



**Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve sénégal**  
( O . M . V . S . )

# **PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS**

## **Phase III**

### **Manuel de gestion du barrage de Manantali**

**Version finale**

**Novembre 2001**

Auteur : JC Bader



**Institut de recherche  
pour le développement**

**République Française**

**SERVICE DE COOPERATION ET D'ACTION  
CULTURELLE**

**DAKAR – SENEGAL  
S.C.A.C**

# TABLE DES MATIERES

<b>SYNTHESE-</b> .....	<b>4</b>
<b>S.1. Principes généraux de la gestion proposée</b> .....	<b>4</b>
S.1.1. Suivi de la situation hydrologique.....	4
S.1.2. Contraintes de gestion .....	5
S.1.3. Consignes de sécurité.....	5
S.1.4. Consignes de gestion.....	5
S.1.4.1. Consignes définissant une limite minimale pour le débit lâché .....	5
S.1.4.2. Consignes définissant une limite maximale pour le débit lâché .....	7
S.1.5. Calcul du débit à lâcher par les organes d'évacuation .....	7
<b>S.2. Détail des procédures de gestion opérationnelle</b> .....	<b>7</b>
S.2.1. Situation hydrologique : préparation de la banque de données.....	8
S.2.2. Calcul des limites minimales et maximales de débit lâché, liées aux contraintes de gestion	8
S.2.3. Calcul des limites minimales et maximales de débit lâché, imposées par les consignes de	8
sécurité et les consignes de gestion .....	8
S.2.3.1. Calcul du débit lâché donnant à Bakel un débit prédéfini pour les jours suivants.....	8
S.2.3.2. Calcul du débit lâché limite permettant de respecter une limite minimale ou maximale	8
de niveau du lac dans les jours à venir .....	8
S.2.3.3. Calcul du débit lâché minimal relatif à la consigne de production d'énergie : .....	9
S.2.4. Détermination du débit à lâcher par les différents organes d'évacuation .....	9
<b>S.3. Simulation numérique</b> .....	<b>9</b>
S.3.1. Consignes de gestion retenues pour un cas de gestion type .....	10
S.3.2. Résultats obtenus.....	10
S.3.2.1. Défaillances obtenues pour le soutien de basses eaux.....	11
S.3.2.2. Fréquence des faibles crues obtenues .....	11
S.3.2.3. Energie moyenne produite par année.....	11
S.3.2.4. Scénarios de gestion optimaux .....	12
S.3.3. Analyse des possibilités de soutien d'étiage à 300 m <sup>3</sup> /s.....	14
<b>PREMIERE PARTIE : MANUEL DES CONSIGNES</b> .....	<b>15</b>
<b>AVANT PROPOS</b> .....	<b>15</b>
<b>1. PRINCIPE DE LA GESTION</b> .....	<b>16</b>
1.1. Généralités.....	16
1.2. Suivi de la situation hydrologique .....	17
1.2.1. Apports en eau : suivi des débits aux stations hydrométriques .....	17
1.2.2. Cote dans la retenue .....	17
1.2.3. Taux d'évaporation .....	18
1.2.4. Procédures utilisées en cas de données manquantes.....	18
1.3. Contraintes de gestion .....	18
1.4. Consignes de sécurité et consignes de gestion .....	19
1.4.1. Consignes définissant une limite inférieure $Q_{min}$ pour le débit à lâcher du barrage .....	19
1.4.2. Consignes définissant une limite supérieure $Q_{max}$ pour le débit à lâcher du barrage ...	22
1.5. Principe du calcul de débit à lâcher à travers les différents organes d'évacuation .....	22
1.5.1. Calcul du débit total à lâcher .....	22
1.5.2. Calcul du débit turbiné $Q_e$ et de la puissance développée $P_e$ .....	23
1.5.3. Calcul du débit évacué par la vidange de fond et par l'évacuateur de crue.....	23
<b>2. DETAIL DES PROCEDURES DE GESTION OPERATIONNELLE</b> .....	<b>24</b>
2.1. Situation hydrologique : préparation de la banque de données .....	24
2.1.1. Le Bakoye à Diangola.....	25

2.1.2.	Le Bakoye à Oualia .....	25
2.1.3.	La Falémé à Gourbassy .....	26
2.1.4.	Le Bafing à Daka Saidou .....	27
2.1.5.	Le Bafing à Makana.....	27
2.1.6.	Le Bafing à Soukoutali en régime naturel : station fictive.....	28
2.1.7.	Débits intermédiaires Int1 entre Manantali, Oualia et Kayes : station fictive .....	28
2.1.8.	Le Sénégal à Kayes en régime naturel : station fictive.....	29
2.1.9.	Débits intermédiaires Int2 entre Kayes, Gourbassy et Bakel : station fictive .....	29
2.1.10.	Le Sénégal à Kayes.....	29
2.1.11.	Le Sénégal à Bakel.....	30
2.1.12.	Pertes par évaporation .....	30
2.2.	Calcul des limites Qmino et Qmaxo relatives aux contraintes de gestion .....	35
2.2.1.	Débit minimal Qmino .....	35
2.2.2.	Débit maximal Qmaxo .....	35
2.3.	Calcul des limites Qmin et Qmax imposées par les consignes de gestion .....	37
2.3.1.	Mode de calcul du débit lâché donnant à Bakel un débit prédéfini pour les jours suivants : consignes A4, A5 et B2 (C et A dans Progeman).....	37
2.3.2.	mode de calcul du débit lâché minimal permettant de maintenir le niveau du lac en dessous d'une limite prédéfinie dans les jours à venir : consignes A1 et A6 (B dans Progeman)	37
2.3.3.	Mode de calcul du débit lâché maximal permettant de maintenir le niveau du lac au dessus d'une limite prédéfinie dans les jours à venir : consignes B1 et B3 (D dans Progeman)..	39
2.3.4.	Mode de calcul du débit minimal relatif à la consigne de production d'énergie : A2 (E dans Progeman).....	40
2.3.4.1.	Potentiel de production de l'usine hydroélectrique.....	40
2.3.4.2.	Mode de production d'énergie préconisé .....	40
2.3.4.3.	Consigne de gestion associée à la production d'énergie.....	41
2.4.	Combinaison des différentes limites : calcul du débit total à lâcher Qt .....	52
2.5.	Détermination du débit à évacuer par les différents organes du barrage.....	52
2.6.	Réglage des organes d'évacuation du barrage .....	56

