

# **Modélisation numérique visant à évaluer certains bénéfices et impacts du futur barrage de Sambangalou sur le fleuve Gambie**

**Production d'énergie, modification du régime d'écoulement à l'amont de  
Gouloumbo, modification de la salinité de l'estuaire à l'aval de Gouloumbo**

**Jean-Claude Bader**

**IRD, Montpellier, le 23/05/2003**



## **Table des matières**

Résumé .....	5
1 Objectifs.....	8
2 Données de base .....	8
2-1 Caractéristiques physiques de l'ouvrage .....	8
2-2 Ressource en eau sur le haut bassin de la Gambie.....	10
2-2-1 Préparation d'une banque de données opérationnelles au pas de temps journalier sur la période 1970-2001.....	10
2-2-2 Consistance de la banque opérationnelle sur la période 1970-2001.....	11
2-2-3 Extension des débits de Sambangalou sur la période 1954-1969 .....	11
2-2-4 Caractéristiques du régime naturel d'écoulement.....	11
2-3 Données relatives à la salinité des eaux dans l'estuaire .....	12
3 Description des modèles utilisés .....	13
3-1 Modèle de propagation de débit entre Sambangalou, Simenti et Gouloumbo.....	13
3-2 Modèle de simulation de gestion : SIMULGAM .....	15
3-2-1 Consignes de gestion.....	15
3-2-2 Principe du calcul du débit lâché du barrage et de la puissance électrique produite .....	16
3-2-3 Données en entrée et valeurs produites en sortie du calcul.....	16
3-2-4 Calcul des cotes limites à respecter dans le lac .....	17
3-2-5 Evaluation des résultats .....	17
3-3 Modèle de déplacement du front salé : SALNSTAT .....	17
4 Simulations réalisées.....	19
4.1 Scénario A : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 77 mw et une consigne permanente de "gestion haute".....	19
4.1.1 Consignes simulées .....	19
4.1.2 Production d'énergie.....	19
4.1.3 Débits, niveau du plan d'eau, superficie du plan d'eau.....	19
4.1.4 Salinité des eaux de l'estuaire.....	20
4.1.5 Régularisation du régime.....	20
4-1-6 Influence de l'hydraulicité .....	21
4.2 Scénario B : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 128,3 mw et une consigne de "gestion haute" limitée au mois d'août .....	21
4.2.1 Consignes simulées .....	21
4.2.2 Production d'énergie.....	22
4.2.3 Débits, niveau du plan d'eau, superficie du plan d'eau.....	22
4.2.4 Salinité des eaux de l'estuaire.....	22
4.2.5 Régularisation du régime.....	22
4-2-6 Influence de l'hydraulicité .....	23

4.3 Scénario C : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 128,3 mw, une consigne de "gestion haute" limitée au mois d'août et l'arrêt de turbinage en fin d'étiage .....	23
4.3.1 Consignes simulées .....	23
4.3.2 Résultats .....	24
4.4 Modifications de salinité de l'estuaire induites par un rehaussement éventuel du niveau de l'océan. ....	24
Annexe A : Extraits de l'annexe 1 (spécifications techniques) du contrat de juin 2002 passé entre Coyne et Bellier et l'IRD.....	38
Annexe B : Elaboration de la banque de données hydrométriques journalières opérationnelle.....	40
Annexe C : Evaluation du modèle de propagation de débit entre Sambangalou et Gouloumbo.....	50
Annexe D : logiciel SALNSTAT. Valeurs des paramètres et test du modèle concernant le déplacement du front salé à 1 g/l. Liste de publications.....	54
Annexe E : Détail de résultats concernant les simulations de gestion du scénario A.....	56
Annexe F : Détail de résultats concernant les simulations de gestion du scénario B.....	68
Annexe G : Détail de résultats concernant les scénarios C1 à C4 (arrêt de turbinage en fin d'étiage), et concernant l'impact d'un rehaussement du niveau de l'océan.....	80

## Résumé

Les caractéristiques physiques du futur barrage sont rappelées (essentiellement : cote de déversement = 200 m ; puissance installée = 77 mw (scénario A) ou 128,3 (scénario B)), au vu des éléments disponibles en mai 2003. Certaines fonctions caractéristiques (par exemple : débit maximal turbinable en fonction de la chute), nécessaires au logiciel SIMULGAM de simulation de l'IRD, sont élaborées à partir des paramètres communiqués par Coyne et Bellier.

Une banque de données de débits journalier homogène et complète est élaborée sur la période 1954-2001.

- Sur la période 1970-2001, elle concerne dix stations du haut bassin situées à Gouloumbo et à l'amont, pour lesquelles sont détaillées les différentes opérations de reconstitution de données manquantes. Avec 99% de données observées sur cette période, la station de Kédougou, très proche du site de Sambangalou, offre la série la plus complète. Au moins pour les stations situées sur le cours principal du fleuve, les fortes corrélations observées entre stations montrent la bonne qualité générale des données.
- Les débits journaliers de Sambangalou, calculés en fonction des débits de Kédougou sur la période 1970-2001, sont étendus sur la période 1954-2001 à partir de quelques données disponibles pour Gouloumbo, et surtout à partir des débits observés à Goubassy sur la rivière Falémé, dont le bassin jouxte celui du fleuve Gambie.

Le régime naturel d'écoulement du fleuve Gambie est caractérisé par une crue annuelle s'étalant de juillet à octobre. Par rapport à la période 1954-1969 où il s'élève à 144,2 m<sup>3</sup>/s, le module interannuel de débit de la Gambie à Sambangalou chute de moitié sur la période 1970-2001, où il s'élève à 71,6 m<sup>3</sup>/s. Cette diminution d'hydraulicité est conforme aux valeurs observées par ailleurs dans la région, par exemple sur le bassin du fleuve Sénégal.

En régime naturel, la salinité des eaux de l'estuaire est caractérisée par un cycle annuel de salinisation progressive en période d'étiage et de désalinisation assez rapide pendant la crue. En moyenne la concentration 1g/l remonte jusqu'à environ 250 km à l'amont de l'embouchure vers fin juin et ne se situe plus qu'à environ 100 km vers fin août. Un modèle statistique simple est élaboré pour représenter la position moyenne du front salé à 1g/l en fonction de la date.

Un modèle de propagation de débit est calé entre Sambangalou et les stations de Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, avec des temps de propagation respectifs de 0, 1, 3, 4 et 6 jours. Ce modèle qui peut être utilisé en temps réel en régime naturel ou artificiel, permet de calculer le débit à chacune de ces cinq stations à partir du débit lâché à Sambangalou, du débit naturel à Sambangalou et d'un débit intermédiaire lui-même évalué à partir de données observées sur certains affluents. Ces débits intermédiaires, calculés directement à partir de la banque de données opérationnelle sur la période 1970-2001, sont reconstitués sur la période 1954-1969 à partir d'une relation établie avec les débits de Sambangalou.

Le logiciel SIMULGAM permet de simuler au pas de temps journalier la gestion en temps réel du futur ouvrage de Sambangalou, sur la base de la banque opérationnelle de débits du haut bassin de la Gambie. En fonction des règles de gestion envisagées, il donne les débits lâchés, les débits résultants à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, la production d'électricité et l'évolution du niveau dans le lac de barrage. Une description rapide du logiciel est effectuée.

Le modèle SALNSTAT permet de décrire l'évolution de la concentration saline moyenne de n'importe quelle section en travers de l'estuaire de la Gambie, en fonction de la chronique des apports d'eau douce connus à Gouloumbo. Le calage du modèle en régime naturel est effectué à partir des données disponibles concernant la position du front salé de concentration 1 g/l. La position des fronts salés à 1 g/l et 5 g/l est modélisée pour le régime naturel à partir des débits de Sambangalou, à l'aide d'une chaîne SIMULGAM-SALNSTAT. Ces résultats décrivent une situation de référence à laquelle peuvent être comparés les résultats relatifs au régime artificiel.

Deux scénarios de gestion (A et B) sont simulés, caractérisés de la façon suivante:

### Scénario A :

- Si la cote de la retenue se situe entre 188 et 196 m, turbiner le débit nécessaire pour produire une puissance égale à une valeur  $P_{obj}$ . Cet objectif de puissance est déterminé par simulations successives de façon à correspondre à la puissance moyenne mensuelle garantie à 95 %.
- Si la cote de la retenue se situe au dessus de 196 m, utiliser les turbines à leur pleine capacité (puissance installée = 77 mw)

#### **Scénario B :**

- Si la cote de la retenue se situe entre 188 et 196 m, turbiner le débit nécessaire pour produire une puissance égale à une valeur  $P_{obj}$ . Cet objectif de puissance est déterminé par simulations successives de façon à correspondre à la puissance moyenne mensuelle garanti à 95 %.
- Au mois d'août, si la cote de la retenue se situe au dessus de 196 m, utiliser les turbines à leur pleine capacité ( puissance installée = 128,3 mw )
- Si la cote de la retenue se situe au dessus de 200 m (débordement), utiliser les turbines à leur pleine capacité.

#### **Principaux résultats du scénario A sur la période 1954-2001 :**

- Production annuelle d'énergie : minimum = 162 gwh ; moyenne = 378 gwh ; maximum = 508 gwh ; garantie (95 mois sur 100) = 242gwh.
- Les mois de mai à juillet sont ceux où le risque de production d'une puissance inférieure à la puissance garantie est le plus élevé. Quelques interruptions prolongées de production d'énergie peuvent se produire : 4 mois d'affilée en 1984 et 5 mois et demi en 1985.
- En moyenne, le turbinage représente 80% des volumes lâchés du barrage, le reste étant déversé (18%) quand le niveau du plan d'eau dépasse la cote 200, ou vidangé (2%) pour éviter le dépassement de la cote maximale admissible. Le surplus de pertes par évaporation causé par l'existence du plan d'eau représente 10% des volumes lâchés.
- Le niveau du plan d'eau (minimum 186,83 m ; moyenne 194,67 m ; maximum 202,20 m) suit une variation cyclique annuelle avec un minimum situé en juin ou juillet, et un maximum situé en septembre ou octobre.
- La plupart du temps, la régularisation du régime entraînée par la gestion du barrage bloque la remontée de la salinité vers l'amont de l'estuaire: PK 160 au lieu de 250 en régime naturel pour la concentration 1 g/l ; PK 145 au lieu de 200 pour la concentration 5g/l. Par contre, la migration maximale de la salinité vers l'aval pendant la crue n'est quasiment pas modifiée par rapport au régime naturel.
- Les pointes de crue journalières faibles et moyennes sont fortement laminées à l'aval du barrage. Ainsi à Simenti, Wassadou et Gouloumbo, la crue médiane chute d'environ 40% en régime régularisé, correspondant alors à peu près à la décennale sèche du régime naturel.
- Par rapport au régime naturel, la régularisation du régime se traduit par un renforcement relatif des débits mensuels d'étiage, croissant de novembre à juin, et par un très net abaissement relatif de août à octobre. En cote, ceci se traduit selon les stations par une augmentation du niveau médian d'étiage de mai allant de 1,05 m à 1,93 m, et par une diminution du niveau médian de crue de septembre allant de 1,06 m à 2,59 m.

#### **Principaux résultats du scénario B sur la période 1954-2001 :**

- Production annuelle d'énergie : minimum = 134 gwh ; moyenne = 400 gwh ; maximum = 581 gwh ; garantie (95 mois sur 100) = 301 gwh.
- Les mois de avril à juillet sont ceux où le risque de production d'une puissance inférieure à la puissance garantie est le plus élevé. Quelques interruptions prolongées de production d'énergie peuvent se produire entre 1984 et 1994, allant jusqu'à 4 mois d'affilée en 1984 et 7 mois d'affilée en 1985.

- En moyenne, le turbinage représente 84,5% des volumes lâchés du barrage, le reste étant déversé (14,1%) quand le niveau du plan d'eau dépasse la cote 200, ou vidangé (1,3%) pour éviter le dépassement de la cote maximale admissible. Le surplus de pertes par évaporation causé par l'existence du plan d'eau représente 10,9 % des volumes lâchés.
- Le niveau du plan d'eau (minimum 186,73 m ; moyenne 196,19 m ; maximum 202,20 m) suit une variation cyclique annuelle avec un minimum situé en juin ou juillet, et un maximum situé en septembre ou octobre.
- La plupart du temps, la régularisation du régime entraînée par la gestion du barrage bloque la remontée de la salinité vers l'amont de l'estuaire: PK 155 au lieu de 250 en régime naturel pour la concentration 1 g/l ; PK 140 au lieu de 200 pour la concentration 5g/l. Toutefois, les arrêts de turbinage entraînés par l'abaissement excessif du plan d'eau en période de faible hydraulité, permettent à la concentration 1g/l de remonter jusqu'au PK 200 une année sur dix. La migration maximale de la salinité vers l'aval pendant la crue n'est quasiment pas modifiée par rapport au régime naturel.
- Les pointes de crue journalières faibles et moyennes sont fortement laminées à l'aval du barrage. Ainsi à Simenti, Wassadou et Gouloumbo, la crue médiane chute d'environ 40% en régime régularisé, correspondant alors à peu près à la décennale sèche du régime naturel. Par contre, les plus fortes pointes de crue journalières sont peu modifiées : diminution de 5% de la décennale humide aux trois stations citées ci-dessus.
- Par rapport au régime naturel, la régularisation du régime se traduit par un renforcement relatif des débits mensuels d'étiage, croissant de décembre à juin, et par un très net abaissement relatif de août à octobre. En cote, ceci se traduit selon les stations par une augmentation du niveau médian d'étiage de mai allant de 1,16 m à 2,13 m, et par une diminution du niveau médian de crue de septembre allant de 1,17 m à 2,66 m.

L'effet d'une suspension systématique du turbinage sur une durée de 15 jours à 2 mois avant le 1<sup>er</sup> juillet est testé par simulation des quatre scénarios C1 à C4, qui reproduisent en dehors de cette période la même consigne de gestion que le scénario B. Même en suspendant le turbinage pendant 2 mois (scénario C4), la production moyenne d'énergie par année ne diminue que d'environ 2 % par rapport au scénario B. Par contre le niveau de garantie de la puissance Pobj demandée (34,30 mw) est presque divisé par quatre. L'effet de la suspension de turbinage se fait nettement sentir au niveau de la remontée de la salinité vers l'amont de l'estuaire. Toujours avec deux mois de suspension, le front salé à 1g/l (resp. 5 g/l) progresse la plupart du temps de 50 km (resp. 30 km) supplémentaires vers l'amont par rapport au scénario B.

Comparé à l'impact du barrage de Sambangalou (intrusion maximale annuelle de la concentration 1 g/l repoussée en moyenne de 77 km vers l'aval par rapport à la situation actuelle), l'impact inverse d'un éventuel rehaussement de 20 cm du niveau de l'océan sur la salinité de l'estuaire semble assez négligeable : accroissement inférieur à 10 km de l'intrusion de la salinité vers l'amont.

# 1 Objectifs

Ce rapport traite l'intégralité des points H4 et E4, ainsi qu'une partie du point E2 (stations sénégalaises) des travaux prévus dans le cadre du contrat de juin 2000 passé entre Coyne et Bellier et l'IRD (voir annexe A), concernant la faisabilité de l'équipement du site de Sambangalou sur le fleuve Gambie.

Il s'agit ici de simuler le fonctionnement du futur ouvrage au pas de temps journalier, suivant les consignes de gestion et les caractéristiques techniques fixées par Coyne et Bellier. Le but consiste à faire une analyse statistique des résultats obtenus concernant les paramètres suivants : niveau et superficie de surface libre dans la retenue ; puissance produite ; débit lâché du barrage pour chaque organe d'évacuation ; débits et cotes aux stations influencées par le barrage, de Kédougou à Gouloumbo..

Sont également analysées dans ce rapport, les modifications de salinité induites par le futur barrage dans la partie estuarienne du fleuve à l'aval de Gouloumbo.

## 2 Données de base

### 2-1 Caractéristiques physiques de l'ouvrage

C'est le jeu de caractéristiques de base décrit ci-dessous qui est pris en compte dans les différents calculs de simulation menés par l'IRD dans la présente étude. Ces caractéristiques sont déduites du rapport de COTECO de Novembre 2002 (Etude des moyens de production et de transport de l'énergie électrique des pays membres de l'OMVG. Rapport provisoire de l'étude préliminaire. N° 10 861 RP08). Elles tiennent compte par ailleurs des éléments communiqués par Coyne et Bellier en Mars puis en Mai 2003.

#### Fonctions hauteur volume surface de la retenue

Cote (m)	125	150	160	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
Volume (hm³)	0	125.4	360.2	736.3	1000	1335	1760.5	2296.8	2968.7	3794.4	4777.6	5925.6	7247	8746.7
Superficie (km²)	0	16	30	46	59	75	95	119	150	181	213	247	282	318

#### Relation hauteur débit dans le canal de fuite

Cote (m)	122	122.08	124.32	125.23	126.42	127.29	128.01	128.62	131.02	132.97	134.62	135.99
Débit (m³/s)	0	2	100	200	400	600	800	1000	2000	3000	4000	5000

#### Caractéristiques de l'usine électrique

L'usine serait équipée de trois turbines identiques pouvant développer en tout entre 38,4 et 77 mw pour le scénario A, et entre 64,15 et 128,3 mw pour le scénario B. Un rendement global R constant de 87,22 % est envisagé (89 % pour le groupe turbine alternateur, et 2 % de pertes de charge hydraulique dans les conduites d'amenée).

#### Supplément de pertes par évaporation dues à la retenue

Mois	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nove	dece
En (mm)	220.4	239.9	309.7	300.2	265.2	52.1	-44.4	12.6	26.9	115.2	180	196.6

#### Hauteur maximale admise dans la retenue

Ce paramètre n'est pour l'instant pas précisé. Toutefois, la figure 2.2.1 du rapport de COTECO indique un niveau de crête du barrage situé à 2,70 mètres au dessus du seuil de déversoir. La

crête serait donc à 202,70 m pour RN = 200, cote retenue pour le seuil du déversoir de crue. Si l'on considère une marge de 50 cm pour pallier l'effet du battillage, la gestion de l'ouvrage doit donc veiller à maintenir en permanence le niveau du plan d'eau en dessous de la cote 202,20 m, pour éviter tout débordement en dehors de l'évacuateur de surface. La cote 202,20 m sera donc envisagée comme cote maximale admissible dans la retenue.

### Débit minimal déversé par l'évacuateur de surface

L'évacuateur envisagé est un seuil libre de largeur 50 m arrasé à la cote 200. L'ordre de grandeur du débit déversé peut être estimé par une formule du type :

$$Q = \mu \cdot L \cdot (H - H_s) \cdot (2 \cdot g \cdot (H - H_s))^{0,5}$$

Avec g : accélération de pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>) ; L : longueur du déversoir (50 m) ; H : niveau du plan d'eau amont ; H<sub>s</sub> : niveau du seuil (200 m) ;  $\mu$  : coefficient de débit.

Si l'on adopte une valeur de 0.45 pour le coefficient de débit  $\mu$ , on obtient la correspondance suivante :

Cote (m)	123	200	200.2	200.4	200.6	200.8	201	201.2	201.4	201.6	201.8	202	202.2
Débit (m <sup>3</sup> /s)	0	0	8.9	25.2	46.3	71.3	99.7	131	165.1	201.7	240.7	281.9	325.2

### Débit maximal évacué par l'ensemble vidange de fond -- évacuateur de surface

La vidange de fond envisagée consiste en deux pertuis de section 3 m par 5 m, pouvant évacuer chacun 350 m<sup>3</sup>/s sous la cote 200. En première approximation, il est possible d'utiliser la formule suivante pour évaluer le débit vidangé :

$$Q = N \cdot \rho \cdot L \cdot Z \cdot (2 \cdot g \cdot (H - H_s - Z))^{0,5}$$

Avec : N : nombre de vannes (2) ;  $\rho$  : coefficient de débit ; L : largeur de vanne (3 m) ; Z : hauteur de vanne (5 m) ; g : accélération de pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>) ; H : niveau du plan d'eau amont ; H<sub>s</sub> : niveau du seuil de vanne (123 m, estimé) ;

Le débit de 700 m<sup>3</sup>/s pouvant être vidangé à pleine ouverture sous la cote 200 permet d'estimer le coefficient de débit  $\rho$  à la valeur suivante : 0,62.

Il est alors possible d'estimer en fonction de la cote du plan d'eau, le débit maximal pouvant être évacué par l'ensemble des évacuateurs de fond et de surface :

Cote (m)	123	130	145	160	175	185	190	195	200	200.5	201	201.5	202	202.2
Débit (m <sup>3</sup> /s)	0	116.7	340.1	466.7	565.6	622.8	649.6	675.3	700	737.7	804.5	890.3	991.5	1035.8

### Débit maximal turbinable par groupe.

Les spécifications envisagées pour les turbines indiquent la production d'une puissance maximale de 67,2 (resp. 112) mw sous la cote 188 m, 72 (resp. 120,1) mw sous la cote 191 et 77 (resp. 128,3) mw sous une cote supérieure à 194 m, respectivement pour les scénarios A et B. Compte tenu de l'étalonnage du canal de fuite et du rendement global R de l'installation (0,8722), on en déduit le débit maximal unitaire en fonction de la chute brute :

variable	niveau de plan d'eau amont	débit turbiné	niveau de plan d'eau aval	chute brute	puissance produite
symbole	Ham	Q	Hav = f(Q)	Ham - Hav	P = 3.p.g.Q.(Ham-Hav).R/10 <sup>6</sup>
unité	m	m <sup>3</sup> /s	m	m	mw
Scénario A	188.00	41.25	124.54	63.46	67.20
	191.00	42.22	124.56	66.44	72.00
	194.00	43.22	124.59	69.41	77.00
Scénario B	188.00	69.57	125.28	62.72	112.00
	191.00	71.23	125.31	65.69	120.10
	194.00	72.80	125.34	68.66	128.30

Dans le logiciel SIMULGAM (voir plus bas) qui modélise le fonctionnement du futur barrage, les possibilités de production électrique sont donc calculées de la façon suivante, sans référence explicite à un débit d'équipement : pour une chute brute inférieure ou égale à 69,41 m (scénario A) ou 68,66 m (scénario B), c'est la fonction Q = f(Ham-Hav) définie ci-dessus qui donne la limite

supérieure de fonctionnement des turbines. Pour une chute brute supérieure (c'est à dire pour un niveau amont supérieur à 194 m), c'est la puissance maximale productible envisagée (77 mw ou 128,3 mw pour les trois groupes) qui entre en ligne de compte. Dans la pratique, ces spécifications induisent un débit turbiné global maximal sous la cote 194 m : 129,65 m<sup>3</sup>/s pour produire 77 mw , ou 218,4 m<sup>3</sup>/s pour produire 128,3 mw.

## **2-2 Ressource en eau sur le haut bassin de la Gambie**

### **2-2-1 Préparation d'une banque de données opérationnelles au pas de temps journalier sur la période 1970-2001**

Les données hydrométriques utilisées ici pour décrire la ressource en eau sur le haut bassin de la Gambie sont relatives à la période 1970-2001. Elles proviennent des deux sources suivantes :

1 : la banque de données Hydraccess gérée au centre IRD de Dakar par l'équipe de l'US 048 Divha, tenue à jour jusqu'en 2002. En plus des données brutes critiquées concernant l'ensemble des stations du bassin de la Gambie, cette banque contient pour certaines stations, des données reconstituées palliant des lacunes d'observations.

2 : la banque de données Hydrom gérée au centre IRD de Montpellier par l'équipe de l'US 048 Divha, issue de l'étude du schéma hydraulique du fleuve Gambie réalisée en 1998 par Sogreah, Hydroconsult International et SCET Tunisie. Constituée de données critiquées homogénéisées sur la période 1970-1997, cette banque opérationnelle est complète sur la période 1971-1996 grâce aux reconstitutions de lacunes effectuées à l'époque. Elle concerne les stations suivantes (fig. 1), qui permettent de décrire la propagation des débits entre Sambangalou et Gouloumbo : Gambie à Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou, Gouloumbo ; Koulountou au gué du PNNK et à Missirah Gounasse ; Diaguery au pont ; Diarha au pont ; Niokolokoba au pont du PNNK ; Tiokoye au pont.

Pour réaliser une banque de débits journaliers homogènes et complets sur la période 1970-2001, il a été décidé d'utiliser en priorité les données de la banque Hydraccess. Par rapport à la banque Hydrom, celle-ci offre en effet les trois avantages suivants :

- 1- Elle intègre les années 1997 à 2002, alors que la banque Hydrom ne dépasse pas mi-97
- 2- Sur la période 1970-1996, elle présente certaines séries de données observées qui, non disponibles en 1998, avaient dû être reconstituées dans la banque Hydrom.
- 3- Elle utilise des étalonnages plus précis pour la traduction des cotes en débit, grâce aux jaugeages réalisés depuis 1998. Des différences sensibles sur les débits de crue observés se remarquent ainsi pour les stations du Tiokoye, du Niokolokoba, de la Koulountou au gué et surtout du Diaguery.

L'annexe B, qui donne la nomenclature des fichiers de base issus des banques Hydrom et Hydraccess (tableau B1), détaille l'élaboration de la banque de données opérationnelle 1970-2001.

Dans un premier temps sont éliminées quelques rares données douteuses ou manifestation fausses, passées inaperçues dans la banque Hydraccess. La banque opérationnelle Hydrom est ensuite utilisée pour combler les lacunes de données antérieures à 1998, après correction éventuelle des débits pour tenir compte des révisions d'étalonnages mentionnées ci-dessus (tableau B2). Après quoi, les lacunes subsistant sur la période 1997-2002 sont reconstituées à partir de données de stations voisines, en utilisant des relations établies sur la base de débits uniquement observés (tableau B3). Quelques reconstitutions par modèle de tarissement sont également effectuées. Enfin, les débits de Gouloumbo inférieurs à 100 m<sup>3</sup>/s sont remplacés par la somme (décalée de deux jours) des débits de la Gambie à Wassadou aval et de la Koulountou au gué du PNNK, conformément à ce qui avait été préconisé dans l'étude du schéma directeur hydraulique de 1998. L'influence sensible de la marée sur les niveaux d'étiage à Gouloumbo entraîne en effet une grande imprécision sur leur traduction en débit.

La chronologie des opérations effectuées est donnée dans le tableau B4.

## 2-2-2 Consistance de la banque opérationnelle sur la période 1970-2001

Les statistiques données dans le tableau 1 montrent que les débits journaliers de la banque opérationnelle correspondent majoritairement à la traduction de cotes observées.

Pour les stations situées sur le cours du fleuve Gambie, les données contiennent environ 1 % de valeurs reconstituées à Kédougou, 15 % à Mako, 27 % à Wassadou, 73 % à Gouloumbo et 100 % à Sambangalou. Les nombreux débits reconstitués à Gouloumbo concernent surtout l'étiage et représentent donc une assez faible partie (20 %) du volume écoulé total à cette station. Les débits de Sambangalou sont quant à eux intégralement reconstitués à partir de ceux de Kédougou (observés à 99 %) à l'aide de la relation établie dans l'étude de 1998 ( $Q_{\text{Sambangalou}(j)} = 0.953 \cdot Q_{\text{Kédougou}(j)}$ ). Bien que cette relation soit établie au pas de temps mensuel, la grande proximité de Sambangalou et Kédougou permet de l'utiliser au pas de temps journalier avec suffisamment de précision.

Pour les stations situées sur les affluents de la Gambie, celles du Diaguery, du Tiokoye, du Diarha et du Niokolokoba présentent assez peu de données reconstituées, qui concernent moins de 35 % de leur volume écoulé. Par contre, celle de la Koulountou au gué du PNNK, affectée par de nombreuses lacunes d'observation, voit son volume écoulé estimé à près de 92 % à partir de données reconstituées. Cette station doit néanmoins être conservée pour la modélisation, car elle contrôle à elle seule presque autant d'écoulement que les quatre précédentes réunies et présente, compte tenu des temps de propagation, plus d'intérêt pour la gestion du futur ouvrage que celle de Missirah Gounasse située plus en aval sur le même cours d'eau.

## 2-2-3 Extension des débits de Sambangalou sur la période 1954-1969

Les débits journaliers de la Gambie à Sambangalou peuvent être reconstitués sur la période 1954-1969 à partir des données observées certaines années à la station de Gouloumbo, située à l'aval. Les données disponibles à Gourbassy, beaucoup plus complètes, peuvent également être utilisées. Cette station située sur la Falémé contrôle en effet un bassin versant jouxtant celui de la Gambie à Sambangalou, avec une superficie comparable. Les relations établies (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) entre les débits journaliers de Sambangalou ( $Q_s$ ), Gouloumbo ( $Q_g$ ) et Gourbassy ( $Q_{fg}$ ) sont présentées ci-dessous et sur les figures B1 et B2 de l'annexe B.

$$Q_s(j) = 7,081 Q_{fg}(j+2)^{0,6425} - 4,23 \quad (R^2 = 0,8383 ; \text{ erreur type} = 49 \text{ m}^3/\text{s} ; \text{ période } 1970-2001)$$

$$Q_s(j) = 0,4353 Q_g(j+6) + 5,9853 \quad (R^2 = 0,8822 ; \text{ erreur type} = 42 \text{ m}^3/\text{s} ; \text{ période } 1970-2002)$$

Affectées d'une erreur type relativement faible par rapport à l'écart type des débits de la Gambie à Sambangalou qui vaut  $122 \text{ m}^3/\text{s}$  sur les périodes 1970-2001 et 1970-2002, ces relations peuvent être utilisées pour reconstituer les débits journaliers de Sambangalou sur la période 1954-1969. Les figures B3-1 à B3-4 de l'annexe B montrent que les débits reconstitués à Sambangalou par l'une ou l'autre de ces relations sont assez proches, hormis les années 1955, 1964 et 1967 qui présentent des volumes de crue assez différents. La reconstitution des débits de Sambangalou sur la période 1950-1969 a d'abord utilisé les quelques données disponibles pour Gouloumbo, à l'exception des années 1955, 1964 et 1967. Les lacunes restantes, beaucoup plus nombreuses, ont ensuite été reconstituées à partir des données de Gourbassy.

Remarque : La relation établie entre Sambangalou et Gourbassy au niveau de l'ensemble des débits journaliers s'avère peu satisfaisante sur l'échantillon plus restreint des maximums annuels de débit journalier de Sambangalou (figure B1 de l'annexe B). Il est possible que les pointes journalières de crue reconstituées à Sambangalou sur la période 1954-1969, soient un peu sous-estimées.

## 2-2-4 Caractéristiques du régime naturel d'écoulement

Le climat régnant sur le bassin de la Gambie est caractérisé par une saison pluvieuse centrée sur les mois d'août et septembre, avec une durée (7 à 5 mois) et une pluviométrie annuelle (1600 à 700 mm) décroissantes du sud vers le nord. Le régime d'écoulement associé présente une crue annuelle s'étalant de juillet à octobre, suivie d'un tarissement qui aboutit au quasi arrêt des écoulements vers avril mai sur le cours principal du fleuve (tab. 2, fig. 2).

L'ampleur des crues peut être très diverse selon les années (fig. 3), ce qui entraîne une grande variabilité du volume écoulé annuel (tab. 1, fig. 4). Sur la période commune 1971-1996, les modules interannuels de la présente banque opérationnelle sont très légèrement inférieurs (entre 0 et 2%) à ceux de la banque Hydrom utilisée dans l'étude du schéma directeur hydraulique de 1998. Ces légères différences résultent essentiellement des révisions d'étalonnages mentionnées plus haut. La bonne hydraulité observée ces dernières années donne par contre sur la période 1970-2001, un module interannuel plus élevé de 5 à 6% pour les stations du fleuve par rapport à celui de la période 1971-1996. Toutes autres choses égales par ailleurs, ce rehaussement ne peut entraîner que des résultats plus optimistes pour les simulations réalisées dans la présente étude sur la période 1970-2001, par rapport à ceux de l'étude de 1998 basés sur la période 1971-1996.

Sur la période 1970-2001, les volumes écoulés à Sambangalou représentent selon les années entre 37 et 64 %, et en moyenne 47.5 % des volumes écoulés à Gouloumbo, station à l'aval de laquelle le fleuve entre dans sa partie maritime et ne reçoit plus que des apports très faibles. A elles cinq, les stations du Diaguery, du Tiokoye, du Diarha, du Niokolokoba et de la Koulountou au gué du PNNK contrôlent en moyenne 34 % des volumes écoulés à Gouloumbo. Ces cinq stations ajoutées à Sambangalou, permettent donc de contrôler en moyenne 81.5 % des volumes qui vont transiter à Gouloumbo. Les 18.5 % d'apports incontrôlés se répartissent pour 2.4 % entre Sambangalou et Kedougou, 3.8 % entre Kedougou et Mako, 7.8 % entre Mako et Wassadou et 4.5 % entre Wassadou et Gouloumbo.

Le tableau 3 donne les débits moyens mensuels et annuels de la Gambie à Sambangalou sur la période 1954-2001. Il montre, ainsi que la figure 4, un net déficit d'hydraulité des années postérieures à 1970 par rapport aux années précédentes. Le module interannuel de la période 1970-2001 vaut précisément la moitié de celui de la période 1954-1969. Ceci est assez conforme à l'évolution des débits observés à Goubassy sur le bassin de la Falémé. Le rapport des modules calculés à cette station voisine entre les périodes 1970-2000 et 1954-1969 s'élève en effet à 0,41.

## **2-3 Données relatives à la salinité des eaux dans l'estuaire**

Les données utilisées pour caractériser la salinité des eaux concernent tout particulièrement la position du front salé à 1 g/l. Il s'agit de la distance par rapport à l'embouchure (Banjul) à partir de laquelle la concentration moyenne en sels dans la section du fleuve devient inférieure à 1g/l. Ces données proviennent des deux sources suivantes :

1- Banque de données constituée à l'occasion de l'étude du schéma hydraulique du fleuve Gambie de 1998. Ces données gérées par le centre IRD de Dakar concernent 93 points de mesure répartis entre 1974 et 1997, donnant chacun la position de la concentration à 1 g/l. Elles proviennent de la DWR (Direction Gambienne des ressources en Eau).

2- Données obtenues par numérisation d'un graphique publié par Monsieur H. H. G. Savenige dans l'article suivant : "Influence of rain and evaporation on salt intrusion in estuaries. Journal of hydraulic engineering, vol 114, n° 12, 1988". Il s'agit de 44 points de mesures répartis entre 1972 et 1981, donnant chacun la position de la concentration à 1 g/l.

D'après l'étude du schéma hydraulique de 1998, il est à noter que la concentration en sels montre des gradients de variation très faibles suivant les directions verticale et perpendiculaire à l'axe du fleuve. Les variations, apparemment assez progressives, s'observent essentiellement d'amont en aval, ce qui permet de classer l'estuaire de la Gambie dans la catégorie des estuaires bien mélangés.

En régime naturel, les eaux marines envahissent l'estuaire de la Gambie suivant un cycle annuel très lié à celui de la crue d'eau douce continentale, comme le montre la figure 5. En moyenne, le front salé à 1 g/l qui se situe vers fin juin aux alentours du PK 250 (distance en km comptée depuis Banjul) est repoussé vers l'aval de début juillet à mi-septembre, période correspondant à l'augmentation des débits provenant de l'amont. Le front salé descendu vers le PK 100 reprend ensuite le chemin de l'amont, à mesure de la diminution des débits.

La position moyenne du front salé à 1g/l en régime naturel peut être reliée directement à la date (fig.5) avec une erreur type de 17 km, de la façon suivante :

On note :  $j$  = quantième divisé par 100 (0,01 pour le 01/01,....., 3,65 pour le 31/12)

$D$  = position du front salé à 1 g/l (distance en km depuis Banjul, dans l'axe du fleuve)

$$A(j) = 148,18 + 71,186 j + 13,328 j^2 - 13,779 j^3 + 0,50988 j^4$$

$$B(j) = 10243 - 20644 j + 15775 j^2 - 5268,6 j^3 + 645,55 j^4$$

Pour  $j < 177$  (avant le 26 juin) :  $D(j) = A(j)$

Pour  $177 < j < 264$  (entre le 26 juin et le 19 septembre) :  $D(j) = B(j)$

Pour  $264 < j$  (après le 19 septembre) :  $D(j) = A(j-365)$

### 3 Description des modèles utilisés

#### 3-1 Modèle de propagation de débit entre Sambangalou, Simenti et Gouloumbo

La propagation des débits entre Sambangalou et Gouloumbo est modélisée sur la base des débits journaliers de la banque opérationnelle. La modélisation est conforme à celle qui avait été réalisée en 1998 dans l'étude du schéma directeur hydraulique, dont sont intégralement repris les résultats concernant les temps de propagation entre stations. Seules sont ici révisées les correspondances entre valeurs de débits observées à ces stations. Ces derniers sont notés en utilisant les noms de stations abrégés définis dans le tableau B1

Les quatre relations F, G1, G2 et H suivantes, détaillées sur la figure 6, peuvent être mises en évidence pour le régime naturel entre les débits journaliers des différentes stations :

$$\text{Mako}_{\text{nat}}(j+1) = F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] \quad [1]$$

$$\text{Simen}_{\text{nat}}(j+3) = G1[\text{Mako}_{\text{nat}}(j+1) + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)] \quad [2]$$

$$\text{Wasav}_{\text{nat}}(j+4) = G2[\text{Mako}_{\text{nat}}(j+1) + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)] \quad [3]$$

$$\text{Goulo}_{\text{nat}}(j+6) = H[\text{Wasav}_{\text{nat}}(j+4) + \text{Parcg}(j+4)] \quad [4]$$

Il est possible d'écrire ces relations sous une forme différente, valable en régime naturel comme en régime artificiel, en introduisant un débit Inter rendant compte à la fois des apports et pertes intermédiaires non contrôlés, et de l'amortissement des ondes de crue :

$$\text{Mako}(j+1) = \text{Samban}(j) + \text{Diagu}(j+1) + \text{InterA}(j) \quad [5]$$

$$\text{Simen}(j+3) = \text{Mako}(j+1) + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2) + \text{InterB1}(j+1) \quad [6]$$

$$\text{Wasav}(j+4) = \text{Mako}(j+1) + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2) + \text{InterB2}(j+1) \quad [7]$$

$$\text{Goulo}(j+6) = \text{Wasav}(j+4) + \text{Parcg}(j+4) + \text{InterC}(j+4) \quad [8]$$

L'application des relations 5 à 8 en régime naturel, combinées aux relations 1 à 4, permet d'écrire :

$$\text{InterA}(j) = F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] - [\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)]$$

$$\begin{aligned} \text{InterB1}(j+1) = & G1(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) \\ & - (F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{InterB2}(j+1) = & G2(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) \\ & - (F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{InterC}(j+4) = & H[G2(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) + \text{Parcg}(j+4)] \\ & - [G2(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)] + \text{Tioko}(j+2) + \text{Diarh}(j+2) + \text{Nioko}(j+2)) + \text{Parcg}(j+4)] \end{aligned}$$

Dans l'hypothèse que les apports ou pertes intermédiaires non contrôlés, identiques en régime naturel ou artificiel, constituent la part essentielle des débits Inter, il est possible de remplacer ces

derniers dans les relations 5 à 8 par leurs valeurs déterminées ci-dessus en régime naturel. La combinaison des relations permet alors d'exprimer le débit à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo en fonction du débit à Sambangalou, sous une forme valable en régime naturel comme en régime artificiel :

$$\text{Mako}_1(j+1) = \text{Samban}(j) + \text{INTER}_m(j)$$

$$\text{Simen}_1(j+3) = \text{Samban}(j) + \text{INTER}_s(j)$$

$$\text{Wasav}_1(j+4) = \text{Samban}(j) + \text{INTER}_w(j)$$

$$\text{Goulo}_1(j+6) = \text{Samban}(j) + \text{INTER}_g(j)$$

$$\text{INTER}_m(j) = - \text{Samban}_{\text{nat}}(j) + F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Diagu}(j+1)]$$

$$\text{INTER}_s(j) = - \text{Samban}_{\text{nat}}(j) + G1(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j)+\text{Diagu}(j+1)]+\text{Tioko}(j+2)+\text{Diarh}(j+2)+\text{Nioko}(j+2))$$

$$\text{INTER}_w(j) = - \text{Samban}_{\text{nat}}(j) + G2 (F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j)+\text{Diagu}(j+1)]+\text{Tioko}(j+2)+\text{Diarh}(j+2)+\text{Nioko}(j+2))$$

$$\text{INTER}_g(j) = - \text{Samban}_{\text{nat}}(j) + H[G2(F[\text{Samban}_{\text{nat}}(j)+\text{Diagu}(j+1)]+\text{Tioko}(j+2)+\text{Diarh}(j+2)+\text{Nioko}(j+2))+\text{Parcg}(j+4)]$$

Selon le même principe, la relation utilisée plus haut entre les débits naturels de Sambangalou et Kédougou permet d'estimer le débit de Kédougou à partir du débit lâché à Sambangalou de la façon suivante :

$$\text{Kedou}_1(j) = \text{Samban}(j) + \text{INTER}_k(j)$$

$$\text{INTER}_k(j) = - \text{Samban}_{\text{nat}}(j) + \text{Samban}_{\text{nat}}(j)/0,953 = 0,0493 \text{ Samban}_{\text{nat}}(j)$$

Pour la gestion en temps réel du futur ouvrage de Sambangalou, ces relations permettent d'estimer entre 1 et 6 jours à l'avance les débits probables à Mako, Simenti, Wassadou et Gouloumbo en fonction du débit lâché du barrage. Elles permettent aussi, à l'inverse, de calculer le débit à lâcher pour respecter un objectif de débit défini à l'une de ces stations. Pour pouvoir les utiliser au jour j, il est nécessaire d'estimer au préalable les débits naturels de Sambangalou au jour j, du Diaguery au jour j+1, du Tiokoye, du Diahra et du Niokolokoba au jour j+2, et enfin de la Koulountou au gué du PNNK au jour j+4. Au stade actuel des études, il n'est pas nécessaire d'étudier les moyens à mettre en œuvre pour faire ces estimations, qui pourraient reposer sur le suivi en temps réel des stations concernées et de certaines stations situées à l'amont (Gambie à Kouny, Koulountou au pont de Youkounkoun), et éventuellement sur un suivi en temps réel de la pluviométrie.

L'application des formules ci-dessus en régime naturel, permet de comparer les résultats des modèles Kedou<sub>1</sub>, Mako<sub>1</sub>, Simen<sub>1</sub>, Wasav<sub>1</sub> et Goulo<sub>1</sub> aux débits effectivement observés. Pour Kédougou, l'adéquation parfaite découle du principe même de la modélisation adoptée, qui a servi par ailleurs à élaborer la banque de données journalières de Sambangalou. Pour Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, on constate une bonne adéquation, affectée toutefois d'un bruit (erreur type de 24, 50, 46 et 55 m<sup>3</sup>/s resp.) qui s'estompe sensiblement sur les moyennes mobiles centrées (sur 2, 3, 5 et 7 jours resp.) :

$$\text{Mako}_2(j) = [0,5 * \text{Mako}_1(j-1) + \text{Mako}_1(j) + 0,5 * \text{Mako}_1(j+1)] / 2$$

$$\text{Simen}_3(j) = [\text{Simen}_1(j-1) + \text{Simen}_1(j) + \text{Simen}_1(j+1)] / 3$$

$$\text{Wasav}_5(j) = [\text{Wasav}_1(j-2)+\text{Wasav}_1(j-1)+\text{Wasav}_1(j)+\text{Wasav}_1(j+1)+\text{Wasav}_1(j+2)] / 5$$

$$\text{Goulo}_7(j) = [\text{Goulo}_1(j-3)+\text{Goulo}_1(j-2)+\text{Goulo}_1(j-1)+\text{Goulo}_1(j)+\text{Goulo}_1(j+1)+\text{Goulo}_1(j+2)+\text{Goulo}_1(j+3)]/7$$

Les débits Mako<sub>2</sub>, Simen<sub>3</sub>, Wasav<sub>5</sub> et Goulo<sub>7</sub> ainsi calculés présentent sur la période 1970-2001 une moyenne de 87,6, 125,8, 120,8 et 152,6 m<sup>3</sup>/s respectivement, très proche de la moyenne observée (87,6, 124,5, 119,8 et 150,6 m<sup>3</sup>/s resp.). Les erreurs types de 21,7, 44,8, 39,2 et 45,4 m<sup>3</sup>/s, très inférieures aux écarts types des débits observés (157, 230, 224 et 265 m<sup>3</sup>/s resp.), montrent par ailleurs que ces modèles reproduisent plus de 96 % de la variance des débits journaliers observés à ces stations.. L'adéquation des modèles Simen<sub>3</sub> et Goulo<sub>7</sub> aux valeurs observées est illustrée sur la figure 7, ainsi que sur les figures C1 à C4 de l'annexe C pour Goulo<sub>7</sub>. La figure 8 montre par ailleurs la reconstitution acceptable des maximums annuels de débit journalier sur la période 1970-2001 à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, à partir des modèles Mako<sub>2</sub>, Simen<sub>3</sub>, Wasav<sub>5</sub> et Goulo<sub>7</sub>.

