.3	1204	6000	6312	0.0050
	10	04/11/1950	-18.1	555	1200	1290	0.0075		74	19/09/1961	-26.6	1160	5490	5896	0.0050
	11	04/11/1950	-18.1	555	1130	1215	0.0075		75	21/09/1961	-35.3	1089	4590	5058	0.0050
	12	08/11/1950	-11.3	497	1030	1079	0.0079		76	23/09/1961	-21.4	1034	4020	4254	0.0050
	13	08/11/1950	-11.3	497	963	1009	0.0079		77	02/11/1961	-2.1	388	564	569	0.0087
	14	29/11/1950	-4.9	339	480	492	0.0096		78	05/02/1962	-2.1	153	72.6	73.8	0.0150
	15	19/12/1950	-2.0	268	285	289	0.0128		79	27/03/1962	-1.4	36	1.06	1.07	0.0150
	16	25/04/1951	-1.4	53	7.08	7.16	0.0150		80	04/06/1968	-0.4	78	16.0	16.0	0.0150
	17	27/06/1951	-3.4	170	97.0	100	0.0150		81	30/07/1968	6.7	438	922	897	0.0083
	18	23/07/1951	-10.9	441	860	902	0.0083		82	09/08/1968	-30.9	527	1190	1362	0.0077
	19	23/07/1951	-10.9	441	753	790	0.0083		83	13/09/1968	26.0	830	2990	2798	0.0055
	20	10/08/1951	15.6	599	1980	1878	0.0071		84	18/09/1968	-9.5	887	3170	3249	0.0051
	21	17/08/1951	-12.4	628	1800	1883	0.0069		85	14/10/1968	-11.9	493	1020	1072	0.0079
	22	31/08/1951	-15.3	687	1660	1749	0.0065		86	29/11/1968	-4.8	240	223	231	0.0141
	23	08/09/1951	0.6	841	2830	2825	0.0054		87	16/07/1969	15.1	455	1060	1000	0.0082
	24	25/09/1951	-27.7	792	2080	2268	0.0057		88	21/07/1969	11.3	417	824	787	0.0085
	25	28/09/1951	-9.9	690	1710	1768	0.0065		89	24/07/1969	27.7	509	1280	1161	0.0078
	26	06/10/1951	38.1	1146	5600	5132	0.0050		90	28/07/1969	5.1	451	904	886	0.0082
	27	08/10/1951	-5.8	1158	5140	5216	0.0050		91	07/08/1969	-1.6	509	1190	1197	0.0078
	28	11/10/1951	-11.8	1122	4970	5123	0.0050		92	10/08/1969	34.9	519	1230	1092	0.0077
*	29	19/10/1951	-6.6	935	2700	2746	0.0050		93	12/08/1969	16.7	644	1920	1819	0.0068
	30	23/10/1951	-7.9	877	2440	2491	0.0051		94	14/08/1969	-16.5	599	1570	1672	0.0071
	31	31/10/1951	-15.0	880	2740	2851	0.0051		95	18/08/1969	7.3	553	1340	1305	0.0075
	32	12/11/1951	-29.6	689	1600	1780	0.0065		96	19/08/1969	50.3	579	1690	1446	0.0073
	33	21/11/1951	-15.6	511	987	1053	0.0078		97	21/08/1969	25.3	727	2400	2231	0.0062
	34	26/11/1951	-10.7	444	772	809	0.0083		98	23/08/1969	10.8	745	2400	2325	0.0061
	35	04/12/1951	-6.6	377	597	615	0.0088		99	25/08/1969	26.4	789	2670	2487	0.0058
	36	21/12/1951	-2.9	301	348	354	0.0113		100	27/08/1969	33.3	845	3140	2893	0.0054
*	37	24/01/1952	-1.5	224	143	145	0.0150		101	29/08/1969	14.2	914	3460	3343	0.0050