## **DEUXIEME PARTIE : SIMULATION DE SCENARIOS DE GESTION ..... 57**

<b>3.</b>	<b>ETUDE D'UN CAS DE GESTION TYPE.....</b>	<b>57</b>
3.1.	Consignes de gestion retenues .....	57
3.2.	Résultats obtenus .....	58
3.2.1.	Laminage des crues .....	59
3.2.2.	Analyse des défaillances pour le soutien des basses eaux .....	59
3.2.3.	Analyse de la fréquence des faibles crues obtenues .....	60
3.2.4.	Analyse de l'énergie annuelle moyenne produite.....	61
3.2.5.	Scénarios de gestion optimaux.....	61
3.2.5.1.	Résultats divers concernant les scénarios de gestion optimaux.....	62
3.2.5.2.	Variabilité de la production d'énergie pour les scénarios de gestion optimaux .....	63
3.2.6.	Conclusion .....	63
<b>4.</b>	<b>ANALYSE DES POSSIBILITES DE SOUTIEN D'ETIAGE A 300 M3/S .....</b>	<b>78</b>
4.1.	Objectif et méthode .....	78
4.2.	Capacité de retenue nécessaire permettant un soutien permanent à 300 m <sup>3</sup> /s.....	78
4.3.	Gestion envisageant le soutien à 300 m <sup>3</sup> /s comme unique objectif .....	78
4.4.	Gestion envisageant le soutien à 300 m <sup>3</sup> /s associé aux autres objectifs .....	78

## **ANNEXES ..... 83**

**Annexe A : Liste des paramètres de gestion et des variables utilisés..... 83**

**Annexe B : limnigrammes de cotes limites maximales à respecter dans le lac, pour permettre de laminier les crues futures..... 86**

**Annexe C : limnigrammes de cotes limites minimales à respecter dans le lac, pour permettre de soutenir les futures basses eaux ..... 96**

**Annexe D : Calcul de la capacité de retenue permettant de garantir le soutien permanent d'un débit de 300 m<sup>3</sup>/s à Bakel ..... 106**

**Annexe E : Liste des consignes de gestion simulées pour l'analyse du soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s..... 108**

# SYNTHESE

Le manuel de gestion du barrage de Manantali, concerne la détermination en temps réel du débit qui doit être lâché par les différents organes d'évacuation du barrage, afin de satisfaire au mieux les objectifs de régularisation du débit (laminage des crues ; soutien d'étiage ; soutien de crue) et de production d'électricité.

Sa première partie présente les principes généraux de la gestion proposée.

La seconde donne le détail des différentes procédures de gestion opérationnelle.

La troisième partie analyse enfin les résultats d'une simulation numérique reproduisant la gestion proposée au pas de temps journalier pour 162 scénarios de consignes différents, sur la base des débits observés entre 1950 et 1998 sur le haut bassin du Sénégal.

Avant de pouvoir mettre en pratique ce manuel, il sera nécessaire de définir les degrés de priorité accordés aux différents objectifs assignés à l'ouvrage. Il s'agira principalement de définir les éléments suivants :

- Pour le soutien d'étiage : hydrogramme minimal à assurer en basses eaux (Bakel); fréquence de défaillance (pénurie d'eau ) acceptée.
- Pour le soutien de crue : hydrogramme objectif de crue (Bakel); fréquence des années pour lesquelles on accepte de renoncer au soutien de crue.
- Pour la production d'électricité : moyenne de l'énergie produite par année

Ces choix qui définiront la stratégie de gestion du barrage, sont du ressort de l'OMVS, qui devra tenir compte des possibilités présentées dans la troisième partie du manuel.

## **S.1. PRINCIPES GENERAUX DE LA GESTION PROPOSEE**

Le débit à lâcher du barrage doit être déterminé à partir des éléments suivants :

- **contraintes de gestion** imposées par les caractéristiques physiques de l'ouvrage ;
- **consignes de sécurité** visant à protéger l'ouvrage ;
- **consignes de gestion** concernant la régularisation des débits et la production d'énergie.

En fonction de la situation hydrologique du moment, ces contraintes et consignes imposent chacune une limite minimale ou maximale sur le débit total pouvant être lâché du barrage. Prises en compte par ordre de priorité décroissante, ces limites doivent alors être combinées pour en déduire le débit total à lâcher du barrage.