Les séries INTER<sub>k</sub>, INTER<sub>m</sub>, INTER<sub>s</sub>, INTER<sub>w</sub> et INTER<sub>g</sub> vont être utilisées dans les simulations de gestion du barrage de Sambangalou pour évaluer les débits résultants à Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo. Il reste à les étendre sur la période 1954-1969 pour pouvoir mener les calculs sur la période 1954-2001. Pour INTER<sub>k</sub>, l'extension est effectuée à partir des débits journaliers de Sambangalou, à l'aide de la relation présentée plus haut. Pour les quatre autres, elle est effectuée à partir des débits de Sambangalou évalués en moyenne mobile centrée sur 3, 7 et 11 jours (Q<sub>s3</sub>, Q<sub>s7</sub> et Q<sub>s11</sub>), sur la base des relations ci-dessous évaluées sur la période 1970-2002 (fig. B4 et B5 de l'annexe B) :

$$\begin{aligned} \text{INTER}_m(j) &= 0,0001518 Q_{s3}(j)^2 + 0,1959 Q_{s3}(j) & (R^2 = 0,9450; \quad \text{erreur type} = 8 \text{ m}^3/\text{s}) \\ \text{INTER}_s(j) &= 0,0001450 Q_{s7}(j)^2 + 0,7622 Q_{s7}(j) & (R^2 = 0,9274; \quad \text{erreur type} = 27 \text{ m}^3/\text{s}) \\ \text{INTER}_w(j) &= 0,7352 Q_{s7}(j) & (R^2 = 0,9095; \quad \text{erreur type} = 28 \text{ m}^3/\text{s}) \\ \text{INTER}_g(j) &= 1,153 Q_{s11}(j) & (R^2 = 0,9253; \quad \text{erreur type} = 38 \text{ m}^3/\text{s}) \end{aligned}$$

La figure 9 montre que les maximums annuels de débit journalier naturel à Simenti et Gouloumbo, calculés par les modèles Simen<sub>3</sub> et Goulo<sub>7</sub> à partir des débits de Sambangalou, varient de façon cohérente avec ceux de la Falémé à Gourbassy sur l'ensemble de la période 1954-2001. Il en va de même pour les débits naturels modélisés à Wassadou aval avec Wasav<sub>5</sub>. Comme ils sont par ailleurs très proches des valeurs observées sur la période 1970-2001, il est donc fort probable que les maximums annuels de débit modélisé à ces trois stations soient également assez fiables pour les années antérieures à 1970. Pour Sambangalou au contraire, la figure 9 semble confirmer une tendance à la sous-estimation des maximums annuels antérieurs à 1970. Ce problème, évidemment répercuté sur les débits de Kédougou, s'observe également pour Mako.

Pour évaluer les modifications de régime hydrologique induites par le barrage sur la base des données de la période 1954-2001, il sera donc possible d'analyser l'amortissement des pointes de crue aux stations de Simenti, Wassadou et Gouloumbo. Les modifications induites à Kédougou et Mako ne seront analysées qu'au pas de temps mensuel.

### 3-2 Modèle de simulation de gestion : SIMULGAM

Ce logiciel développé par l'IRD avait déjà été mis en œuvre dans le cadre du schéma directeur hydraulique de 1998. Il permet de simuler au pas de temps journalier la gestion en temps réel du futur ouvrage de Sambangalou, sur la base de la banque opérationnelle de débits du haut bassin de la Gambie. En fonction des règles de gestion envisagées, il donne les débits lâchés, les débits résultants à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, la production d'électricité et l'évolution du niveau dans le lac de barrage.

Les paramètres gérés par le logiciel concernent les domaines suivants :

- 1- Caractéristiques du barrage et de la retenue
- 2- Configuration du réseau de stations hydrométriques supposées suivies en temps réel
- 3- Modèle hydrologique de propagation de débits, par biefs successifs
- 4- Scénarios de demande de débit objectif à satisfaire à une station située à l'aval du barrage (ici : Gouloumbo). Chaque scénario de demande, variable sur l'année, est considéré permanent (et donc inchangé d'une année sur l'autre) au cours des simulations.
- 5- Scénarios de demande de production électrique. Même remarque que pour les demandes de débit.

#### 3-2-1 Consignes de gestion

Chaque scénario simulé est défini par une liste de consignes assorties de rangs de priorité. Ces consignes sont associées aux contraintes de gestion liées aux caractéristiques de l'ouvrage, à des objectifs de sécurité ou aux objectifs de gestion envisagés. Elles concernent la production électrique, les objectifs de débit définis à l'aval du système (Gouloumbo), et le laminage des crues.

A chaque pas de temps, chacune des consignes permet de définir soit une limite minimale  $Q_{min}$ , soit une limite maximale  $Q_{max}$ , soit les deux, pour le débit total à lâcher du barrage (vidangé + déversé + turbiné). Pour la plupart, ces limites correspondent à l'un des trois types de valeurs suivantes :

1- débit lâché (noté  $Q_{mina}$  ou  $Q_{maxa}$ ) permettant de satisfaire directement la demande associée. Par exemple, c'est le débit lâché dont la propagation, associée à celle des apports intermédiaires arrivant à l'aval du barrage, produit quelques jours plus tard à Gouloumbo une valeur de débit à atteindre (hydrogramme objectif) ou au contraire à ne pas dépasser (laminage). Dans ce cas, la limite de débit à lâcher est calculée sur la base du modèle de propagation défini plus haut ( $Goulo_1(j+6) = Samban(j) + INTERg(j)$ ).

2- débit lâché (noté  $Q_{minb}$  ou  $Q_{maxb}$ ) permettant d'amener la cote du lac au niveau de revanche ou de stock nécessaire pour garantir la possibilité de satisfaire la demande associée avec un certain niveau de risque d'échec dans le futur. Par exemple, c'est le débit lâché maximal à ne pas dépasser, pour ne pas faire descendre le stock dans le lac en dessous d'une valeur qui entraînerait un risque trop élevé de pénurie pour la satisfaction future des besoins en eau. Autre exemple, c'est le débit lâché minimal à dépasser pour permettre de conserver un volume vide suffisant dans la retenue, pour pouvoir laminar les crues à venir. Le calcul donnant ces limites de débit à lâcher est basé sur un bilan de volume dans la retenue.

3- Débit lâché minimal  $Q_{minc}$  et maximal  $Q_{maxc}$  compatibles avec la production d'une puissance objectif. Ce débit minimal est calculé en fonction du niveau de la retenue, sur la base des caractéristiques des turbines et de la relation hauteur débit à l'aval du barrage.

### **3-2-2 Principe du calcul du débit lâché du barrage et de la puissance électrique produite**

A chaque pas de temps, compte tenu de la cote dans le lac, une première fourchette de valeurs limites possibles pour le débit total lâché est d'abord déterminée à partir des contraintes de gestion, qui résultent des dimensions des différents organes d'évacuation et de la cote limite maximale de sécurité à ne pas dépasser dans la retenue. Cette fourchette est ensuite resserrée par la prise en compte successive des différentes consignes, par ordre de priorité décroissante. Le processus s'arrête lorsque toutes les consignes ont été prises en compte, ou lorsque l'une d'entre elles est incompatible avec la fourchette résultant des contraintes et des consignes précédentes. Dans ce dernier cas la fourchette est réduite à celle de ses deux bornes qui se rapproche le plus du débit lâché exigé par la consigne non satisfaite.

Dans tous les cas, le débit total lâché est pris égal à la borne inférieure de la fourchette déterminée ci-dessus. La puissance électrique produite est alors calculée suivant l'hypothèse que la part maximale turbinable du débit total lâché est toujours turbinée. Ceci suppose qu'il est possible de produire à certains moments, une puissance supérieure à la valeur demandée. On se place donc dans le cas où toute puissance électrique produite au barrage pourra être consommée, du fait que la demande est toujours considérée supérieure à la capacité de production de l'ouvrage.

### **3-2-3 Données en entrée et valeurs produites en sortie du calcul**

En entrée du calcul, chaque simulation utilise les données suivantes supposées connues en temps réel :

1- Cote initiale dans le lac

2- Chronique journalière des apports dans la retenue évalués au droit du barrage. Il s'agit du débit naturel de la rivière à cet endroit. Cette chronique correspond aux débits  $Samban_{nat}$  mentionnés plus haut, directement tirés de la banque opérationnelle.

3- Chroniques journalière des débits non influencés par l'ouvrage, mais tributaires du débit passant à la station située à l'aval du système, pour laquelle on définit un hydrogramme objectif (Gouloumbo). Les apports intermédiaires pris en compte sont regroupés dans les chroniques  $INTERm$ ,  $INTERs$ ,  $INTERw$  et  $INTERg$  définies plus haut.

4- Chroniques journalières éventuelles de débit à des stations situées à l'amont de l'ouvrage (non utilisé ici)

Le calcul produit les chroniques journalières de valeurs suivantes :

- 1- Débit à la sortie du barrage, déduit de la fourchette de débits limites associés aux consignes.
- 2- Débit aux stations situées à l'aval du système (Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo). Le logiciel sort directement les débits  $Mako_1$  ,  $Simen_1$  ,  $Wasav_1$  et  $Goulo_1$  à partir desquels on calcule sous Excel les moyennes mobiles  $Mako_2$  ,  $Simen_3$  ,  $Wasav_5$  et  $Goulo_7$  qui servent à l'analyse des résultats. Les débits de Kédougou (Kedou1) sont directement calculés sous excel à partir des débits sortant de la retenue et des débits naturels de Sambangalou.
- 3- Puissance électrique produite, calculée à partir du niveau amont, du débit lâché, des caractéristiques des turbines et du canal de fuite.
- 4- Cote du lac de retenue, calculée par bilan de volume à partir des débits entrant et sortant, des pertes par évaporation et des caractéristiques du réservoir.
- 5- Déficit de puissance produite par rapport à la demande
- 6- Déficit de débit obtenu à Gouloumbo par rapport à l'hydrogramme objectif

### **3-2-4 Calcul des cotes limites à respecter dans le lac**

Une procédure particulière du logiciel permet d'élaborer les limnigrammes annuels de cotes à respecter dans le lac, correspondant à certains niveaux de risque d'échec pour la satisfaction des différents objectifs. Ces limnigrammes peuvent être utilisés ensuite comme consigne de gestion, pour le calcul des limites  $Q_{minb}$  ou  $Q_{maxb}$  définies plus haut.

### **3-2-5 Evaluation des résultats**

Le logiciel SIMULGAM comporte un certain nombre de procédures permettant d'évaluer les résultats de chaque simulation. Une passerelle de changement de format de fichier permet en outre d'examiner ces résultats avec d'autres logiciels (Excel par exemple). Les procédures actuellement intégrées à SIMULGAM permettent de faire les opérations suivantes :

- 1- Traitement statistique des résultats: élaboration de fichiers annuels de valeurs journalières iso-fréquence ; fonctions de répartition de valeurs caractéristiques sur n jours (dépassées ou non atteintes n jours dans l'année) ; fonctions de répartition de moyennes annuelles
- 2- Visualisation graphique ou sous forme de tableaux de chiffres, pour les chroniques de valeurs utilisées en entrée de calcul ou élaborées par la simulation, et pour les séries d'extremums annuels ou de valeurs journalières iso-fréquence de valeurs élaborées par simulation.
- 3- Evaluation du taux de déficit pour la satisfaction des objectifs (besoins en eau exprimés à Gouloumbo et puissance électrique demandée)

## **3-3 Modèle de déplacement du front salé : SALNSTAT**

Ce modèle dont l'auteur est Monsieur H.H.G. Savenige avait déjà été utilisé dans l'étude du schéma hydraulique de 1998. Basé sur les lois de l'hydraulique et de la diffusion discrétisées en mode monodimensionnel suivant l'axe de l'écoulement, il permet de calculer en phase transitoire la salinité en tout point d'un estuaire de type alluvial bien mélangé, comme c'est le cas pour celui du fleuve Gambie. Il utilise une représentation de l'estuaire sous forme de biefs réguliers successifs. Chacun de ces biefs est caractérisé par une profondeur variant de façon linéaire et par une décroissance exponentielle de la largeur au miroir vers l'amont. Une liste de quelques publications relatives au modèle de Savenige est donnée en annexe D.

Les principaux paramètres et données utilisés en entrée du modèle sont les suivants :

- 1- Chroniques au pas de temps mensuel : besoins en eau de l'agriculture irriguée ( $m^3/s/1000ha$ ) ; pertes par évaporation sur l'estuaire (m/mois) ; précipitations sur l'estuaire (m/mois) ; apports de débit provenant de l'amont ( $m^3/s$ ).
- 2- Salinité de l'océan et des apports provenant de l'amont (g/l)

3- Débit initial provenant de l'amont. Cette valeur est utilisée par le logiciel pour évaluer un profil initial de salinité en régime permanent. L'expérience montre que l'effet de ce paramètre tend à s'annuler au fil des mois simulés.

4- Durée moyenne d'une période de marée (s), amplitude moyenne de marée (m) et coefficient d'amortissement de marée.

5- Facteurs multiplicatifs à ajuster pour la prise en compte des précipitations et de l'évaporation sur l'estuaire

6- Superficie de cultures irriguées prélevant de l'eau dans l'estuaire (1000 ha)

7- Section de l'écoulement ( $m^2$ ) et profondeur (m) à l'embouchure

8- Paramètres décrivant la géométrie de l'estuaire : nombre de biefs élémentaires et, pour chacun d'entre eux, la profondeur (m) à la limite amont du bief et le coefficient négatif  $b$  (1/m) de décroissance exponentielle de la largeur  $L$  suivant l'abscisse  $x$  comptée positivement vers l'amont :  $b = (dL/dx)/L$

9- Pas de temps du calcul : entre 1 et 30 jours.

Les débits de la Gambie à Gouloumbo issus de la banque opérationnelle 1970-2001 ont été utilisés dans SALNSTAT pour décrire l'évolution des apports naturels de l'amont dans l'estuaire. Pour les précipitations et les pertes par évaporation, les valeurs moyennes mensuelles publiées par Saveninge (1988) ont été retenues (tableau 4), avec une même chronique de 12 valeurs mensuelles reproduite chaque année.

Les valeurs des paramètres retenus pour SALNSTAT sont données dans l'annexe D. Par rapport aux calculs effectués en 1998 pour le schéma hydraulique, quelques unes ont été légèrement modifiées pour obtenir un meilleur ajustement du modèle par rapport aux valeurs mesurées. Il s'agit de l'amplitude de marée (1,1 m au lieu de 1,0 m), du facteur multiplicatif concernant les pertes par évaporation (0,4 au lieu de 0,7) et de la profondeur : 9 m au PK 0 ; 6 m au PK 174 ; 6 m au PK 340 (au lieu de : 9 m, 9 m et 6 m respectivement).

En considérant des prélèvements nuls pour l'irrigation, le modèle utilisé au pas de temps de 10 jours reconstitue assez précisément la position du front salé à 1g/l en régime naturel, comme l'indiquent les figures 10 et D1 où ses résultats sont comparés aux 137 points de mesures mentionnés plus haut. L'erreur commise par le modèle, inférieure à 10 km dans 50 % des cas et inférieure à 20 km dans 85 % des cas, est faible comparée à l'amplitude de variation de cette position qui est de l'ordre de 150 km. L'erreur type (moyenne quadratique des erreurs) est de 16 km.

Le modèle sort les valeurs de salinité aux pas de temps et d'espace choisis sur toute la longueur de l'estuaire. Il est donc possible d'exploiter ces résultats pour obtenir des profils de salinité à différentes dates, ou inversement les déplacements de fronts salés à différentes concentrations Ceci est illustré sur les figures 11 et 12 pour les salinités moyennes reconstituées avec SALNSTAT (à partir des débits observés de Gouloumbo) dans le cas du régime naturel sur la période 1970-2001.

Bien que calé et validé sur des données relatives au seul régime naturel, le modèle SALNSTAT semble tout à fait indiqué pour prévoir les concentrations salines dans l'estuaire en régime artificiel, du fait qu'il est basé sur les équations de la physique des écoulements et de la diffusion, indépendantes du régime. Les modifications induites par le barrage sur la salinité de l'estuaire peuvent être évaluées en utilisant la chaîne de modélisation Simulgam-Salnstat. Il suffit de comparer les résultats obtenus pour un scénario de gestion donné, à ceux qui reproduisent le régime naturel en supposant l'égalité stricte entre débit entrant et débit sortant de la retenue. Ces résultats relatifs au régime naturel modélisé à partir de Sambangalou, considéré comme situation de référence, sont présentés sur les figures 13 et 14 sous forme de courbes iso-fréquence décrivant le déplacement annuel du front salé à 1g/l et à 5 g/l.

## 4 Simulations réalisées

Les simulations effectuées avec Simulgam portent sur des années calendaires et débutent systématiquement un 1<sup>er</sup> janvier. Par souci de cohérence avec les résultats de simulations présentés dans le rapport de Coteco de Novembre 2002, seules sont présentées ici les simulations pour lesquelles la cote moyenne résultante de la retenue au 1<sup>er</sup> janvier, évaluée sur l'ensemble de la période simulée, est égale à la cote initiale. Ceci nécessite un processus itératif de simulations successives effectuées pour différentes cotes initiales, dont les résultats intermédiaires ne seront pas présentés.

Tous les scénarios envisagés intègrent comme consigne de sécurité prioritaire, le lâcher d'un débit suffisant pour maintenir le niveau de la retenue en dessous de la cote maximale autorisée (202,20 m). Cette consigne n'est donc pas rappelée dans la description des différents scénarios simulés.

### 4.1 Scénario A : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 77 mw et une consigne permanente de "gestion haute"

#### 4.1.1 Consignes simulées

La simulation porte sur la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 1954 au 31 décembre 2001. En dehors de la consigne de sécurité, la seule consigne de gestion envisagée ici concerne la production d'énergie, définie par les deux points suivants :

- 1- Si la cote de la retenue se situe entre 188 et 196 m, turbiner le débit nécessaire pour produire une puissance égale à une valeur  $P_{obj}$  prédéfinie.
- 2- Si la cote de la retenue se situe au dessus de 196 m, utiliser les turbines à leur pleine capacité (consigne de "gestion haute").

L'objectif de puissance  $P_{Obj}$  est déterminé par un processus itératif de simulations successives, destiné à le faire correspondre à la valeur vingtennale faible de la puissance moyenne mensuelle obtenue sur l'ensemble de la période simulée. Autrement dit, il s'agit de la puissance moyenne mensuelle garantie 19 mois sur 20. Les différentes itérations permettent de déterminer les valeurs suivantes :

Cote initiale de la retenue au 1<sup>er</sup> janvier 1954 : 196,70 m

Objectif de puissance  $P_{obj}$  : 27,60 mw

#### 4.1.2 Production d'énergie

Puissance moyenne interannuelle obtenue : 43,1 mw (soit 377,8 gwh/an)

Puissance moyenne mensuelle garantie 19 mois sur 20 : 27,6 mw (soit 241,9 gwh/an)

Avec les spécifications de turbine adoptées, la consigne envisagée entraîne trois possibilités pour la puissance moyenne journalière produite : puissance nulle (2,6 % du temps) ; 27,6 mw (64,5 % du temps) ; 77 mw (32,9 % du temps). La répartition des puissances moyennes journalières, mensuelles et annuelles est donnée sur la figure 15, qui montre une forte variabilité de la production. L'énergie produite annuellement varie ainsi entre 162 et 508 gwh selon les années. Enfin, la figure E1 de l'annexe E montre que les mois de mai à juillet sont ceux où le risque de production inférieure à la puissance garantie (27,6 mw) est le plus élevé. Une production nulle est observée plus d'une année sur 15 au mois de juin.

#### 4.1.3 Débits, niveau du plan d'eau, superficie du plan d'eau

Débit turbiné : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 69,8 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 126 m<sup>3</sup>/s

Débit déversé : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 15,2 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 325 m<sup>3</sup>/s

Débit vidangé : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 2,0 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 446 m<sup>3</sup>/s

Débit total lâché : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 87,1 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 893 m<sup>3</sup>/s

Débit moyen du surplus de pertes par évaporation dû à l'existence du plan d'eau : 8,8 m<sup>3</sup>/s

Débit moyen du stockage net dans la retenue : - 0,0 m<sup>3</sup>/s

Niveau du plan d'eau : minimum = 186,83 m ; moyenne = 194,67 m ; maximum = 202,20 m

Superficie du plan d'eau : minimum = 103,1 km<sup>2</sup> ; moyenne = 147,9 km<sup>2</sup> ; maximum = 195,5 km<sup>2</sup>

Les figures E1 et E2 de l'annexe E montrent que la cote 200 est assez fréquemment dépassée entre septembre et novembre, ce qui entraîne alors des déversements non négligeables. Les années de forte hydraulité, la cote limite admissible (202,20m) peut même être atteinte en septembre et octobre, ce qui entraîne l'ouverture de la vidange de fond. A l'inverse, les années de faible hydraulité peuvent voir le niveau baisser en dessous de la cote 188 m entre mi-mai et mi-juillet, ce qui entraîne alors l'arrêt du turbinage et l'annulation temporaire du débit lâché par le barrage.

Une statistique des valeurs journalières de débit turbiné, déversé et vidangé, ainsi que de la cote et de la superficie du plan d'eau est représentée sur la figure E10 de l'annexe E.. Il apparaît que le débordement et la vidange se produisent respectivement pendant 11,4% et 1,1% du temps.

#### 4.1.4 Salinité des eaux de l'estuaire

On s'intéresse aux sections de concentration saline 1g/l et 5 g/l, repérées par leur distance PK à l'embouchure. Les figures E3 et E4 de l'annexe E (à comparer avec les figures 13 et 14 relatives au régime naturel) , montrent que le scénario de gestion A freine considérablement la remontée de la salinité vers l'amont, dès le mois de décembre. Alors que cette progression se poursuit en régime naturel jusqu'au mois de juin, elle s'arrête la plupart du temps entre février et mai dès que la concentration 1g/l (resp. 5 g/l) se situe aux alentours du PK 160 (resp. PK 145) avec le scénario A. Les figures E5 et E6 de l'annexe E montrent que le scénario A réduit nettement l'extension maximale annuelle de la salinité vers l'amont, alors que le retrait maximal vers l'aval des concentrations 1 g/l et 5 g/l n'est quasiment pas modifié par rapport au régime naturel.

#### 4.1.5 Régularisation du régime

##### Débits journaliers

Sur la période 1954-2001, l'utilisation de l'ouvrage aux seules fins de production d'énergie lamine fortement les pointes de crues faibles et moyennes mais n'affecte quasiment pas les crues les plus fortes (figure E7 de l'annexe E). A Simenti, Wassadou et Gouloumbo, la pointe de crue médiane du scénario A (593 ; 501 et 660 m<sup>3</sup>/s resp.) diminue d'environ 40% par rapport au régime naturel et devient très proche de la décennale faible (583 ; 536 et 645 m<sup>3</sup>/s resp.) de ce dernier. La pointe de crue décennale forte du scénario A (1340 ; 1226 et 1479 m<sup>3</sup>/s rep.) reste quasiment inchangée par rapport au régime naturel (diminution de 3%). Les débits journaliers les plus forts du régime naturel, qui représentent 30 % de l'effectif total sur la période 1954-2001, voient leur valeur diminuer aux trois stations dans le scénario A, contrairement aux 70% restants qui voient leur valeur augmenter (fig. E10 de l'annexe E).

##### Débits mensuels

Les figures E8-1 et E8-2 de l'annexe E montrent les courbes annuelles iso-fréquence de débit moyen mensuel relatives au régime naturel modélisé et au scénario A, pour les stations de Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo. Par rapport au régime naturel, le scénario A entraîne à ces stations un abaissement relatif des débits très marqué en août, septembre et octobre, et beaucoup moins fort en juillet. De novembre à juin par contre, les débits obtenus sont plus forts qu'en régime naturel. L'importance relative de la modification de régime décroît de l'amont vers l'aval. Ainsi, entre le régime naturel et le scénario A, la médiane du débit moyen de septembre diminue de 68% à Kédougou, 45% à Mako, 40% à Simenti, 42% à Wassadou aval et 34% à Gouloumbo.

## Cotes moyennes mensuelles

Le tableau E1 de l'annexe E donne pour les douze mois de l'année les valeurs isofréquence (pour  $f = 0,1 ; 0,5 ; 0,9$ ) des cotes moyennes mensuelles relatives au régime naturel et au scénario A. Le scénario A entraîne par rapport au régime naturel une augmentation de la médiane de cote moyenne de mai qui se situe selon les stations entre 1,05 m et 1,93 m. En septembre, l'abaissement se situe lui entre 1,07 m et 2,59 m. Que ce soit pour l'augmentation du niveau d'étiage ou pour l'abaissement du niveau de crue, c'est la station de Wassadou aval qui semble la plus affectée par le scénario A. Ceci s'explique par le marnage important constaté à cette station.

### 4-1-6 Influence de l'hydraulicité

La capacité utile de la retenue s'élève à 2082 hm<sup>3</sup> entre les cotes 188 et 200 m. Ce volume qui représente 69% de l'écoulement annuel moyen (1954-2001) est insuffisant pour amortir l'effet d'une diminution durable de l'hydraulicité, telle que celle qui a été constatée depuis le début des années 70. Des différences très nettes apparaissent donc dans les résultats de simulation, entre la période ancienne excédentaire et la période récente déficitaire. (cf figures E9-1 à E9-4 de l'annexe E)

Alors qu'avant 1968 des volumes significatifs sont évacués plus d'une année sur deux par la vidange de fond pour éviter le dépassement de la cote 202,20 m, ceci ne se produit plus jamais à partir de 1968.

Avant 1971, des déversements significatifs sont effectués chaque année par l'évacuateur de surface, du fait d'un dépassement durable de la cote 200. Ceci ne se produit jamais de 1976 à 1993.

Le niveau de la retenue restant toujours au dessus de la cote 188 m, aucun arrêt de production électrique n'est constaté avant 1978. Les interruptions de production les plus notables se produisent en 1993, 1987 et surtout 1984 (4 mois d'affilée sans production) et 1985 (5 mois et demi d'affilée sans production).

## 4.2 Scénario B : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 128,3 mw et une consigne de "gestion haute" limitée au mois d'août

### 4.2.1 Consignes simulées

La simulation porte sur la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 1954 au 31 décembre 2001. En dehors de la consigne de sécurité, la seule consigne de gestion envisagée ici concerne la production d'énergie, définie par les trois points suivants :

- 1- Si la cote de la retenue se situe entre 188 et 196 m, turbiner le débit nécessaire pour produire une puissance égale à une valeur  $P_{obj}$  prédéfinie.
- 2- Au mois d'août, si la cote de la retenue se situe au dessus de 196 m, utiliser les turbines à leur pleine capacité.
- 3- Si la cote de la retenue se situe au dessus de 200 m (débordement), utiliser les turbines à leur pleine capacité.

La cote initiale de la retenue et l'objectif de puissance  $P_{obj}$  sont déterminés suivant les mêmes principes que ceux décrits plus haut pour le scénario A. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Cote initiale de la retenue au 1<sup>er</sup> janvier 1954 : 198,15 m

Objectif de puissance  $P_{obj}$  : 34,30 mw

## 4.2.2 Production d'énergie

Puissance moyenne interannuelle obtenue : 45,7 mw (soit 400,4 gwh/an)

Puissance moyenne mensuelle garantie 19 mois sur 20 : 34,3 mw (soit 300,7 gwh/an)

Avec les spécifications de turbine adoptées, la consigne envisagée entraîne trois possibilités pour la puissance moyenne journalière produite : puissance nulle (3,5 % du temps) ; 34,3 mw (83,1 % du temps) ; 128,3 mw (13,4 % du temps). La répartition des puissances moyennes journalières, mensuelles et annuelles est donnée sur la figure 16, qui montre une forte variabilité de la production. L'énergie produite annuellement varie ainsi entre 134 et 581 gwh selon les années. Enfin, la figure F1 de l'annexe F montre que les mois de avril à juillet sont ceux où le risque de production inférieure à la puissance garantie (34,3 mw) est le plus élevé. Une production nulle est observée plus d'une année sur 20 en mai et presque une année sur 10 en juin.

## 4.2.3 Débits, niveau du plan d'eau, superficie du plan d'eau

Débit turbiné : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 72,9 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 212 m<sup>3</sup>/s

Débit déversé : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 12,2 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 325 m<sup>3</sup>/s

Débit vidangé : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 1,1 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 365 m<sup>3</sup>/s

Débit total lâché : minimum = 0 m<sup>3</sup>/s ; moyenne = 86,3 m<sup>3</sup>/s ; maximum = 893 m<sup>3</sup>/s

Débit moyen du surplus de pertes par évaporation dû à l'existence du plan d'eau : 9,4 m<sup>3</sup>/s

Débit moyen du stockage net dans la retenue : 0,1 m<sup>3</sup>/s

Niveau du plan d'eau : minimum = 186,73 m ; moyenne = 196,19 m ; maximum = 202,20 m

Superficie du plan d'eau : minimum = 102,6 km<sup>2</sup> ; moyenne = 157,4 km<sup>2</sup> ; maximum = 195,5 km<sup>2</sup>

Les figures F1 et F2 de l'annexe F montrent que la cote 200 est assez fréquemment dépassée entre septembre et novembre, ce qui entraîne alors des déversements non négligeables. Les années de forte hydraulité, la cote limite admissible (202,20m) peut même être atteinte entre septembre et mi-octobre, ce qui entraîne l'ouverture de la vidange de fond. A l'inverse, les années de faible hydraulité peuvent voir le niveau baisser en dessous de la cote 188 m entre mi-avril et mi juillet, ce qui entraîne alors l'arrêt du turbinage et l'annulation temporaire du débit lâché par le barrage.

Une statistique des valeurs journalières de débit turbiné, déversé et vidangé, ainsi que de la cote et de la superficie du plan d'eau est représentée sur la figure F10 de l'annexe F.. Il apparaît que le débordement et la vidange se produisent respectivement pendant 10,6% et 0,6% du temps.

## 4.2.4 Salinité des eaux de l'estuaire

Les figures F3 et F4 de l'annexe F (à comparer avec les figures 13 et 14 relatives au régime naturel) , montrent que le scénario de gestion B freine considérablement la remontée de la salinité vers l'amont, dès le mois de janvier. Alors que cette progression se poursuit en régime naturel jusqu'au mois de juin, elle s'arrête la plupart du temps entre février et mai dès que la concentration 1g/l (resp. 5 g/l) se situe aux alentours du PK 155 (resp. PK 140) avec le scénario B. Toutefois, lorsque le niveau de la retenue passe en dessous de la cote minimale d'exploitation (188 m), l'arrêt de turbinage qui se produit alors entraîne une reprise de la progression du front salé vers l'amont. Ceci permet à la concentration 1g/l (resp. 5 g/l) d'atteindre le PK 200 (resp. 170) environ une année sur dix. Les figures F5 et F6 de l'annexe F montrent que le scénario B réduit nettement l'extension maximale annuelle de la salinité vers l'amont, alors que le retrait maximal vers l'aval des concentrations 1 g/l et 5 g/l n'est quasiment pas modifié par rapport au régime naturel.

## 4.2.5 Régularisation du régime

Débits journaliers

Comme le scénario A, le scénario B lamine fortement les pointes de crues faibles et moyennes mais n'affecte quasiment pas les crues les plus fortes (figure F7 de l'annexe F). A Simenti, Wassadou et Gouloumbo, la pointe de crue médiane du scénario B (575 ; 531 et 656 m<sup>3</sup>/s resp.)

diminue d'environ 40% par rapport au régime naturel et devient très proche de la décennale faible (583 ; 536 et 645 m<sup>3</sup>/s resp.) de ce dernier. La pointe de crue décennale forte du scénario B (1312 ; 1202 et 1460 m<sup>3</sup>/s rep.) reste quasiment inchangée par rapport au régime naturel (diminution de 5%). Les débits journaliers les plus forts du régime naturel, qui représentent 39 % de l'effectif total sur la période 1954-2001, voient leur valeur diminuer aux trois stations dans le scénario B, contrairement aux 61% restants qui voient leur valeur augmenter (fig. F10 de l'annexe F).

#### Débits mensuels

Les figures F8-1 et F8-2 de l'annexe F montrent les courbes annuelles iso-fréquence de débit moyen mensuel relatives au régime naturel modélisé et au scénario B, pour les stations de Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo. Par rapport au régime naturel, le scénario B entraîne à ces stations un abaissement relatif des débits très marqué en août, septembre et octobre, et beaucoup moins fort en juillet. De décembre à juin par contre, les débits obtenus sont plus forts qu'en régime naturel., les débits de novembre restant quasiment inchangés. L'importance relative de la modification de régime décroît de l'amont vers l'aval. Ainsi, entre le régime naturel et le scénario B, la médiane du débit moyen de septembre diminue de 71% à Kédougou, 59% à Mako, 41% à Simenti, 43% à Wassadou aval et 34% à Gouloumbo.

#### Cotes moyennes mensuelles

Le tableau F1 de l'annexe F donne pour les douze mois de l'année les valeurs isofréquence (pour f = 0,1 ; 0,5 ; 0,9) des cotes moyennes mensuelles relatives au régime naturel et au scénario B. Par rapport au régime naturel, le scénario B entraîne une augmentation de la médiane de cote moyenne de mai qui se situe selon les stations entre 1,16 m et 2,13 m. En septembre, l'abaissement se situe lui entre 1,17 m et 2,66 m. Que ce soit pour l'augmentation du niveau d'étiage ou pour l'abaissement du niveau de crue, c'est la station de Wassadou aval qui semble la plus affectée par le scénario B.

### **4-2-6 Influence de l'hydraulicité**

Comme pour le scénario A, le scénario B fait apparaître des différences très nettes dans les résultats de simulation, entre la période ancienne excédentaire et la période récente déficitaire.(cf figures F9-1 à F9-4 de l'annexe F)

Alors qu'avant 1968 des volumes significatifs sont évacués presque une année sur deux par la vidange de fond pour éviter le dépassement de la cote 202,20 m, ceci ne se produit plus jamais à partir de 1968.

Avant 1971, des déversements significatifs sont effectués chaque année par l'évacuateur de surface, du fait d'un dépassement durable de la cote 200. Ceci ne se produit jamais de 1976 à 1993.

Le niveau de la retenue restant toujours au dessus de la cote 188 m, aucun arrêt de production électrique n'est constaté avant 1984. Les interruption de production les plus notables se produisent en 1994, 1993, 1988, 1987 et surtout 1984 (4 mois d'affilée sans production) et 1985 (7 mois d'affilée sans production).

## **4.3 Scénario C : simple demande de production d'énergie, pour une puissance installée de 128,3 mw, une consigne de "gestion haute" limitée au mois d'août et l'arrêt de turbinage en fin d'étiage**

### **4.3.1 Consignes simulées**

La simulation porte sur la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 1954 au 31 décembre 2001. En dehors de la consigne de sécurité applicable en permanence, une unique consigne de gestion est envisagée, identique à celle du scénario B. Cette consigne est appliquée sur la période suivante :

du 1<sup>er</sup> juillet au 15 juin : scénario C1

du 1<sup>er</sup> juillet au 30 avril : scénario C2

du 1<sup>er</sup> juillet au 15 avril : scénario C3

du 1<sup>er</sup> juillet au 31 mars : scénario C4

En dehors de la période d'application de cette consigne relative à la production d'énergie, aucun lâcher de débit destiné à satisfaire un objectif de gestion n'est envisagé.

#### **4.3.2 Résultats**

La suspension du turbinage en fin d'étiage entraîne chaque année une reprise de la progression de la salinité vers l'amont de l'estuaire. La production d'énergie annuelle est quant à elle affectée différemment selon les années.

La suspension systématique de production permet en effet de turbiner les volumes économisés dans de meilleures conditions de chute, ainsi que de diminuer la fréquence des arrêts prolongés de production dus à l'abaissement du plan d'eau en dessous du niveau minimal d'exploitation. Tout ceci tend parfois à améliorer la production annuelle en période de faible hydraulité. Les risques de déversement sont par contre accrus, ce qui peut grever cette production, tout particulièrement en période de forte hydraulité.

Comme le montrent le tableau G1 et la figure G1 de l'annexe G, la suspension du turbinage en fin d'étiage entraîne une diminution de l'énergie moyenne interannuelle produite croissante avec la durée de la suspension. Pour les durées retenues, cette diminution se situe entre 1 et 2% par rapport à la production du scénario B. Le niveau de garantie de la puissance  $P_{obj}$  demandée (34,30 mw) chute de façon importante, passant de 95% pour le scénario B à 82% pour le scénario C4.

La figure G2 montre que par rapport au scénario B, la remontée de la salinité vers l'amont entraînée par l'arrêt du turbinage est maximale à la fin du mois de juin et s'annule au plus tard vers fin août. Plus l'interruption est longue, plus la remontée maximale annuelle de la salinité par rapport au scénario B est importante et régulière (figures G3 et G4 de l'annexe G), avec une disparition progressive des remontées exceptionnelles engendrées par les arrêts prolongés de production dus à l'épuisement de la réserve utile du barrage. Avec deux mois d'interruption de turbinage, le scénario C4 voit le front salé à 1 g/l (resp. 5 g/l) progresser la plupart du temps de 50 km (resp. 30 km) supplémentaires vers l'amont par rapport au scénario B (tableau G1).

#### **4.4 Modifications de salinité de l'estuaire induites par un rehaussement éventuel du niveau de l'océan.**

On fait ici l'hypothèse d'un rehaussement de 20 cm du niveau moyen de l'océan par rapport au niveau actuel. Pour évaluer les conséquences d'un tel bouleversement sur la salinité du fleuve Gambie, la méthode adoptée est la suivante :

- 1- modification des paramètres du logiciel SALNSTAT décrivant la géométrie de l'estuaire (accroissement de 20 cm des profondeurs, et de 2,2% de la section à l'embouchure)
- 2- application du logiciel sur les débits modélisés à Gouloumbo relatifs au régime naturel et au scénario B
- 3- comparaison des résultats obtenus concernant la position des fronts salés à 1 g/l et 5 g/l avec ceux qui ont été présentés plus haut pour le niveau actuel de l'océan.

Les résultats obtenus montrent qu'en régime naturel, le rehaussement de 20 cm du niveau de l'océan permettrait à l'eau salée de remonter un peu plus vers l'amont qu'à l'heure actuelle, surtout en période de faible hydraulité. Selon les années, le PK maximal annuel de la concentration 1 g/l augmenterait de 2 à 8 km (moyenne 4 km) par rapport à la situation actuelle. Celui de la concentration 5 g/l augmenterait entre 3 et 6 km (moyenne 4 km). L'allure générale du cycle annuel de déplacement des concentrations dans l'estuaire n'est pas affectée par le rehaussement de l'océan.

Pour le régime artificiel (scénario B), le rehaussement de 20 cm laisse également prévoir une remontée plus prononcée de la salinité vers l'amont. L'impact par rapport à la situation actuelle est toutefois moindre que pour le régime naturel, avec une augmentation du PK maximal annuel des concentrations 1 g/l et 5 g/l ne dépassant jamais 5 km.