	38	20/02/1952	-1.9	177	118	120	0.0150		102	01/09/1969	-16.6	880	3120	3261	0.0051
	39	25/03/1952	0.0	112	47.7	47.7	0.0150		103	02/09/1969	-0.5	864	2960	2964	0.0052
	40	28/04/1952	-1.4	68	14.6	14.8	0.0150		104	04/09/1969	31.1	873	2890	2683	0.0052
	41	28/08/1952	-37.8	660	1530	1771	0.0067		105	05/09/1969	44.2	935	3370	3050	0.0050
	42	29/08/1952	-32.1	622	1440	1635	0.0070		106	06/09/1969	20.8	972	3710	3531	0.0050
	43	05/09/1952	10.9	540	1080	1038	0.0076		107	09/09/1969	16.2	986	3670	3530	0.0050
	44	15/09/1952	-5.7	885	3060	3105	0.0051		108	10/09/1969	9.6	990	3580	3497	0.0050
*	45	17/09/1952	-15.7	860	2940	3069	0.0052		109	12/09/1969	3.9	1009	3730	3694	0.0050
	46	28/09/1952	35.7	1022	3660	3371	0.0050		110	13/09/1969	0.6	981	3310	3305	0.0050
	47	21/10/1952	-29.8	855	2640	2876	0.0053		111	17/09/1969	-16.0	981	3310	3451	0.0050
	48	07/11/1952	-11.3	443	799	839	0.0083		112	19/09/1969	-17.6	938	2950	3089	0.0050
	49	15/11/1952	-4.8	363	493	504	0.0089		113	26/09/1969	-31.2	859	2410	2636	0.0053
	50	18/11/1953	-4.7	320	413	424	0.0104		114	28/09/1969	-9.9	811	2130	2192	0.0056
	51	19/11/1953	-2.7	316	379	385	0.0106	*	115	06/10/1969	-0.5	738	1840	1843	0.0062
	52	20/11/1953	-1.9	315	400	404	0.0107	*	116	08/10/1969	4.8	752	1970	1942	0.0060
	53	20/11/1953	-1.9	313	380	384	0.0108		117	21/10/1969	-0.6	668	1810	1814	0.0066
	54	07/09/1954	-7.1	1228	6440	6557	0.0050	*	118	24/10/1969	12.1	712	1830	1763	0.0064
	55	09/09/1954	-26.8	1198	5660	6082	0.0050	*	119	28/10/1969	21.9	751	2000	1879	0.0060
	56	11/09/1954	-37.3	1124	4680	5189	0.0050		120	01/11/1969	-29.4	773	2020	2221	0.0059
	57	12/09/1954	-33.0	1088	4290	4695	0.0050		121	05/11/1969	-29.1	631	1370	1533	0.0069
	58	14/09/1954	-20.9	1030	3710	3920	0.0050		122	07/11/1969	-23.1	579	1220	1338	0.0073
	59	16/09/1954	-17.1	1002	3450	3608	0.0050		123	11/11/1969	-13.5	509	952	1006	0.0078
	60	19/09/1954	-18.8	940	2840	2984	0.0050		124	14/11/1969	-17.0	470	819	882	0.0081
*	61	07/10/1954	-28.6	805	1810	1980	0.0057		125	20/11/1969	-8.6	405	637	662	0.0086
	62	08/10/1954	-34.7	780	1480	1658	0.0059		126	24/11/1969	-5.5	376	532	545	0.0088
	63	16/05/1955	-1.5	97	35.3	35.7	0.0150		127	27/11/1969	-6.9	356	492	508	0.0089
	64	18/05/1955	-0.4	94	35.0	35.1	0.0150		128	02/12/1969	-6.0	328	412	425	0.0101