### **S.1.1. SUIVI DE LA SITUATION HYDROLOGIQUE**

Les apports en eau doivent être suivis en temps quasi-réel par système radio sur un réseau composé des stations hydrométriques suivantes :

- Essentielles : Bakoye à Oualia ; Falémé à Gourbassy ; Sénégal à Bakel ; Bafing à Daka-Saidou ; Sénégal à Kayes

- Importantes : Bafing à Makana ; Falémé à Fadougou ;
- Souhaitables : Bakoye à Diangola ; Bafing à l'amont de Daka-Saidou.

Pour la reconstitution de données manquantes ou l'extension nécessaire de certaines données de débit, il est prévu d'utiliser des modèles autorégressifs, de tarissement ou de propagation, ainsi que des valeurs médianes, en dernier ressort.

Au niveau du barrage, il faut suivre en temps réel l'évolution des paramètres suivants :

- Essentiels : cote du plan d'eau à l'amont du barrage ; débit total lâché ;
- Souhaitable : taux d'évaporation à la surface du plan d'eau.

### **S.1.2. CONTRAINTES DE GESTION**

Les caractéristiques physiques de l'ouvrage permettent de déterminer le débit lâché du barrage lorsque ses organes d'évacuation sont ouverts au maximum. Ceci constitue pour le débit total lâché, une limite maximale croissante en fonction de la cote du plan d'eau amont.

Quand la retenue dépasse la cote 208,05 m, ces mêmes caractéristiques imposent un certain déversement par les vannes de surface destiné à éviter la submersion de ces dernières. Ceci constitue pour le débit total lâché, une limite minimale croissante en fonction de la cote du plan d'eau amont.

### **S.1.3. CONSIGNES DE SECURITE**

#### **A1 : Précaution contre la submersion des digues du barrage**

Cette consigne impose une limite minimale au débit total lâché, pour éviter que le niveau du lac ne dépasse la cote maximale de sécurité (210,50 m) dans les jours à venir, tout en limitant au mieux le débit maximal lâché durant cette période. Cette limite minimale dépend de la cote du plan d'eau amont et du débit entrant dans la retenue, ainsi que des valeurs prévues pour ce dernier dans les jours à venir.

#### **B1 : Submersion permanente de la partie basse du parement amont de l'ouvrage**

Afin d'éviter l'endommagement par la houle du parement amont du barrage, cette consigne vise à maintenir le lac au dessus de la cote 187 m durant les jours à venir, tout en évitant des restrictions trop sévères sur les lâchures. Elle impose de maintenir le débit lâché en dessous d'une limite maximale qui dépend de la cote du plan d'eau amont et du débit entrant dans la retenue.

### **S.1.4. CONSIGNES DE GESTION**

Les consignes de gestion envisagées sont présentées ci-dessous dans un ordre arbitraire.

#### **S.1.4.1. Consignes définissant une limite minimale pour le débit lâché**

##### **A2 : Production d'énergie électrique**

Dans un but de rentabilité, il est souhaitable qu'une énergie donnée soit produite en turbinant le moins d'eau possible. Dans cette optique, la consigne envisage les trois cas suivants :

- Quand la cote du lac est supérieure à un seuil  $S_2$ , on vise à produire la puissance maximale qu'il est possible de produire avec cette cote :  $P_{max}$ .
- Quand la cote du lac est comprise entre  $S_1$  ( $<S_2$ ) et  $S_2$ , on vise à produire une puissance  $P$  définie par :  $P = \min (P_o ; P_{max})$  où  $P_o$  désigne une puissance demandée prédéfinie.
- Quand la cote du lac est inférieure à  $S_1$ , la consigne de production d'énergie n'est pas prise en compte.

Dans les deux premiers cas, la consigne permet d'évaluer en fonction de la cote du plan d'eau amont, le débit minimal lâché qui permet de produire la puissance visée.

### **A3 : Lâcher de débit sanitaire réservé**

#### **A4 : Soutien de crue**

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif de crue  $Q_c(t)$  prédéfini. La décision de soutien de crue est prise une fois par an à une date prédéfinie  $T_c$ .

- Si la cote du lac à la date  $T_c$  est supérieure à un seuil  $H_s$  prédéfini, et si un hydrogramme de crue jugé suffisant n'a pas encore été observé dans l'année à Bakel, le soutien de crue est déclenché. La consigne est alors prise en compte pendant toute la durée nécessaire à la réalisation de l'hydrogramme  $Q_c(t)$  à Bakel.
- Dans le cas contraire, la consigne de soutien de crue n'est plus prise en compte jusqu'à l'année suivante. Autrement dit, l'eau qui aurait dû être lâchée cette année là aux seules fins du soutien de crue est stockée dans la retenue.

Le débit minimal à lâcher pour le soutien de crue est calculé à partir des débits observés dans les affluents non contrôlés Bakoye et Falémé, ainsi que dans le Sénégal à Kayes et Bakel.

#### **A5 : Soutien immédiat des basses eaux**

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif d'étiage  $Q_{et}(t)$  prédéfini. Cet hydrogramme correspond au débit nécessaire pour la satisfaction de certains besoins. Deux consignes de ce type peuvent être prises en compte en même temps :

- La première vise à satisfaire des besoins sommables de consommation d'eau : irrigation, alimentation humaine. L'hydrogramme objectif doit alors être défini comme la somme de ces besoins, augmentée des pertes accompagnant le transit des débits jusqu'au lieu de la consommation, et encore augmentés d'un éventuel débit résiduel de sécurité.
- La deuxième vise à garantir un débit suffisant pour permettre la navigation (passage des seuils) à certains moments de l'année.