Comme le montre la figure G5 de l'annexe G, un rehaussement de 20 cm du niveau de l'océan aurait donc un impact assez négligeable sur la salinité de l'estuaire, comparé à l'impact inverse du barrage de Sambangalou :

- Le rehaussement de l'océan fait progresser l'intrusion de la salinité de moins de 10 km vers l'amont .
- En moyenne, l'intrusion maximale annuelle de la salinité dans l'estuaire pour la concentration 1 g/l (resp. 5 g/l) est repoussée 77 km (resp. 52 km) vers l'aval du fait de la régularisation de débit provoquée par le barrage de Sambangalou.

cours d'eau	Gambie	Gambie	Diaguery	Gambie	Tiokoye	Diarha	Niokolokoba	Gambie	Koulountou	Gambie	année
station	Sambangalou	Kedougou	pont	Mako	pont	pont	pont	Wasadou aval	gué du PNNK	Gouloumbo	
débit moyen annuel (m <sup>3</sup> /s)	107.4	112.7	9.7	119.9	11.2	8.8	14.3	162.5	25.9	195.6	1970
	66.4	69.6	6.1	79.9	8.0	6.2	8.2	118.0	20.7	151.2	1971
	66.6	69.9	4.3	72.1	4.7	4.7	3.1	91.3	15.7	115.3	1972
	75.2	78.9	8.6	95.2	9.7	8.1	5.6	132.4	22.6	163.4	1973
	105.0	110.1	12.8	128.4	15.7	15.0	15.8	214.0	44.5	269.7	1974
	82.2	86.3	10.1	107.2	10.2	9.6	6.6	155.7	35.0	215.4	1975
	75.4	79.1	5.4	84.1	6.5	7.2	2.1	104.0	30.3	143.7	1976
	52.5	55.1	4.2	63.2	5.2	2.4	2.8	77.2	8.3	88.9	1977
	89.3	93.7	10.4	116.8	11.2	7.9	16.6	187.2	37.9	237.5	1978
	48.8	51.2	4.3	58.4	7.0	6.1	4.4	84.1	20.0	114.3	1979
	79.5	83.4	7.4	97.3	9.8	5.8	2.7	121.9	15.5	150.8	1980
	65.3	68.5	7.1	79.7	5.2	3.7	7.7	105.1	18.8	126.7	1981
	60.0	63.0	2.9	68.2	7.7	5.4	2.0	88.7	19.5	115.3	1982
	36.7	38.5	1.1	41.1	2.6	2.1	0.7	50.5	7.0	57.4	1983
	32.2	33.8	2.4	39.1	7.1	5.2	2.3	62.7	18.8	88.1	1984
	78.8	82.7	5.2	96.3	10.2	9.0	3.6	139.9	29.0	173.1	1985
	45.6	47.8	3.7	55.0	4.8	3.8	3.8	77.1	17.9	99.4	1986
	54.8	57.5	3.0	62.7	5.3	3.4	7.1	83.0	17.3	99.4	1987
	64.5	67.7	3.5	76.2	8.2	7.1	2.2	111.7	27.9	143.6	1988
	75.9	79.6	7.5	94.9	6.9	2.8	1.2	128.1	28.9	157.3	1989
	59.5	62.5	2.4	69.8	4.8	5.3	2.0	82.8	14.7	95.1	1990
	64.5	67.7	6.7	79.1	4.2	7.1	2.2	103.5	19.0	118.4	1991
	48.9	51.4	3.8	56.1	3.7	4.0	3.1	75.5	17.9	91.1	1992
	55.2	57.9	2.7	62.9	6.0	5.1	4.0	79.0	13.3	90.9	1993
109.8	115.3	14.6	147.0	14.8	11.9	10.0	200.5	38.1	234.8	1994	
84.8	89.0	11.8	122.1	11.9	9.5	8.0	151.6	24.2	171.0	1995	
74.1	77.8	8.1	100.7	9.2	7.3	6.3	140.8	26.1	174.5	1996	
101.9	106.9	8.9	127.1	9.5	7.8	5.8	161.5	34.2	210.3	1997	
91.2	95.7	9.4	112.8	9.4	11.1	3.2	142.5	28.0	180.2	1998	
91.6	96.2	9.7	112.7	14.8	13.3	7.2	170.2	41.3	239.2	1999	
69.7	73.1	7.8	85.1	12.5	9.4	1.8	121.1	28.1	164.1	2000	
77.5	81.4	6.7	91.1	9.5	6.4	3.3	108.8	23.5	145.1	2001	
débit moyen interannuel 1970-2001 ( m <sup>3</sup> /s)	71.6	75.1	6.6	87.6	8.4	7.0	5.3	119.8	24.1	150.6	
débit moyen interannuel 1971-1996 ( m <sup>3</sup> /s)	67.4	70.7	6.2	82.8	7.7	6.4	5.2	114.1	22.7	141.8	
coefficient de variation du débit moyen annuel	0.277	0.277	0.508	0.307	0.403	0.447	0.776	0.342	0.381	0.351	
écoulement de 1970 à 2001 : Volume <sub>mesuré</sub> / Volume <sub>total</sub>	0.000	0.987	0.639	0.905	0.745	0.664	0.650	0.674	0.080	0.802	
proportion de débits journaliers mesurés	0.000	0.988	0.633	0.853	0.689	0.565	0.468	0.726	0.128	0.265	
écoulement de 1970 à 2001 : Volume <sub>station</sub> / Volume <sub>Gouloumbo</sub>	0.475	0.499	0.044	0.581	0.055	0.046	0.035	0.795	0.160	1.000	

tableau 1 : modules annuels et interannuels de l'écoulement aux stations hydrométriques du haut bassin de la Gambie. Statistiques sur l'origine des données (observées ou reconstituées)

cours d'eau	Gambie	Gambie	Diaguery	Gambie	Tiokoye	Diarha	Niokolokoba	Gambie	Koulountou	Gambie	mois
station	Sambangalou	Kedougou	pont	Mako	pont	pont	pont	Wasadou aval	gué du PNNK	Gouloumbo	
débit moyen mensuel : moyenne interannuelle sur la période 1970-2001 (m <sup>3</sup> /s)	9.8	10.3	0.3	11.2	0.3	0.4	0.1	12.2	2.3	15.3	1
	4.8	5.1	0.1	5.2	0.1	0.2	0.1	5.4	1.0	6.8	2
	1.6	1.7	0.1	1.8	0.1	0.1	0.1	1.9	0.6	2.8	3
	0.3	0.3	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.7	0.5	1.2	4
	0.3	0.3	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.3	0.7	1.0	5
	8.7	9.1	0.6	8.0	1.2	0.7	0.9	6.2	1.8	7.0	6
	71.9	75.5	3.9	78.0	8.0	6.4	5.2	87.7	16.1	93.0	7
	253.6	266.1	22.7	303.1	30.7	23.8	18.8	379.6	73.7	435.6	8
	304.8	319.9	35.1	396.2	40.2	32.8	26.3	566.2	107.5	694.0	9
	137.9	144.7	12.4	170.5	15.2	14.4	9.7	276.8	60.8	406.2	10
	43.4	45.6	3.0	50.9	3.1	3.2	1.5	70.3	16.8	105.5	11
	18.2	19.1	0.9	21.3	0.9	1.1	0.4	25.1	6.0	33.3	12

tableau 2 : valeurs moyennes interannuelles des débits mensuels sur la période 1970 – 2001

annee	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece	moy.
1954	33.6	19.9	11.5	1.6	4.1	85.1	150.2	407.8	758.7	365.6	150.0	81.9	172.9
1955	49.8	35.7	23.7	11.6	9.4	39.4	190.4	594.4	537.5	282.0	141.8	80.4	167.2
1956	50.9	36.5	22.9	9.3	7.0	24.2	178.9	424.7	734.4	459.5	124.8	65.0	178.5
1957	43.3	30.5	18.7	7.2	0.8	56.5	158.1	443.8	456.8	327.9	141.9	75.2	147.5
1958	45.5	31.0	18.6	6.8	7.2	41.7	164.5	546.7	435.2	258.9	162.1	95.3	152.0
1959	57.0	37.5	27.2	14.7	7.5	31.2	159.8	417.9	491.1	213.0	103.6	56.9	135.3
1960	39.1	26.9	15.0	5.0	0.9	45.7	198.5	343.5	394.6	213.2	101.0	53.7	120.1
1961	37.1	26.7	14.6	3.7	0.2	57.2	215.1	465.8	567.0	187.2	90.1	57.1	144.0
1962	40.8	21.5	7.6	1.4	0.4	47.4	148.5	426.9	558.1	238.8	109.9	57.5	138.7
1963	35.1	24.8	17.8	1.9	0.1	1.0	165.8	370.2	408.3	298.3	109.1	52.2	124.5
1964	34.3	19.4	6.9	0.3	0.0	79.0	195.2	412.4	656.2	237.5	114.0	66.3	151.9
1965	43.3	29.3	16.2	6.1	0.6	42.4	138.1	413.4	530.0	317.6	141.0	69.9	146.3
1966	47.7	32.5	19.8	10.5	9.9	25.8	117.0	276.3	453.7	514.8	151.3	75.8	145.4
1967	49.1	33.2	20.3	13.3	6.0	56.3	172.4	363.0	602.5	370.8	142.0	80.3	159.6
1968	54.2	41.2	25.7	11.0	13.3	20.7	67.4	186.8	366.1	167.8	65.2	42.0	88.4
1969	27.1	14.6	4.5	0.0	0.0	31.4	153.2	320.7	472.0	412.2	131.8	58.8	136.3
1970	17.0	8.9	4.6	1.6	0.4	13.5	124.6	512.3	422.5	110.6	43.0	21.7	107.4
1971	12.5	6.6	2.8	1.5	1.6	5.6	50.8	275.5	303.2	88.6	29.8	14.5	66.4
1972	7.4	3.4	1.0	0.1	0.0	31.9	83.0	273.1	233.8	102.4	38.6	21.3	66.6
1973	10.9	5.3	1.9	0.1	0.6	8.4	67.9	354.3	311.6	88.0	32.6	15.5	75.2
1974	8.3	4.1	1.3	0.1	0.0	8.2	133.2	424.5	408.2	193.0	48.7	21.5	105.0
1975	11.8	6.4	2.7	0.6	0.0	8.0	85.3	167.8	495.6	149.7	39.9	18.1	82.2
1976	10.0	5.4	2.0	0.4	0.0	10.2	124.3	251.9	204.8	176.5	87.2	27.3	75.4
1977	14.7	7.5	3.5	1.6	0.7	11.2	20.8	105.7	317.9	103.0	30.2	13.7	52.5
1978	7.3	3.4	0.7	0.0	0.0	7.4	42.4	289.0	378.3	248.1	64.9	25.2	89.3
1979	12.6	6.2	3.0	0.4	0.1	9.9	49.4	135.9	155.6	150.6	42.4	16.0	48.8
1980	8.5	3.8	1.1	0.0	0.0	15.1	109.6	399.2	299.1	70.7	28.5	14.0	79.5
1981	7.0	3.5	0.7	0.1	4.1	5.6	53.7	282.9	294.2	81.6	31.6	14.6	65.3
1982	7.0	3.8	0.9	0.0	0.0	3.7	57.5	162.9	297.3	133.0	36.1	16.1	60.0
1983	8.4	4.0	1.0	0.1	0.0	4.5	33.0	109.9	171.9	76.4	19.7	9.9	36.7
1984	5.3	2.1	0.3	0.0	0.0	20.5	91.7	75.7	73.1	91.5	16.3	7.5	32.2
1985	3.5	1.3	0.2	0.0	0.0	0.5	94.9	332.1	356.4	107.1	30.7	13.7	78.8
1986	7.8	4.2	1.3	0.1	0.4	8.9	43.7	110.4	205.2	115.9	32.2	14.9	45.6
1987	8.2	4.0	1.0	0.0	0.0	8.0	23.8	112.6	257.5	184.6	39.9	15.4	54.8
1988	8.4	3.8	0.9	0.0	0.0	0.2	68.5	250.6	294.3	95.5	35.1	15.0	64.5
1989	7.7	3.7	0.7	0.0	0.0	4.9	53.8	288.1	362.1	130.7	38.4	17.1	75.9
1990	9.2	4.4	1.1	0.0	0.0	4.9	68.6	238.9	220.8	116.5	32.0	13.5	59.5
1991	6.8	2.5	0.4	0.0	0.0	0.0	73.2	297.4	225.1	112.9	34.7	15.3	64.5
1992	8.3	3.9	0.6	0.0	0.0	2.5	93.8	155.8	208.0	75.8	25.3	11.7	48.9
1993	5.7	2.1	0.2	0.0	0.0	1.2	57.3	178.3	294.2	80.4	28.8	12.1	55.2
1994	6.4	2.5	0.3	0.0	0.1	9.8	100.8	253.9	504.5	276.7	120.4	38.5	109.8
1995	18.5	10.9	4.8	1.7	0.0	3.9	65.6	382.0	346.2	122.0	37.6	18.6	84.8
1996	9.9	4.4	1.3	0.1	0.0	5.5	50.8	236.9	391.6	129.3	42.3	18.0	74.1
1997	9.7	4.8	1.4	0.1	2.3	44.8	119.5	390.3	352.7	195.4	66.2	27.7	101.9
1998	15.4	8.2	3.9	0.7	0.0	5.0	67.1	288.8	429.0	196.8	53.8	21.6	91.2
1999	11.2	5.6	1.9	0.1	0.0	2.4	50.6	248.9	352.9	302.0	85.6	32.6	91.6
2000	15.8	8.0	3.3	0.6	0.0	7.3	70.6	244.1	223.8	176.9	60.1	22.2	69.7
2001	11.3	5.8	1.8	0.1	0.0	3.8	72.2	286.1	363.1	129.5	36.6	16.1	77.5
moy. 1970-2001	9.8	4.8	1.6	0.3	0.3	8.7	71.9	253.6	304.8	137.9	43.4	18.2	71.6
moy. 1954-2001	20.8	12.8	6.7	2.4	1.6	20.0	101.6	302.7	378.7	193.3	70.2	34.4	95.8

tableau 3 : débits moyens mensuels (m<sup>3</sup>/s) de la Gambie à Sambangalou déduits des débits moyens journaliers, sur la période 1954-2001

	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nove.	déce.
évaporation (m)	0.130	0.136	0.186	0.192	0.204	0.173	0.173	0.142	0.130	0.130	0.087	0.080
précipitation (m)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.105	0.204	0.278	0.223	0.087	0.006	0.000

tableau 4 : valeurs moyennes mensuelles des pertes par évaporation et des précipitations à Goergetown, d'après Savenige (1988)

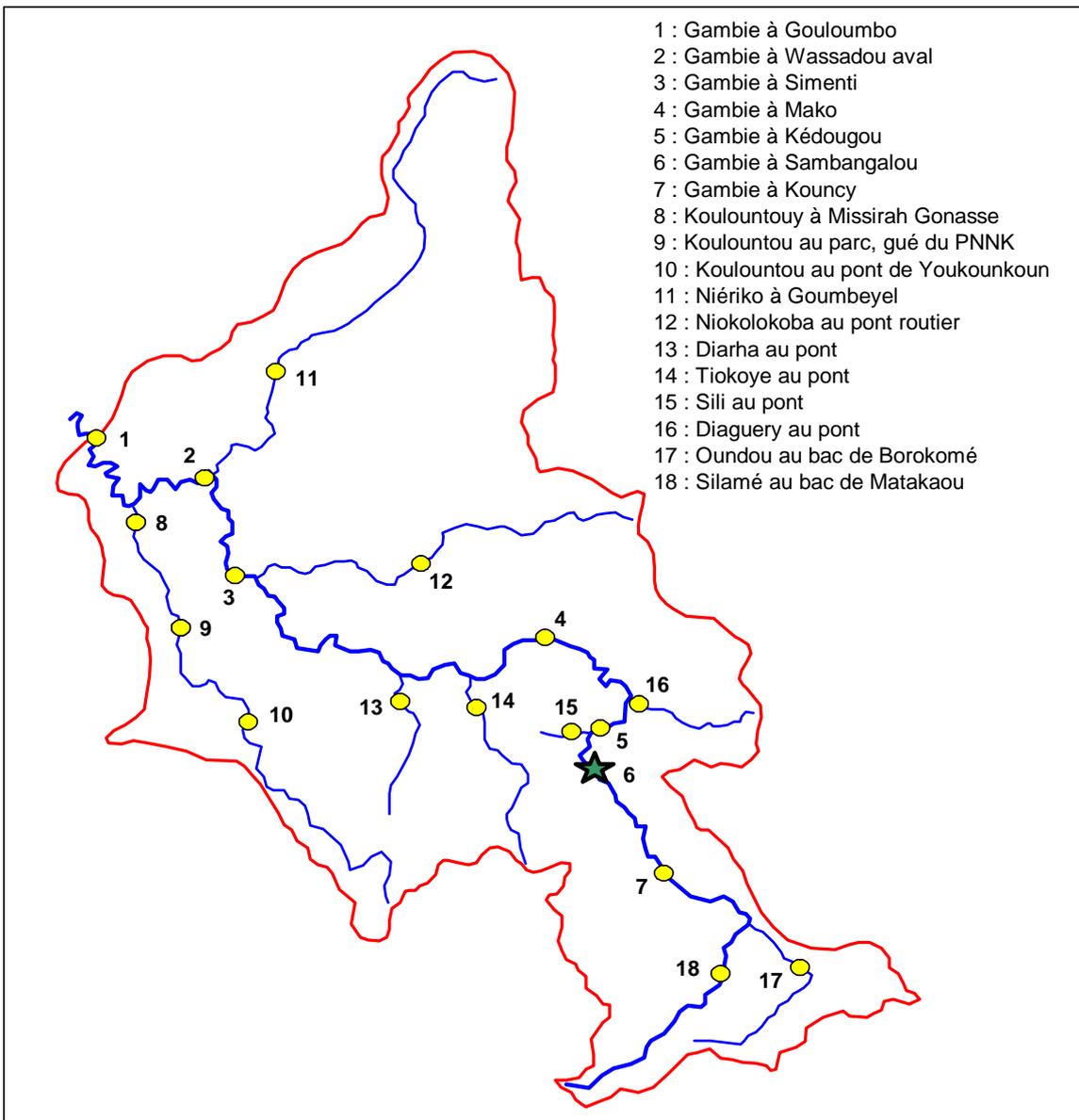


Figure 1 : plan de situation des principales stations hydrométriques sur le haut bassin de la Gambie, à l'amont de Gouloumbo

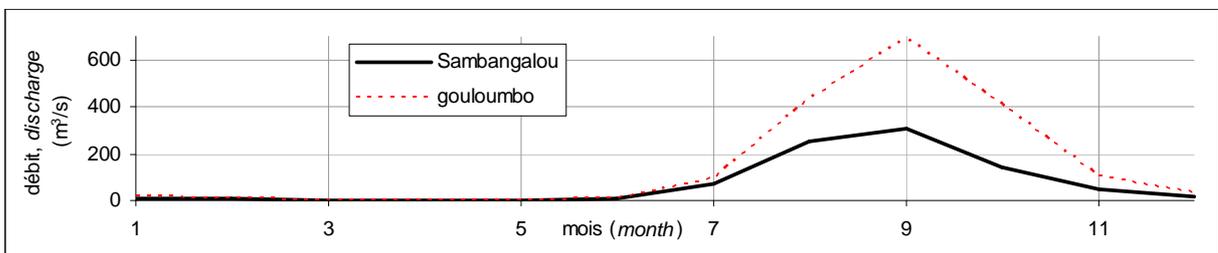


Figure 2 : débit moyen mensuel de la Gambie à Sambangalou et Gouloumbo. Moyenne sur la période 1970—2001

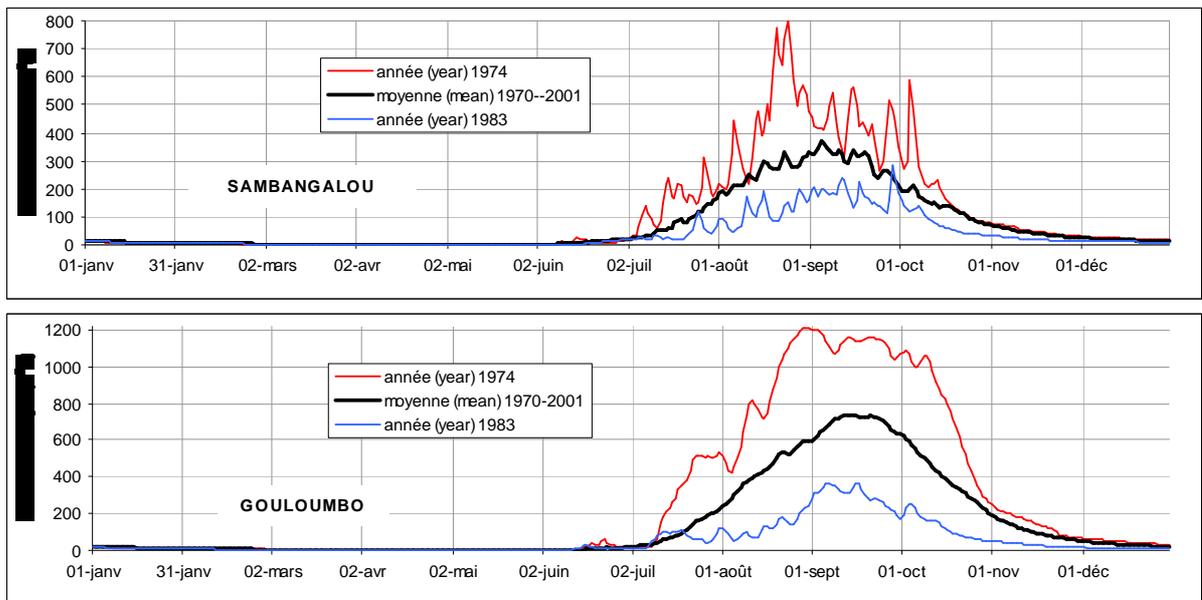


figure 3 : débit moyen journalier de la Gambie à Sambangalou et Gouloumbo. Années 1974 et 1983 et valeurs moyennes sur la période 1970--2001.

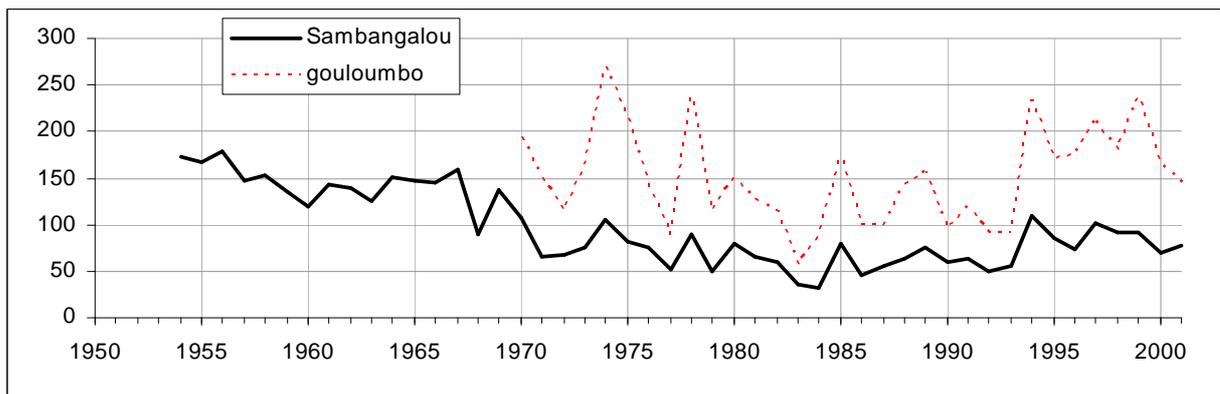


figure 4 : évolution du débit moyen annuel ( $m^3/s$ ) de la Gambie à Sambangalou et Gouloumbo, entre 1954 et 2001

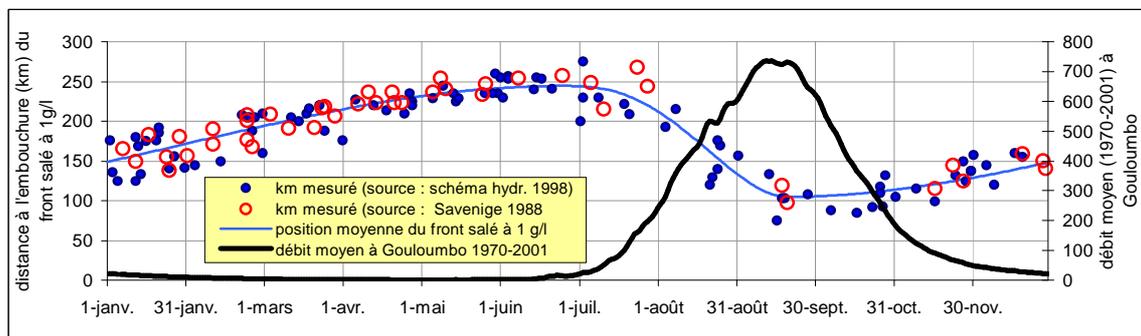


figure 5 : déplacement annuel du lieu de concentration saline à 1 g/l (137 points de mesure entre 1972 et 1997), comparé au débit moyen écoulé à Gouloumbo (1970-2001)

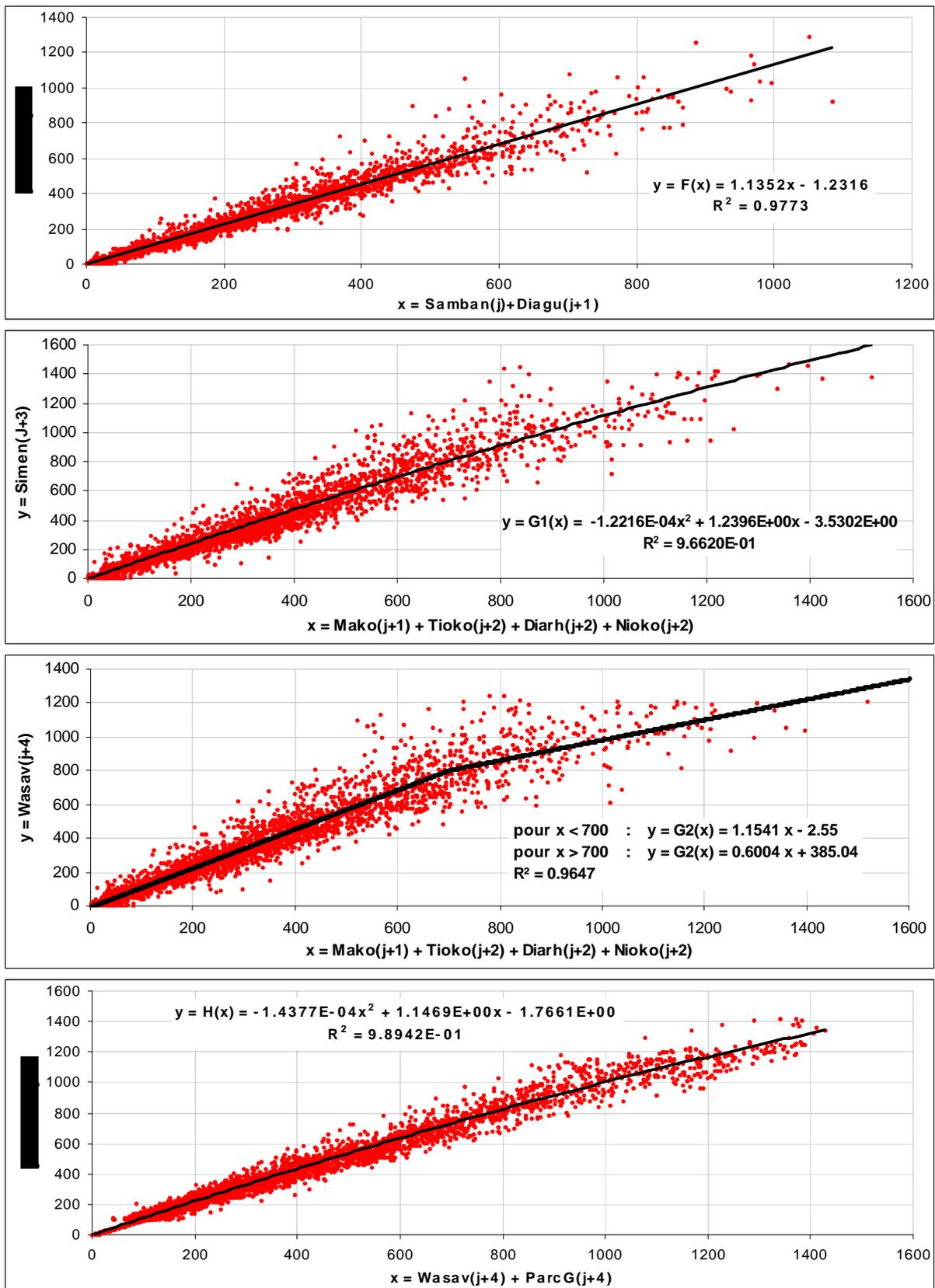


figure 6 : relations moyennes F, G1, G2 et H décrivant la propagation des débits naturels ( $m^3/s$ ) entre Sambangalou, Mako, Simenti, Wassadou et Gouloumbo, établies sur la période 1970-2001

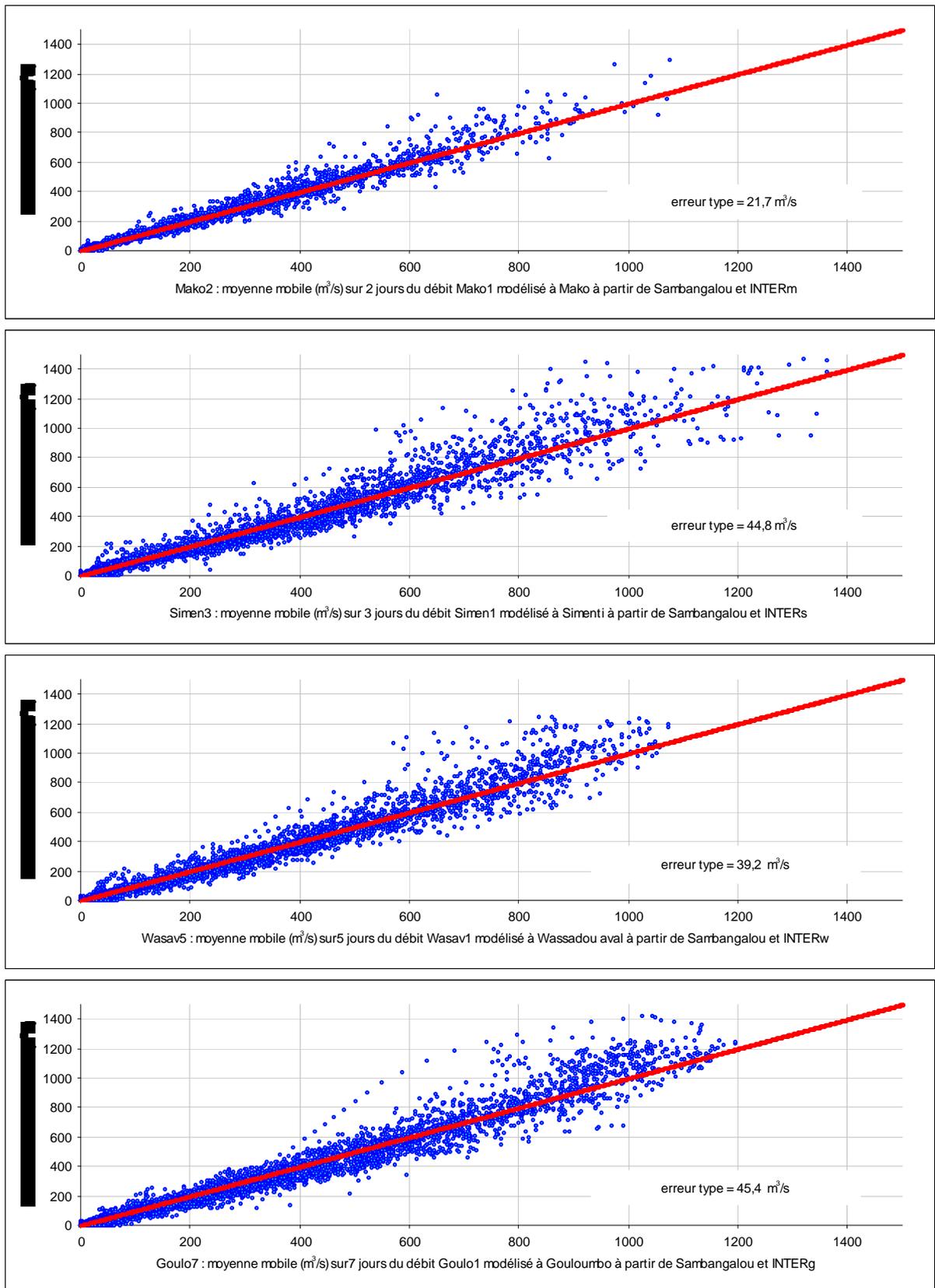


figure 7 : comparaison sur la période 1970-2001 des débits journaliers naturels observés et modélisés à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo

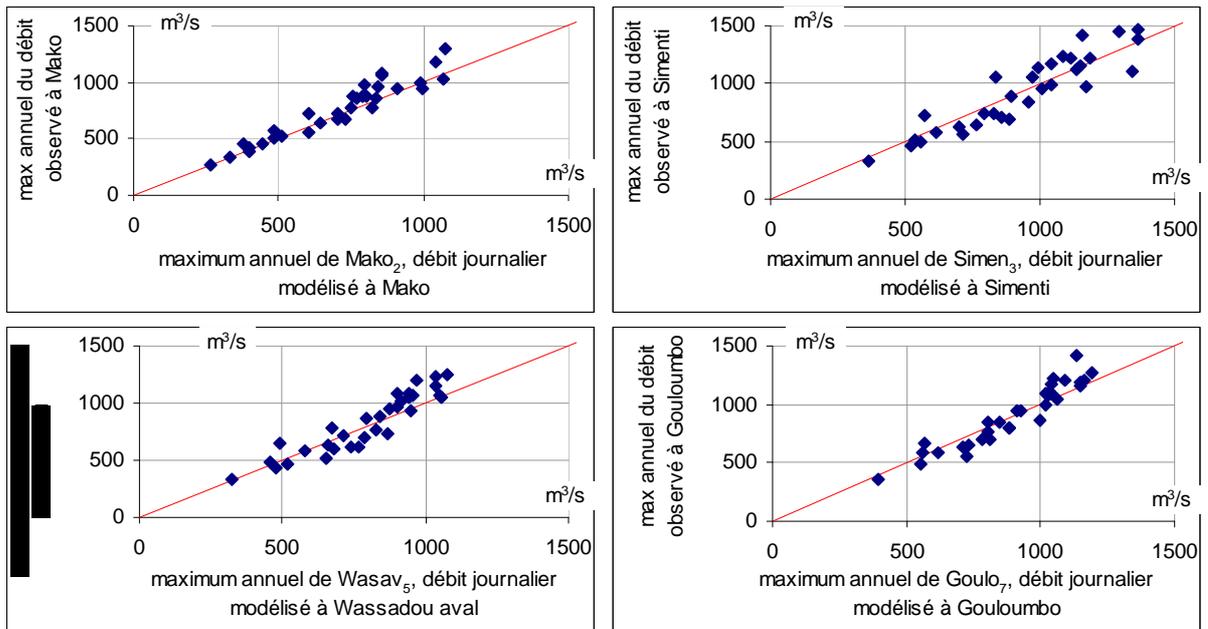


figure 8 : comparaison sur la période 1970-2001, des maximums annuels de débit journalier naturel observés et modélisés à Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo

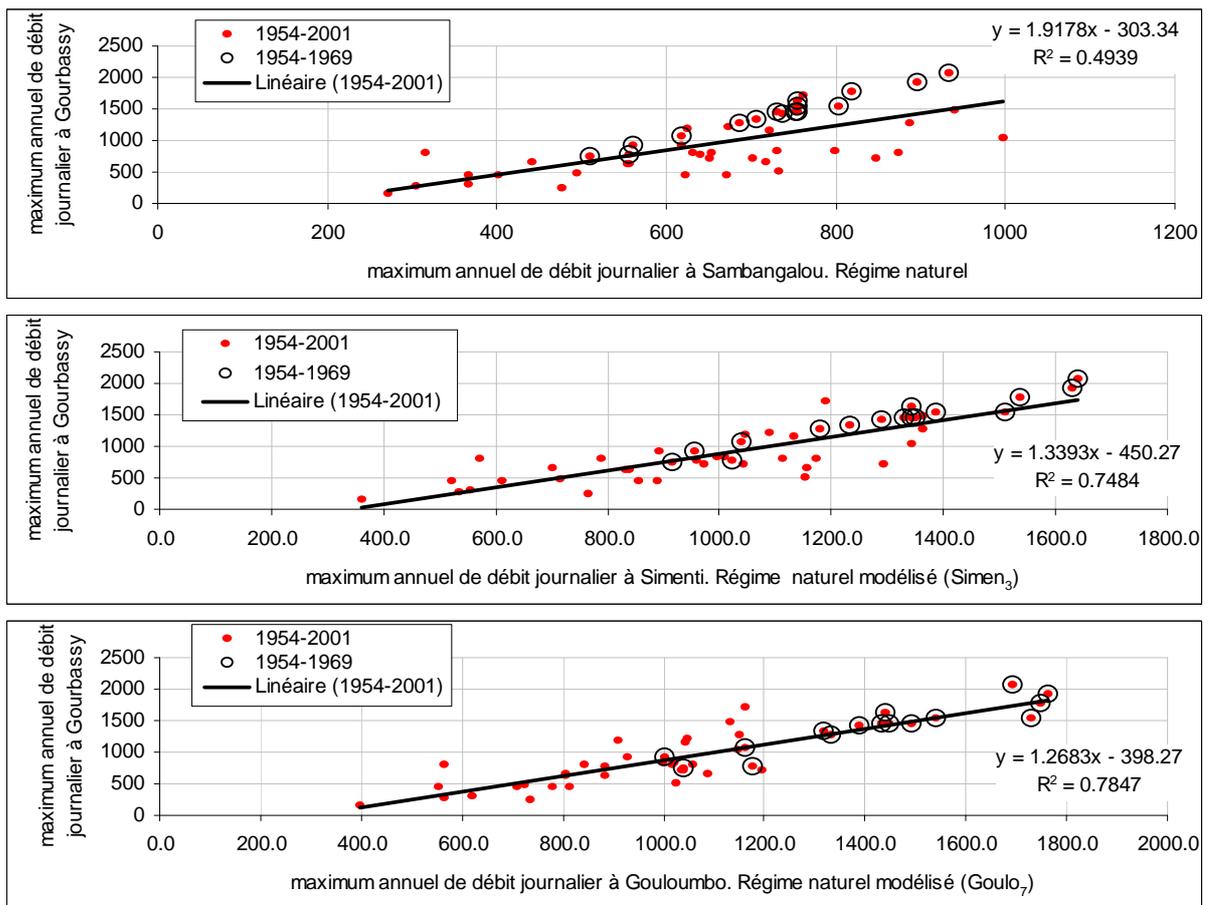


figure 9 : Relation entre les maximums annuels (m³/s) de débit journalier naturel de la Falémé à Gourbassy et ceux de la Gambie à Sambangalou, Simenti (modélisé) et Gouloumbo (modélisé)

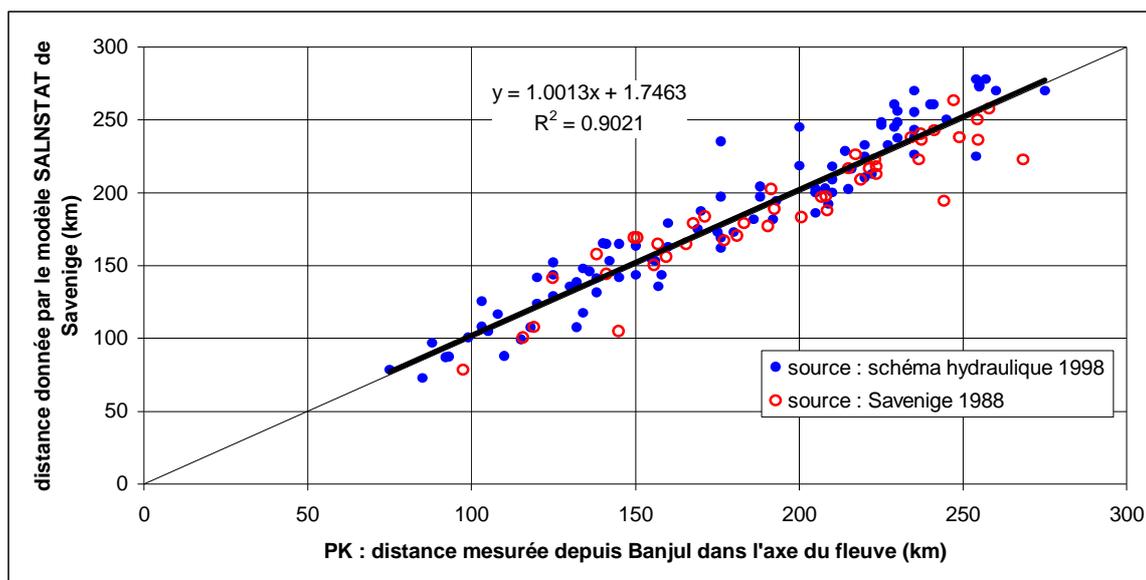


figure 10 : comparaison des valeurs mesurées et modélisées par SALNSTAT (à partir des débits observés à Gouloumbo), concernant la position du front salé à 1g/l sur 137 points de la période 1972-1997.

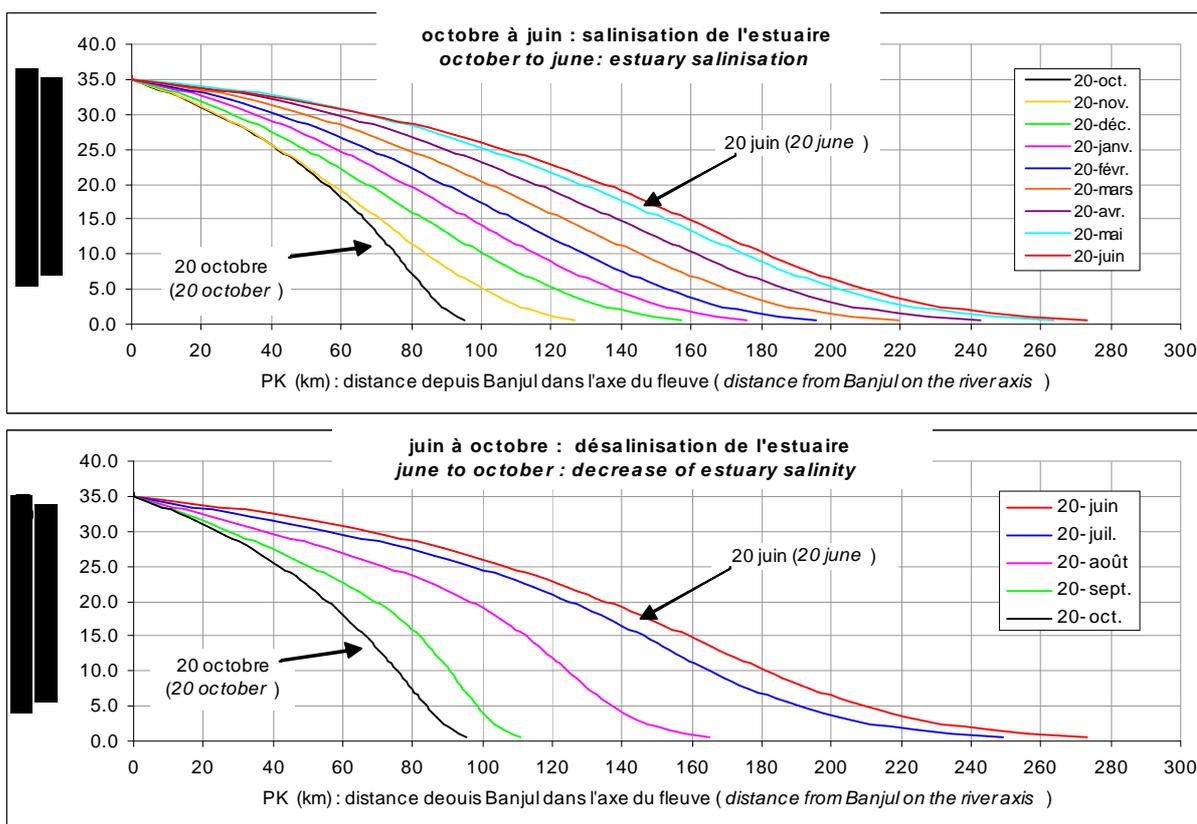


figure 11 : moyennes des profils de salinité évaluées sur la période 1970-2001 en régime naturel avec le logiciel SALNSTAT (à partir des débits observés à Gouloumbo)

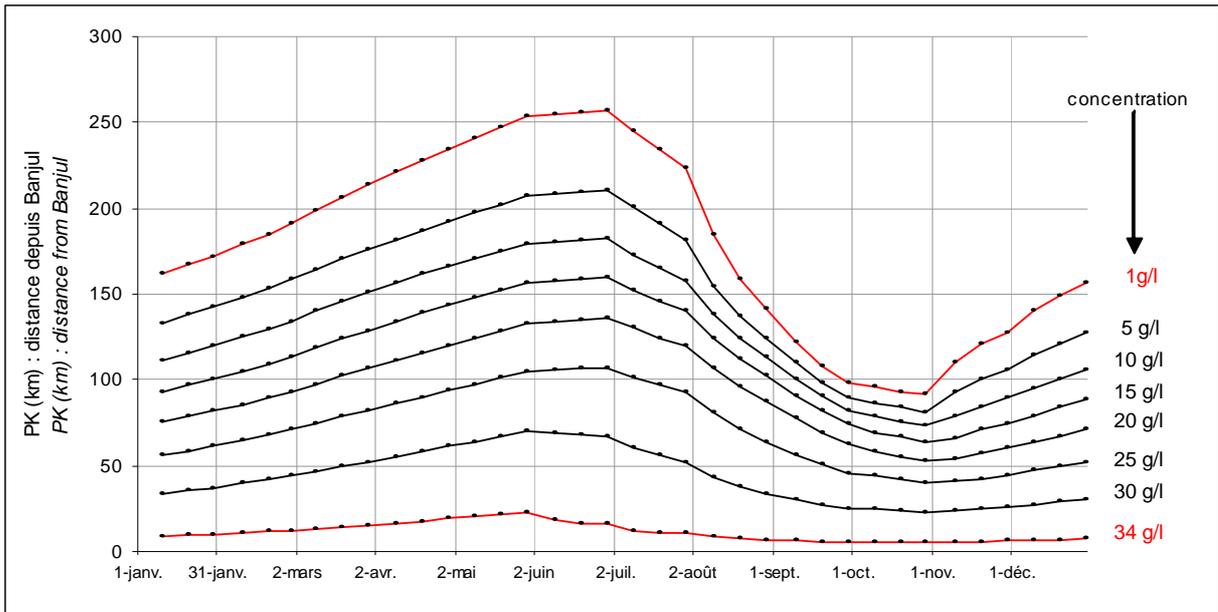


figure 12 : déplacements moyens de fronts salés à différentes concentrations en fonction de la date, évalués sur la période 1970-2001 avec le logiciel SALNSTAT (à partir des débits observés à Gouloumbo).