H (cm) : cote à l'échelle

Q (m3.s-1) : débit mesuré

DH (cm.jour-1) : gradient limnimétrique

K : coefficient de correction de gradient

Q0 (m3.s-1) : débit du régime permanent théorique ($= Q/\text{racine}(1+K*Q)$)

* : mesure non retenue pour l'établissement des étalonnages

Liste des mesures de débit effectuées sur le Sénégal à Bakel

rang	date	DH	H	Q	Q0	K	rang	date	DH	H	Q	Q0	K
129	08/12/1969	-3.7	301	374	382	0.0113	193	11/12/1975	-2.2	204	177	180	0.0150
130	19/12/1969	-2.4	272	278	282	0.0127	194	15/01/1976	-1.9	144	70.0	71.0	0.0150
131	29/12/1969	-2.9	243	218	223	0.0140	195	17/01/1976	-0.6	142	68.7	69.0	0.0150
132	05/01/1970	-3.2	228	179	183	0.0147	196	17/03/1976	-0.6	84	14.0	14.1	0.0150
133	15/01/1970	-2.0	207	152	154	0.0150	197	08/05/1976	-0.5	41	430	432	0.0150
134	10/05/1973	-0.6	40	250	251	0.0150	198	07/08/1976	9.9	391	780	749	0.0087
135	05/06/1973	0.0	42	833	833	0.0150	199	12/08/1976	11.3	474	1140	1091	0.0081
136	15/12/1973	-1.1	152	64.8	65.3	0.0150	200	17/08/1976	36.6	585	1750	1556	0.0072
137	12/01/1974	-1.0	120	43.4	43.7	0.0150	201	19/08/1976	4.4	634	1960	1931	0.0069
138	13/02/1974	-0.5	93	19.1	19.2	0.0150	202	23/08/1976	3.0	829	2390	2371	0.0055
139	06/03/1974	-1.0	78	11.5	11.6	0.0150	203	06/09/1976	-13.6	482	1090	1155	0.0080
140	27/03/1974	-0.9	59	2.60	2.62	0.0150	204	10/09/1976	-2.5	453	1010	1021	0.0082
141	30/04/1974	-0.4	45	1.17	1.17	0.0150	205	14/09/1976	-0.1	427	910	910	0.0084
142	17/05/1974	-0.5	38	720	723	0.0150	206	22/10/1976	7.9	423	890	862	0.0084
143	30/05/1974	-0.9	28	126	127	0.0150	207	28/04/1977	-2.0	60	4.64	4.71	0.0150
144	16/06/1974	-0.5	20	000	000	0.0150	208	09/06/1977	0.0	44	1.40	1.40	0.0150
145	27/07/1974	15.4	515	1370	1295	0.0078	209	06/11/1977	-2.5	257	301	306	0.0134
146	13/08/1974	-25.0	599	1590	1754	0.0071	210	04/01/1978	-1.9	120	45.4	46.1	0.0150
147	14/08/1974	-22.2	574	1440	1574	0.0073	211	12/02/1978	-0.5	86	14.4	14.5	0.0150
148	16/08/1974	-12.7	541	1320	1388	0.0076	212	01/05/1978	0.0	38	678	678	0.0150
149	03/09/1974	-33.5	1061	4480	4910	0.0050	213	01/01/1979	-1.0	138	65.5	66.0	0.0150
* 150	07/09/1974	-22.7	953	?	?	0.0050	* 214	01/01/1979	-1.0	138	66.0	66.2	0.0050
151	09/09/1974	-3.9	953	3600	3636	0.0050	215	01/01/1979	-1.0	138	64.0	64.5	0.0150
152	12/09/1974	-34.5	876	2940	3241	0.0051	216	26/03/1979	-0.3	69.5	4.53	4.54	0.0150
153	14/09/1974	-18.9	823	2700	2853	0.0055	217	26/04/1979	-0.3	45	900	902	0.0150
154	18/09/1974	7.3	821	2850	2794	0.0055	218	08/06/1979	8.3	62	5.26	4.96	0.0150
155	22/09/1974	-17.2	842	3030	3181	0.0054	219	30/11/1979	-3.6	198	146	150	0.0150
156	24/09/1974	-33.5	777	2500	2788	0.0059	220	01/08/1980	25.3	411	961	872	0.0085
157	24/03/1975	-1.0	79	10.6	10.7	0.0150	221	01/08/1980	25.3	411	970	880	0.0085
158	03/05/1975	0.0	52	2.02	2.02	0.0150	222	02/08/1980	-42.4	433	1100	945	0.0084