Le débit minimal à lâcher pour le soutien d'étiage est calculé suivant le même principe que pour le soutien de crue.

#### **A6 : Conservation d'une revanche suffisante pour le laminage futur des crues**

Il s'agit de lâcher un volume suffisant du barrage pour conserver une revanche (volume libre dans la retenue) permettant de laminar les crues futures au palier de débit souhaité avec un taux de réussite probable prédéfini. Cette revanche nécessaire, qui correspond à une cote limite maximale du niveau dans le lac, est variable dans l'année.

Le débit minimal à lâcher pour conserver la revanche souhaitée, est calculé en fonction de la cote du lac et du débit entrant dans la retenue

### **S.1.4.2. Consignes définissant une limite maximale pour le débit lâché**

#### **B2 : Laminage immédiat des crues**

Deux types de laminage des crues peuvent être envisagés :

- Le laminage immédiat des crues à la sortie du barrage consiste à lâcher un débit total  $Q_t$  inférieur ou égal à un certain débit limite  $Q_{l1}$  prédéfini.
- Le laminage des crues au niveau de Bakel consiste à lâcher un débit  $Q_t$  suffisamment faible pour que le débit des jours suivants à Bakel ne dépasse pas une limite  $Q_{l2}$  prédéfinie. Dans ce cas, le débit maximal à lâcher est calculé en fonction des débits observés sur le Bakoye et la Falémé, et sur le Sénégal à Kayes et Bakel.

#### **B3 : Conservation d'un stock d'eau suffisant pour le soutien d'étiage futur**

Il s'agit de limiter le débit total lâché du barrage afin de conserver le stock nécessaire (dans la tranche utile des cotes supérieures à  $H_{min}=187m$ ) pour pouvoir satisfaire le soutien d'étiage futur avec un taux de réussite probable prédéfini. Ce stock nécessaire, qui correspond à une cote limite minimale du niveau dans le lac, est variable dans l'année.

Le débit maximal à lâcher pour conserver le stock souhaité, est calculé en fonction de la cote du lac et du débit entrant dans la retenue

### **S.1.5. CALCUL DU DEBIT A LACHER PAR LES ORGANES D'EVACUATION**

Le calcul est fait dans l'optique de lâcher le débit minimal permettant de respecter le plus grand nombre possible des consignes qui auront été préalablement définies et classées par ordre de priorité.

Tout d'abord, la fourchette de débit qu'il est physiquement possible d'évacuer de l'ouvrage, est déterminée à partir des contraintes de gestion. Elle se resserre ensuite en fonction des limites minimales ou maximales de débit à lâcher, imposées par les consignes de sécurité puis par celles de gestion. Le processus s'arrête lorsque toutes les consignes envisagées ont été prises en compte par ordre de priorité décroissante, ou lorsque l'une d'entre elles s'avère incompatible avec les consignes de priorité supérieure. Dans ce dernier cas, la fourchette de débit à lâcher est réduite à une valeur unique, à la fois compatible avec les consignes de priorité supérieure, et la plus proche possible du débit demandé par la consigne incompatible. C'est finalement la borne inférieure de la fourchette résultante qui détermine le débit total à lâcher du barrage.

La répartition de ce dernier entre les différents organes d'évacuation (turbines, vannes de surface et vannes de demi fond) est faite de façon à produire le maximum de puissance pouvant être absorbée sur le réseau, et à respecter l'ouverture minimale des vannes de surface imposée par les contraintes de gestion.

## **S.2. DETAIL DES PROCEDURES DE GESTION OPERATIONNELLE**

Le chapitre 2 donne le détail des procédures de calcul dont la plupart sont automatisées dans le logiciel PROGEMAN de gestion en temps réel, fourni avec le manuel.



### **S.2.1. SITUATION HYDROLOGIQUE : PREPARATION DE LA BANQUE DE DONNEES**

Le calcul des débits à lâcher utilise les valeurs moyennes journalières des données décrivant la situation hydrologique. Il est précédé des opérations suivantes :

- Saisie des dernières valeurs connues pour mettre à jour les fichiers de données décrivant la situation hydrologique : cotes aux stations hydrométriques et dans la retenue, et taux d'évaporation éventuellement.
- Traduction des cotes en débits instantanés aux stations hydrométriques.
- Calcul de débits moyens journaliers à partir des valeurs instantanées, par la méthode des trapèzes
- Reconstitution éventuelle de données manquantes, mais surtout extension de données par modèles autorégressifs, de propagation ou de tarissement, voire par utilisation de valeurs médianes. Ces traitements concernent à la fois les stations réelles et certaines stations fictives, indispensables au calcul.

Dans le manuel figurent toutes les valeurs numériques nécessaires concernant l'étalonnage des stations hydrométriques (traduction des cotes en débits) et les différents modèles, ainsi que les valeurs médianes de débit à utiliser en dernier ressort.

### **S.2.2. CALCUL DES LIMITES MINIMALES ET MAXIMALES DE DEBIT LACHE, LIEES AUX CONTRAINTES DE GESTION**

Les valeurs limites du débit qu'il est physiquement possible de lâcher de Manantali, sont directement liées au niveau du plan d'eau de la retenue. Ces relations sont données dans le manuel.