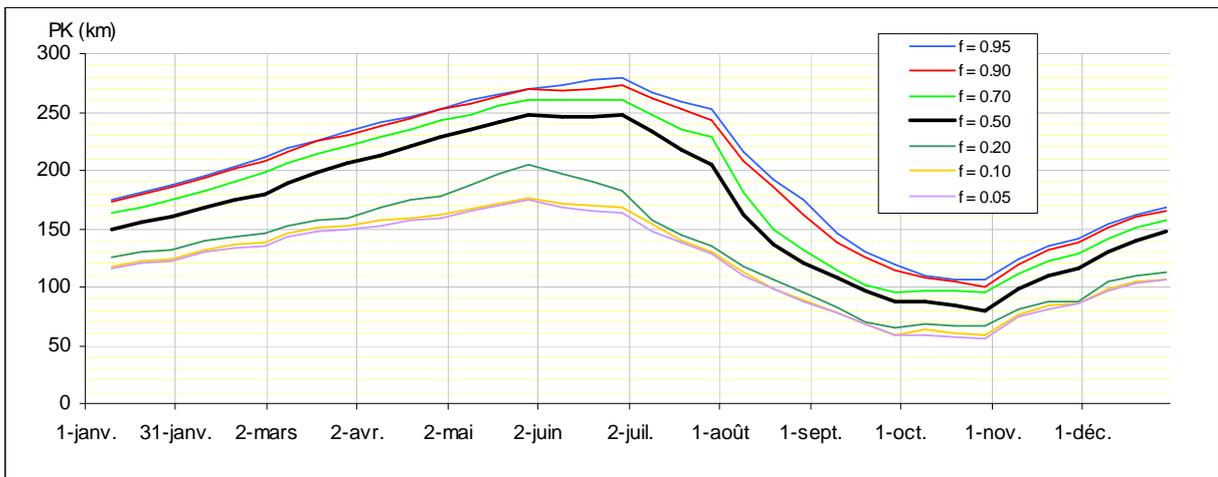


figure 13 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 1g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences f au non dépassement. Régime naturel modélisé (Simulgam + Salnstat) à partir de Sambangalou, période 1954-2001

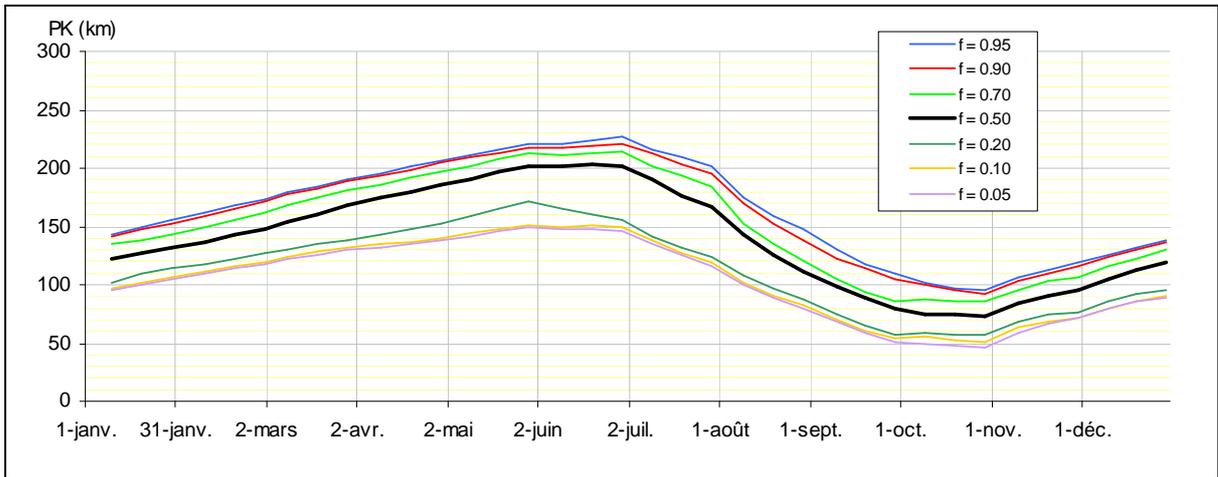


figure 14 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 5g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences  $f$  au non dépassement. Régime naturel modélisé (Simulgam + Salnstat) à partir de Sambangalou, période 1954-2001

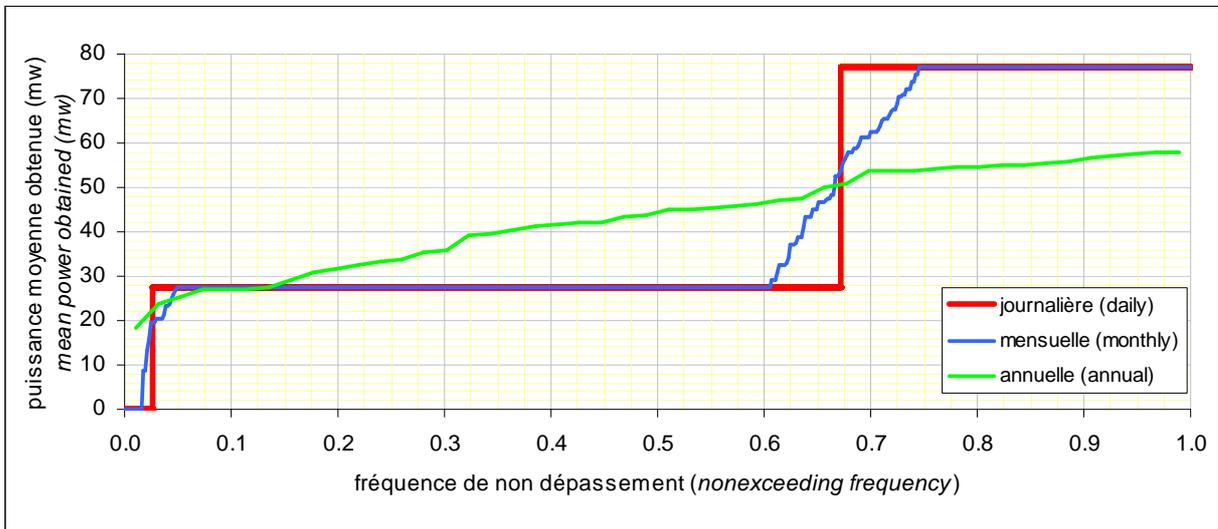


figure 15 : fonctions de répartition des puissances journalières, mensuelles et annuelles obtenues pour le scénario A

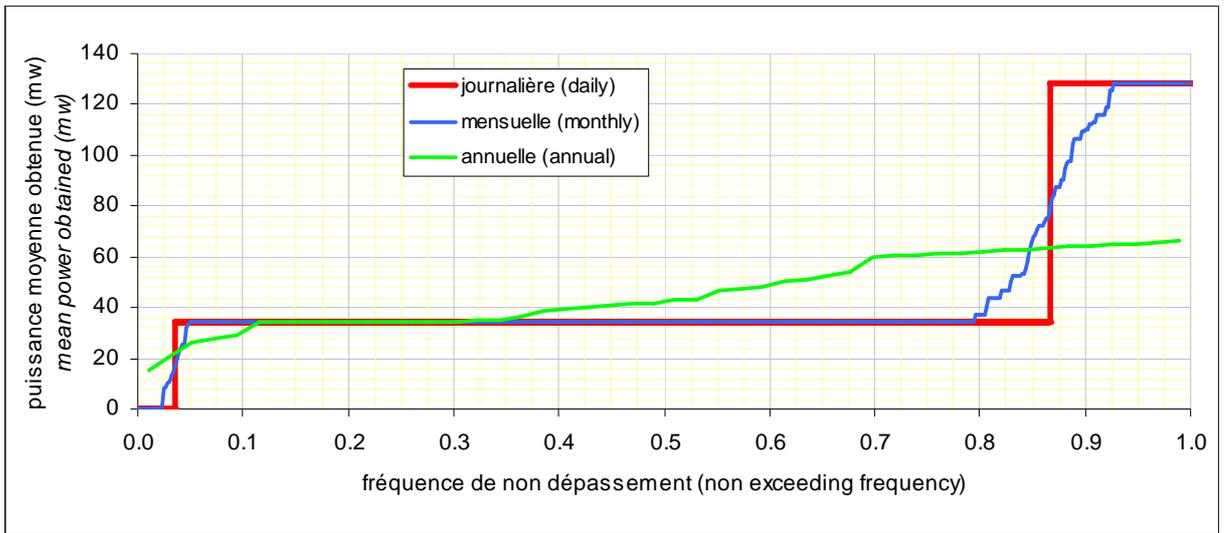


figure 16 : fonctions de répartition des puissances journalières, mensuelles et annuelles obtenues pour le scénario B

## ***Annexe A : Extraits de l'annexe 1 (spécifications techniques) du contrat de juin 2002 passé entre Coyne et Bellier et l'IRD.***

### **Activité H4: Simulation de l'exploitation de la retenue et de la production énergétique (section 6.2.2.9 des termes de référence généraux)**

Les calculs de simulation et d'optimisation de la gestion du réservoir de Sambangalou seront effectués par Coyne et Bellier. Ces calculs seront faits au pas de temps mensuel, en principe avec le logiciel SIM ou équivalent, sur la période 1971 – 2001 éventuellement étendue par la période 1904 - 1970. Ils seront réalisés pour les 3 ou 4 variantes de hauteur de retenue normale envisagées au cours des études préliminaires, à l'issue desquelles une seule valeur sera adoptée pour l'étude de faisabilité.

Afin d'assurer la continuité des calculs entre l'amont et l'aval du barrage, il sera sans doute utile que certains calculs effectués avec les logiciels de Coyne et Bellier soient répétés avec les logiciels de l'IRD.

Comme dans l'étude du Schéma Directeur Hydraulique du fleuve Gambie, le logiciel SIMULGAMB sera utilisé pour simuler la gestion du barrage au pas de temps journalier. Les calculs seront effectués sur la base des données observées, vérifiées et complétées, décrivant les écoulements du régime naturel sur le bassin du fleuve Gambie. Il sera tenu compte des différentes pertes. La période de référence s'étendra au minimum de 1971 à 2001.

Ces simulations seront effectuées suivant les scénarios de gestion définis en phase préliminaire par Coyne et Bellier, et différenciés au niveau des paramètres suivants :

- Hauteur en crête du barrage, et puissance installée;
- Consignes d'exploitation, visant à satisfaire les différents objectifs assignés à l'ouvrage. En plus des objectifs envisagés dans l'étude précédente (énergie, irrigation à l'amont du PK 170), les objectifs suivants seront intégrés dans certains scénarios : navigabilité; soutien de crue en cas de situation hydrologique favorable (agriculture, équilibre écologique); éventuellement, suspension périodique de lâchure permettant le reflux d'eau salée pour le maintien de la mangrove.

L'analyse des résultats de ces simulations portera sur les chroniques journalières de valeurs suivantes : niveau de surface libre dans la retenue, puissance produite, débit lâché du barrage pour chaque organe d'évacuation, débits (et cotes) aux principales stations situées sur le fleuve Gambie à l'aval du barrage, déficits éventuels de débit par rapport aux objectifs (irrigation, soutien de crue). Pour les solutions optimales, on présentera de façon détaillée les résultats concernant : les superficies inondées par la retenue, les modifications du régime hydrologique à l'aval du barrage, la satisfaction des divers objectifs de gestion pour chaque mois de l'année. L'énergie produite par année, ainsi que la puissance moyenne produite durant chaque mois de l'année, feront l'objet d'une analyse statistique détaillée.

Les débits calculés pour la Gambie à Gouloumbo lors de ces simulations serviront d'entrée au modèle SALNSTAT décrivant les déplacements de front salé.

### **Activité E2: Débits et niveaux moyens mensuels aux stations de mesure aval en fonction du mode de gestion (section 2.1.b. des termes de référence de l'étude d'impact)**

Pour les différents scénarios de gestion proposés, les débits et niveaux moyens mensuels feront l'objet d'une analyse statistique pour les stations situées à l'aval de l'ouvrage. Les résultats seront présentés sous forme de lignes d'eau moyennes et isofréquences (médiane, décennale sèche,

décennale humide), ou de courbes des niveaux à chaque site en fonction du temps, avec superposition des fluctuations éventuelles résultant des marées.

Les sites où ces données seront fournies sont:

- i) au Sénégal: Kédougou, Mako, Wassadou et Gouloumbo;
- ii) en Gambie: sera fournie une comparaison des niveaux atteints, avec ou sans Sambangalou, à Bassé, Bansang et Georgetown.

## **Activité E4: Salinité (section 6.2.2.7 des termes de référence généraux et sections 2.1.e et 2.1.F des termes de référence de l'étude d'impact)**

### **Modélisation**

Le modèle SALNSAT est basé sur l'équation unidimensionnelle de diffusion, et simule le déplacement du front salé en régime transitoire. Il utilise l'équation de Van der Burgh (1972) pour le calcul du biseau salé, et la schématisation de l'estuaire proposée par Savenije (1986). Il est appliqué aux estuaires alluviaux.

Le modèle permet de simuler l'influence des pluies et de l'évaporation, et de prendre en compte les prélèvements d'eau liés à l'irrigation. Il a été utilisé sur l'estuaire du fleuve Gambie par Euroconsult (GTZ, 1986) et dans le cadre des études du Schéma Directeur.

Au cours de ces dernières études, le modèle a été testé sur 86 mesures de position du front salé, concernant 17 années, réparties sur la période 1974-1996.

La précision du modèle a été améliorée depuis 1997 à l'aide des mesures complémentaires réalisées par le DWR de Banjul. Le modèle surestimait légèrement la position du front salé vers l'amont, surtout pour les remontées extrêmes (moins de 10 km en hautes eaux, de l'ordre de 35 km en basses eaux), ce qui était dans le sens de la sécurité pour les calculs de débits nécessaires au repoussement du biseau salin. Les derniers calages ont permis d'améliorer cette précision (divisée par deux en moyenne).

Le modèle est actuellement capable, connaissant les débits journaliers prévus à GOULOUMBO, de prédire la position du front avec seulement quelques kilomètres d'incertitude.

### **Limites d'intrusion saline**

Les limites d'intrusion saline 1 ‰ et 5 ‰ à la saison sèche et à la crue, avant et après mise en service de Sambangalou, seront établies par le modèle SALNSTAT en fonction des débits artificiels calculés à GOULOUMBO par SIMULGAMB, le contrôle aval étant fourni par la table des marées (voir présentation de SALNSTAT en annexe).

### **Variations de salinité**

Le logiciel SALNSAT fournit la position du biseau à tout moment connaissant le débit à Gouloumbo, géré intégralement par le barrage, et la marée à BANJUL. Les variations de salinité et de forme du biseau, dans le temps et dans l'espace, sont connues grâce au modèle SALNSTAT. moyens mensuels iso-fréquence du plan d'eau (cote IGN) à Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo, pour le régime naturel modélisé et le scénario A.

## Annexe B : Elaboration de la banque de données hydrométriques journalières opérationnelle

nom abrégé de la station	nom de la station	nom du cours d'eau	numéro ORSTOM	fichier de valeurs observées du schéma hydraulique de 1998	fichier opérationnel du schéma hydraulique de 1998	fichier extrait de la banque Hydraccess de 2002
Diagu	Pont routier	Diaguéry	1381200110	Diagu0	Diagu3	Diagu4
Diarh	Pont routier	Diarha	1381201203	Diarh0	Diarh4	Diarh5
Goulo	Gouloumbo	Gambie	1381200106	Goulo0	Goulo3	Goulo4
Kedou	Kedougou	Gambie	1381200108	Kedou0	Kedou3	Kedou4
Mako	Mako	Gambie	1381200112	Mako0	Mako3	Mako4
Missg	Missirah Gonasse	Koulountou	1381201305	Missg0	Missg1	Missg2
Nioko	Pont PNNK	Niokolokoba	1381201903	Nioko0	Nioko3	Nioko4
Parcg	Parc gué du PNNK	Koulountou	1381201303	Parcg0	Parcg2	Parcg3
Samban	Sambangalou	Gambie				
Simen	Simenti	Gambie	1381200117	Simen0	Simen8	Simen9
Tioko	Pont	Tiokoye	1381202503	Tioko0	Tioko4	Tioko5
Wasam	Wassadou amont	Gambie	1381200118	Wasam0	Wasam5	Wasam6
Wasav	Wassadou aval	Gambie	1381200119	Wasav0	Wasav3	Wasav4

tableau B1 : Liste des stations hydrométriques et nomenclature utilisée pour désigner les fichiers de données correspondants

code de la relation	fichier des débits x (banque Hydrom 1998)	fichier des débits y (banque Hydraccess 2002)	relation	taille d'échantillon	période
Modif1	Tioko0	Tioko5	$y = 9.227e-6 x^2 - 0.003421 x^2 + 1.15 x$	6770	1971-1992
Modif2	Nioko0	Nioko4	pour $x < 60 : y = x$ pour $x > 60 : y = 60 + 1.6120 (x-60) - 0.006605 (x-60)^2$	3613	1971-1991
Modif3	Parcg0	Parcg3	pour $x < 90 : y = x$ pour $x > 90 : y = 90 + 0.9025 (x-90) - 0.001476 (x-90)^2$	1336	1974-1981
Modif4	Diagu0	Diagu4	pour $x < 70 : y = x$ pour $x > 70 : y = 70 + 0.1280 (x-70) - 0.0001114 (x-70)^2$	6047	1970-1997

tableau B2 : Relations ( $m^3/s$ ) résultant de révisions d'étalonnages, entre les débits journaliers de la banque Hydraccess de 2002 et ceux de la banque Hydrom utilisée en 1998 par l'étude du schéma hydraulique du fleuve Gambie

code de la relation	station X	station Y	station Z	relation	nombre de points	période	R <sup>2</sup>	écart type de X	écart type résiduel	
Relation 1	Parcg4	Missg2		si $Y(j+2) < 30 : X(j) = 0.613 Y(j+2) + 0.24$ si $Y(j+2) > 30 : X(j) = 0.861 Y(j+2) - 7.21$	1160	1974-1981		21.10	7.21	établi lors de la présente étude
Relation 2	Nioko5	Simen10	Mako4	$X(j) = 0.114 (Y(j) - Z(j-1)) + 0.773$	5506	1971-2002	0.470	16.48	12.00	
Relation 3	Diarh6	Tioko5		$X(j) = 0.781 Y(j) + 0.423$	6516	1972-2002	0.771	16.63	7.95	
Relation 4	Tioko5	Simen10	Mako4	$X(j) = 0.177 (Y(j+2) - Z(j)) + 1.795$	8144	1971-2002	0.713	18.13	9.72	
Relation 5	Diagu5	Mako4	Kedou4	$X(j) = 0.3546 (Y(j) - Z(j-1)) + 2.33$	7434	1974-2002	0.657	14.69	8.60	tiré du Schéma hydraulique de 1998
Relation 6	Missg0	Wasav0	Goulo0	$X(j) = -0.104 Y(j-1) + 0.292 Z(j+1) - 2.3$	5741	1973-1994	0.982	52.10	9.80	
Relation 7	Samban	Kedou0		$X(j) = 0.953 Y(j)$						

tableau B3 : Relations établies entre les débits journaliers ( $m^3/s$ ) de différentes stations

Nom du fichier résultant	opération effectuée	nom du fichier primaire	nom du fichier secondaire	nom du fichier prévisionneur 1	nom du fichier prévisionneur 2	nombre de valeurs reconstituées
Diagu5	S : 010279--150679	Diagu4				-135
Diagu6	Modif 4	Diagu3				0
Diagu7	Compléter	Diagu5	Diagu6			3838
Diagu7	Nul : 010170--220370	Diagu7				81
Diarh6	S : 010377--310777 ; 010273--310574 ; 240686--310786	Diarh5				-676
Diarh7	Compléter	Diarh6	Diarh4			4606
Diarh7	Nul : 010170--230370	Diarh7				82
Goulo5	S : 011070--161170 ; 131076	Goulo4				-48
Goulo6	Compléter	Goulo5	Goulo3			6776
Goulo6	Nul : 010170--270370	Goulo6				86
Kedou4	Tar (0.9785) : 010170--210370	Kedou4				80
Parcg4	S : 200980--011180	Parcg3				-43
Parcg2	Modif 3	Parcg2				0
Parcg5	Compléter	Parcg4	Parcg2			8448
Parcg5	Nul : 010170--230370	Parcg5				82
Mako5	Compléter	Mako4	Mako3			39
Mako5	Tar (0.9768) : 010170--220370	Mako5				81
Missg3	Compléter	Missg2	Missg1			1269
Missg3	Nul : 010170--260370	Missg3				85
Nioko5	S : 250871--160971 ; 010890--300990 ; 010192--311297	Nioko4				-2276
Nioko3	Modif 2	Nioko3				0
Nioko6	compléter	Nioko5	Nioko3			5878
Nioko6	Nul : 010170--230370	Nioko6				83
Simen10	S : 200484--280584	Simen9				-39
Simen11	Compléter	Simen10	Simen8			76
Simen11	Tar (0.9742) : 010170--240370 ; 040601--100601	Simen11				90
Tioko4	Modif 1	Tioko4				0
Tioko6	Compléter	Tioko5	Tioko4			3082
Tioko6	Nul : 010170--220370	Tioko6				81
Wasav5	Compléter	Wasav4	Wasav3			36
Wasav5	Tar (0.9743) : 010170--250370	Wasav5				84
Missg4	Relation 6	Missg3		Wasav5	Goulo6	571
Parcg6	Relation 1	Parcg5		Missg4		1095
Parcg7	Tar (0.950)	Parcg6				566
Diagu8	Relation 5	Diagu7		Mako5	Kedou4	365
Tioko7	Relation 4	Tioko6		Simen11	Mako5	365
Tioko7	S : 171097 ; 180897 ; 190897	Tioko7				-3
Tioko7	Inter : 171097 ; 180897 ; 190897	Tioko7				3
Diarh8	relation 3	Diarh7		Tioko7		400
Nioko7	Relation 2	Nioko6		Simen11	Mako5	245
Samban1	Relation 7			Kedou4		11688
Goulo6	Eliminer les débits inférieurs à 100 m <sup>3</sup> /s	Goulo6				-7027
Goulo6	Compléter	Goulo6(j)	Wasav(j-2) + Parcg(j-2)			8215

tableau B4 : chronologie des opérations effectuées pour l'homogénéisation des débits et la reconstitution de valeurs manquantes

**S** : suppression des données du fichier primaire pour les dates ou intervalles de dates mentionnés (jjmmaa)

**Modif n** : modification des données du fichier primaire par la relation n

**Compléter** : les lacunes du fichier primaire sont complétées par les données existantes du fichier secondaire

**Nul** : saisie de débit nul dans le fichier primaire, pour les dates indiquées

**Tar (k)** : reconstitution de débit de tarissement dans le fichier primaire, par :  $Q(j) = k.Q(j-1)$  ou  $Q(j-1) = Q(j)/k$

**Relation n** : les lacunes du fichier primaire sont reconstituées si possible à partir des prévisionneurs 1 et 2, avec la relation n décrite dans le tableau des relations inter-stations

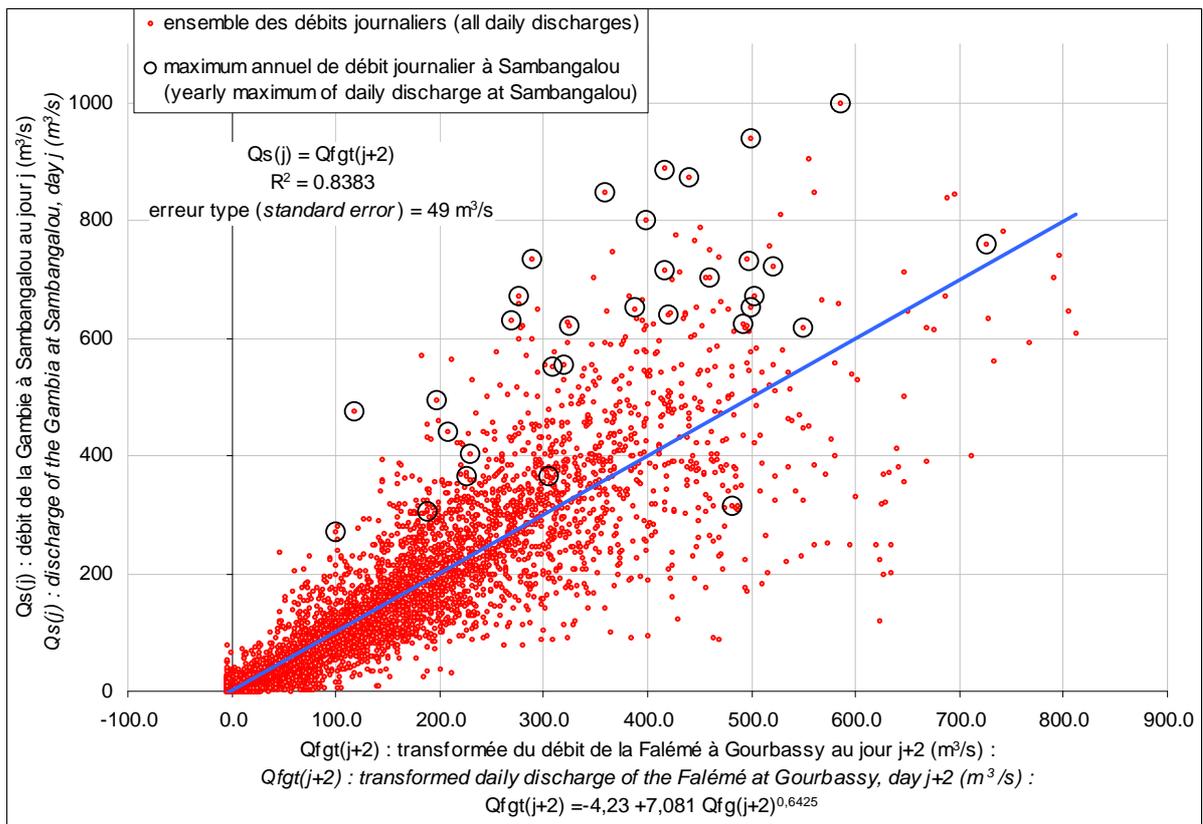
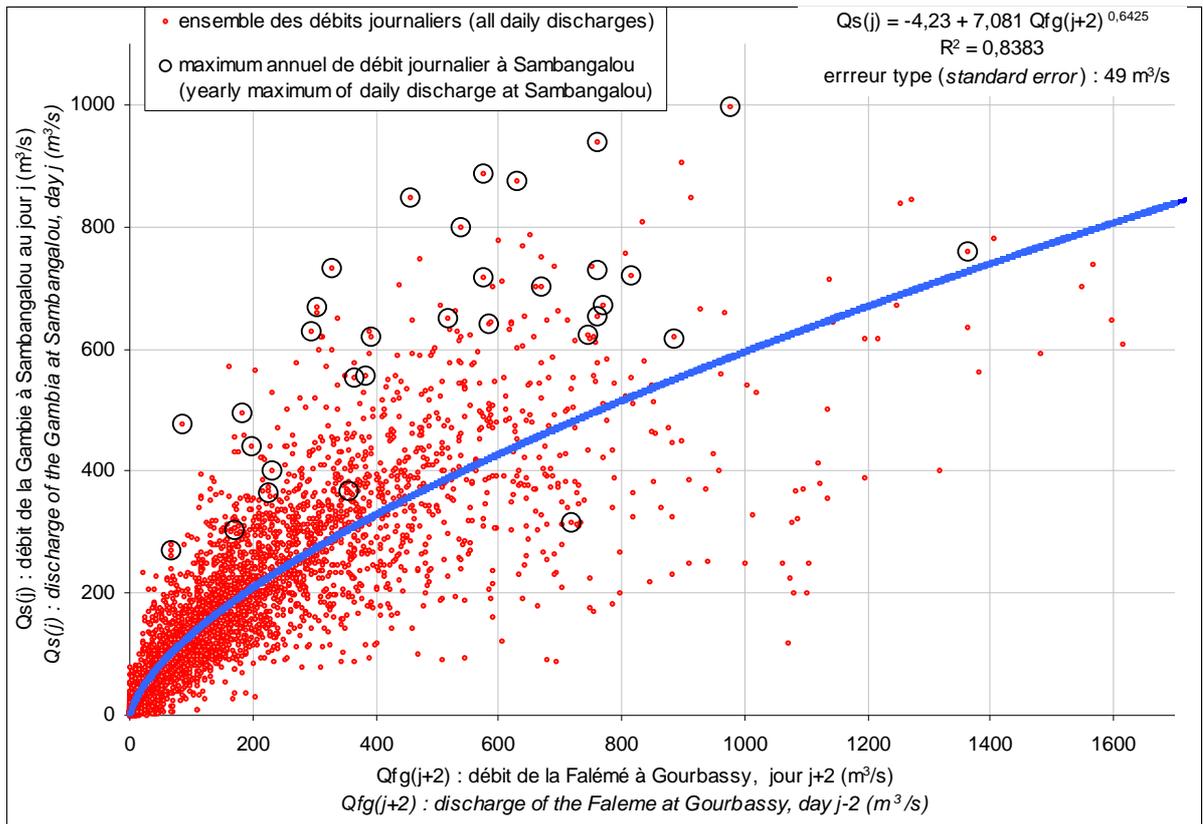


figure B1 : relation entre les débits journaliers de la Falémé à Gourbassy et les ceux de la Gambie à Sambangalou, établie sur la période 1970-2001 (11368 points)

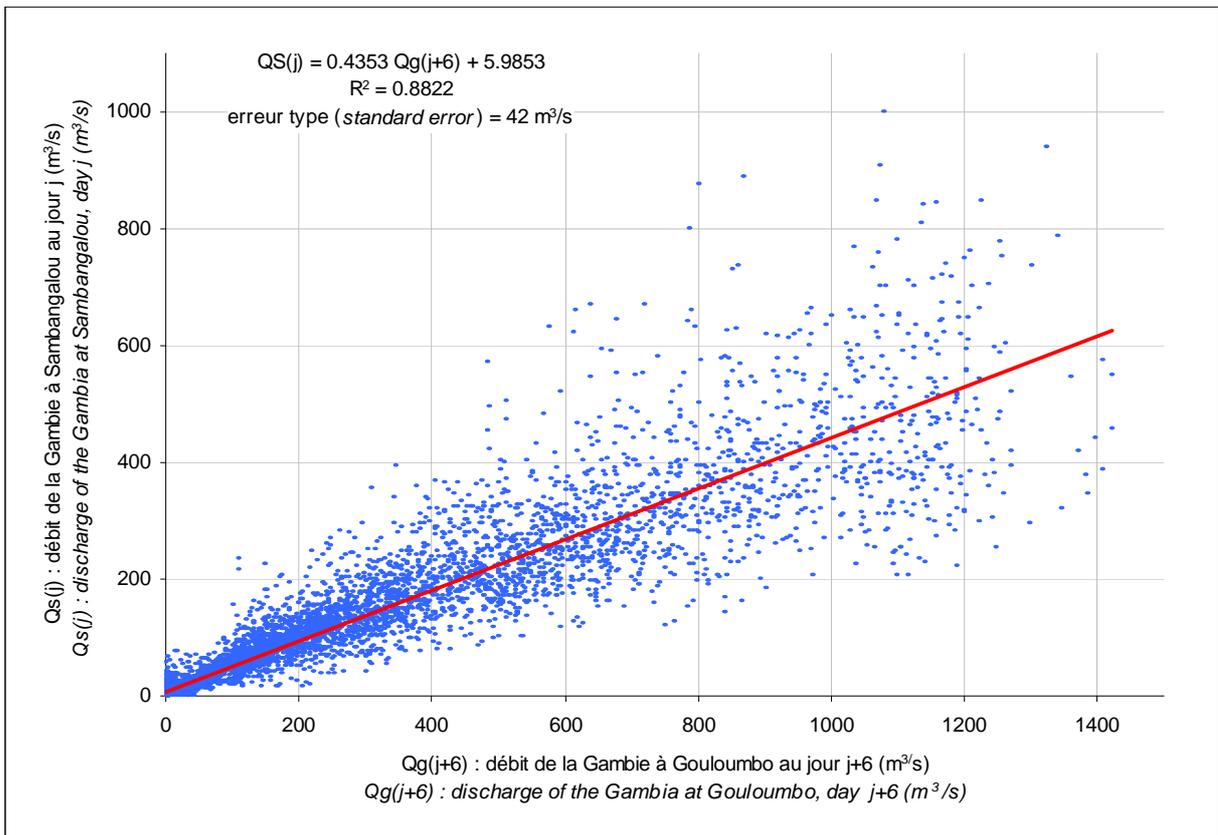


figure B2 : relation entre les débits journaliers de la Gambie à Gouloumbo et ceux de la Gambie à Sambangalou, établie sur la période 1970-2002 (11797 points)

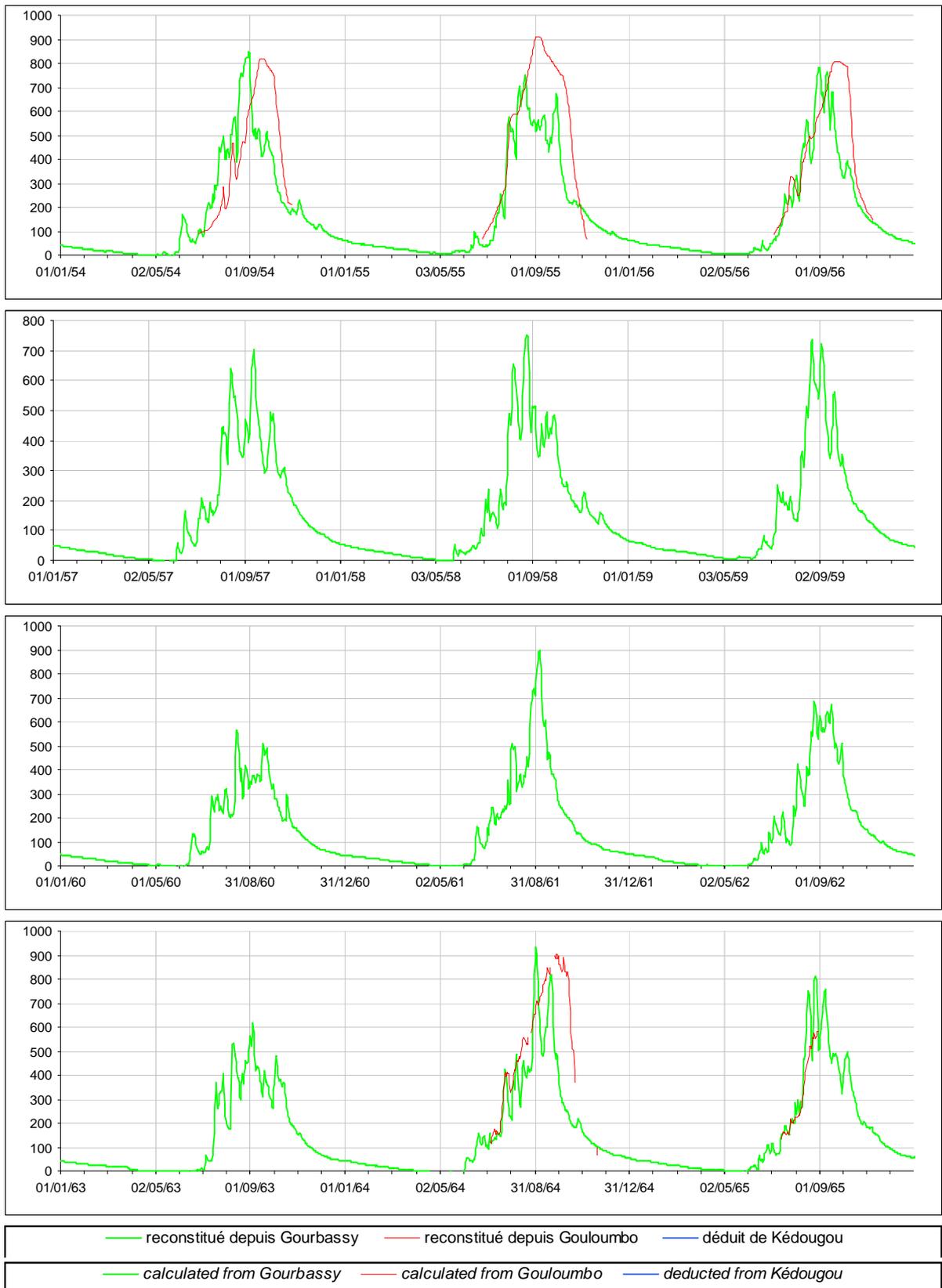


figure B3-1 : débit de la Gambie à Sambangalou (1954-1965), reconstitué à partir de celui de la Falémé à Goubassy et reconstitué à partir de celui de la Gambie à Gouloumbo

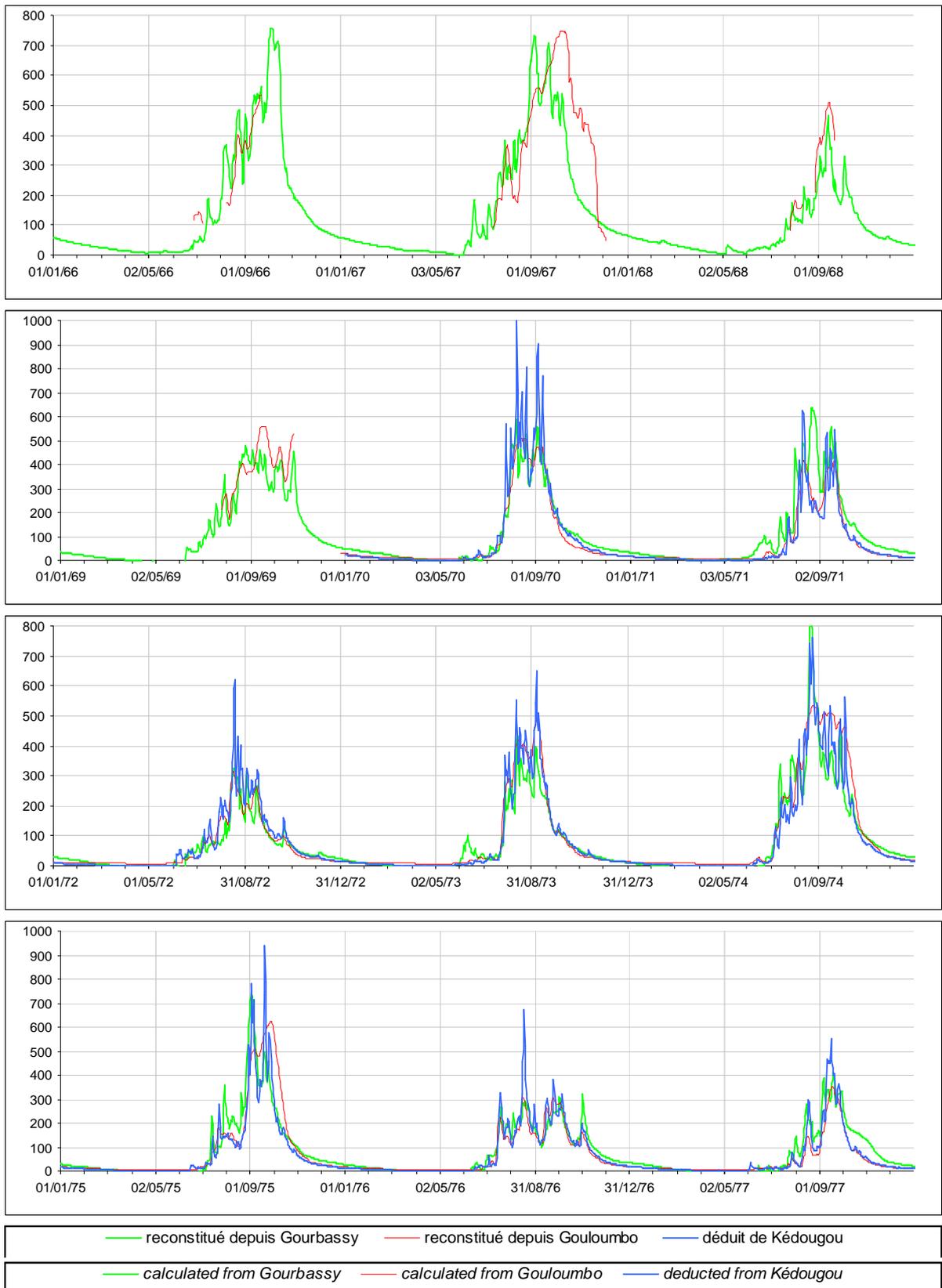


figure B3-2 : débit de la Gambie à Sambangalou (1966-1977), reconstitué à partir de celui de la Falémé à Gourbassy, reconstitué à partir de celui de la Gambie à Gouloumbo et calculé à partir de celui de la Gambie à Kédougou

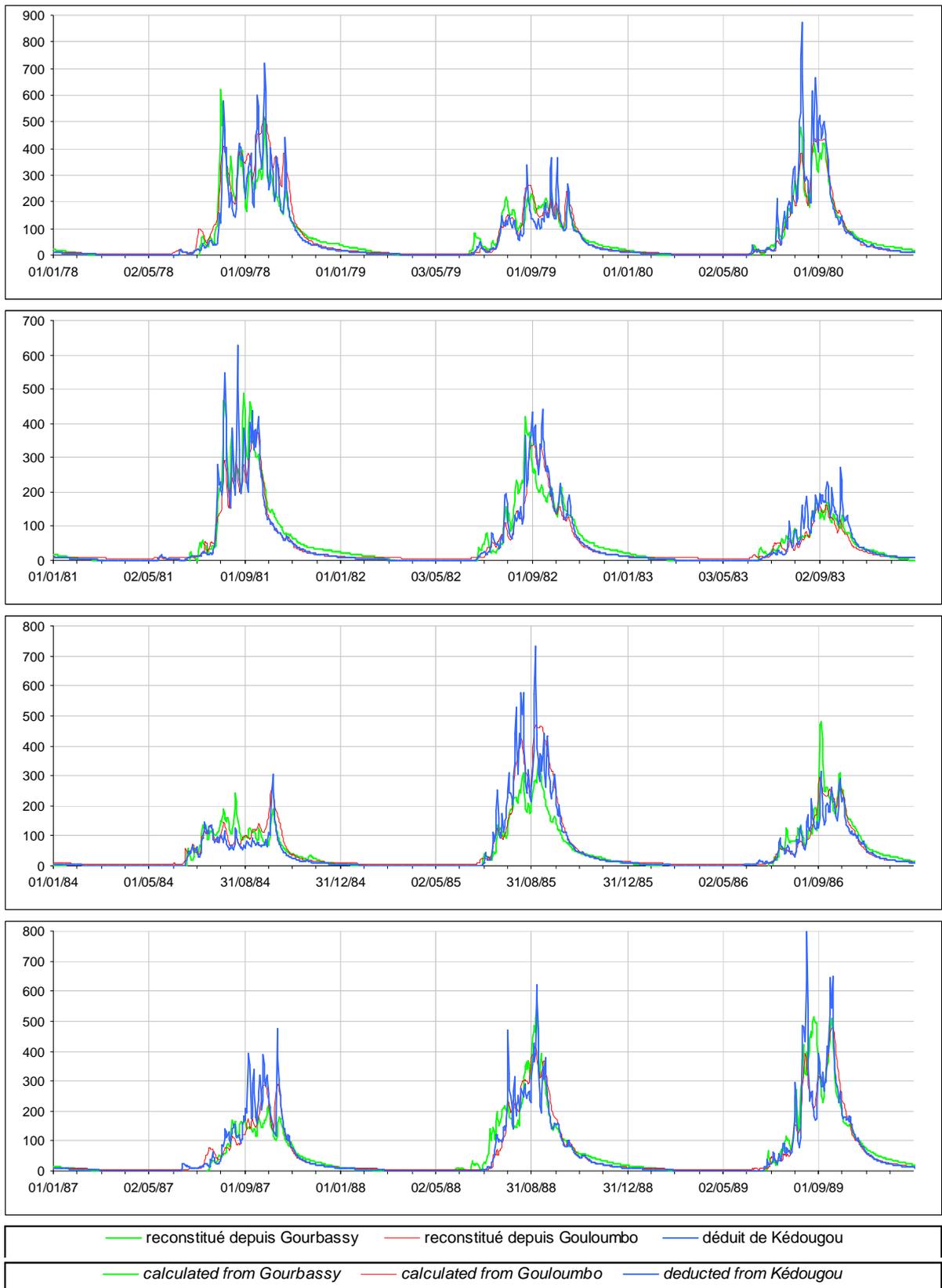


figure B3-3 : débit de la Gambie à Sambangalou (1978-1989), reconstitué à partir de celui de la Falémé à Gourbassy, reconstitué à partir de celui de la Gambie à Gouloumbo et calculé à partir de celui de la Gambie à Kédougou