159	05/06/1975	-0.4	36	390	391	0.0150	223	02/08/1980	-42.4	433	1100	945	0.0084
160	27/07/1975	72.7	459	1200	951	0.0082	224	03/08/1980	83.3	479	1340	1038	0.0080
161	30/07/1975	77.7	674	2470	2008	0.0066	225	04/08/1980	51.0	609	2010	1723	0.0071
* 162	02/08/1975	-12.2	709	2460	2562	0.0064	* 226	05/08/1980	-23.6	604	1850	2028	0.0071
163	11/08/1975	32.4	577	1790	1610	0.0073	227	07/08/1980	-33.7	514	1290	1502	0.0078
164	12/08/1975	4.1	602	1760	1735	0.0071	228	08/08/1980	-3.3	485	1200	1216	0.0080
165	16/08/1975	-3.5	581	1650	1671	0.0073	229	09/08/1980	18.2	500	1300	1216	0.0079
166	19/08/1975	-19.5	539	1370	1484	0.0076	230	10/08/1980	16.6	524	1450	1365	0.0077
167	21/08/1975	-22.8	494	1160	1281	0.0079	231	11/08/1980	28.1	534	1470	1334	0.0076
168	23/08/1975	-5.5	454	995	1018	0.0082	232	12/08/1980	39.2	576	1850	1631	0.0073
169	26/08/1975	15.6	510	1310	1237	0.0078	233	25/08/1980	17.2	55	4.04	3.60	0.0150
170	27/08/1975	4.3	521	1330	1308	0.0077	234	02/01/1981	-1.4	130	73.2	74.0	0.0150
171	29/08/1975	29.2	546	1500	1358	0.0075	235	16/01/1981	-1.0	118	45.5	45.8	0.0150
172	30/08/1975	49.4	572	1650	1413	0.0073	236	14/08/1981	-47.8	669	1930	2336	0.0066
173	31/08/1975	92.2	658	2360	1855	0.0067	237	16/08/1981	-18.2	589	1450	1556	0.0072
174	01/09/1975	103.6	753	3020	2370	0.0060	238	19/08/1981	35.9	656	2230	2001	0.0067
175	01/09/1975	103.6	775	3140	2476	0.0059	239	25/08/1981	-11.7	599	1520	1588	0.0071
176	02/09/1975	90.4	853	3780	3108	0.0053	240	28/08/1981	2.9	615	1780	1762	0.0070
177	03/09/1975	75.7	936	4470	3807	0.0050	241	01/09/1981	31.6	676	2290	2083	0.0066
178	04/09/1975	35.1	1004	4980	4593	0.0050	242	04/09/1981	4.9	699	2180	2146	0.0064
179	05/09/1975	-5.7	1016	4730	4799	0.0050	243	11/09/1981	16.0	623	1970	1869	0.0070
180	06/09/1975	-9.0	993	4560	4666	0.0050	244	14/09/1981	-6.9	622	1720	1763	0.0070
181	08/09/1975	1.0	1006	4670	4658	0.0050	245	15/09/1981	-12.9	616	1520	1594	0.0070
182	10/09/1975	-23.8	976	4080	4347	0.0050	246	18/09/1981	0.8	586	1560	1556	0.0072
183	11/09/1975	-26.6	946	3860	4146	0.0050	247	20/09/1981	2.4	583	1480	1467	0.0073
184	13/09/1975	-33.4	889	3400	3728	0.0050	248	23/09/1981	-8.9	586	1520	1571	0.0072
185	14/09/1975	-32.8	856	3080	3387	0.0053	249	25/09/1981	-11.7	562	1510	1580	0.0074
186	16/09/1975	-20.3	792	2660	2830	0.0057	250	30/10/1981	-3.1	286	335	341	0.0120
187	11/10/1975	-15.5	538	1300	1384	0.0076	251	28/11/1981	-1.7	182	123	125	0.0150
188	13/10/1975	-18.5	503	1120	1211	0.0078	252	29/01/1982	-1.4	101	38.5	38.9	0.0150
189	14/10/1975	-16.0	485	1060	1135	0.0080	253	03/03/1982	-1.5	72	9.15	9.25	0.0150
190	08/11/1975	-5.0	321	473	486	0.0104	254	27/03/1982	-0.2	50	2.37	2.37	0.0150
191	10/11/1975	-6.0	310	444	459	0.0109	255	25/07/1982	5.4	274	370	358	0.0126
192	09/12/1975	-2.0	208	181	184	0.0150	256	27/07/1982	5.0	284	372	361	0.0121