### **S.2.3. CALCUL DES LIMITES MINIMALES ET MAXIMALES DE DEBIT LACHE, IMPOSEES PAR LES CONSIGNES DE SECURITE ET LES CONSIGNES DE GESTION**

#### **S.2.3.1. Calcul du débit lâché donnant à Bakel un débit prédéfini pour les jours suivants**

Ce calcul qui concerne les consignes A4, A5 et B2, repose sur les modèles de propagation établis entre Manantali, Oualia et Kayes d'une part, et Kayes, Gourbassy et Bakel d'autre part. Il inclut une procédure de régulation qui consiste à effectuer une correction en boucle fermée, en comparant en permanence les débits obtenus à Kayes et Bakel avec ceux qui pouvaient être prévus à partir des seuls modèles de propagation. Les données utilisées sont les débits du Bakoye et de la Falémé (observés et prévus), ainsi que les débits observés à Kayes et Bakel.

#### **S.2.3.2. Calcul du débit lâché limite permettant de respecter une limite minimale ou maximale de niveau du lac dans les jours à venir**

Ce calcul qui concerne les consignes A1, A6, B1 et B3, repose sur un simple bilan de volume qui prend en compte les courbes de remplissage de la retenue (relations cote—surface et cote—volume). Il vise à respecter le niveau limite du lac, tout en évitant les débits lâchés trop forts (A1, A6) ou trop faibles (B1, B3). Les données utilisées sont la cote du plan d'eau, le débit entrant (observé et prévu) dans la retenue et le taux d'évaporation.

### **S.2.3.3. Calcul du débit lâché minimal relatif à la consigne de production d'énergie :**

#### **1er cas : la cote du plan d'eau est inférieure à S1**

La demande de production électrique n'est alors pas prise en compte pour déterminer le débit total à lâcher.

#### **2ème cas : la cote du plan d'eau est comprise entre S1 et S2**

On vise alors à produire une puissance  $P = \min(P_o, P_{max})$ , où  $P_{max}$  représente le maximum productible (croissant en fonction du niveau du plan d'eau) et  $P_o$  la puissance demandée.

Le manuel donne les abaques nécessaires pour déterminer en fonction du niveau du plan d'eau, la puissance maximale productible  $P_{max}$  ainsi que le débit total minimal lâché du barrage permettant de produire la puissance  $P$ .

#### **3ème cas : la cote du plan d'eau est supérieure à S2**

On vise alors à produire la puissance maximale productible  $P_{max}$ . Le débit minimal à lâcher est donné par les abaques mentionnés ci-dessus.

### **S.2.4. DETERMINATION DU DEBIT A LACHER PAR LES DIFFERENTS ORGANES D'EVACUATION**

Tout d'abord, le débit total à lâcher du barrage est calculé en combinant les limites minimales et maximales déterminées plus haut, en prenant d'abord en compte celles qui sont imposées par les contraintes de gestion, puis par les consignes de sécurité, et enfin par les consignes de gestion classées par ordre de priorité décroissante. Le processus de combinaison de ces valeurs limites est détaillé dans le manuel.

Ensuite, la puissance maximale qu'il est possible de produire est déterminée en fonction du débit total à lâcher et du niveau du plan d'eau (abaque fourni dans le manuel). C'est cette puissance qui va devoir être produite, sauf si elle est supérieure à la puissance maximale que le réseau peut absorber, auquel cas c'est cette dernière qui sera produite.

En fonction de la puissance qui doit être produite, du niveau du plan d'eau et du débit total à lâcher, il est alors possible de déterminer le débit à turbiner.

Le débit à lâcher par le déversoir de crue doit être fixé supérieur ou égal au débit minimal imposé par les contraintes de gestion, qui correspond à l'ouverture minimale de sécurité de l'évacuateur de crue.

Enfin, le débit à lâcher par les vannes de demi-fond doit être égal au débit total à lâcher, diminué du débit à turbiner et du débit à déverser.

## **S.3. SIMULATION NUMERIQUE**

Sur la base des débits naturels observés de 1950 à 1998 sur le haut bassin du Sénégal, la gestion de Manantali a été simulée numériquement en considérant un jeu de consignes type, pour lequel 162 scénarios ont été testés en faisant varier certains paramètres.

### **S.3.1. CONSIGNES DE GESTION RETENUES POUR UN CAS DE GESTION TYPE**

Les scénarios testés envisagent une puissance installée de 205 Mw au barrage, et sont basés sur les consignes suivantes, listées par ordre de priorité décroissante :

**A1** : Précaution contre la submersion des digues du barrage, en maintenant le niveau du plan d'eau en dessous de la cote 210,50 m

**A3** : lâcher d'un débit sanitaire réservé de 10 m<sup>3</sup>/s

**B1** : précaution contre l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage, en maintenant le niveau du plan d'eau au dessus de la cote 187 m.

**B2** : laminage immédiat des crues du Sénégal à Bakel, avec un débit journalier limité à 4500 m<sup>3</sup>/s

**A6** : conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, pour pouvoir assurer le laminage futur des crues du Sénégal à Bakel en dessous de 4500 m<sup>3</sup>/s avec un taux de réussite de 49 années sur 50, en référence à la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote maximale à respecter dans le lac est donné dans le manuel.

**A5** : soutien des basses eaux, concernant les usages suivants : agriculture irriguée, alimentation humaine, navigabilité. Une valeur constante ( de 100, 150 ou 200 m<sup>3</sup>/s ) a été retenue pour le débit  $Q_e$  à assurer en permanence au niveau de Bakel.

**B3** : conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour permettre le soutien futur de basses eaux. Le débit objectif  $Q_e$  envisagé est le même que dans la consigne A5, et le taux de réussite retenu est de 24 années sur 25 sur la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote minimale à respecter dans le lac est donné dans le manuel provisoire.