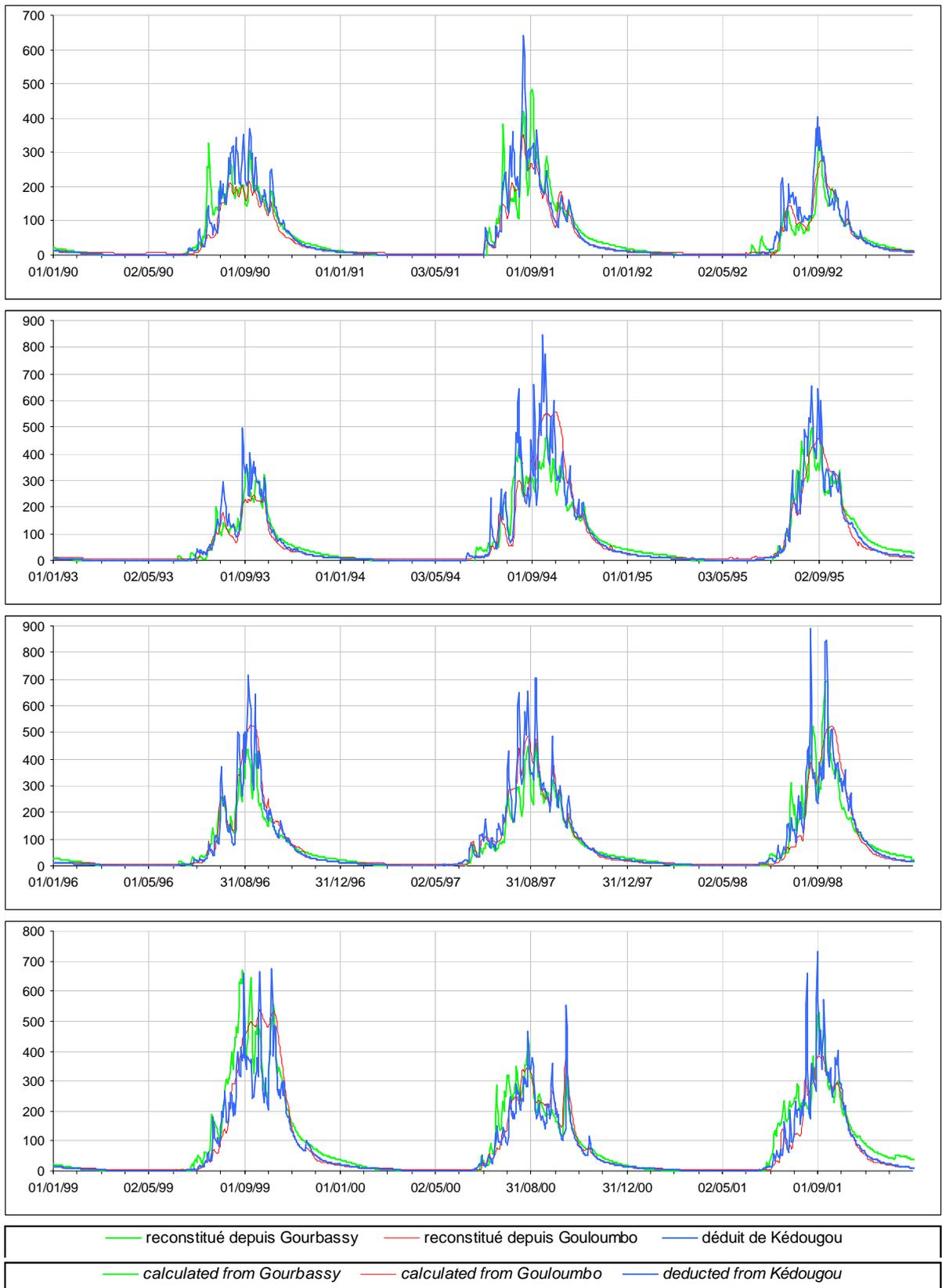


figure B3-4 : débit de la Gambie à Sambangalou (1990-2001), reconstitué à partir de celui de la Falémé à Gourbassy, reconstitué à partir de celui de la Gambie à Gouloumbo et calculé à partir de celui de la Gambie à Kédougou

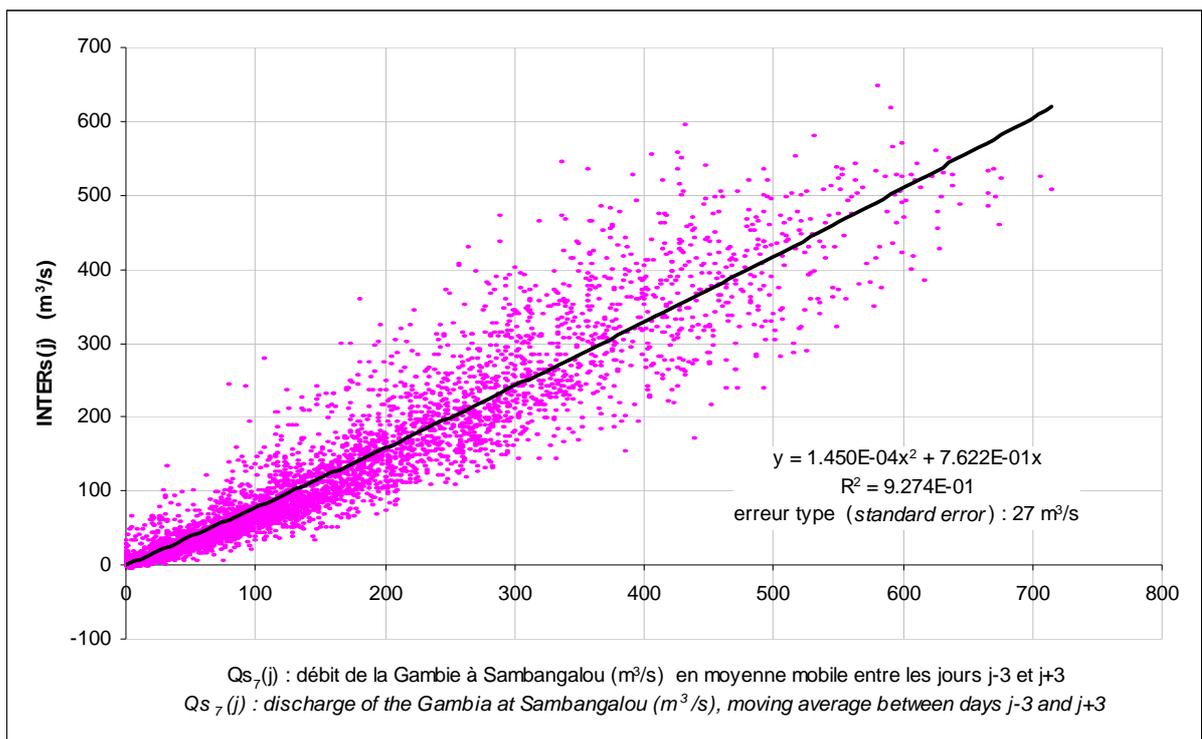
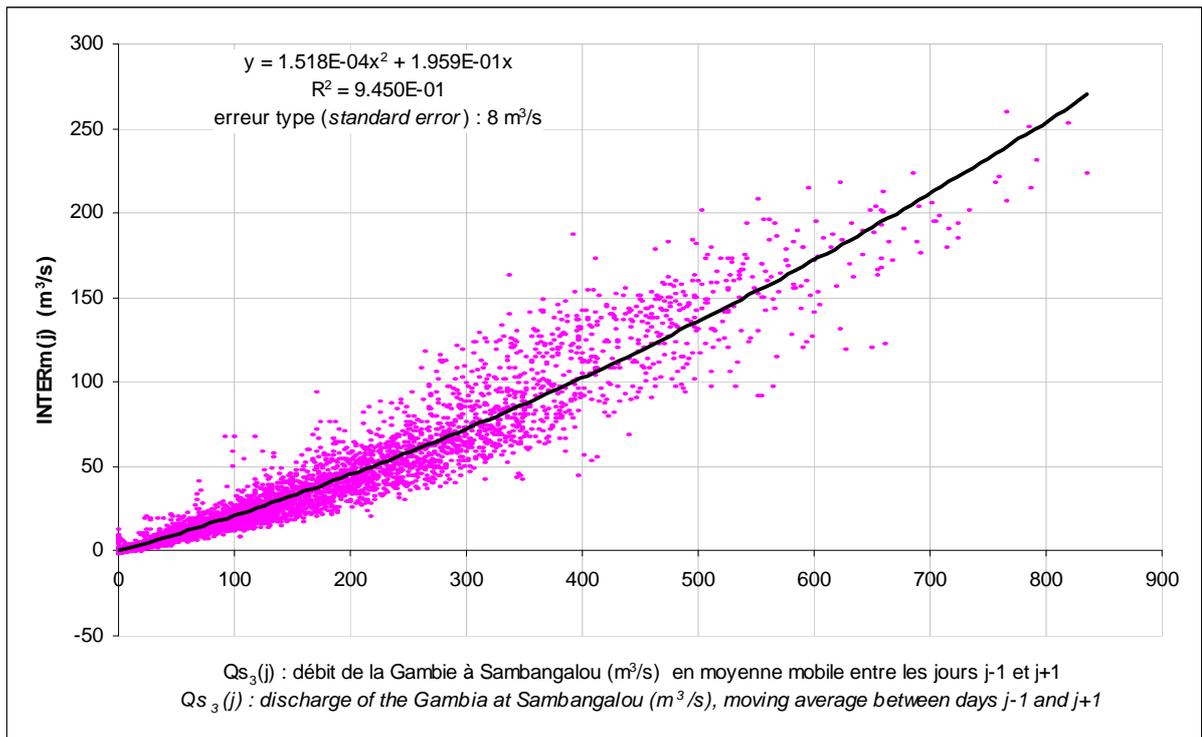


figure B4 : relations (1970-2002) entre le débit de Sambangalou en moyenne mobile centrée sur 3 et 7 jours, et le débit des apports intermédiaires INTER<sub>m</sub> entre Sambangalou et Mako d'une part, et INTER<sub>s</sub> entre Sambangalou et Simenti d'autre part.

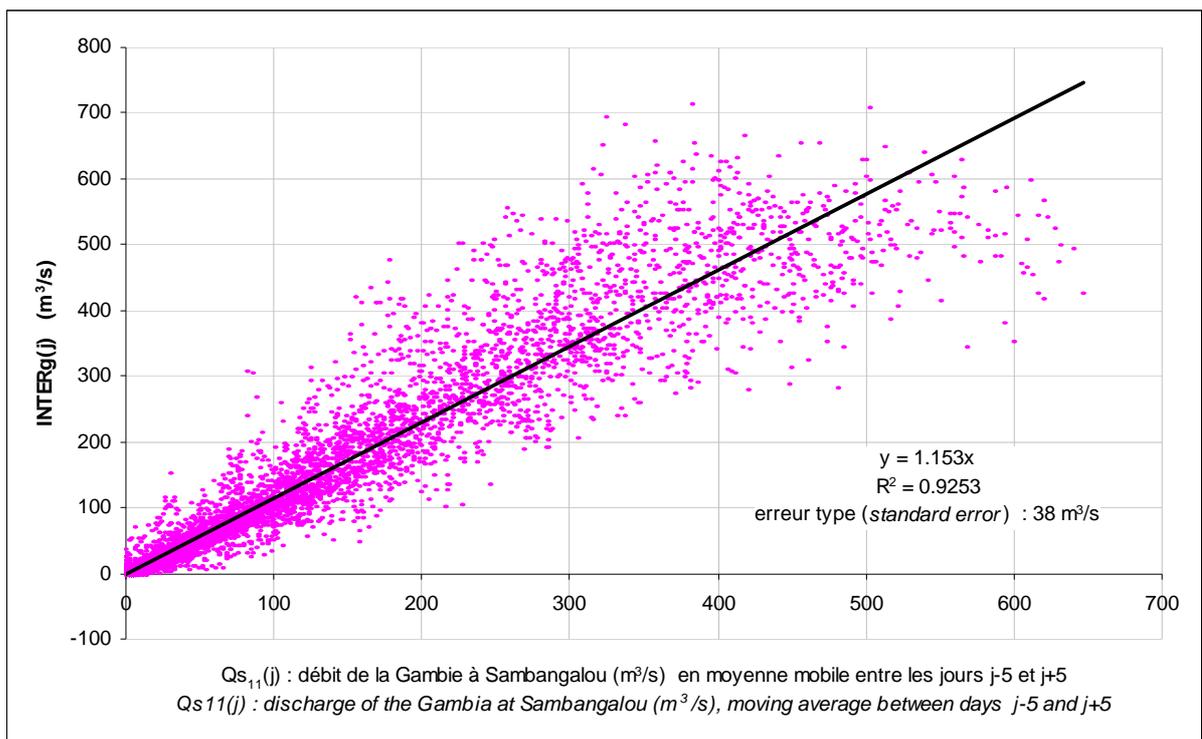
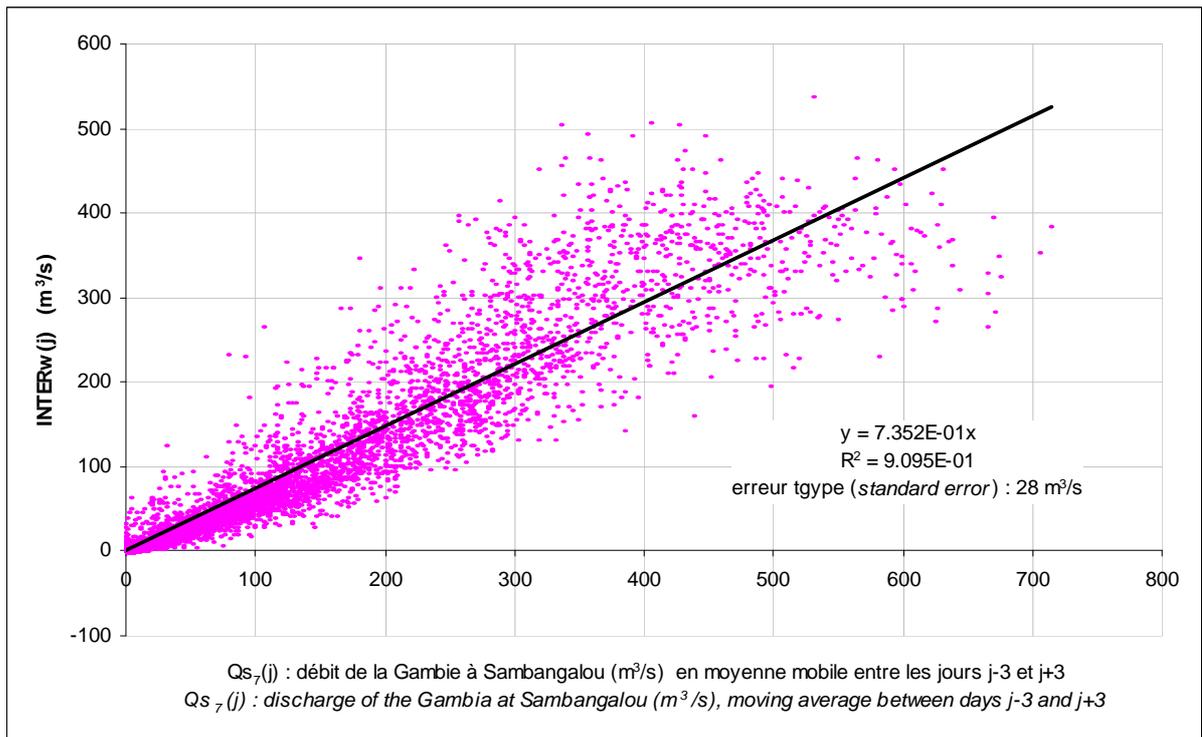


figure B5 : relations (1970-2002) entre le débit de Sambangalou en moyenne mobile centrée sur 7 et 11 jours, et le débit des apports intermédiaires INTERw entre Sambangalou et Wassadou aval d'une part, et INTERg entre Sambangalou et Gouloumbo d'autre part.

## Annexe C : Evaluation du modèle de propagation de débit entre Sambangalou et Gouloumbo

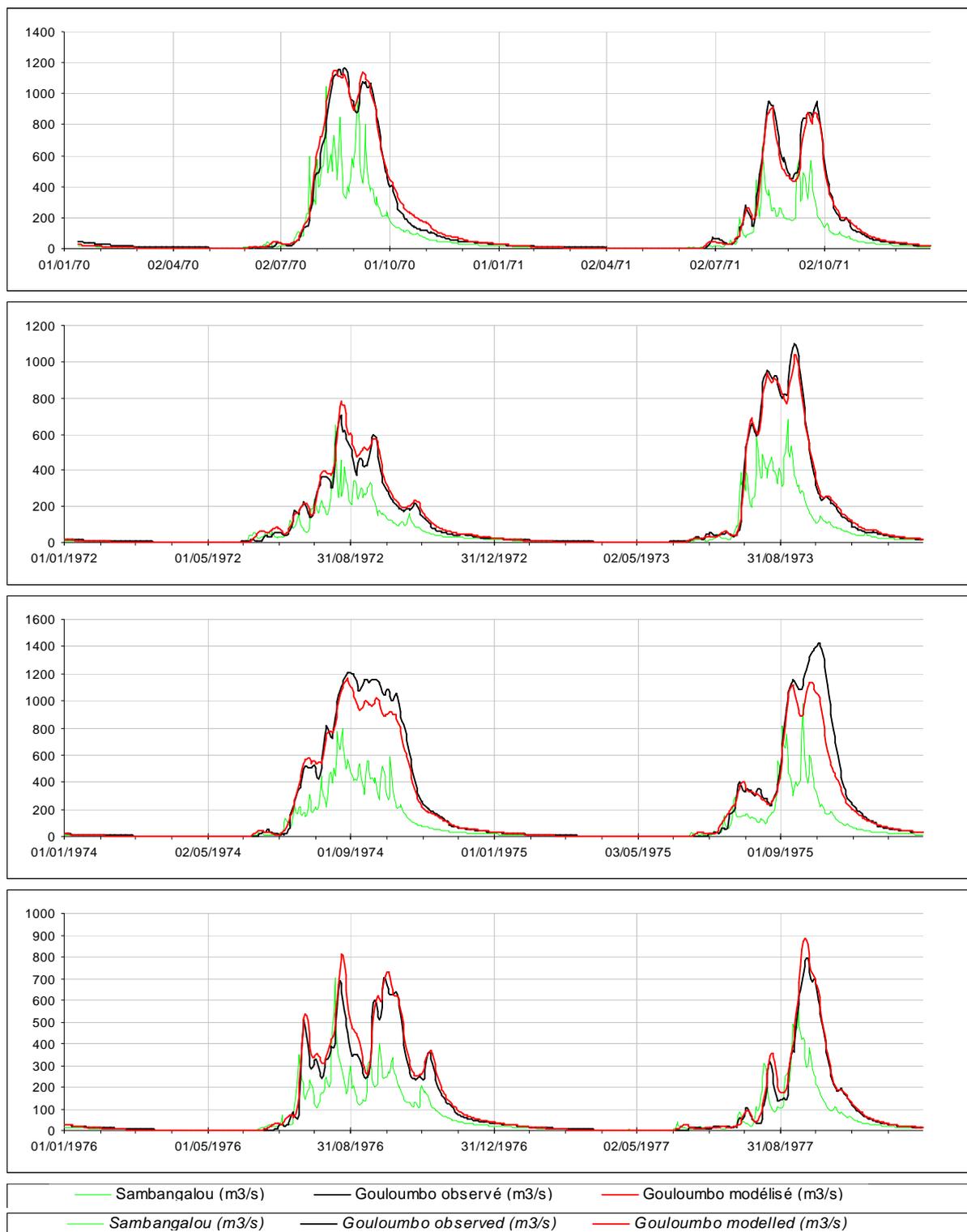


figure C1 : Hydrogramme naturel de la Gambie à Gouloumbo (1970-1977) : débits observés et débits modélisés Goulou<sub>7</sub> (à partir des débits naturels de la Gambie à Sambangalou et des affluents Diaguéry, Tikoye, Diarha, Niokolokoba et Koulountou). Comparaison avec l'hydrogramme naturel de la Gambie à Sambangalou, reconstitué à partir des données de Kédougou.

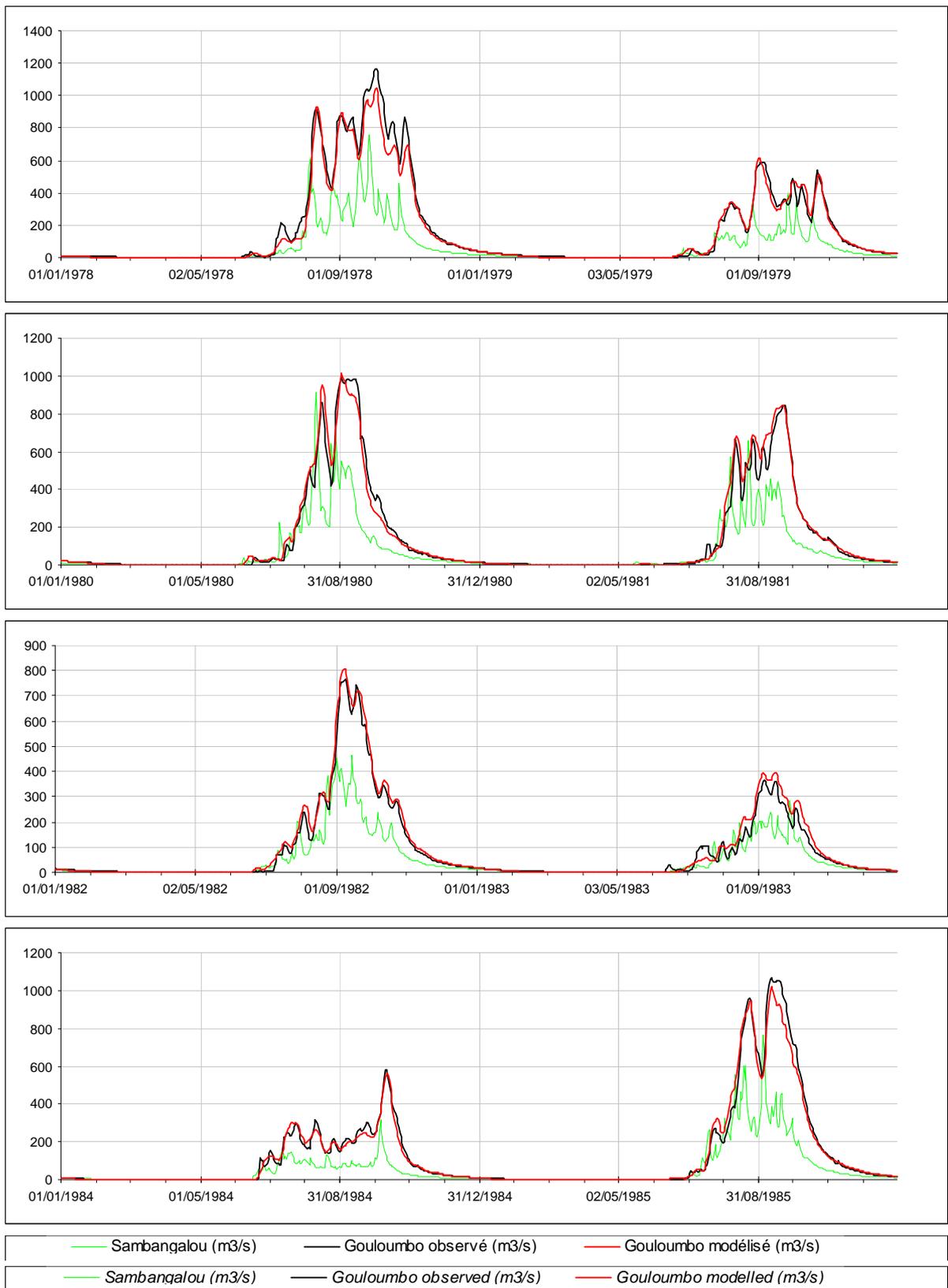


figure C2 : Hydrogramme naturel de la Gambie à Gouloumbo (1978-1985) : débits observés et débits modélisés Goulo<sub>7</sub> (à partir des débits naturels de la Gambie à Sambangalou et des affluents Diaguéry, Tikoye, Diarha, Niokolokoba et Koulountou). Comparaison avec l'hydrogramme naturel de la Gambie à Sambangalou, reconstitué à partir des données de Kédougou.

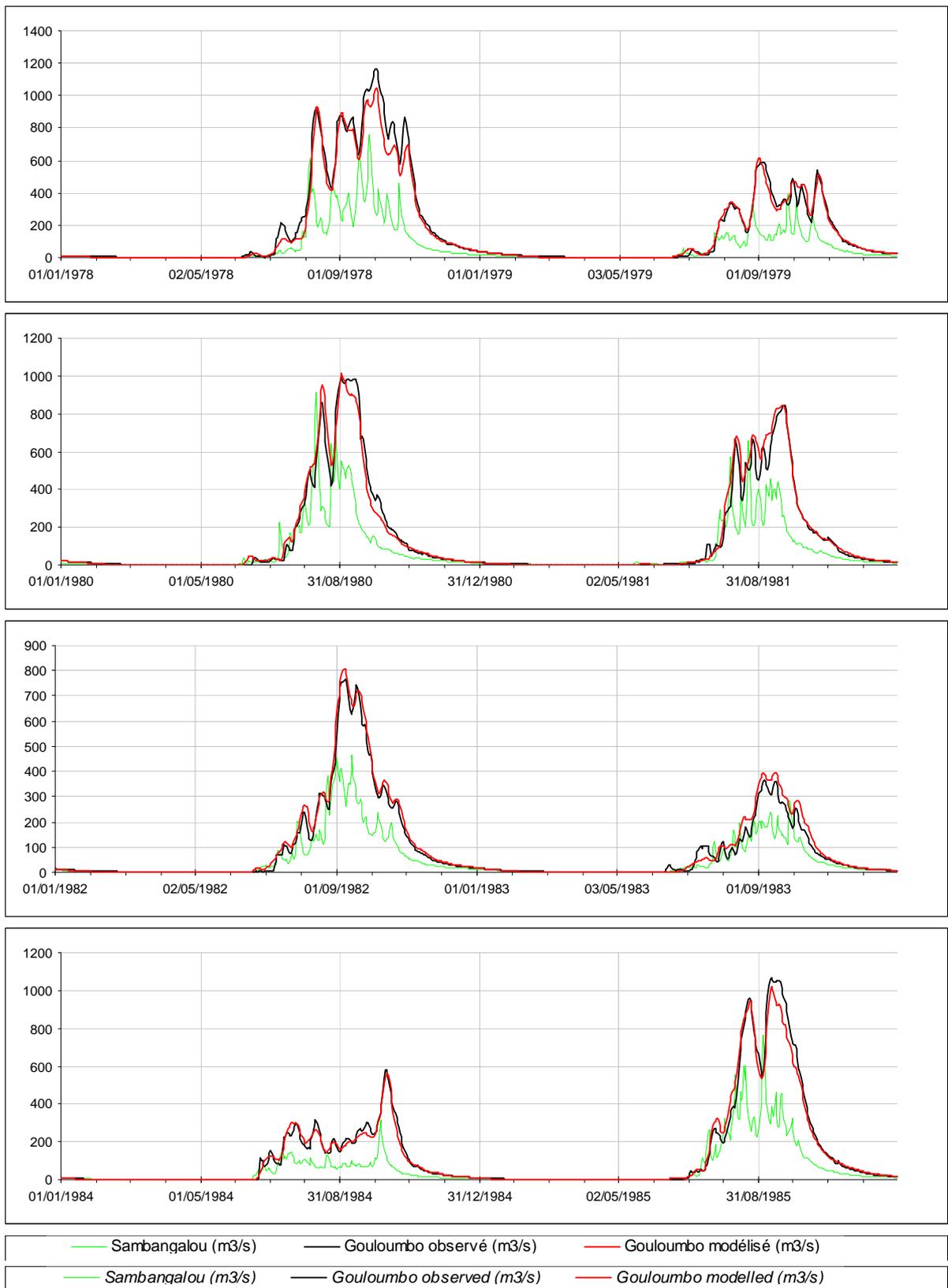


figure C3 : Hydrogramme naturel de la Gambie à Gouloumbo (1986-1993) : débits observés et débits modélisés Goulo<sub>7</sub> (à partir des débits naturels de la Gambie à Sambangalou et des affluents Diaguéry, Tikoye, Diarha, Niokolokoba et Koulountou). Comparaison avec l'hydrogramme naturel de la Gambie à Sambangalou, reconstitué à partir des données de Kédougou.

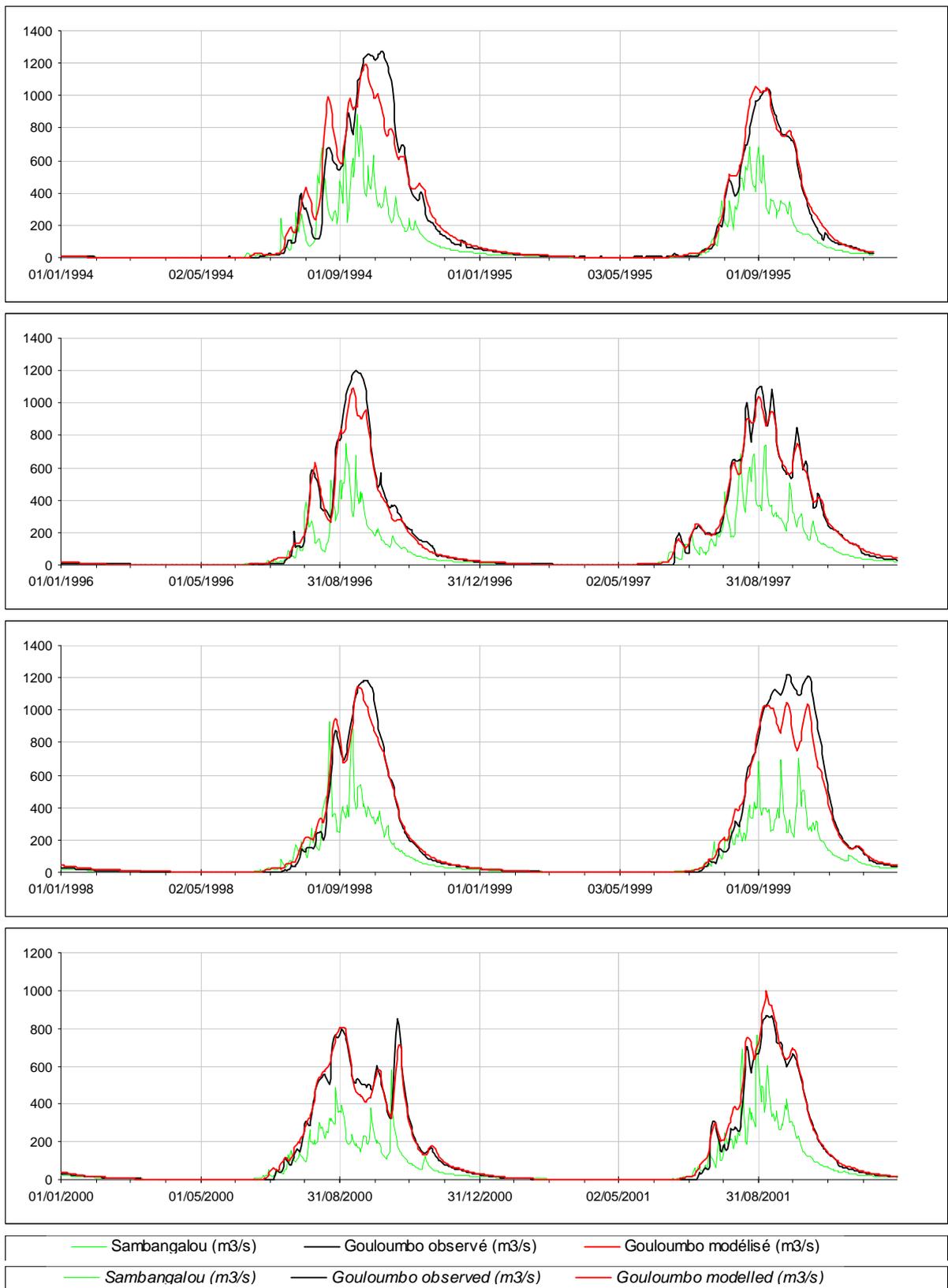


figure C4 : Hydrogramme naturel de la Gambie à Gouloumbo (1994-2001) : débits observés et débits modélisés Goulo<sub>7</sub> (à partir des débits naturels de la Gambie à Sambangalou et des affluents Diaguéry, Tikoye, Diarha, Niokolokoba et Koulountou). Comparaison avec l'hydrogramme naturel de la Gambie à Sambangalou, reconstitué à partir des données de Kédougou.



Savenige, H.H.G. (1992). Lagrangian solution of St Venant's equations for alluvial Estuary. Journal of hydraulic engineering. Vol 118, n° 8.

Savenige, H.H.G. (1992). Lagrangian Determination of estuary parameters on basis of lagrangian analysis. Journal of hydraulic engineering. Vol 119, n° 5.

Savenige, H.H.G. (1992). Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries. IHE report series 27. IHE Delft.

### Test du modèle sur le régime naturel

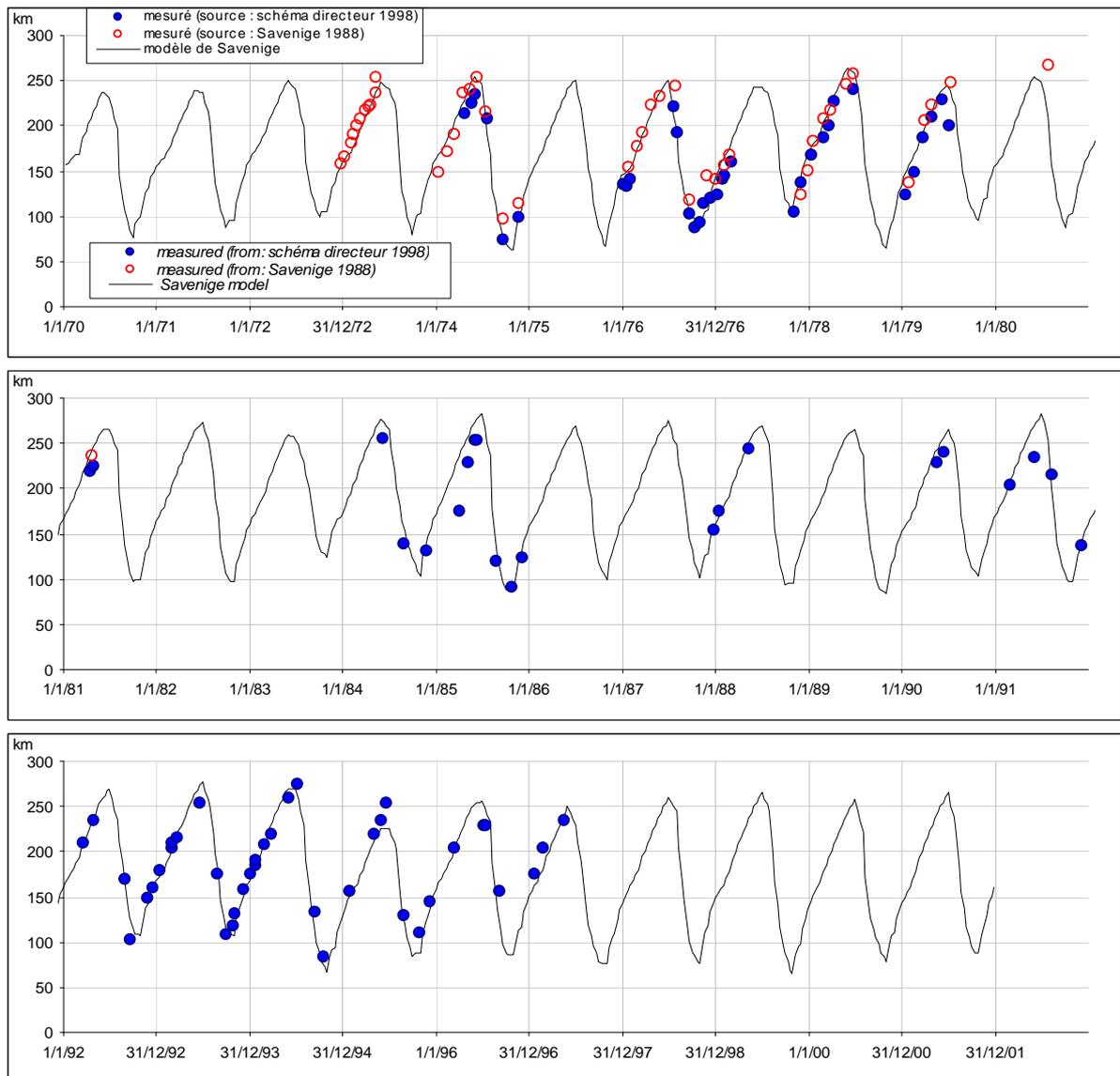


figure D1 : comparaison des valeurs mesurées et modélisées par SALNSTAT concernant la position du front salé à 1 g/l

## Annexe E : Détail de résultats concernant les simulations de gestion du scénario A

			janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
cote moyenne mensuelle (m) relative au régime naturel modélisé	décennal sec	Kédougou	103.31	103.18	103.07	102.96	102.96	103.13	104.08	104.83	105.55	104.49	103.81	103.47
		Mako	75.63	75.34	75.01	74.88	74.88	75.27	76.54	77.27	77.94	77.02	76.31	75.91
		Simenti	10.95	10.47	10.35	10.34	10.34	10.65	12.04	13.20	14.80	12.97	11.86	11.35
		Wassadou Gouloumbo	5.45 5.06	5.06 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	5.13 6.90	6.90 2.53	2.53 4.42	4.42 2.52	2.52 4.42	4.42 2.52	2.52 4.42
	médian	Kédougou	103.42	103.28	103.16	103.04	102.99	103.37	104.54	106.21	106.78	105.28	104.08	103.65
		Mako	75.85	75.58	75.30	74.88	74.88	75.75	76.99	78.31	78.77	77.69	76.61	76.17
		Simenti	11.26	10.87	10.43	10.35	10.35	11.19	12.67	15.50	17.05	14.33	12.28	11.61
		Wassadou Gouloumbo	5.83 5.37	5.37 4.99	4.99 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	5.68 7.81	7.81 11.65	11.65 13.54	13.54 10.35	10.35 7.43	7.43 1.76	1.76 6.32
	décennal humide	Kédougou	104.12	103.88	103.62	103.39	103.32	104.18	105.32	107.34	108.16	106.72	105.03	104.41
		Mako	76.63	76.41	76.16	75.85	75.69	76.66	77.67	79.03	79.58	78.73	77.49	76.92
		Simenti	12.32	12.01	11.72	11.40	11.22	12.25	13.88	17.53	19.74	16.97	13.87	12.80
		Wassadou Gouloumbo	7.49 1.68	7.01 1.68	6.52 1.68	6.02 1.68	5.77 1.68	7.30 1.46	9.49 3.07	13.89 7.09	16.38 9.69	13.58 7.33	9.72 3.56	8.20 2.20
cote moyenne mensuelle (m) relative au scénario A	décennal sec	Kédougou	104.02	104.01	104.01	104.02	104.02	104.00	103.93	104.13	104.17	104.23	104.03	104.02
		Mako	76.47	76.46	76.46	76.47	76.47	76.46	76.46	76.74	77.00	76.89	76.53	76.48
		Simenti	11.80	11.78	11.78	11.81	11.82	11.84	12.06	12.68	13.44	12.86	12.01	11.85
		Wassadou Gouloumbo	6.65 6.63	6.63 6.63	6.63 6.63	6.68 6.68	6.69 6.69	6.73 6.73	6.93 6.93	7.91 2.15	8.97 3.14	8.33 2.58	6.98 1.44	6.74 1.44
	médian	Kédougou	104.35	104.03	104.03	104.03	104.04	104.06	104.11	104.21	104.79	104.90	104.78	104.76
		Mako	76.81	76.48	76.48	76.49	76.49	76.52	76.66	77.12	77.71	77.52	77.24	77.17
		Simenti	12.28	11.80	11.82	11.84	11.85	11.90	12.46	13.91	15.01	13.96	12.95	12.70
		Wassadou Gouloumbo	7.48 1.56	6.66 1.56	6.69 1.56	6.73 1.56	6.73 1.56	6.82 1.64	7.58 1.64	9.57 3.62	10.95 5.00	9.82 3.76	8.40 2.27	8.04 1.87
	décennal humide	Kédougou	104.77	104.78	104.28	104.05	104.06	104.08	104.14	104.89	107.56	106.84	105.38	104.81
		Mako	77.21	77.21	76.78	76.50	76.50	76.61	76.85	77.75	79.33	78.82	77.79	77.28
		Simenti	12.95	12.87	12.35	11.92	11.89	12.25	13.00	15.24	18.70	16.72	14.30	13.22
		Wassadou Gouloumbo	8.42 2.19	8.30 2.07	7.57 1.66	6.87 1.66	6.81 1.66	7.34 1.51	8.36 2.37	11.11 5.07	15.26 8.67	13.64 7.22	10.28 4.01	8.82 2.58
différence de cote moyenne mensuelle (m) entre scénario A et régime naturel	décennal sec	Kédougou	0.71	0.83	0.94	1.05	1.06	0.87	-0.15	-0.70	-1.38	-0.26	0.23	0.55
		Mako	0.84	1.13	1.45	1.59	1.59	1.19	-0.08	-0.52	-0.95	-0.14	0.22	0.57
		Simenti	0.85	1.31	1.43	1.47	1.48	1.19	0.02	-0.52	-1.36	-0.12	0.15	0.50
		Wassadou Gouloumbo	1.21 0.71	1.58 0.83	1.82 0.94	1.87 1.05	1.89 1.06	1.59 0.87	0.04 -0.15	-0.74 -2.00	-1.86 -1.28	-0.09 0.07	0.23 0.70	0.81 1.10
	médian	Kédougou	0.92	0.74	0.87	0.99	1.05	0.69	-0.43	-2.00	-1.98	-0.37	0.70	1.10
		Mako	0.96	0.90	1.18	1.61	1.61	0.77	-0.33	-1.20	-1.07	-0.17	0.63	1.00
		Simenti	1.02	0.93	1.39	1.49	1.50	0.71	-0.21	-1.59	-2.04	-0.37	0.67	1.10
		Wassadou Gouloumbo	1.65 1.65	1.29 1.29	1.70 1.70	1.93 1.93	1.93 1.93	1.15 1.15	-0.23 -0.15	-2.08 -1.50	-2.59 -1.99	-0.54 -0.76	0.97 0.52	1.72 0.52
	décennal humide	Kédougou	0.65	0.90	0.66	0.66	0.74	-0.10	-1.18	-2.45	-0.61	0.12	0.35	0.40
		Mako	0.58	0.80	0.61	0.65	0.81	-0.05	-0.81	-1.28	-0.25	0.09	0.30	0.36
		Simenti	0.63	0.86	0.63	0.51	0.67	0.00	-0.87	-2.28	-1.04	-0.26	0.43	0.41
		Wassadou Gouloumbo	0.93 0.51	1.29 0.51	1.06 0.66	0.85 0.66	1.04 0.74	0.04 -0.10	-1.13 -1.18	-2.78 -2.45	-1.12 -0.61	0.07 0.12	0.55 0.35	0.62 0.40

Tableau E1 : niveaux moyens mensuels iso-fréquence du plan d'eau (cote IGN) à Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo. Régime naturel modélisé, scénario A et différence entre ces deux régimes.