H (cm) : cote à l'échelle

Q (m3.s-1) : débit mesuré

DH (cm.jour-1) : gradient limnimétrique

K : coefficient de correction de gradient

Q0 (m3.s-1) : débit du régime permanent théorique (= Q/racine(1+K*Q))

* : mesure non retenue pour l'établissement des étalonnages

Liste des mesures de débit effectuées sur le Sénégal à Bakel

rang	date	DH	H	Q	Q0	K	rang	date	DH	H	Q	Q0	K
257	29/07/1982	21.1	315	496	448	0.0107	321	28/08/1986	17.2	472	1100	1031	0.0091
* 258	31/07/1982	-26.4	306	428	511	0.0113	322	31/08/1986	12.6	502	1230	1173	0.0099
259	05/08/1982	11.7	375	685	652	0.0088	323	03/09/1986	41.9	537	1370	1193	0.0096
260	12/08/1982	17.3	399	813	759	0.0086	324	04/09/1986	63.2	609	2160	1796	0.0091
261	14/08/1982	57.2	491	1430	1186	0.0079	325	06/09/1986	43.0	662	2380	2097	0.0087
262	15/08/1982	31.9	525	1590	1425	0.0077	326	07/09/1986	32.8	751	2560	2339	0.0080
263	18/08/1982	-24.7	517	1250	1390	0.0077	327	10/09/1986	-25.2	760	2440	2648	0.0080
264	19/08/1982	-26.6	485	1110	1251	0.0080	328	12/09/1986	-14.7	702	1970	2070	0.0084
265	21/08/1982	-1.1	443	945	949	0.0083	329	17/09/1986	-37.7	642	1580	1834	0.0088
266	23/08/1982	51.5	484	1230	1035	0.0080	330	18/09/1986	-25.9	604	1430	1583	0.0071
267	24/08/1982	79.1	546	1640	1298	0.0075	331	22/09/1986	-3.6	559	1360	1379	0.0074
268	26/08/1982	-8.4	644	2090	2153	0.0068	332	23/09/1986	-4.7	416	815	832	0.0085
269	29/08/1982	18.0	667	2410	2277	0.0067	333	25/09/1986	-8.3	129	67.0	71.6	0.0150
270	30/08/1982	15.0	679	2330	2223	0.0066	* 334	16/07/1987	-0.1	169	150	150	0.0150
271	31/08/1982	1.2	693	2370	2361	0.0065	335	19/07/1987	12.9	197	210	192	0.0150
272	02/09/1982	-12.0	670	2220	2314	0.0066	336	19/08/1987	64.7	372	775	619	0.0088
273	05/09/1982	-18.9	676	2030	2170	0.0066	337	21/08/1987	2.7	414	885	875	0.0085
* 274	07/09/1982	-29.1	578	1640	1848	0.0073	338	23/08/1987	45.9	463	1200	1024	0.0081
275	10/09/1982	-10.7	547	1400	1460	0.0075	339	23/08/1987	45.9	496	1330	1139	0.0079
276	18/08/1983	-1.8	376	719	725	0.0088	340	27/08/1987	-37.6	368	610	746	0.0088
277	20/08/1983	42.8	413	796	681	0.0085	341	29/08/1987	-9.9	315	460	486	0.0107
278	22/08/1983	10.2	493	1120	1077	0.0079	342	12/09/1987	-9.1	428	820	853	0.0084
279	31/08/1983	-6.0	397	714	733	0.0086	343	23/09/1987	7.6	416	815	790	0.0085
280	05/10/1983	1.0	379	650	647	0.0087	344	25/11/1987	-3.7	129	67.0	68.9	0.0150
281	09/10/1983	-12.6	349	575	611	0.0091							
282	11/10/1983	-4.5	336	544	556	0.0097							
283	15/10/1983	-6.6	310	432	448	0.0109							
284	18/10/1983	-9.0	285	391	414	0.0121							
285	22/10/1983	-6.0	254	280	292	0.0135							
* 286	27/10/1983	-3.5	291	225	230	0.0120							
287	27/11/1983	-3.2	153	83.8	85.9	0.0150							
288	30/07/1984	11.4	397	756	721	0.0086							
289	08/08/1984	6.7	417	755	734	0.0085							
290	13/08/1984	6.2	393	688	670	0.0086							
291	15/08/1984	-6.4	433	850	874	0.0084							
292	20/08/1984	1.0	409	760	757	0.0085							
293	15/09/1984	-19.8	372	622	684	0.0088							
294	17/09/1984	-6.0	347	542	558	0.0092							
295	26/09/1984	-9.4	332	500	525	0.0099							
296	28/09/1984	-6.6	309	450	467	0.0110							
297	10/10/1984	11.9	415	870	829	0.0085							
298	21/07/1985	-12.1	359	659	698	0.0089							
299	25/07/1985	36.8	400	870	758	0.0086							
300	27/07/1985	-6.2	439	940	965	0.0083							
301	01/08/1985	25.3	479	1190	1085	0.0080							
302	12/08/1985	27.1	522	1310	1191	0.0077							
303	15/08/1985	24.2	557	1590	1463	0.0075							
304	13/09/1985	-13.3	679	2140	2240	0.0066							
305	16/09/1985	-15.7	650	1840	1946	0.0068							
306	18/09/1985	-15.4	612	1640	1737	0.0071							
307	21/09/1985	-19.1	573	1470	1585	0.0073							
308	23/09/1985	-20.4	530	1280	1393	0.0077							
309	25/09/1985	-16.8	490	1110	1192	0.0079							
310	29/09/1985	-7.6	462	1030	1063	0.0081							
311	02/10/1985	-8.6	441	900	934	0.0083							
312	16/07/1986	0.6	245	290	289	0.0139							
313	19/07/1986	24.0	272	380	333	0.0127							
314	20/07/1986	19.2	299	500	453	0.0114							
315	21/07/1986	3.5	314	470	461	0.0107							
316	26/07/1986	11.8	344	620	588	0.0093							
317	28/07/1986	-13.9	327	490	529	0.0101							
318	02/08/1986	-2.7	358	605	612	0.0089							
319	26/08/1986	21.6	418	850	782	0.0085							
320	27/08/1986	28.0	445	1000	901	0.0083							