**A2** : production d'énergie électrique

La consigne de production d'énergie est prise en compte seulement lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S1, pour lequel trois valeurs ont été testées : 187, 192 et 197 m

La consigne vise à produire la puissance maximale productible  $P_{max}$  lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S2, pour lequel deux valeurs ont été testées : 202 et 206 m.

Enfin, quand la cote du lac se situe entre S1 et S2, la consigne vise à produire une puissance  $P = \min (P_o ; P_{max})$  où  $P_o$  désigne une puissance constante pour laquelle trois valeurs ont été testées : 70, 90 et 110 mw.

**A4** : soutien de crue

L'hydrogramme objectif de crue retenu pour Bakel, dénommé "ORSTOM1", est le suivant :

0 m<sup>3</sup>/s le 22 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 28 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 2 septembre ; 0 m<sup>3</sup>/s le 16 octobre.

Le soutien de crue est déclenché à la date  $T_c$  du 20 août, si et seulement si la cote du lac se situe au dessus du seuil  $H_s$ , pour lequel trois valeurs ont été testées : 192, 195 et 198 m.

Il est supposé dans toutes les simulations effectuées, que la puissance électrique qui peut être absorbée sur le réseau est toujours supérieure à la puissance installée au barrage. Enfin, la retenue est supposée pleine ( $H=208,05m$ ) au début de chaque calcul, le 1er janvier 1950.

### **S.3.2. RESULTATS OBTENUS**

L'analyse des résultats porte sur les points suivants :

- Energie moyenne produite par année : W1 (1950-1998) et W2 (1970-1998).
- Nss: nombre d'années pendant lesquelles la crue, non soutenue, a présenté un hydrogramme (même éventuellement décalé) inférieur à l'hydrogramme objectif ORSTOM1.

- Nsi : nombre d'années pendant lesquelles un soutien de crue a été effectué de façon incomplète, avec un arrêt provoquant un grave déficit d'écoulement à Bakel pour des débits objectifs supérieurs à 1000 m<sup>3</sup>/s .
- R : pourcentage d'années présentant une crue insuffisante, évalué sur la période 1950-1998. Il s'agit en fait des années appartenant à l'une des deux catégories précédentes.
- nombre de jours N10, N25 et N50 comptabilisés sur la période 1950-1998 (17896 jours), pendant lesquels un déficit supérieur à 10%, 25% ou 50% a été constaté à Bakel par rapport au débit objectif de basses eaux.
- Le nombre d'années pendant lesquelles un déficit d'écoulement a été constaté à Bakel, par rapport au débit objectif de basses eaux.

### ***S.3.2.1. Défaillances obtenues pour le soutien de basses eaux***

Le fait de placer la consigne B3 de préservation de stock, avant les consignes entraînant de forts lâchés ( A2 pour l'énergie, et A4 pour le soutien de crue), permet toujours d'obtenir un taux de réussite élevé pour le soutien d'étiage, dans la gamme de débit envisagée de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s. Pour aucun des scénarios testés, les défaillances journalières supérieures à 25 ou 50 % du débit objectif de basses eaux, ne se produisent plus de 0,6% et 0,5% du temps respectivement.

### ***S.3.2.2. Fréquence des faibles crues obtenues***

On constate sur l'ensemble des scénarios testés, que le pourcentage de crues trop faibles (non soutenues ou soutenues de façon trop incomplète) augmente avec la puissance  $P_o$  demandée, avec le seuil  $H_s$  conditionnant le soutien de crue et avec le débit objectif  $Q_e$  de basses eaux. Il diminue par contre avec le seuil S1 permettant de prendre en compte la demande de production d'énergie, et avec le seuil S2 entraînant la demande de production de puissance maximale turbinable. Ceci confirme l'antagonisme du soutien de crue avec le soutien d'étiage et la production d'énergie.

Sur l'ensemble des scénarios testés, la proportion des années à crue trop faible se répartit entre 6% et 61%, alors qu'elle peut être évaluée à 31% en régime naturel sur la même période.

### ***S.3.2.3. Energie moyenne produite par année***

En moyenne sur l'ensemble des 162 scénarios testés, l'énergie moyenne produite par année ( $W_1$ ) augmente avec la puissance  $P_o$  demandée, avec le seuil  $H_s$  conditionnant le soutien de crue et avec le débit objectif  $Q_e$  de basses eaux. Elle diminue par contre avec les seuils S1 et S2 permettant respectivement de prendre en compte la demande de production d'énergie et de demander la production de la puissance maximale turbinable. Elle augmente enfin avec le pourcentage R des crues trop faibles obtenues.

### S.3.2.4. Scénarios de gestion optimaux

Du fait qu'ils donnent tous de bons résultats concernant le soutien des basses eaux, les scénarios testés se différencient surtout par l'énergie moyenne produite par année ( $W1$ ) qu'ils permettent d'obtenir, et le taux  $R$  de crues trop faibles qu'ils provoquent. Les scénarios optimaux sont ceux qui, pour un débit  $Q_e$  soutenu en étiage et une énergie moyenne produite par année ( $W1$ ) donnés, permettent d'obtenir les plus petites fréquences  $R$  de crues trop faibles. Les résultats obtenus pour ces scénarios optimaux sont donnés dans le tableau A et représentés sur la figure A.