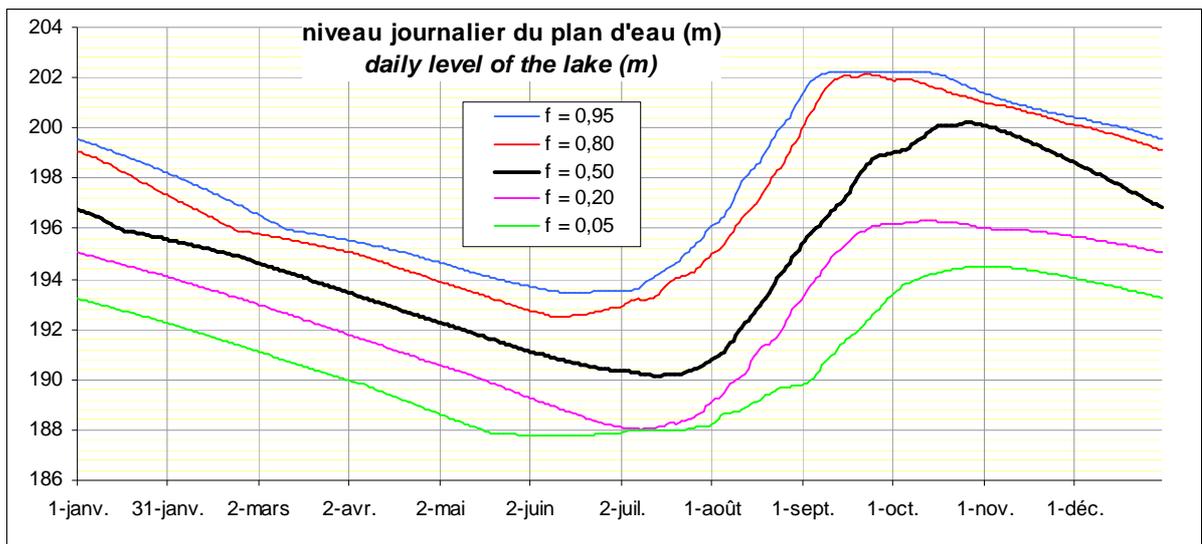
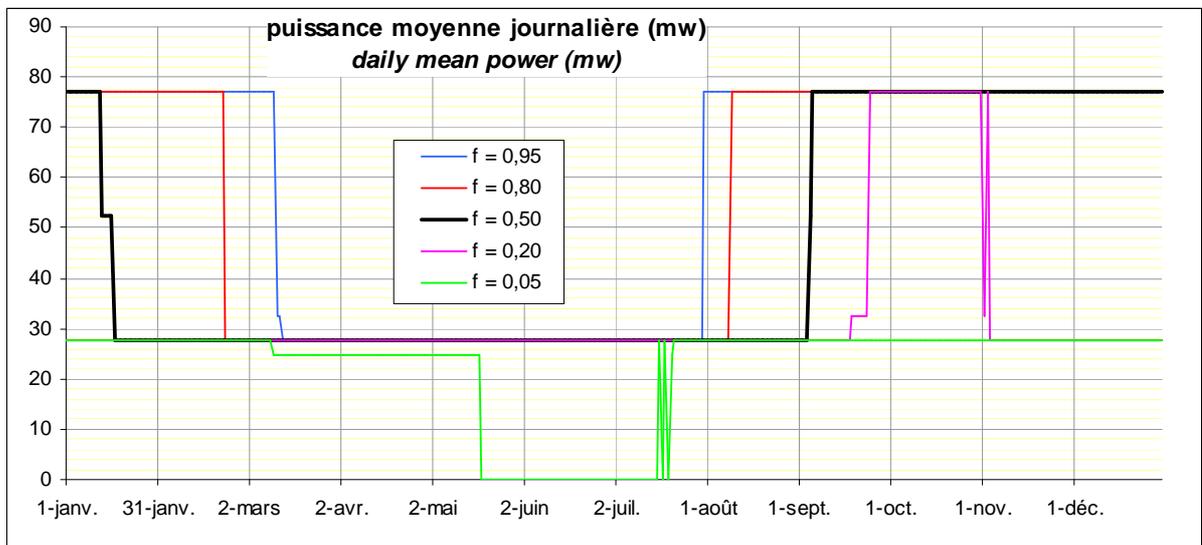
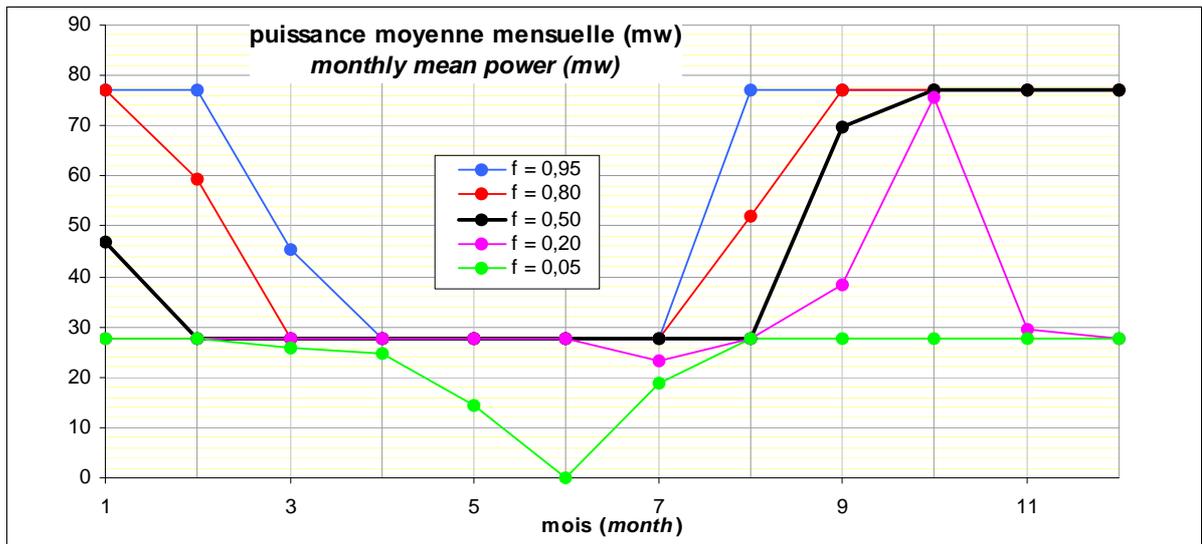


figure E1 : courbes annuelles iso-fréquence décrivant les variations de puissance mensuelle, puissance journalière et niveau du plan d'eau dans le cas du scénario A (1954-2001), pour différentes valeurs de fréquence  $f$  de non dépassement

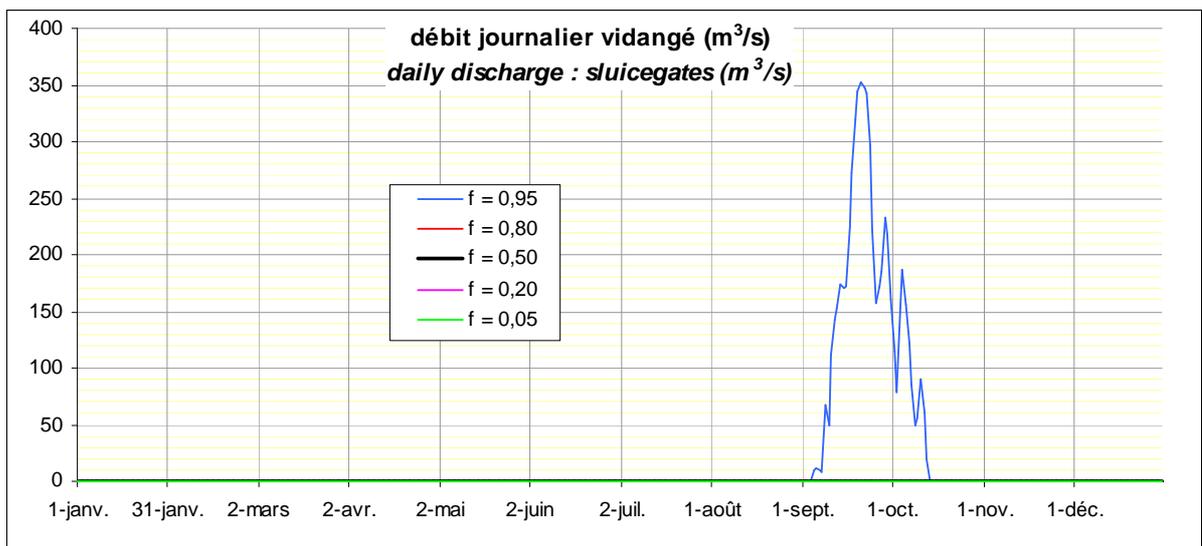
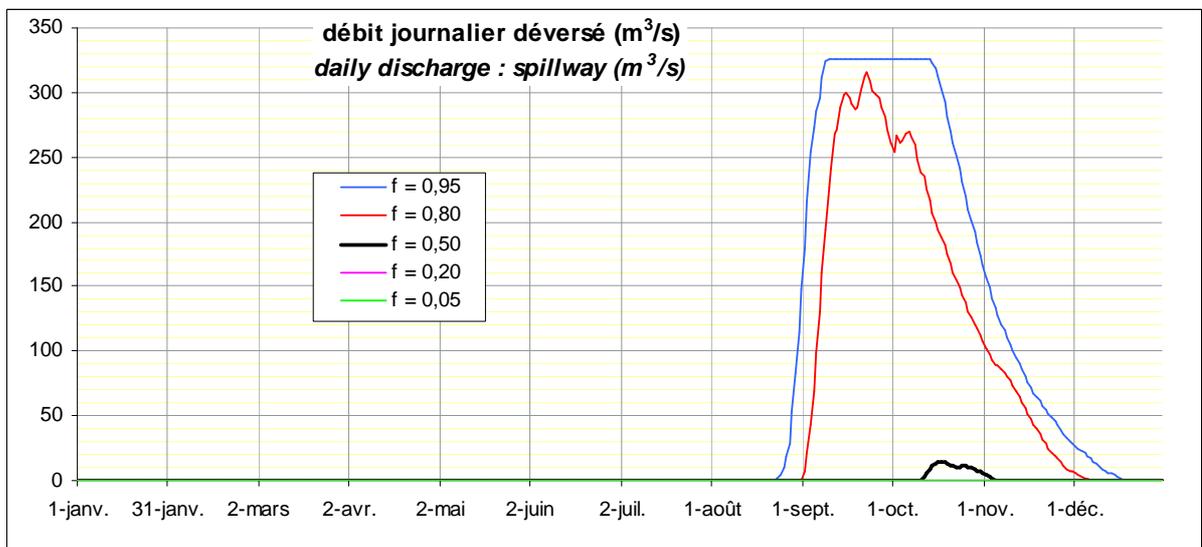
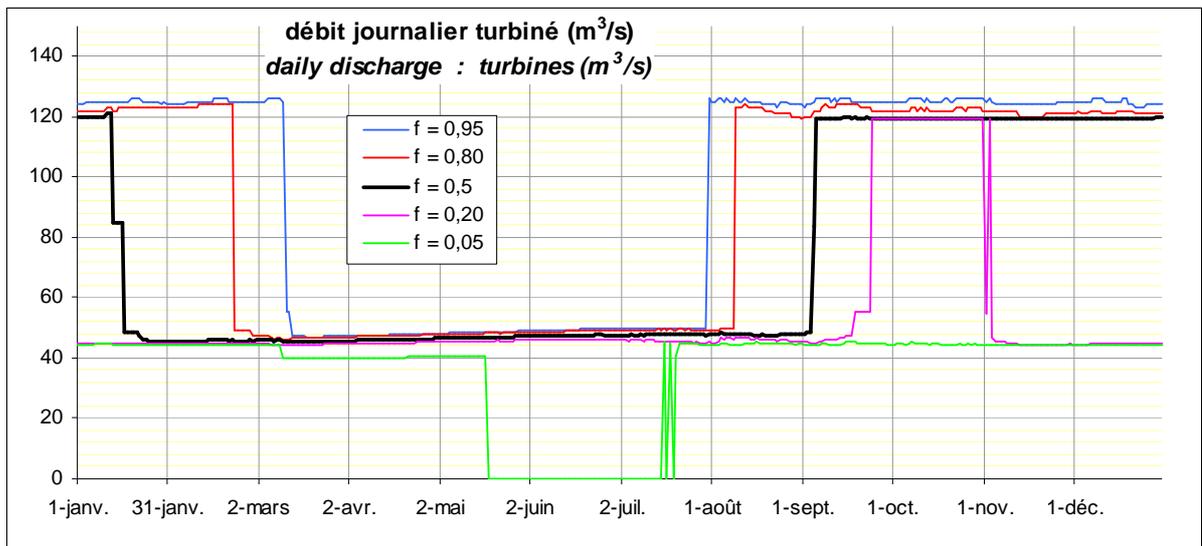


figure E2 : courbes annuelles iso-fréquence décrivant les variations de débit turbiné, déversé et vidangé dans le cas du scénario A (1954-2001), pour différentes valeurs de fréquence f de non dépassement

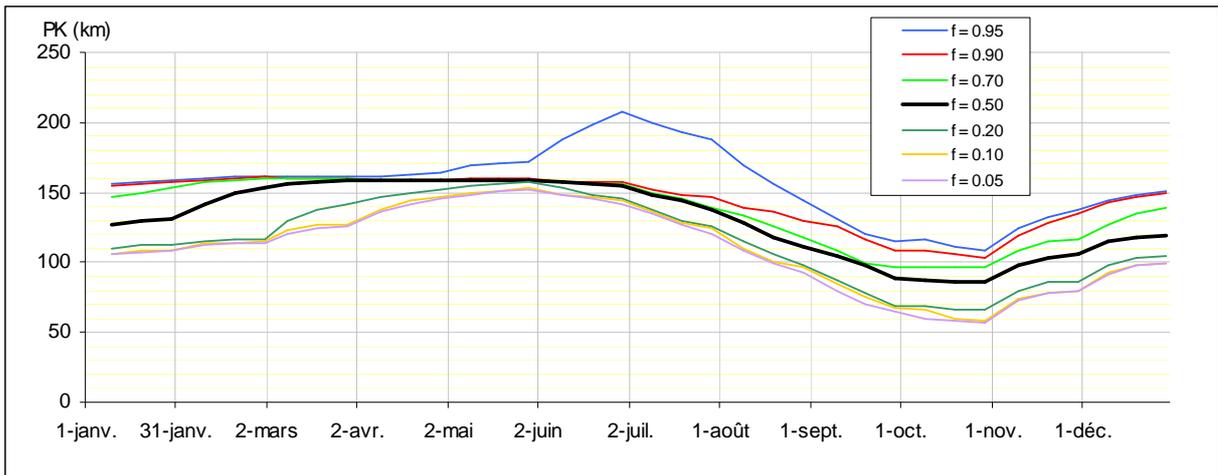


figure E3 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 1g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences f au non dépassement. Scénario A, période 1954-2001.

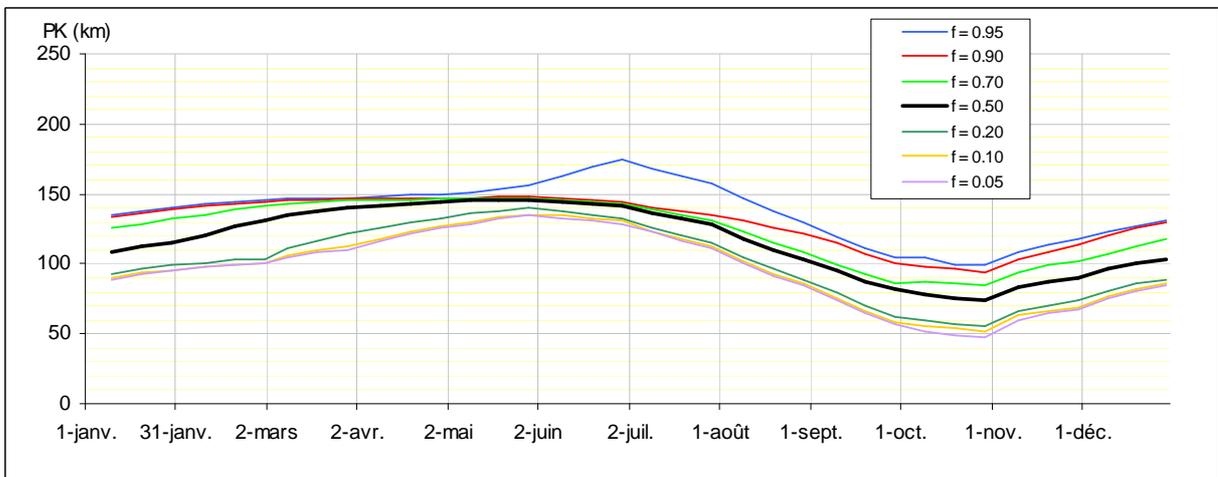


figure E4 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 5g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences f au non dépassement. Scénario A, période 1954-2001

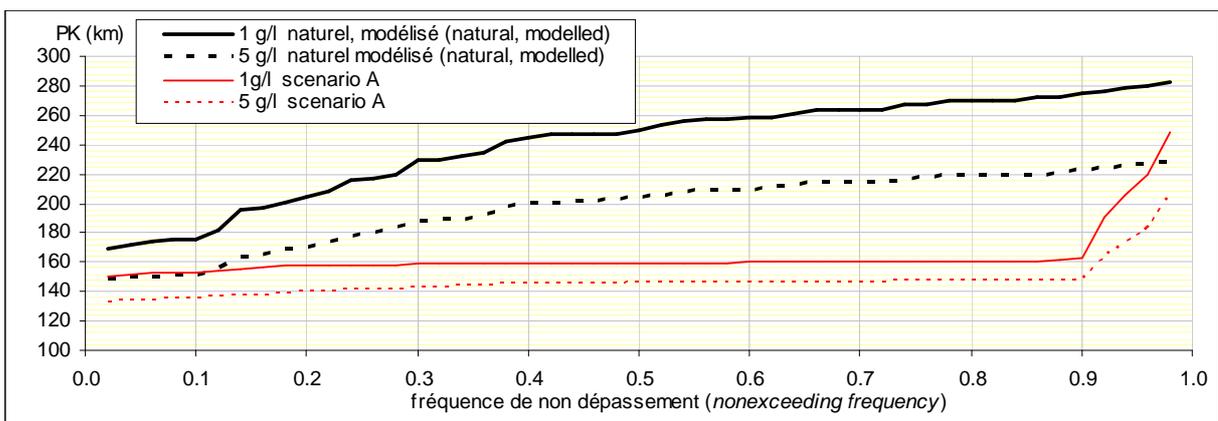


figure E5 : Fonctions de répartition (1954-2001) de la distance PK maximale annuelle relative aux concentrations 1g/l et 5 g/l pour le régime naturel modélisé depuis Sambangalou et le scénario A.

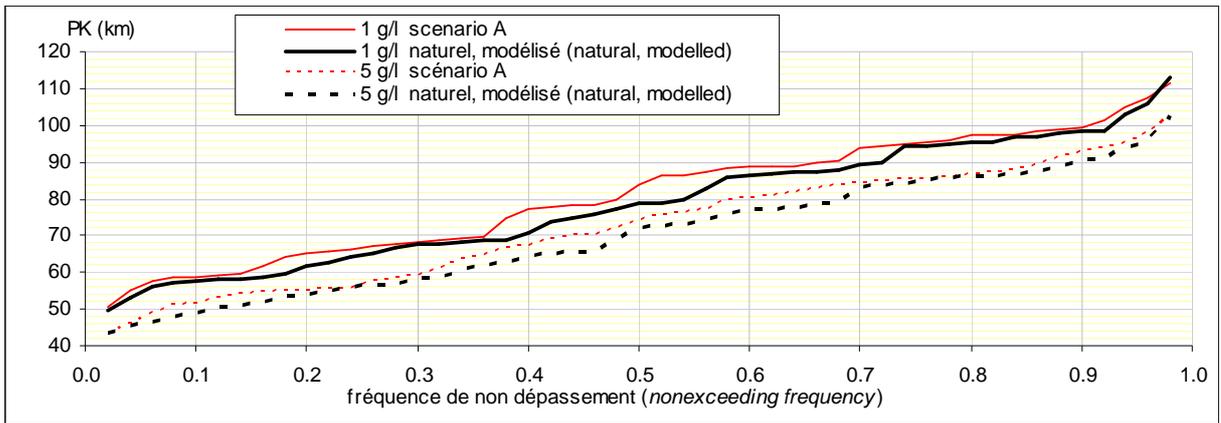


figure E6 : Fonctions de répartition (1954-2001) de la distance PK minimale annuelle relative aux concentrations 1g/l et 5 g/l pour le régime naturel modélisé depuis Sambangalou et le scénario A.

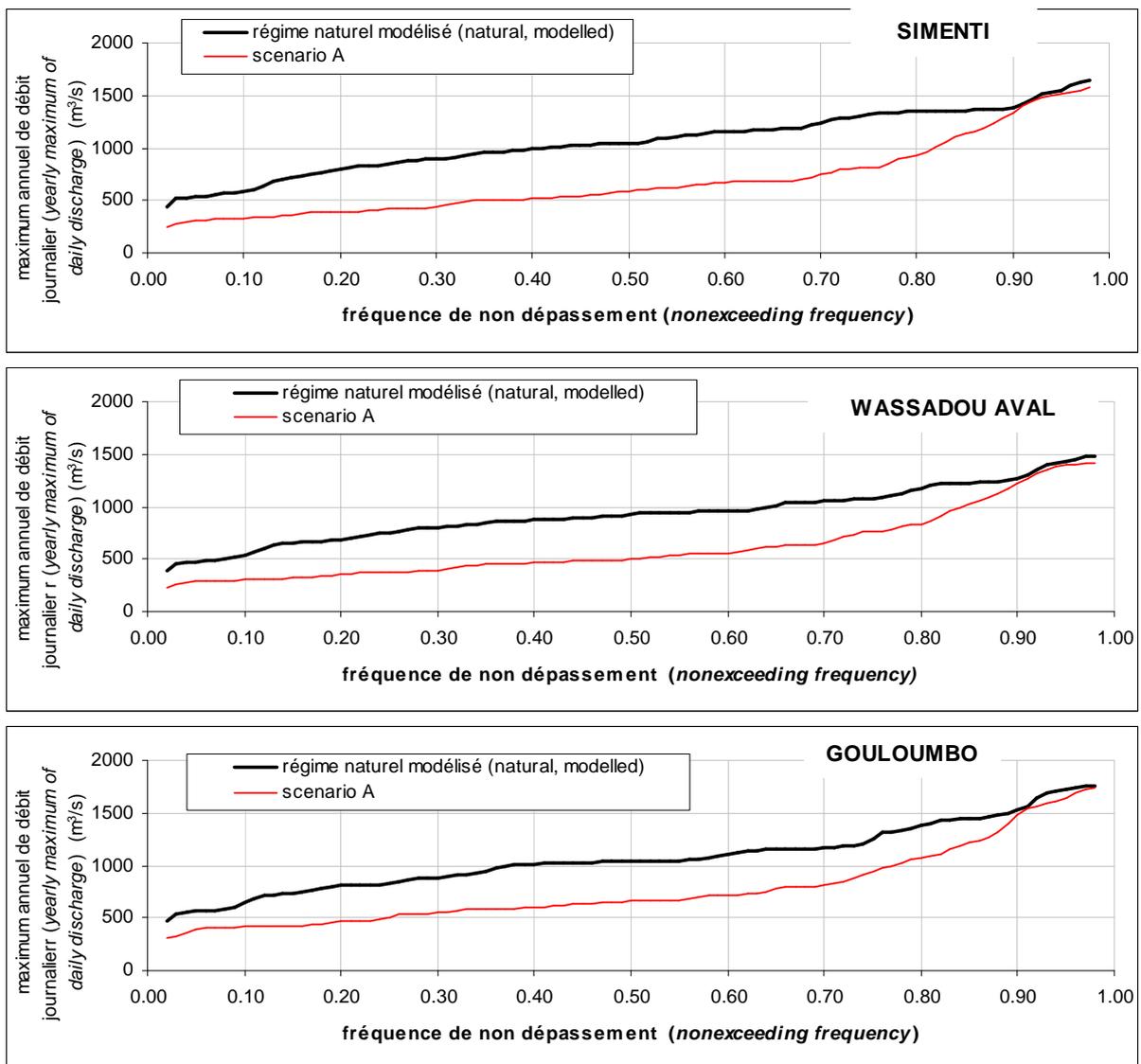


figure E7 : fonctions de répartition des maximums annuels de débit journalier pour le régime naturel modélisé et le scénario A, à Simenti et Gouloumbo.

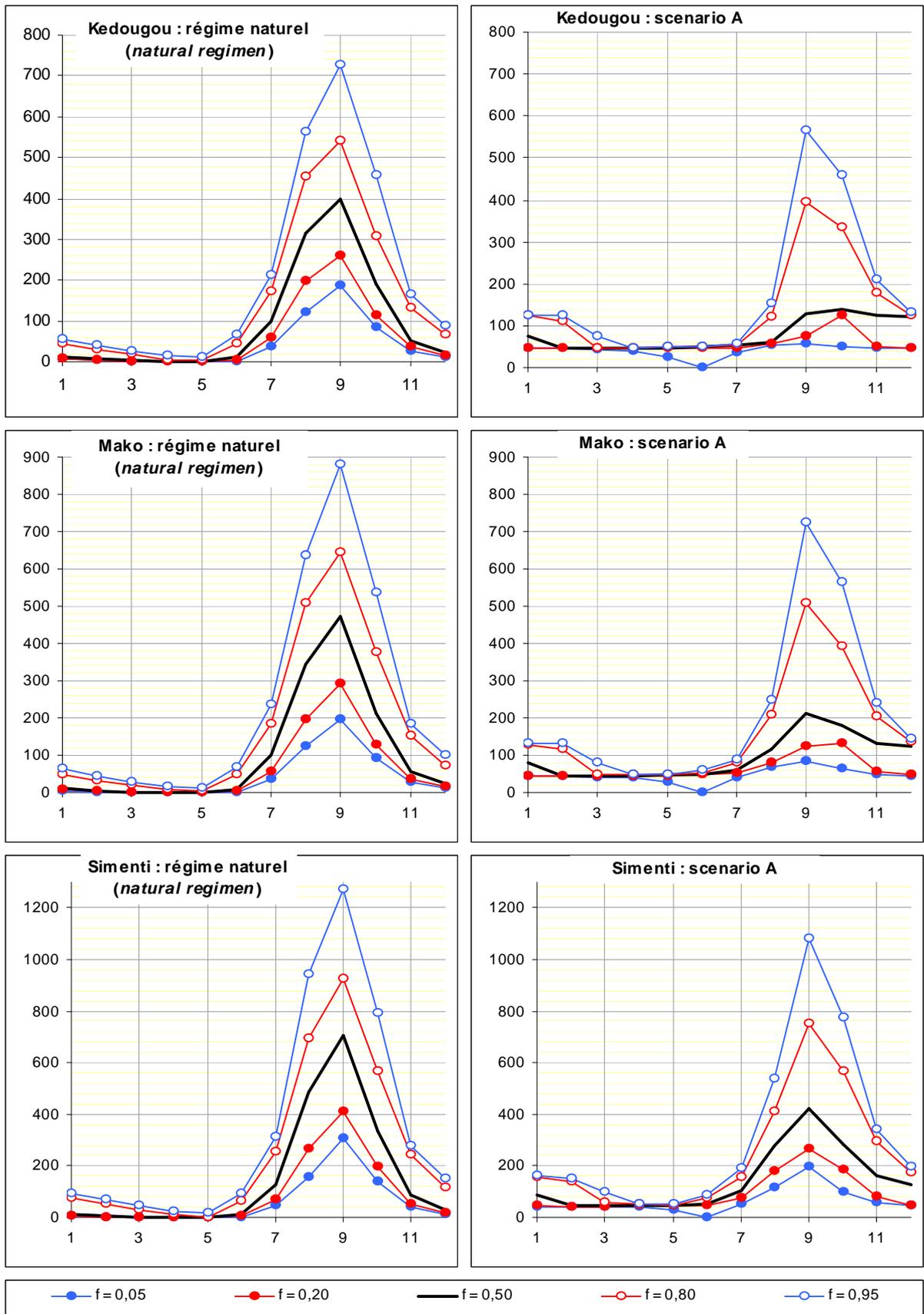


Figure E8-1 : Débit moyen mensuel ( $m^3/s$ ) des 12 mois de l'année à Kédougou, Mako et Simenti, pour différentes fréquences  $f$  de non dépassement. Régime naturel et scénario A

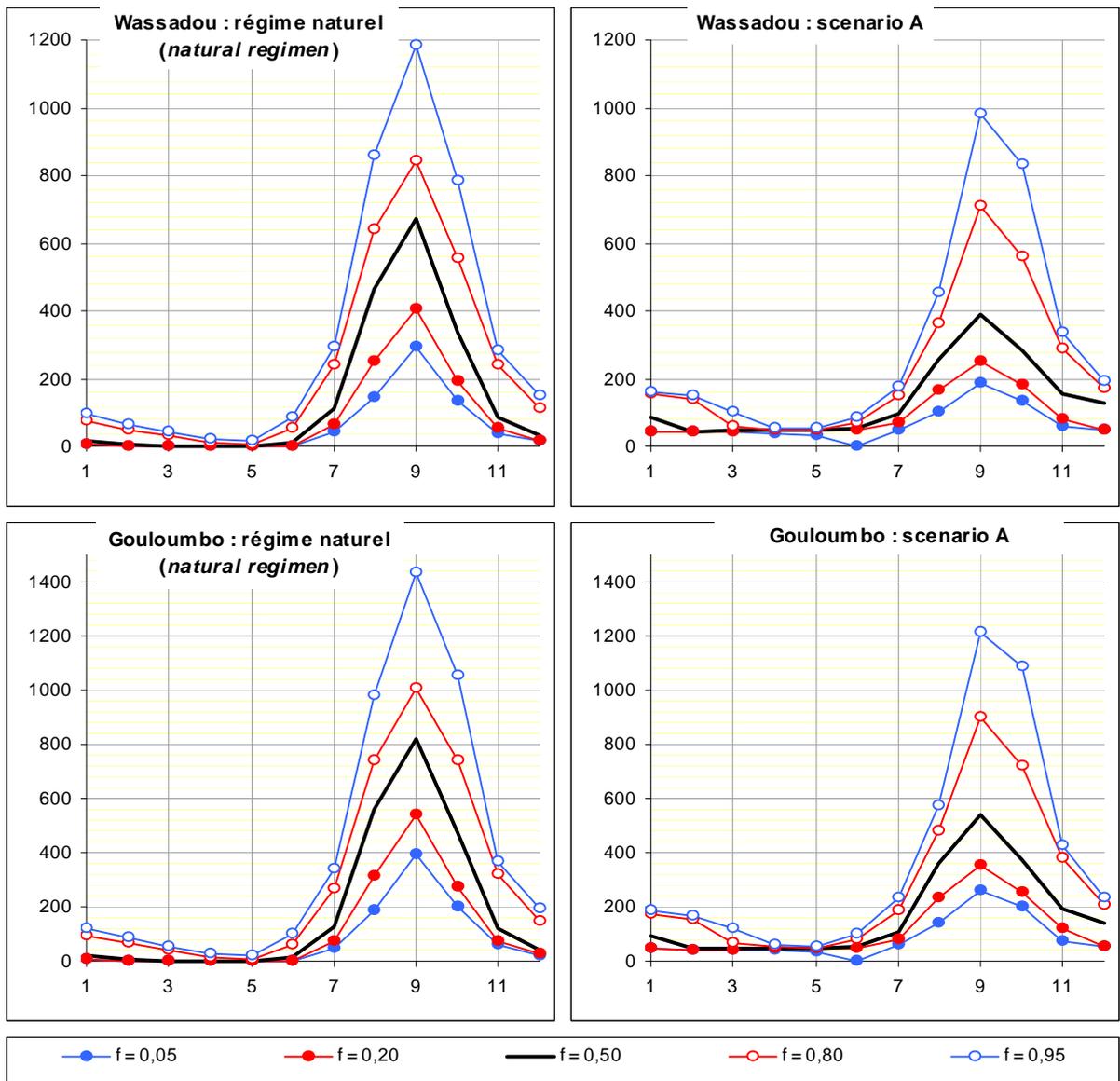


figure E8-2 : Débit moyen mensuel ( $m^3/s$ ) des 12 mois de l'année à Wassadou aval et Gouloumbo pour différentes fréquences  $f$  de non dépassement. Régime naturel et scénario A

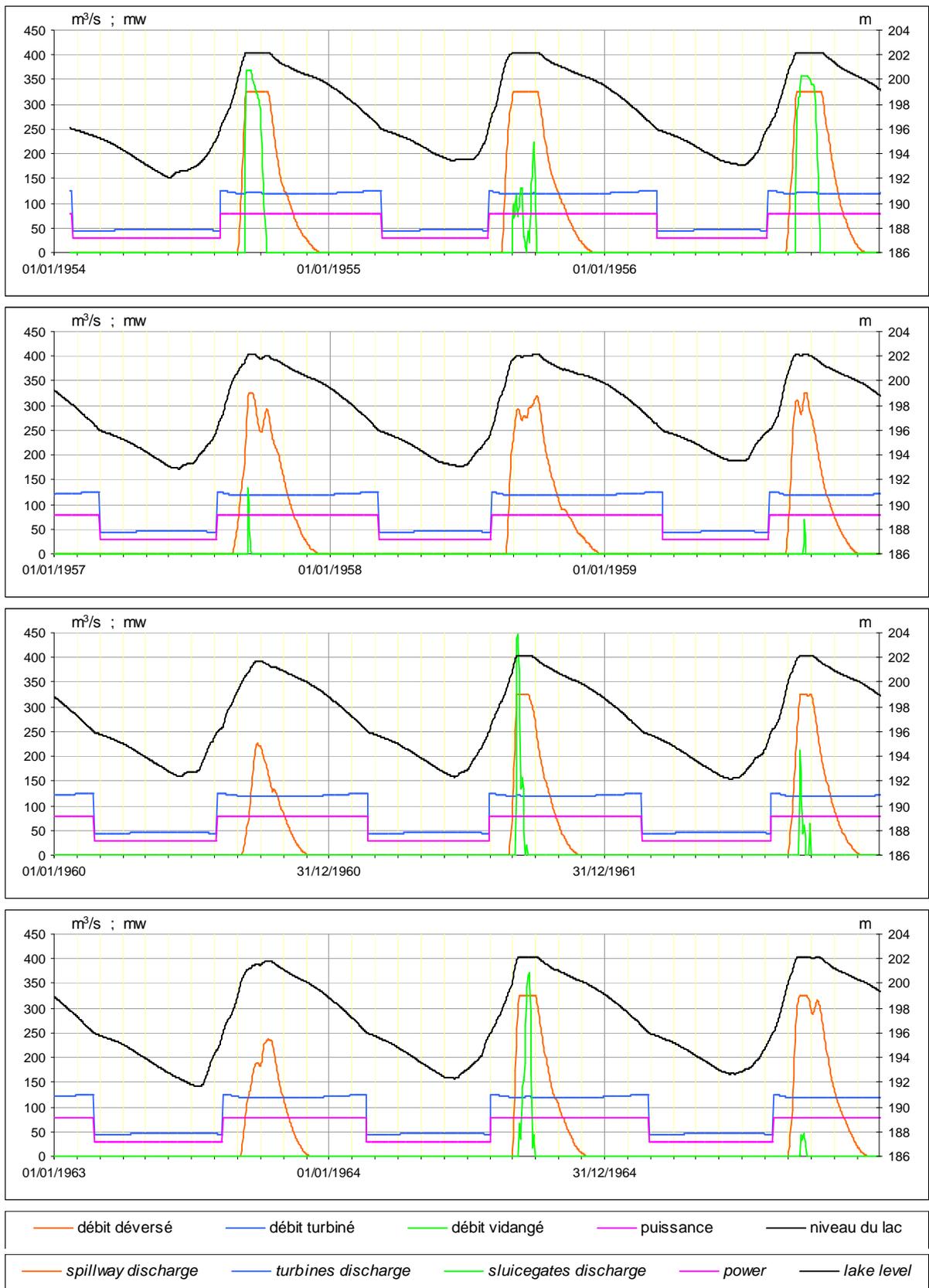


figure E9-1 : Scénario A. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1954-1965

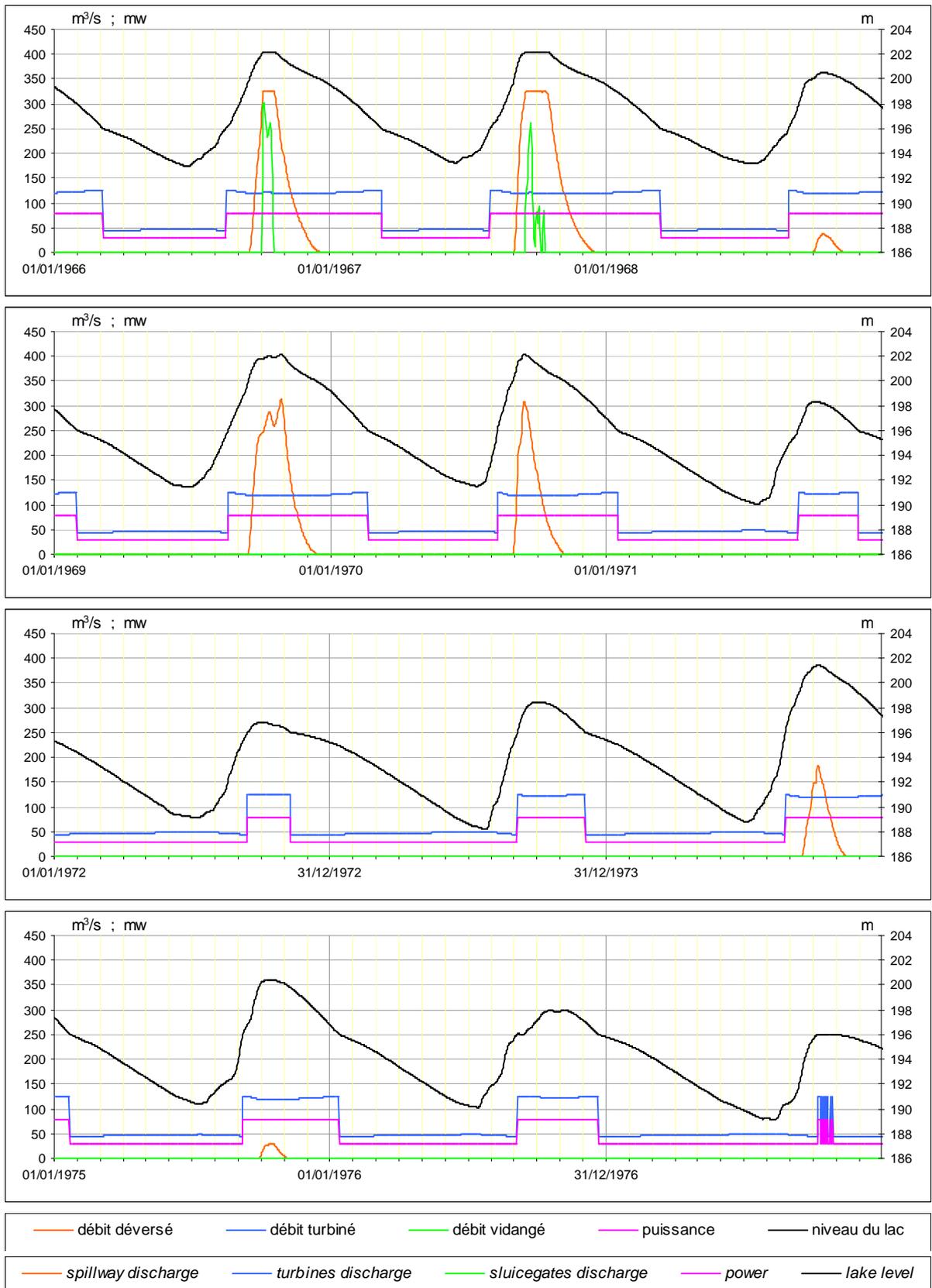


figure E9-2 : Scénario A. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1966-1977

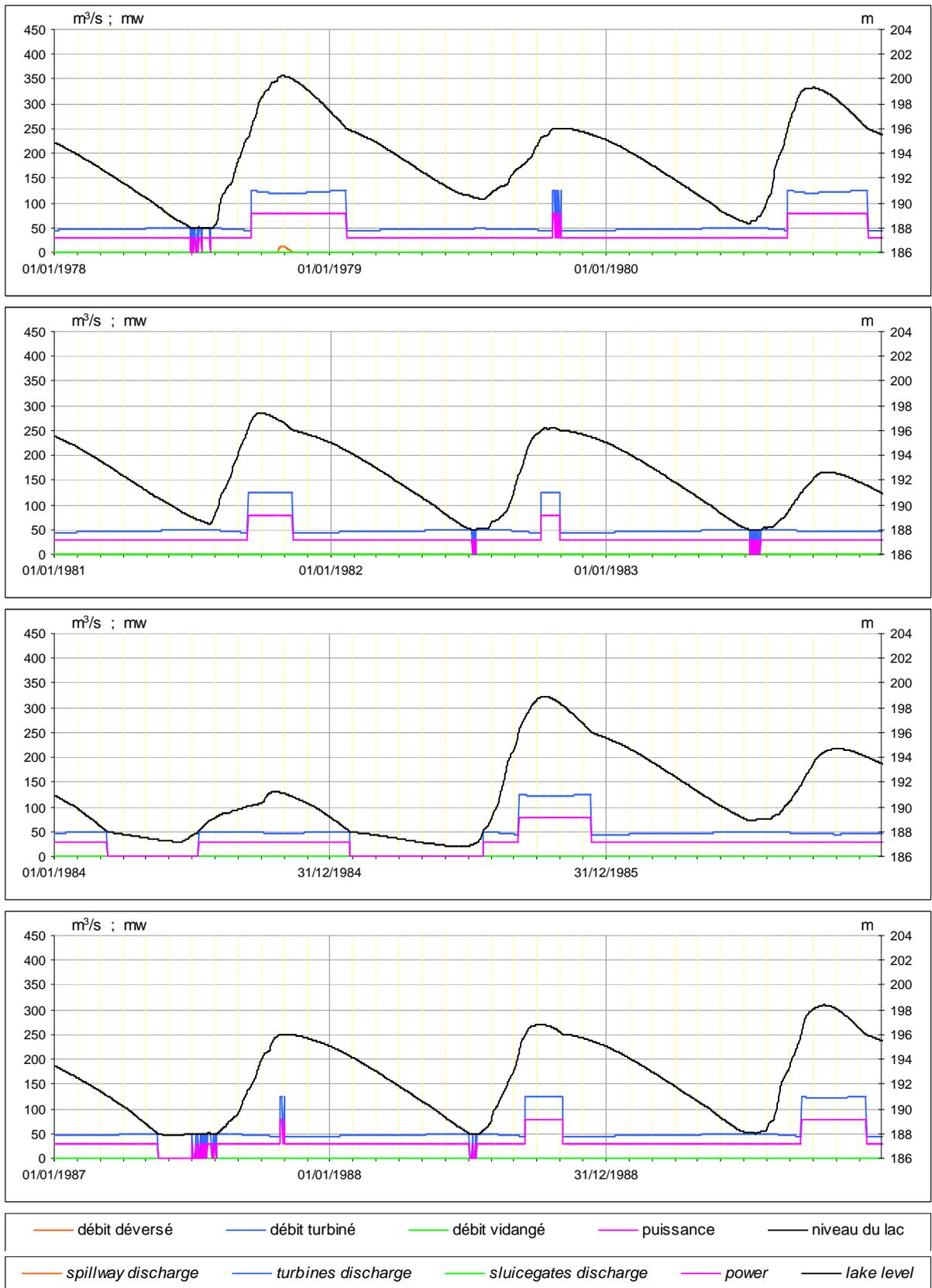


figure E9-3 : Scénario A. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1978-1989