H (cm) : cote à l'échelle

Q (m3.s-1) : débit mesuré

DH (cm.jour-1) : gradient limnimétrique

K : coefficient de correction de gradient

Q0 (m3.s-1) : débit du régime permanent théorique (= Q/racine(1+K*Q))

* : mesure non retenue pour l'établissement des étalonnages

le 8-10-1992 a 18h31mn42'39''

COURBES DE REMPLISSAGE DE LA RETENUE:

Cote (m)	150.00	170.00	175.00	180.00	187.50	200.00	208.00	213.00	220.00
volume (Mm3)	0	750	1400	2150	3700	7700	11270	14350	17650

Cote (m)	150.00	170.00	175.00	180.00	187.50	200.00	208.00	213.00	220.00
Superficie (km2)	0	80	140	240	280	410	477	535	605

EVACUATION MAXIMALE PAR DEVERSOIR ET VIDANGE DE FOND:

Cote amont (m)	150.00	155.28	165.00	175.00	187.00	202.00	208.00	211.17
Debit (m3.s-1)	0	0	1120	1890	2551	3180	6197	7622

EVACUATION MINIMALE PAR DEVERSOIR:

Cote amont (m)	150.00	208.05	208.50	209.00	209.50	210.00	210.50	211.00	211.50
Debit (m3.s-1)	0	0	240	543	885	1267	1690	2155	3664

LOI HAUTEUR-DEBIT EN AVAL DU BARRAGE:

cote (m)	153.70	155.50	157.00	158.20	159.00	159.70	160.20	160.50	161.00	161.50	162.00
debit (m3.s-1)	0	555	1100	1665	2070	2500	2800	3110	3645	4325	4480

DEBIT MAXIMAL TURBINE PAR GROUPE:

Chute (m)	11.30	26.00	28.00	30.00	32.00	34.00	36.00	38.00	40.00
Debit (m3.s-1)	0	95	97	101	104	108	111	112	113

COTE MAXIMALE ADMISE DANS LA RETENUE (m): 210.50

NOMBRE DE GROUPES EQUIPANT L'USINE: 5

PUISSANCE MINIMALE (DEGROCHEMENT) DEVELOPPEE PAR GROUPE (Mw): 20.00

PUISSANCE MAXIMALE (NOMINALE) DEVELOPPEE PAR GROUPE (Mw): 40.00

EVAPORATION NETTE (mm) MENSUELLE:

mois	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nove	dece
Evaporation	156	184	234	234	204	98	-92	-181	-60	48	96	99

RENDEMENT (%) D'UNE TURBINE, FONCTION DE LA CHARGE (m) ET DU DEBIT (m3.s-1):

Charge-->	26.00	28.00	30.00	32.00	34.00	36.00	38.00	40.00	45.00	50.00
debit										
{										
v										
100.00	83.00	84.00	85.00	86.00	87.00	88.00	89.00	90.00	90.00	90.00

le 8-10-1992 a 18H32mn8'98''

Parametres de la station hydrometrique de rang 1 :

numero : 1400026
Nom : Makana
Station influencee par la retenue : NON
Donnees connues pour les calculs : OUI
Coefficient de tarissement : non defini
Debits NON PREVISIBLES a partir de Station(s) de l'amont