Dans l'hypothèse où les années à venir montreront une hydraullicité comparable à celle de la période 1950-1998 sur le haut bassin du Sénégal, ces résultats peuvent guider le choix de stratégie de gestion qui devra être fait par l'OMVS. La figure A montre en effet les meilleures combinaisons qu'il est possible d'envisager pour Manantali, en terme d'objectifs de soutien de crue, soutien d'étiage et production d'énergie.

Une fois que la stratégie de gestion sera définie, il sera possible de se référer au tableau A pour déterminer les paramètres de gestion permettant d'atteindre le dosage désiré entre ces objectifs.

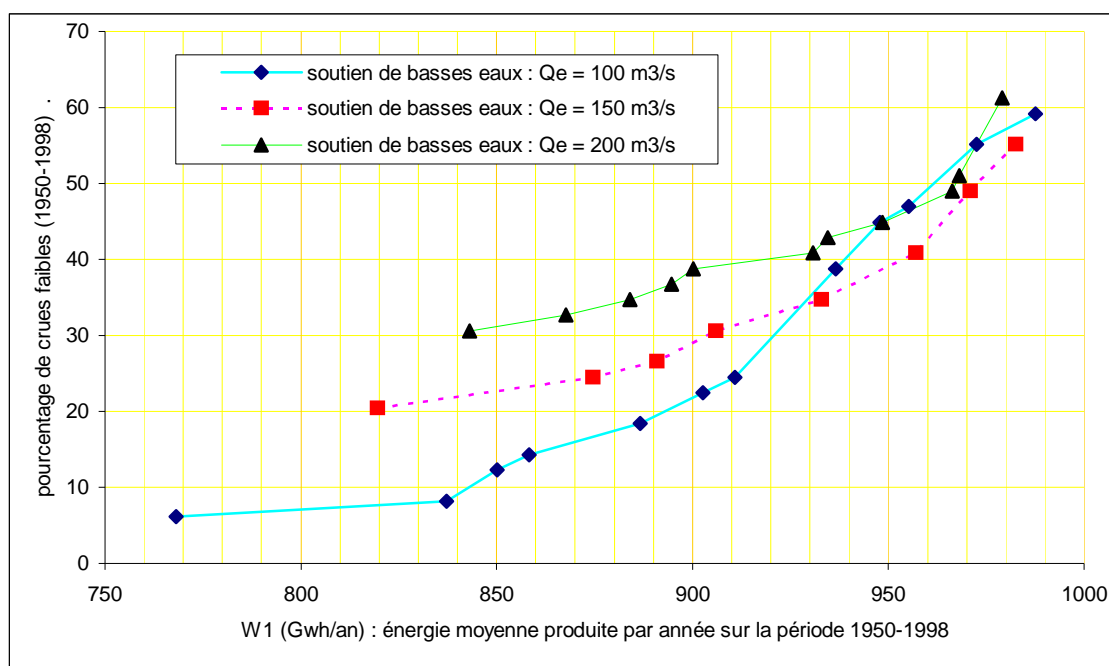


Figure A : relation  $R(W1)$  optimale, donnant la meilleure énergie moyenne produite par année sur la période 1950-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la même période.

paramètres définissant les consignes de gestion					énergie moyenne produite par année (Gw h)		fréquence des crues trop faibles
Qe	Hs	Po	S1	S2	W1	W2	R
(m3/s)	(m)	(Mw)	(m)	(m)	(50-98)	(70-98)	(%)
100	192	70	197	206	768	588	6
100	192	110	197	202	837	582	8
100	195	90	197	202	850	612	12
100	195	110	197	202	858	617	14
100	198	70	197	202	887	687	18
100	198	90	197	202	903	700	22
100	198	110	197	202	911	704	24
100	195	90	192	202	936	730	39
100	195	110	192	202	948	725	45
100	198	70	192	202	955	793	47
100	198	90	192	202	973	790	55
100	198	110	192	202	987	776	59
150	198	70	197	206	820	673	20
150	195	70	197	202	875	666	24
150	195	90	197	202	891	677	27
150	198	70	197	202	906	718	31
150	198	90	197	202	933	747	35
150	198	110	197	202	957	777	41
150	195	110	192	202	971	763	49
150	198	110	192	202	982	768	55
200	195	70	197	206	843	689	31
200	198	70	192	206	868	729	33
200	192	110	197	206	884	684	35
200	198	90	197	206	895	742	37
200	192	110	197	202	900	679	39
200	198	110	197	206	931	762	41
200	195	110	197	202	935	735	43
200	198	70	197	202	948	782	45
200	198	110	197	202	966	788	49
200	195	110	192	202	968	757	51
200	198	110	192	202	979	762	61

tableau A : résultats obtenus pour la production d'énergie et le soutien de crue, dans le cas des scénarios de gestion optimaux

Signification des termes :

Qe (m3/s) : débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel

Hs (m) : cote minimale de la surface libre du lac au 20 août, permettant d'engager le soutien de crue annuel.

Po (w) : puissance électrique demandée

S1 (m) : cote limite de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne relative à la demande de production d'énergie n'est pas prise en considération.

S2 (m) : cote limite de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible en fonction de la cote

W1 (Gwh) : énergie moyenne produite par année sur la période 1950-1998.

W2 (Gwh) : comme W1, mais sur la période 1970-1998

R : fréquence des crues trop faibles obtenues

### **S.3.3. ANALYSE DES POSSIBILITES DE SOUTIEN D'ETIAGE A 300 M<sup>3</sup>/S**

Par simulation numérique basée sur les données hydrologiques de la période 1950-1998, on évalue dans quelle mesure la ressource en eau disponible permettrait de soutenir le débit d'étiage du fleuve Sénégal à hauteur de 300 m<sup>3</sup>/s à partir du barrage de Manantali.