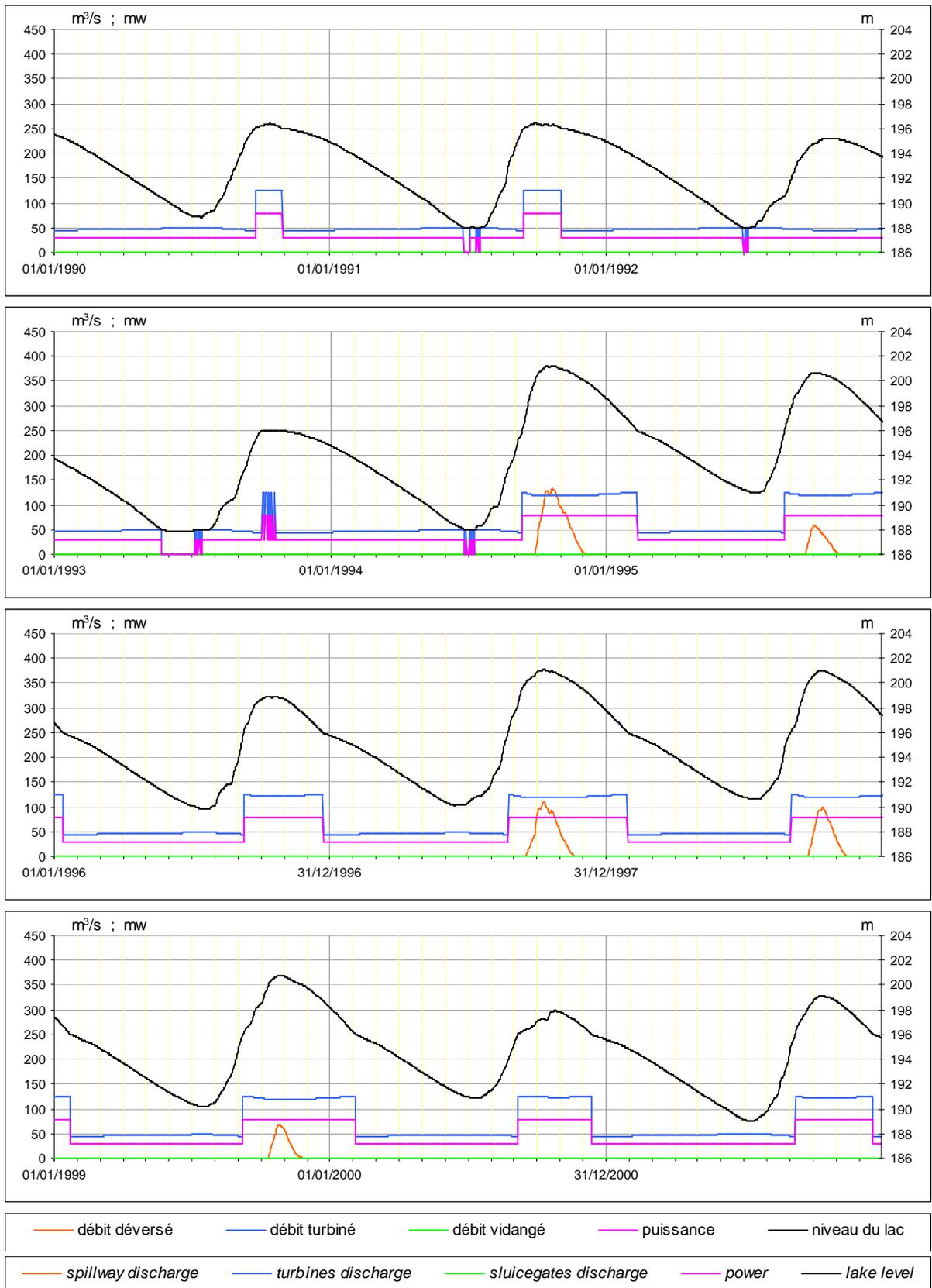


figure E9-4 : Scénario A. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1990-2001

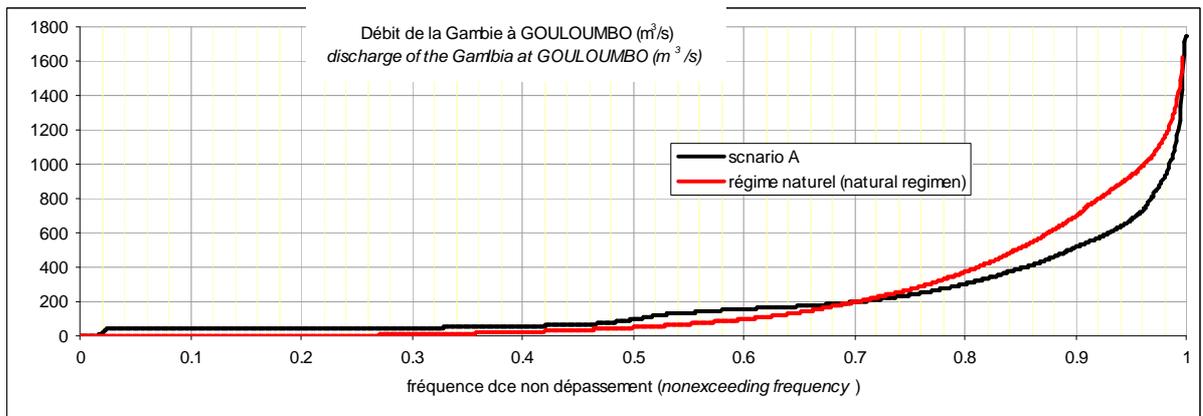
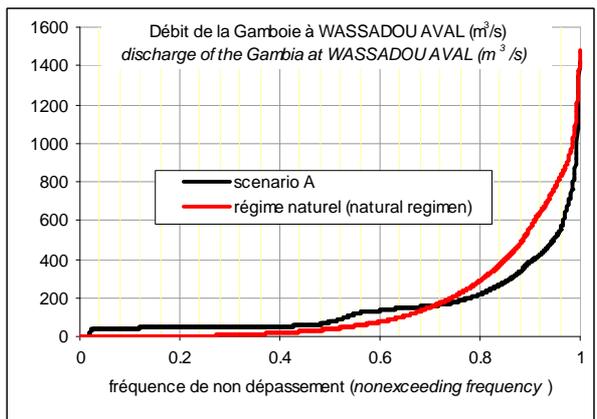
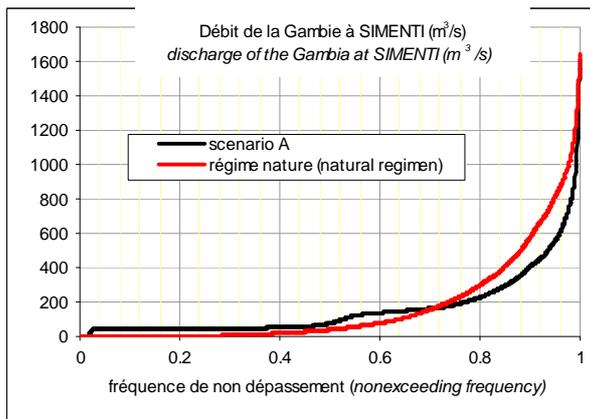
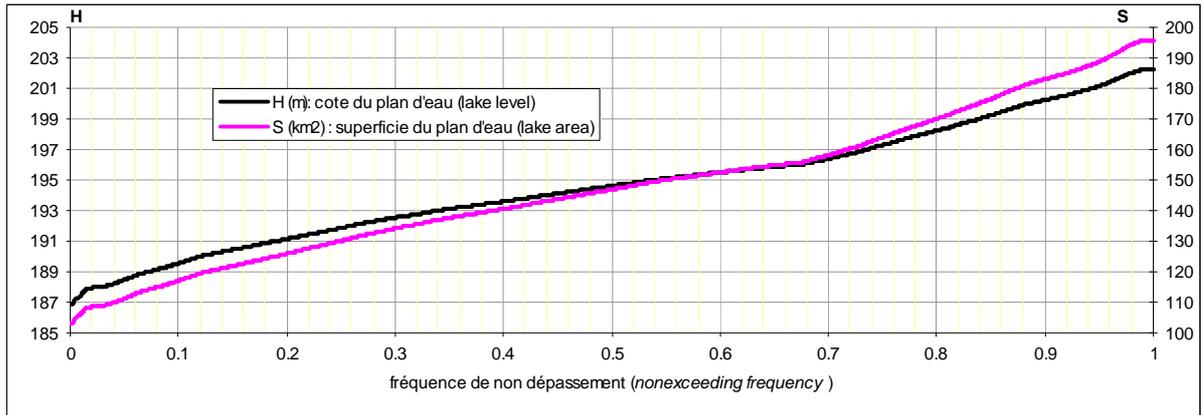
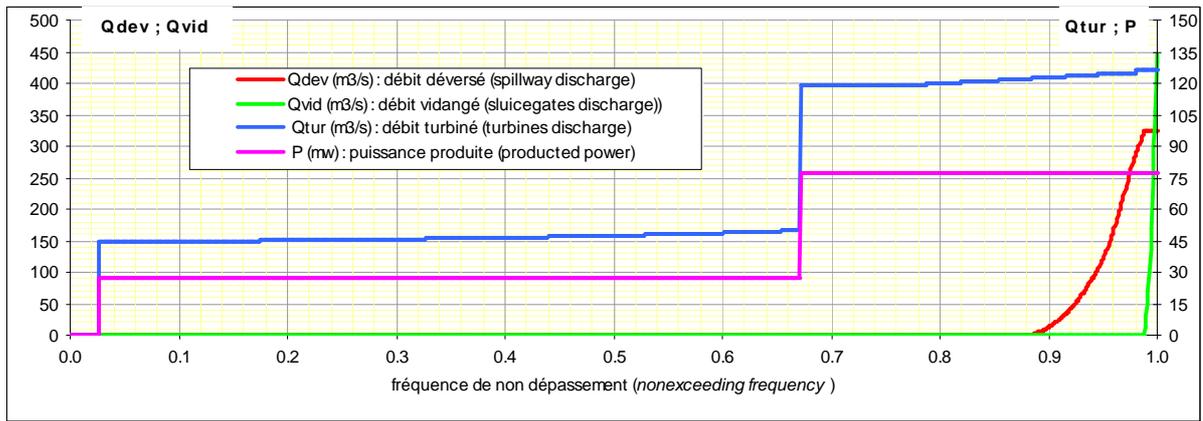


figure E10 : Scénario A. Fonctions de répartition (1954-2001) des valeurs journalières de débit (turbiné, déversé, vidangé et stations aval), puissance produite, niveau et surface de plan d'eau

## Annexe F : Détail de résultats concernant les simulations de gestion du scénario B

			janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct	nov	déc
cote moyenne mensuelle (m) relative au régime naturel modélisé	décennal sec	Kédougou	103.31	103.18	103.07	102.96	102.96	103.13	104.08	104.83	105.55	104.49	103.81	103.47
		Mako	75.63	75.34	75.01	74.88	74.88	75.27	76.54	77.27	77.94	77.02	76.31	75.91
		Simenti	10.95	10.47	10.35	10.34	10.34	10.65	12.04	13.20	14.80	12.97	11.86	11.35
		Wassadou Gouloumbo	5.45 5.06	5.06 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	5.13 6.90	6.90 2.53	8.65 2.53	10.82 4.42	8.42 2.52	6.75 2.52	5.93 2.52
	médiann	Kédougou	103.42	103.28	103.16	103.04	102.99	103.37	104.54	106.21	106.78	105.28	104.08	103.65
		Mako	75.85	75.58	75.30	74.88	74.88	75.75	76.99	78.31	78.77	77.69	76.61	76.17
		Simenti	11.26	10.87	10.43	10.35	10.35	11.19	12.67	15.50	17.05	14.33	12.28	11.61
		Wassadou Gouloumbo	5.83 5.37	5.37 4.99	4.99 4.80	4.80 4.80	4.80 4.80	5.68 7.81	7.81 11.65	11.65 13.54	13.54 6.98	10.35 4.52	7.43 1.76	6.32 1.76
	décennal humide	Kédougou	104.12	103.88	103.62	103.39	103.32	104.18	105.32	107.34	108.16	106.72	105.03	104.41
		Mako	76.63	76.41	76.16	75.85	75.69	76.66	77.67	79.03	79.58	78.73	77.49	76.92
		Simenti	12.32	12.01	11.72	11.40	11.22	12.25	13.88	17.53	19.74	16.97	13.87	12.80
		Wassadou Gouloumbo	7.49 1.68	7.01 1.68	6.52 1.68	6.02 1.68	5.77 1.68	7.30 1.46	9.49 3.07	13.89 7.09	16.38 9.69	13.58 7.33	9.72 3.56	8.20 2.20
cote moyenne mensuelle (m) relative au scénario B	décennal sec	Kédougou	104.12	104.13	104.13	104.13	103.70	103.12	104.07	104.24	104.25	104.18	104.13	104.12
		Mako	76.57	76.57	76.57	76.58	76.21	75.46	76.62	76.83	76.98	76.76	76.62	76.58
		Simenti	11.91	11.90	11.90	11.92	11.63	11.03	12.12	12.78	13.48	12.57	12.11	11.96
		Wassadou Gouloumbo	6.87 6.84	6.84 6.84	6.84 6.84	6.88 6.88	6.43 6.43	5.43 7.10	7.10 8.06	8.06 9.06	9.06 7.80	7.80 7.12	7.12 1.47	6.93 1.47
	médiann	Kédougou	104.13	104.13	104.14	104.15	104.15	104.17	104.21	104.46	104.69	105.20	104.18	104.14
		Mako	76.59	76.59	76.59	76.59	76.60	76.63	76.77	77.29	77.61	77.67	76.71	76.61
		Simenti	11.95	11.92	11.95	11.95	11.96	12.03	12.56	14.09	14.96	14.10	12.39	12.03
		Wassadou Gouloumbo	6.93 6.88	6.88 6.92	6.92 6.93	6.93 6.94	6.94 7.02	7.02 1.75	1.75 3.75	3.75 4.98	4.98 3.96	3.96 1.86	1.86 1.86	1.86 1.86
	décennal humide	Kédougou	104.16	104.17	104.17	104.18	104.18	104.19	104.24	105.62	107.74	106.92	105.39	104.29
		Mako	76.66	76.64	76.62	76.61	76.62	76.70	76.93	78.20	79.39	78.87	77.81	76.84
		Simenti	12.34	12.22	12.12	12.03	12.00	12.34	13.08	15.88	18.91	17.24	14.38	12.70
		Wassadou Gouloumbo	7.51 1.68	7.33 1.54	7.16 1.54	7.04 1.54	7.00 1.54	7.48 1.58	8.47 2.44	11.87 5.59	15.55 8.95	13.82 7.36	10.38 4.15	8.08 2.15
différence de cote moyenne mensuelle (m) entre scénario B et régime naturel	décennal sec	Kédougou	0.82	0.95	1.06	1.17	0.74	-0.01	-0.01	-0.58	-1.31	-0.31	0.32	0.65
		Mako	0.94	1.23	1.56	1.70	1.33	0.18	0.08	-0.44	-0.96	-0.26	0.31	0.67
		Simenti	0.96	1.42	1.55	1.58	1.29	0.38	0.08	-0.42	-1.33	-0.40	0.25	0.60
		Wassadou Gouloumbo	1.42 1.42	1.79 1.79	2.04 2.04	2.08 2.08	1.63 1.63	0.29 0.21	0.21 -0.29	-0.29 -1.20	-1.20 -0.33	-0.33 -0.33	0.37 0.37	1.00 1.00
	médiann	Kédougou	0.71	0.85	0.97	1.10	1.16	0.80	-0.32	-1.75	-2.09	-0.07	0.10	0.49
		Mako	0.75	1.01	1.29	1.71	1.72	0.88	-0.22	-1.02	-1.17	-0.01	0.09	0.44
		Simenti	0.69	1.05	1.52	1.60	1.61	0.84	-0.11	-1.41	-2.09	-0.23	0.11	0.42
		Wassadou Gouloumbo	1.10 1.10	1.51 1.51	1.93 1.93	2.13 2.13	2.13 2.13	1.34 -0.09	-0.09 -1.89	-1.89 -2.66	-2.66 -0.29	-0.29 0.14	0.14 0.70	0.70 0.70
	décennal humide	Kédougou	0.04	0.29	0.55	0.78	0.86	0.02	-1.08	-1.72	-0.42	0.20	0.36	-0.12
		Mako	0.03	0.23	0.46	0.76	0.92	0.04	-0.74	-0.83	-0.18	0.14	0.32	-0.08
		Simenti	0.02	0.21	0.40	0.63	0.78	0.09	-0.80	-1.65	-0.83	0.27	0.51	-0.11
		Wassadou Gouloumbo	0.02 0.00	0.32 0.00	0.65 0.00	1.02 0.00	1.22 0.00	0.19 0.13	-1.02 -0.63	-2.02 -1.50	-0.83 -0.75	0.24 0.04	0.65 0.59	-0.13 -0.05

Tableau F1 : niveaux moyens mensuels iso-fréquence du plan d'eau (cote IGN) à Kédougou, Mako, Simenti, Wassadou aval et Gouloumbo. Régime naturel modélisé, scénario B et différence entre ces deux régimes.

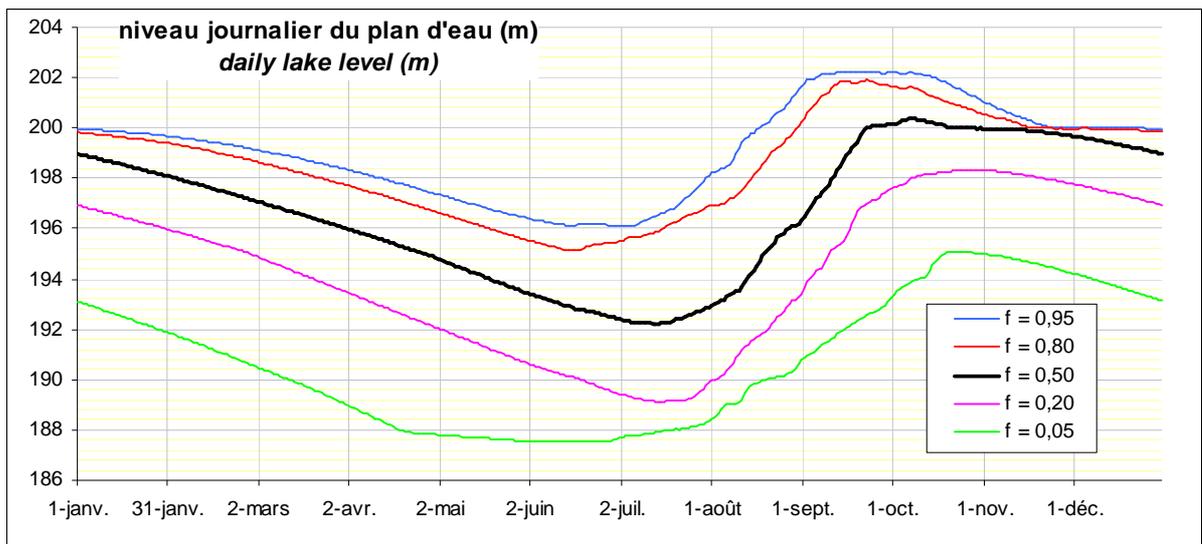
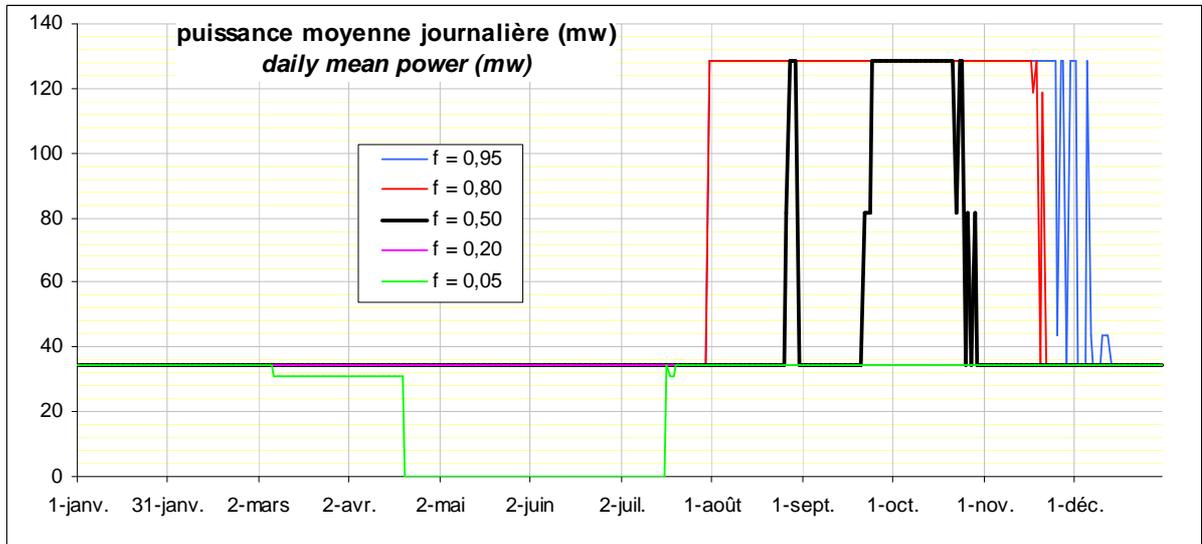
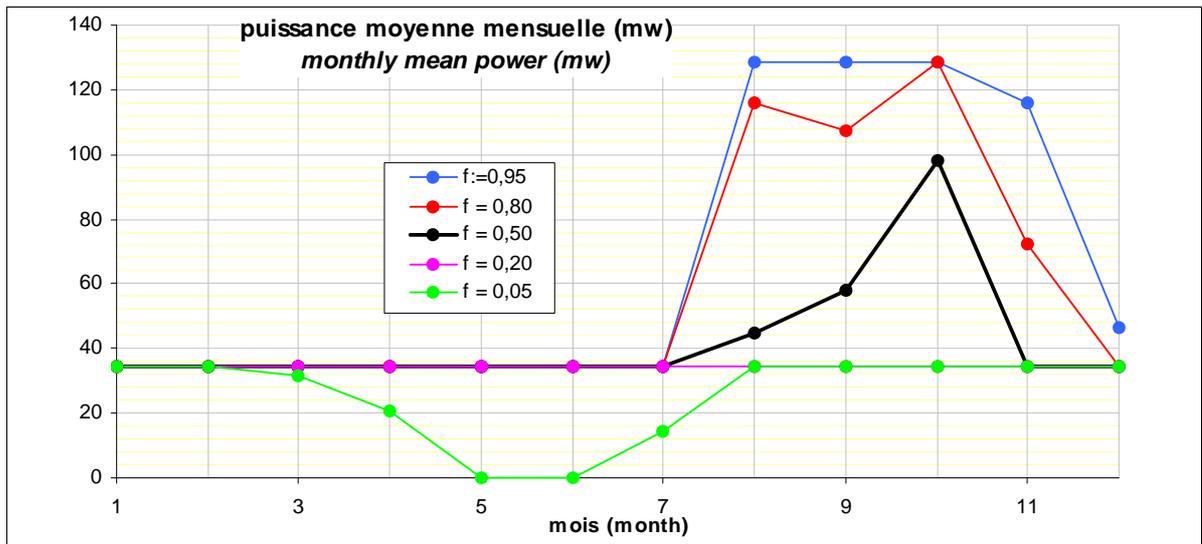


figure F1 : courbes annuelles iso-fréquence décrivant les variations de puissance mensuelle, puissance journalière et niveau du plan d'eau dans le cas du scénario B (1954-2001), pour différentes valeurs de fréquence  $f$  de non dépassement

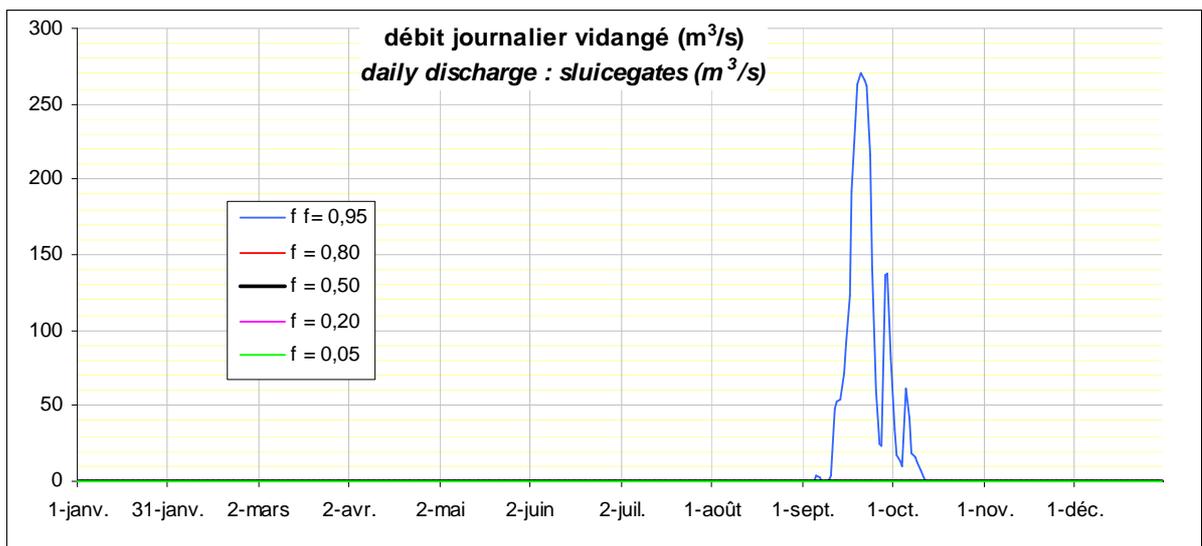
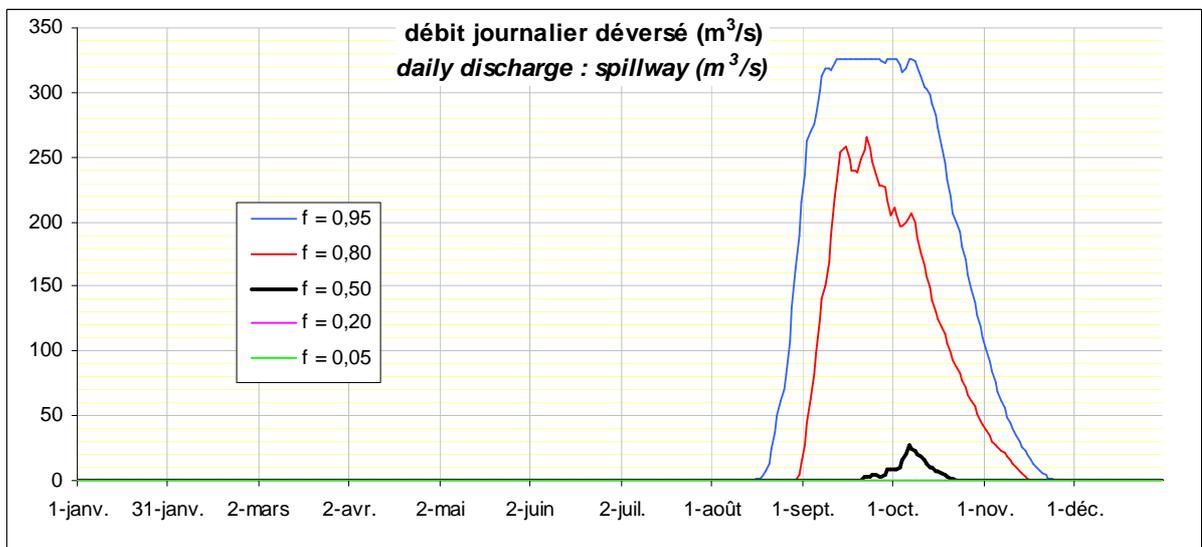
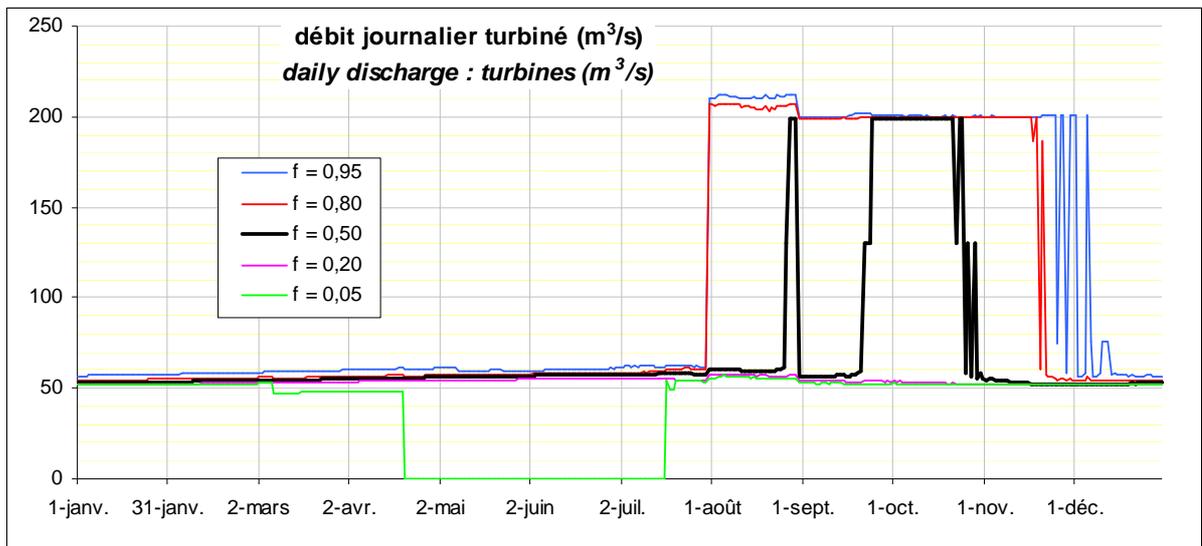


figure F2 : courbes annuelles iso-fréquence décrivant les variations de débit turbiné, déversé et vidangé dans le cas du scénario B (1954-2001), pour différentes valeurs de fréquence f de non dépassement

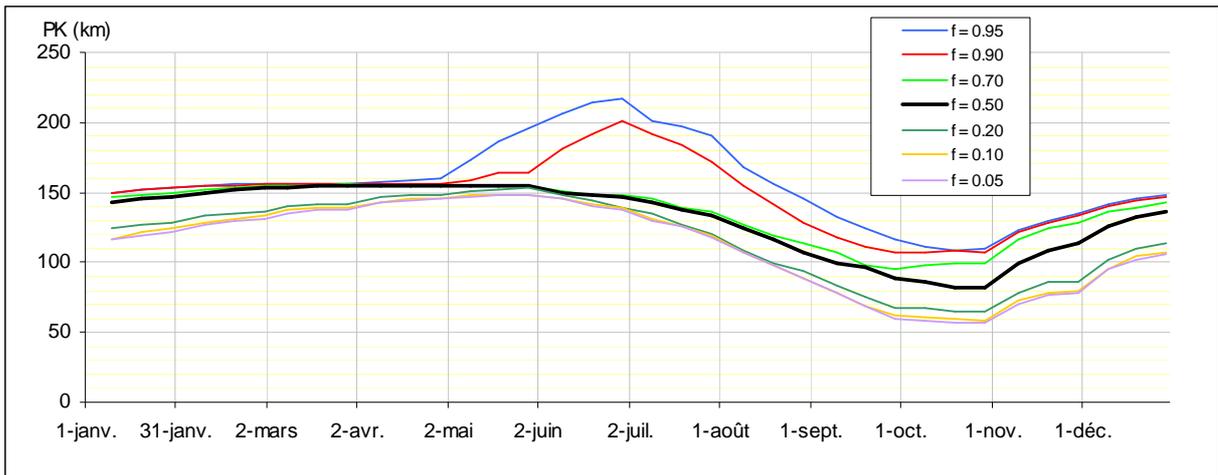


figure F3 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 1g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences f au non dépassement. Scénario B, période 1954-2001.

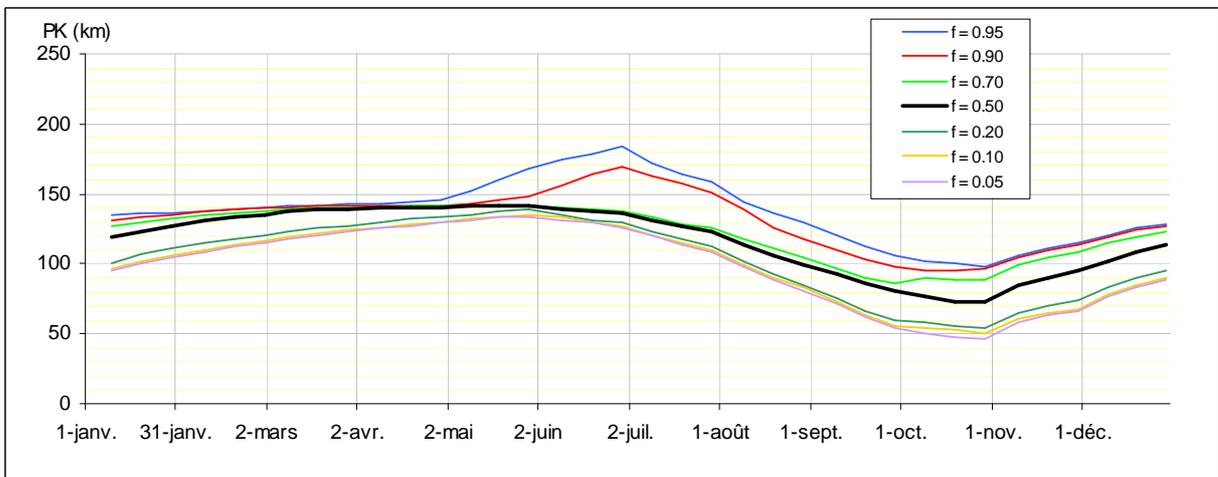


figure F4 : Distance PK à l'embouchure de la concentration à 5g/l tout au long de l'année, pour différentes fréquences f au non dépassement. Scénario B, période 1954-2001

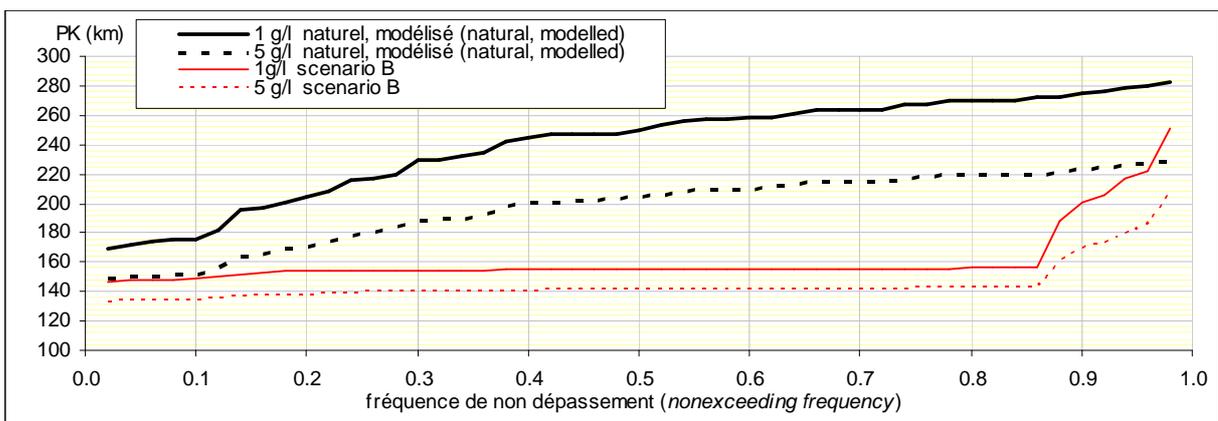


figure F5 : Fonctions de répartition (1954-2001) de la distance PK maximale annuelle relative aux concentrations 1g/l et 5 g/l, pour le régime naturel modélisé depuis Sambangalou et le scénario B.

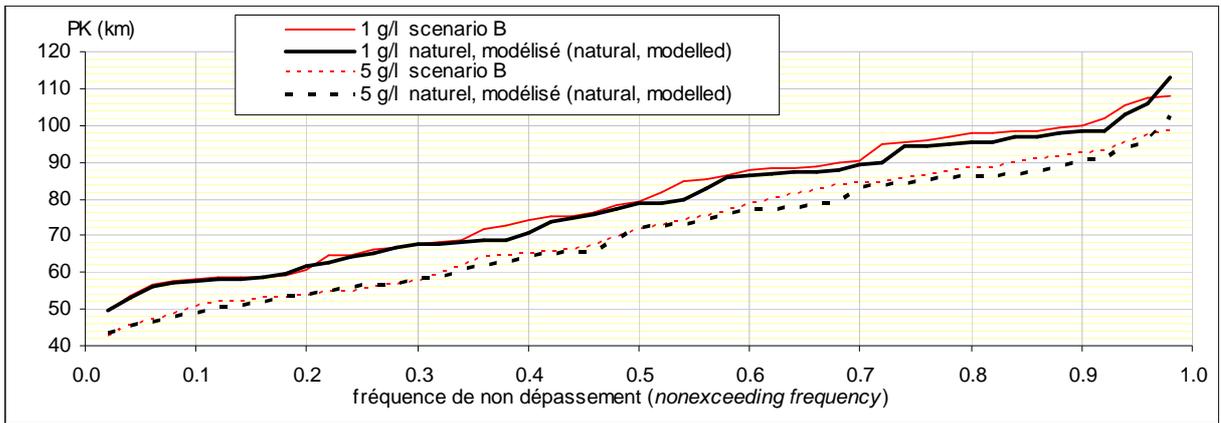


figure F6 : Fonctions de répartition (1954-2001) de la distance PK minimale annuelle relative aux concentrations 1g/l et 5 g/l, pour le régime naturel modélisé depuis Sambangalou et le scénario B.

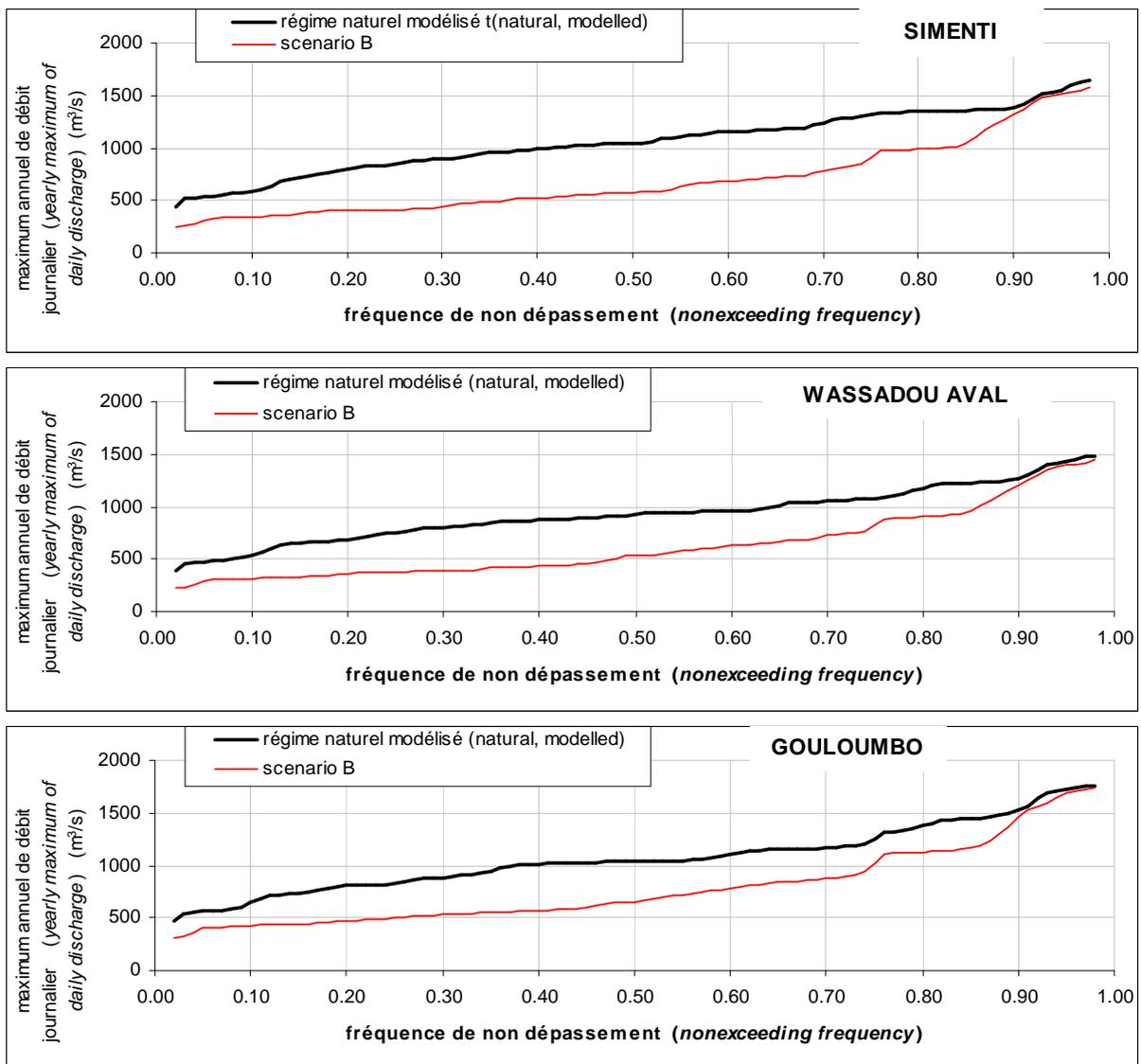


figure F7 : fonctions de répartition des maximums annuels de débit journalier pour le régime naturel modélisé et le scénario B, à Simenti et Gouloumbo.