Parametres de la station hydrometrique de rang 2 :

numero : 1400023
Nom : Entree Manantal
Station influencee par la retenue : NON
Donnees connues pour les calculs : NON
Coefficient de tarissement : 0.02520
Debits previsibles par modele type : "LAMAGAT"
Numero de la station preveiseur : 1400026

debit amont (m3.s-1) : 100.0 500.0 625.0 750.0 1000.0
debit aval (m3.s-1) : 129.0 678.0 758.0 824.0 1062.0
temps de propagation (jour): 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0

Parametres de la station hydrometrique de rang 3 :

numero : 1400021
Nom : Sortie Manant.
Station influencee par la retenue : OUI
Donnees connues pour les calculs : NON
Coefficient de tarissement : non defini
Debits NON PREVISIBLES a partir de Station(s) de l'amont

Parametres de la station hydrometrique de rang 4 :

numero : 1100006
Nom : Gourbassy
Station influencee par la retenue : NON
Donnees connues pour les calculs : OUI
Coefficient de tarissement : non defini
Debits NON PREVISIBLES a partir de Station(s) de l'amont

Parametres de la station hydrometrique de rang 5 :

numero : 1000046
Nom : Ouاليا
Station influencee par la retenue : NON
Donnees connues pour les calculs : OUI
Coefficient de tarissement : non defini
Debits NON PREVISIBLES a partir de Station(s) de l'amont

Parametres de la station hydrometrique de rang 6 :

numero : 1000023
Nom : Kayes
Station influencee par la retenue : OUI
Donnees connues pour les calculs : NON
Coefficient de tarissement : non defini
Debits previsibles par modele type : "LAMAGAT"
Numeros des deux stations preveiseurs: 1000046 et 1400021
Decalage de temps entre preveiseurs : 0
Coeff multiplicateur du preveiseur 2 : 1.00

debit amont (m3.s-1) : 10.0 17.0 29.0 50.0 59.0 69.0 80.0
debit aval (m3.s-1) : 10.0 19.0 31.0 51.0 58.0 64.0 78.0
temps de propagation (jour): 4.0 5.5 8.5 7.5 7.0 5.0 3.5

debit amont (m3.s-1) : 100.0 134.0 145.0 172.0 205.0 227.0 244.0 285.0
debit aval (m3.s-1) : 99.0 125.0 135.0 166.0 188.0 210.0 222.0 263.0
temps de propagation (jour): 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5

debit amont (m ³ .s-1)	:	301.0	381.0	405.0	425.0	444.0	523.0	563.0	621.0
debit aval (m ³ .s-1)	:	277.0	353.0	380.0	399.0	430.0	521.0	554.0	595.0
temps de propagation (jour):	:	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
debit amont (m ³ .s-1)	:	664.0	685.0	1000.0	2000.0	2500.0	3000.0	3500.0	
debit aval (m ³ .s-1)	:	649.0	681.0	1040.0	2207.0	2710.0	3365.0	3955.0	
temps de propagation (jour):	:	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	

Parametres de la station hydrometrique de rang 7 :

numero	:	1000003
Nom	:	Bakel
Station influencee par la retenue	:	OUI
Donnees connues pour les calculs	:	NON
Coefficient de tarissement	:	non defini
Debits previsibles par modele type	:	"LAMAGAT"
Numeros des deux stations prevoiseurs:	:	1000023 et 1100006
Decalage de temps entre prevoiseurs	:	0
Coeff multiplicateur du prevoiseur 2	:	1.00

debit amont (m ³ .s-1)	:	0.0	125.0	250.0	375.0	500.0	750.0	1000.0
debit aval (m ³ .s-1)	:	0.0	137.0	275.0	402.0	521.0	765.0	1034.0
temps de propagation (jour):	:	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
debit amont (m ³ .s-1)	:	1250.0	1500.0	1750.0	2000.0	2500.0	3000.0	3500.0
debit aval (m ³ .s-1)	:	1320.0	1598.0	1869.0	2136.0	2652.0	3158.0	3752.0
temps de propagation (jour):	:	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0
debit amont (m ³ .s-1)	:	4500.0	5000.0	5500.0	6000.0			
debit aval (m ³ .s-1)	:	5006.0	5611.0	6077.0	6515.0			
temps de propagation (jour):	:	2.0	2.0	2.0	2.0			