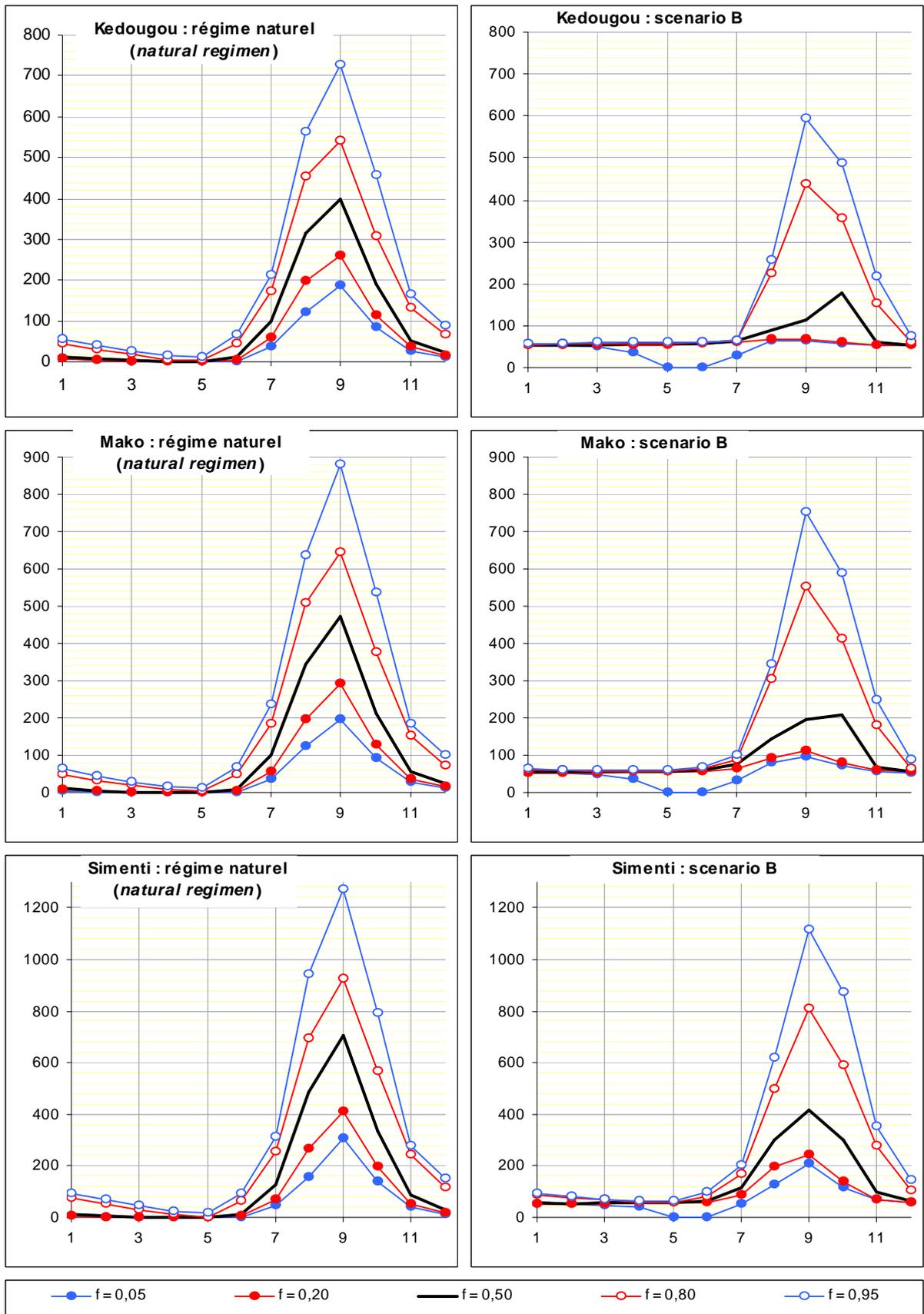


figure F8-1 : Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) des 12 mois de l'année à Kédougou, Mako et Simenti, pour différentes fréquences f de non dépassement. Régime naturel et scénario B

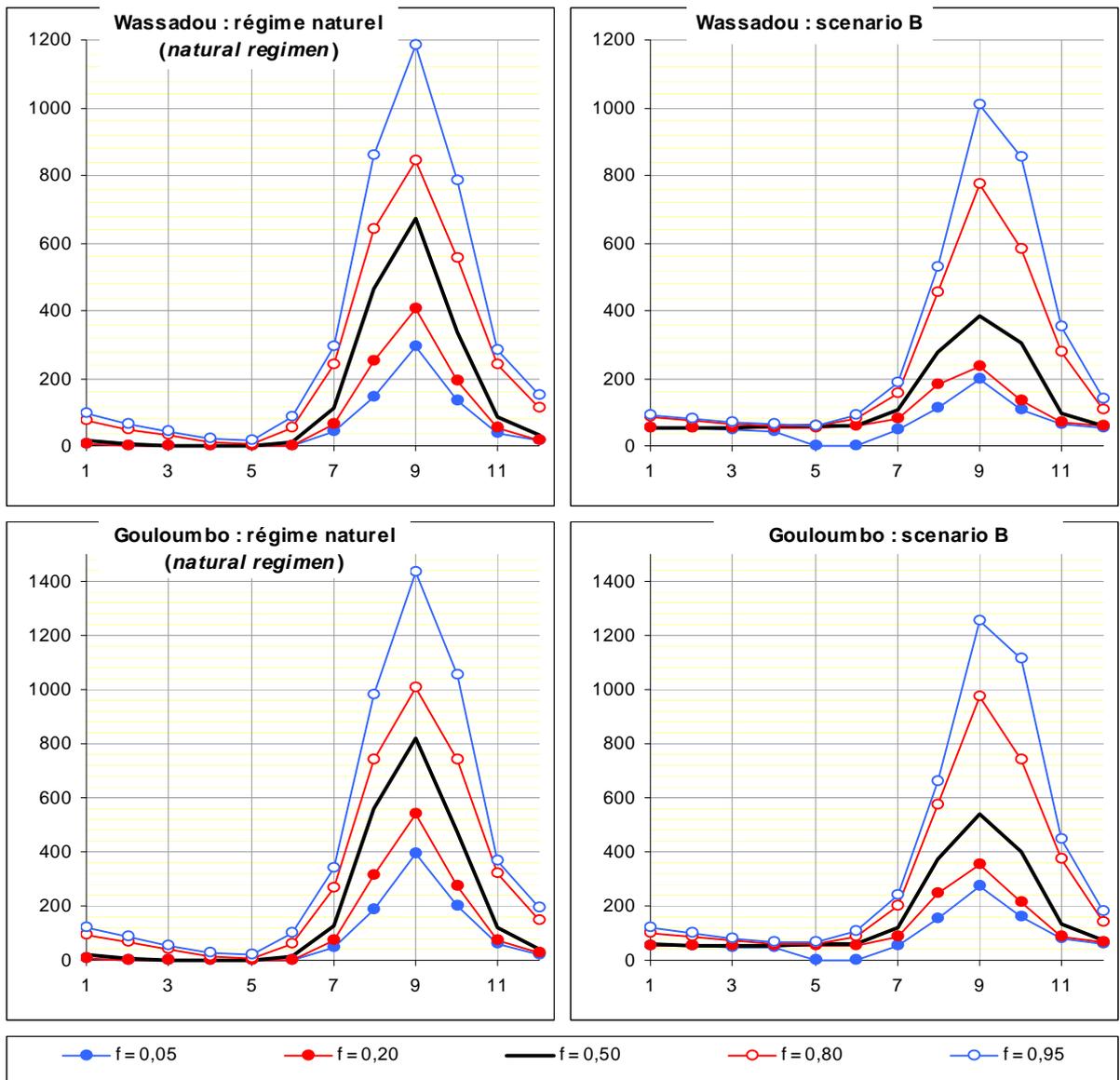


figure F8-2 : Débit moyen mensuel ( $m^3/s$ ) des 12 mois de l'année à Wassadou aval et Gouloumbo pour différentes fréquences  $f$  de non dépassement. Régime naturel et scénario B

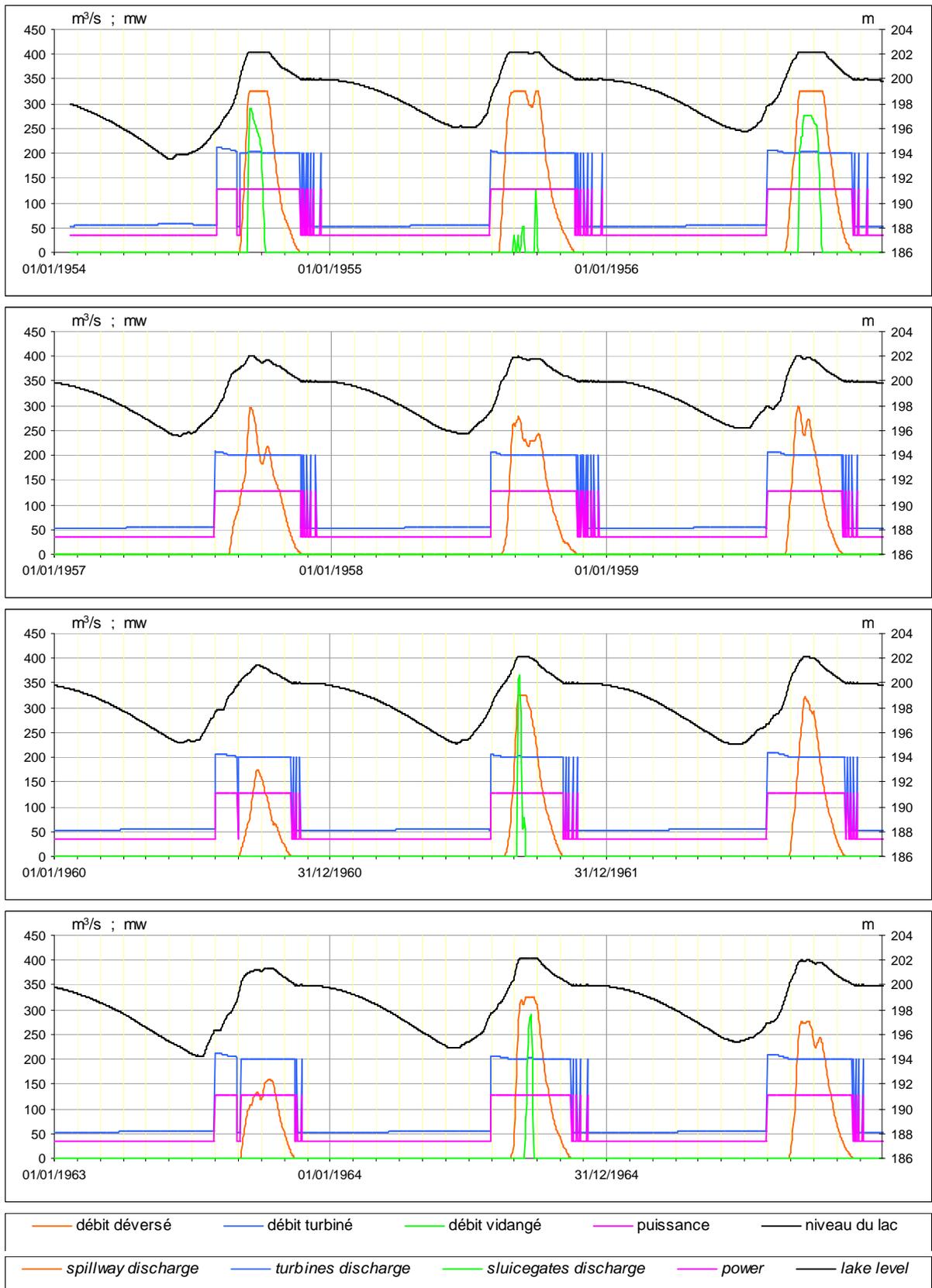


figure F9-1 : Scénario B. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1954-1965

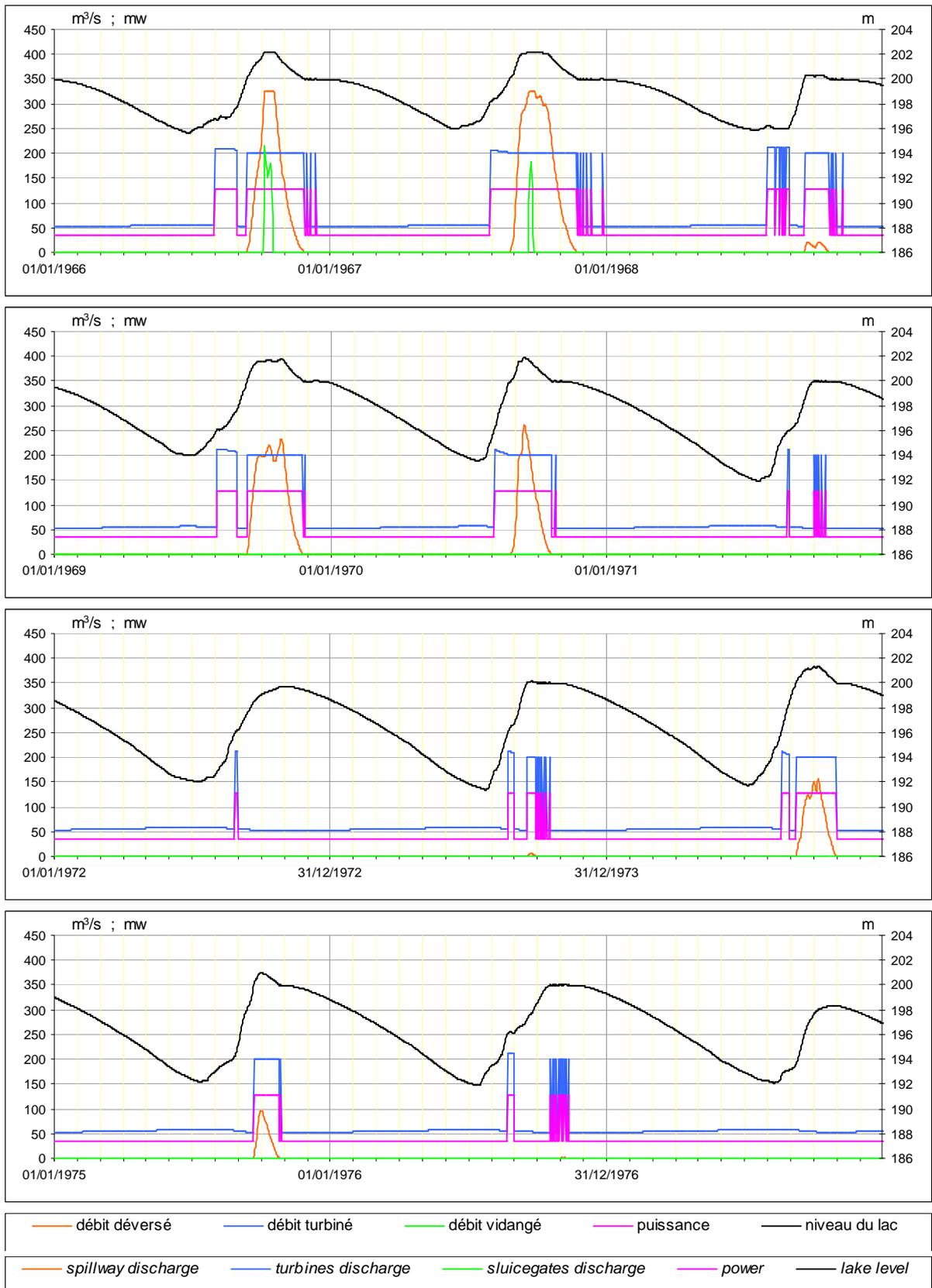


figure F9-2 : Scénario B. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1966-1977

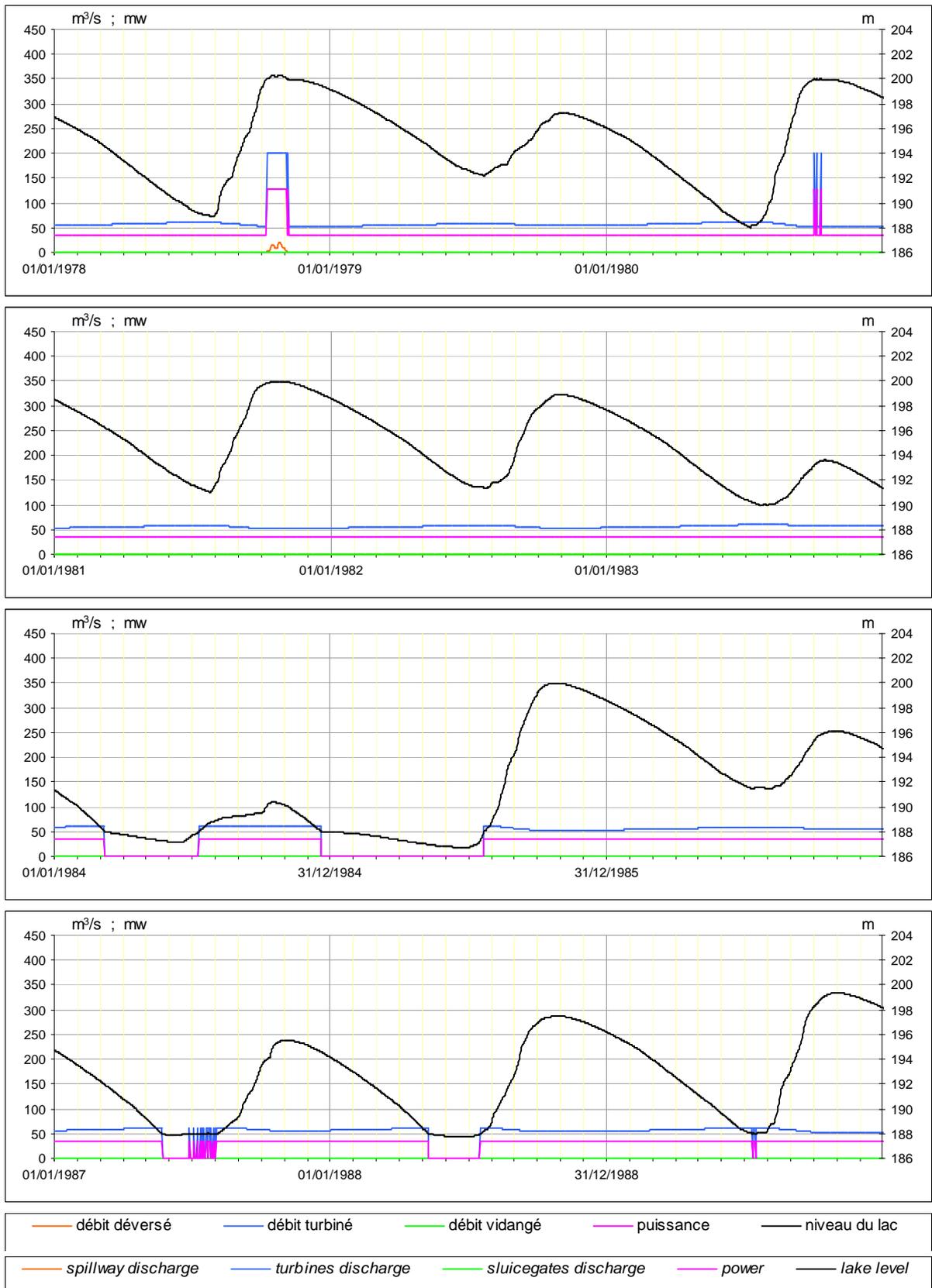


figure F9-3 : Scénario B. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1978-1989

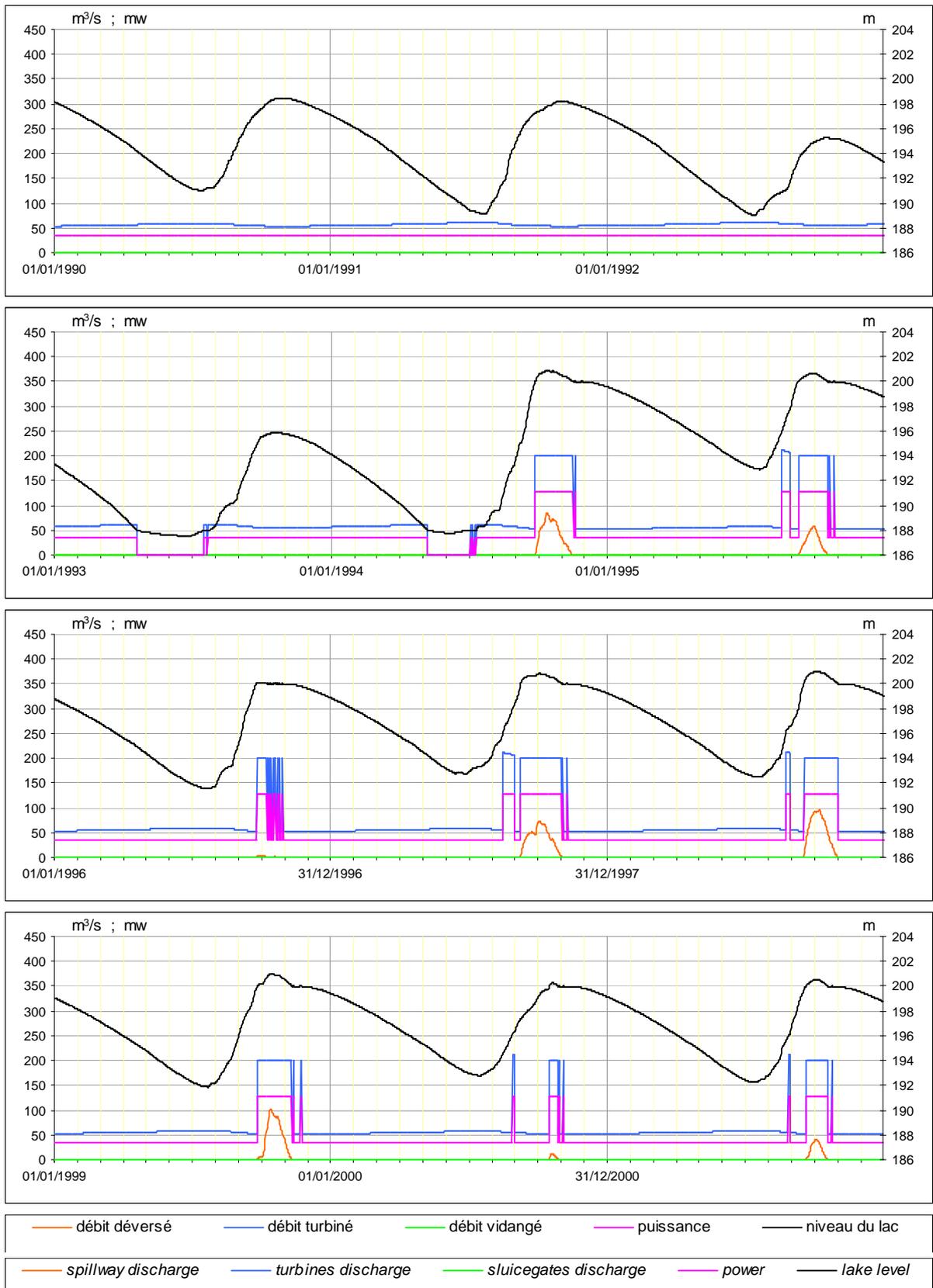


figure F9-4 : Scénario B. Chroniques du niveau de surface libre, de la puissance produite et des débits turbinés, déversés et vidangés. Période 1990-2001

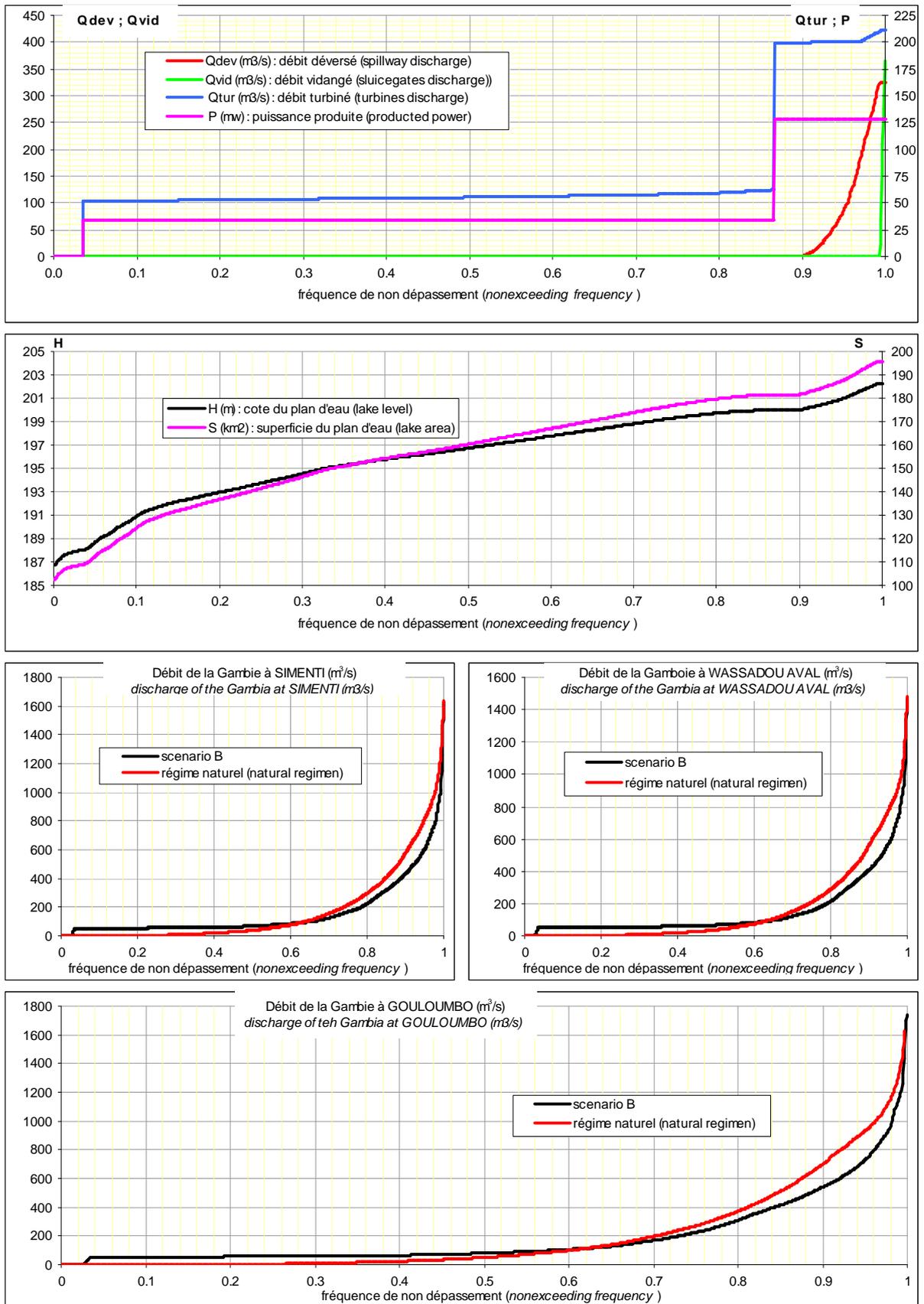


figure F10 : Scénario B. Fonctions de répartition (1954-2001) des valeurs journalières de débit (turbiné, déversé, vidangé et stations aval), puissance produite, niveau et surface de plan d'eau

## Annexe G : Détail de résultats concernant les scénarios C1 à C4 (arrêt de turbinage en fin d'été), et concernant l'impact d'un rehaussement du niveau de l'océan

scenario	B	C1	C2	C3	C4	
période d'arrêt systématique du turbinage	aucune	16/06 --> 30/06	01/06 --> 30/06	16/05 --> 30/06	01/06 --> 30/06	
énergie annuelle moyenne (gwh)	400.4	397.0	392.8	387.9	383.3	
fréquence de non dépassement de la puissance $P_{obj}$ (34,30 mw) en moyenne mensuelle	0.05	0.11	0.10	0.18	0.18	
PK maximal annuel de la concentration 1 g/l	médiane (km)	155.3	156.7	180.0	197.9	205.0
	valeur non atteinte à 90% (km)	201.0	168.8	186.9	206.7	214.7
PK maximal annuel de la concentration 5 g/l	médiane (km)	141.4	143.2	157.8	168.1	173.3
	valeur non atteinte à 90% (km)	169.7	151.2	161.4	172.9	178.8

tableau G1 : résultats des scénarios B et C1 à C4 sur la période 1954-20021, concernant la production d'énergie et l'extension maximale annuelle de la salinité vers l'amont de l'estuaire

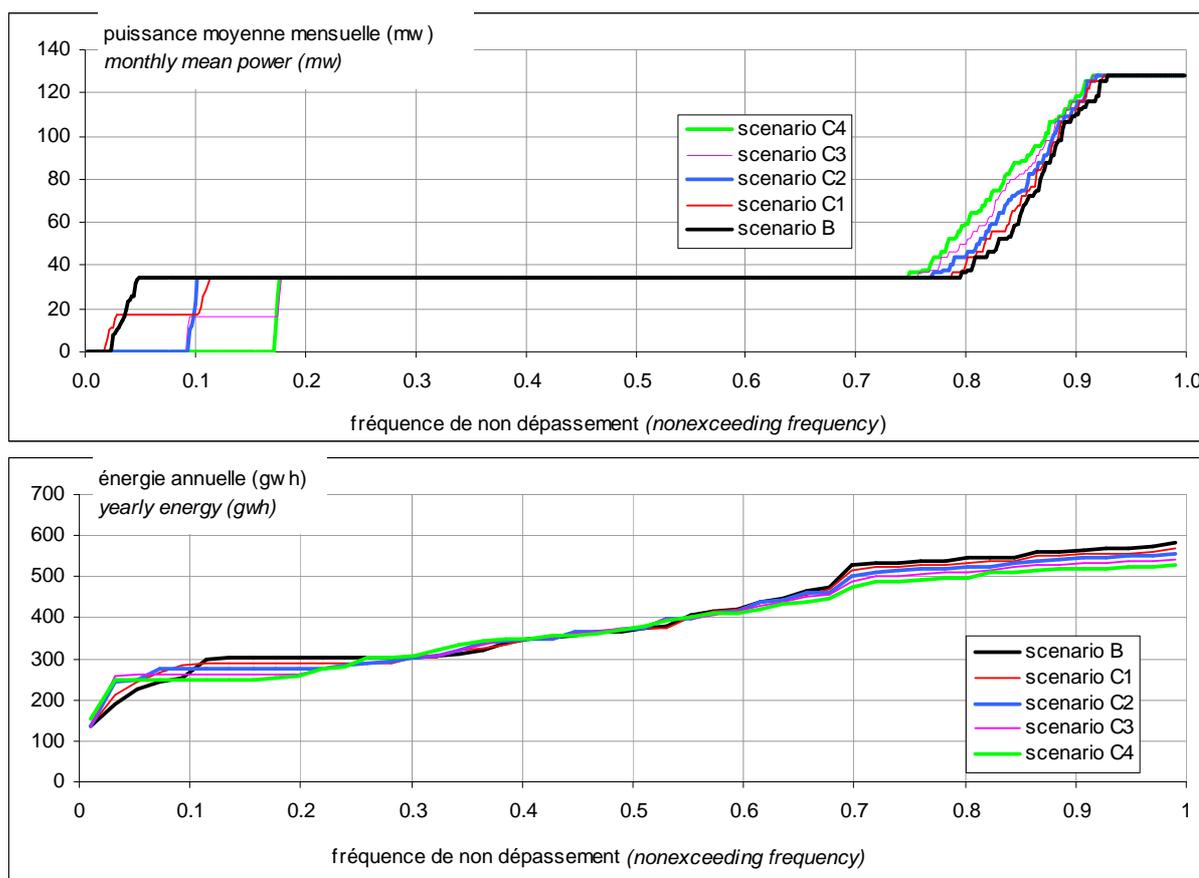


figure G1 : fonctions de répartition des puissances moyennes mensuelles et des énergies annuelles produites sur la période 1954-2001, pour les scénarios B et C1 à C4.

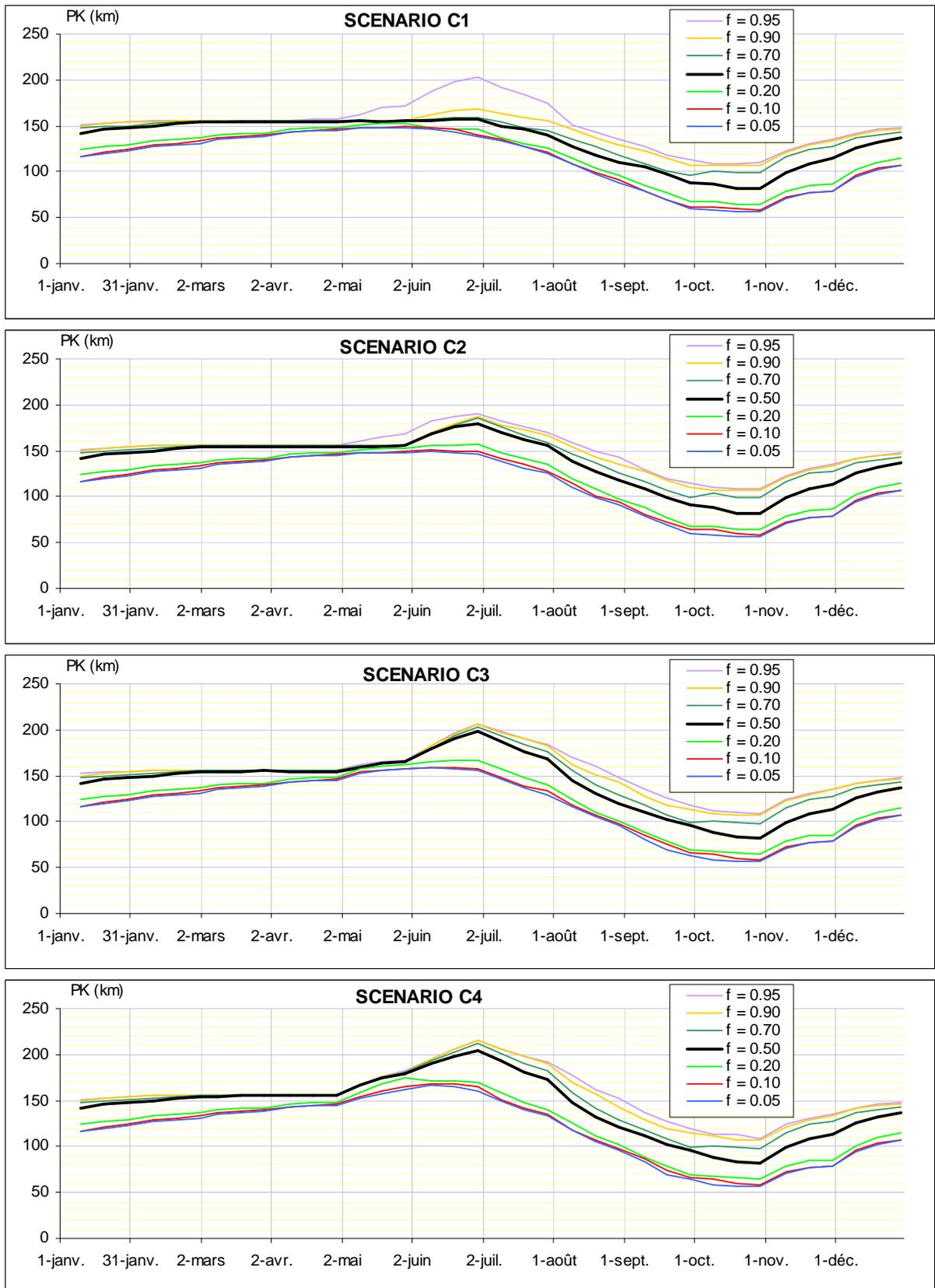


figure G2 : déplacement annuel du PK relatif front salé à 1 g/l pour différentes fréquences  $f$  de non dépassement , pour les scénarios C1 à C4

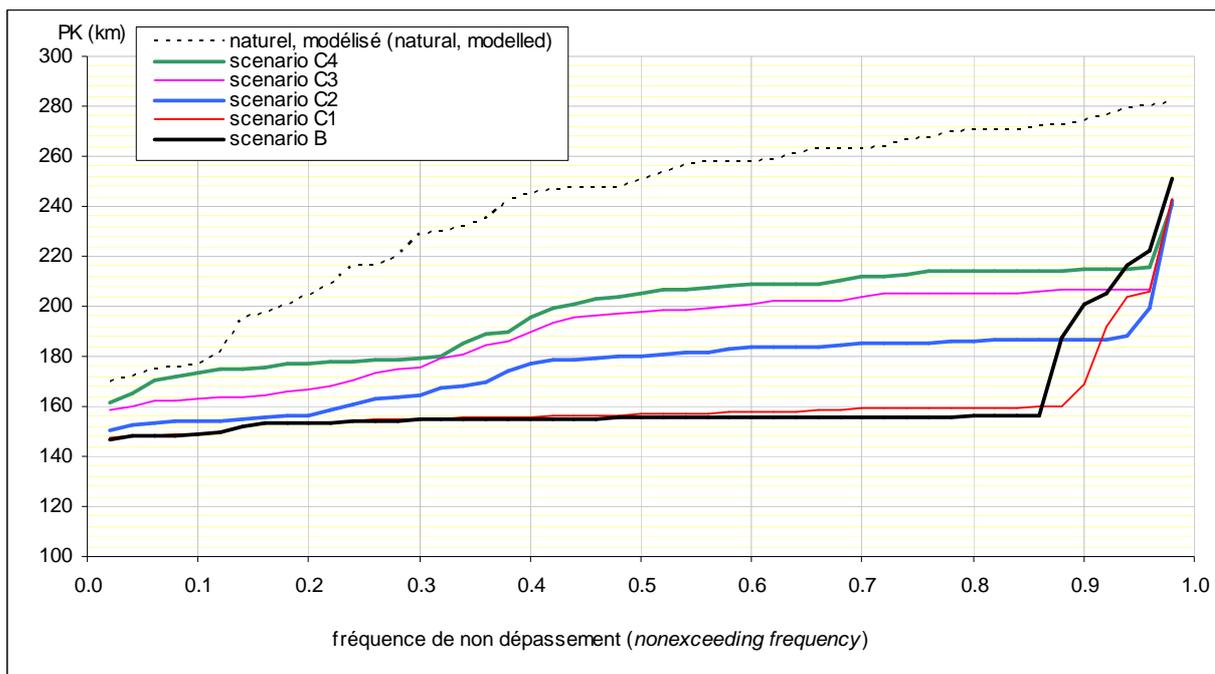


figure G3 : fonction de répartition du PK maximal annuel relatif à la salinité 1g/l, pour le régime naturel et les scénarios B et C1 à C4, sur la période 1954-2001

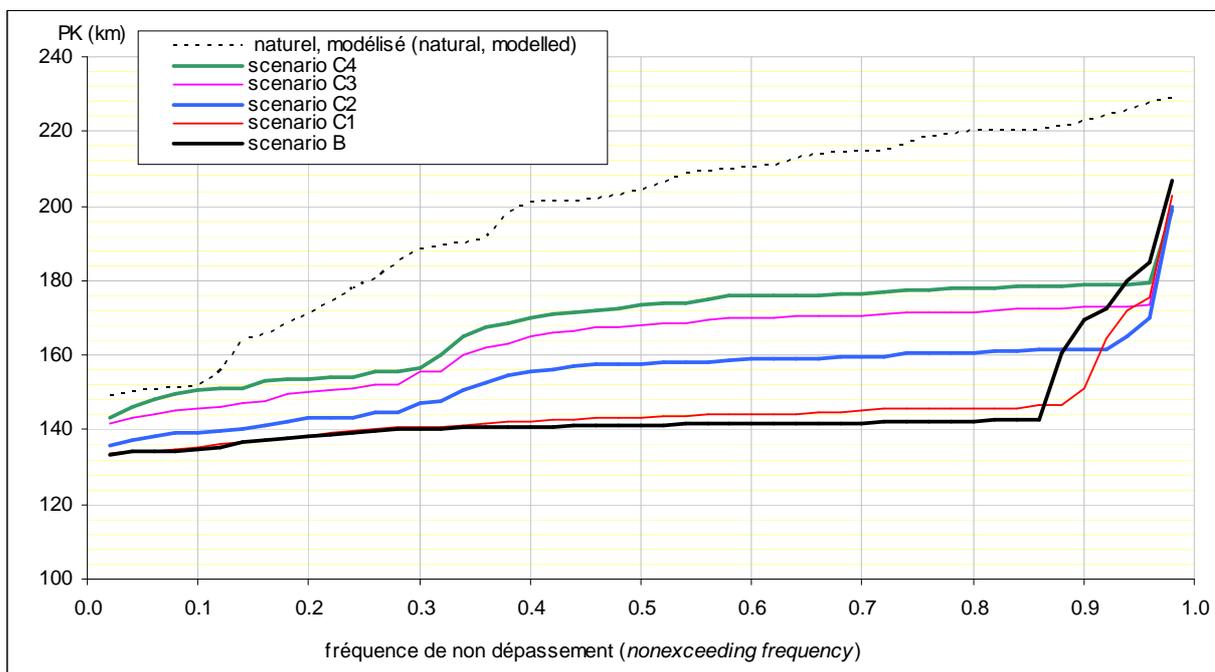


figure G4 : fonction de répartition du PK maximal annuel relatif à la salinité 5 g/l, pour le régime naturel et les scénarios B et C1 à C4, sur la période 1954-2001

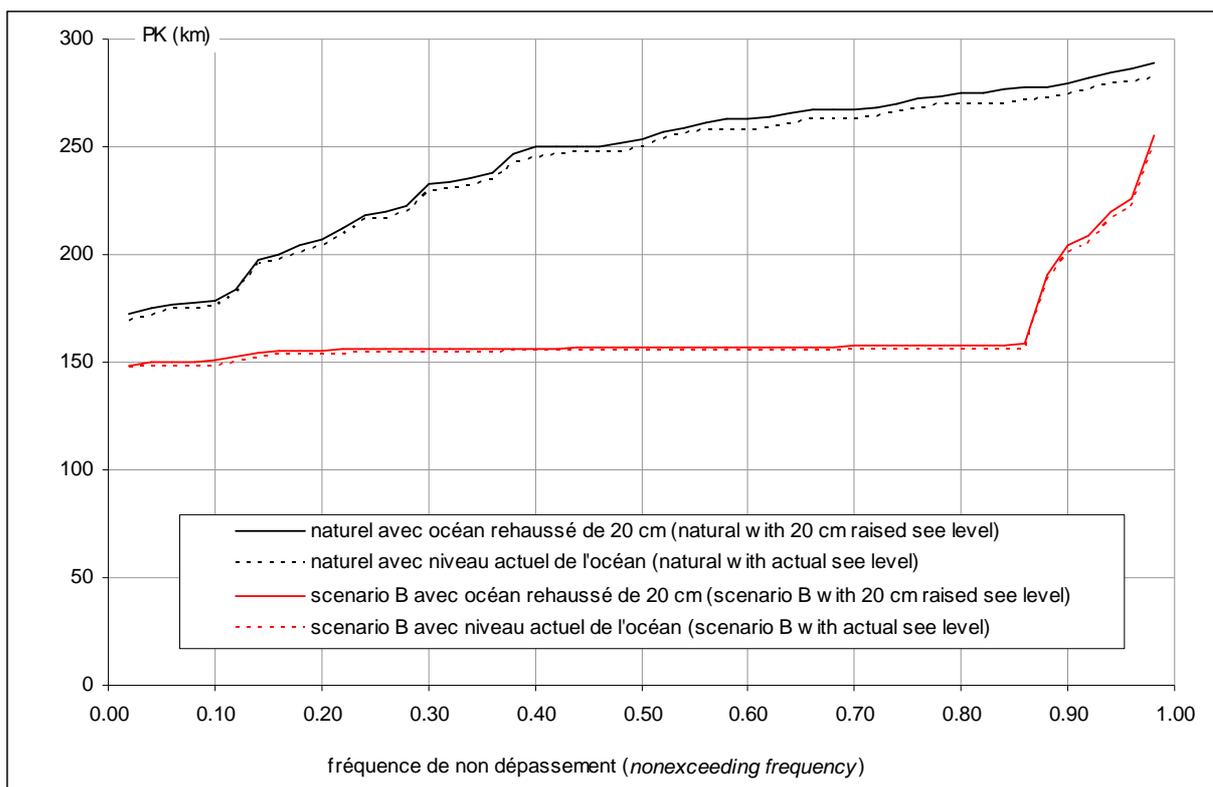


figure G5 : fonction de répartition du PK maximal annuel d'intrusion de la salinité à 1 g/l pour le régime naturel et le scénario B, dans le cas de l'océan à son niveau actuel ou rehaussé de 20 cm.