Il apparaît qu'une capacité de stockage supplémentaire de 16,7 km<sup>3</sup> (en plus des 7,7 km<sup>3</sup> existants à Manantali) serait nécessaire, pour pouvoir garantir la possibilité d'effectuer en permanence un tel soutien d'étiage

Même si le soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s était envisagé comme unique objectif pour le barrage, il est constaté que les débits obtenus à Bakel seraient très largement inférieurs à cette valeur pendant une durée supérieure à 1 mois, pour 24% des étiages.

Combiné aux autres objectifs envisagés dans le cas de gestion type, le soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s a été intégré dans 54 scénarios de gestion qui envisagent tous une garantie de soutien à 200 m<sup>3</sup>/s pour une fréquence de 24 années sur 25. La simulation de ces scénarios montre que des crues trop faibles, non soutenues ou mal soutenues, sont à attendre dans ce cas avec une fréquence supérieure à 43%. Pour autant, les défaillances concernant le soutien à 300 m<sup>3</sup>/s ne sont pas rares, puisqu'il est constaté au moins 27 années sur 100, quel que soit le scénario, des débits inférieurs à 225 m<sup>3</sup>/s (25% de pénurie) à Bakel pendant plus de 100 jours.

Quel que soit le mode de gestion adopté pour le barrage de Manantali, le soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s ne pourra jamais être garanti à 100 % si l'hydraulicité reste conforme à celle de la période 1950-1998 sur le haut bassin du Sénégal. Environ une année sur trois, il sera impossible d'atteindre cet objectif pendant au moins trois mois.

# PREMIERE PARTIE : MANUEL DES CONSIGNES

## AVANT PROPOS

La bonne gestion d'un barrage à but purement hydroélectrique consiste à maintenir le lac le plus haut possible tout en évitant au maximum les débordements, afin de turbiner l'eau avec un maximum de rentabilité. Cependant, un ouvrage à but multiple comme celui de Manantali ne peut pas être géré de façon aussi simple, puisqu'il faut tenir compte des autres objectifs, parfois concurrentiels, assignés à l'ouvrage. Les aléas climatiques ne manqueront probablement pas de créer certaines situations dans lesquelles il s'avérera impossible de satisfaire tous les objectifs en même temps, et certains d'entre eux devront alors être momentanément abandonnés. Les pays riverains du fleuve Sénégal devront donc se mettre d'accord sur un certain dosage des priorités accordées à ces objectifs.

La gestion proposée pour le barrage de Manantali consiste à appliquer une série de consignes affectées de rangs de priorité. Les rangs de priorité, ainsi que certains paramètres précisant les consignes, ne seront définitivement arrêtés qu'en fonction du dosage évoqué plus haut. Ils devront être clairement définis, et connus à l'avance par le gestionnaire, pour permettre à ce dernier de travailler. On ne présente donc ici qu'un cadre pour la gestion de l'ouvrage, qui devra être précisé en fonction des décisions prises en commun par les pays riverains.

La première partie présente les principes de la gestion proposée.

La seconde partie détaille les différentes procédures de calcul qui devront être mises en œuvre pour effectuer la gestion opérationnelle de l'ouvrage. Elle est plus particulièrement destinée au gestionnaire du barrage, qui doit connaître le détail des calculs de gestion, même si ces derniers sont en grande partie automatisés (logiciel PROGEMAN). Par rapport au manuel provisoire édité en Mars 1999, les valeurs de certains paramètres présentés dans cette partie (étalonnages, modèles de propagation) ont été affinées, grâce aux nombreuses mesures effectuées pendant le POGR. Certaines procédures de calcul ont également été légèrement modifiées.

La troisième partie concerne un cas type de gestion du barrage, qui est étudié par simulation numérique. Les résultats présentés permettent d'apprécier les possibilités offertes par l'ouvrage, pour satisfaire les objectifs de production d'énergie, de soutien de crue, et de soutien d'étiage. Cette partie est donc plus particulièrement destinée aux personnes chargées de définir la stratégie de gestion de l'ouvrage. Elle n'a pas été modifiée par rapport à l'édition du manuel provisoire. Cela signifie que les simulations n'ont pas été refaites pour tenir compte des ajustements de modèles intervenus depuis 1999, qui n'auraient entraîné de toute façon qu'une modification minime des résultats.



# 1. PRINCIPE DE LA GESTION

## 1.1. GENERALITES

Ce manuel porte sur l'ensemble des opérations qui permettent de déterminer, au jour le jour, le débit lâché par le barrage de Manantali à travers ses différents organes d'évacuation. Cette détermination repose sur des contraintes de gestion liées aux caractéristiques de l'ouvrage, et sur des consignes de gestion relatives à la sécurité de l'ouvrage ou à la satisfaction de certains objectifs : fourniture d'eau à l'aval, laminage de crues, production d'énergie électrique. Combinées à la situation hydrologique du moment, ces contraintes et consignes imposent chacune des limites minimales  $Q_{min}$  ou maximales  $Q_{max}$ , sur le débit total pouvant être lâché du barrage.

Remarque : on trouvera dans l'annexe A la liste et la signification des différentes variables utilisées dans le texte.

La fourchette de débit qu'il est physiquement possible d'évacuer de l'ouvrage, est déterminée à partir des contraintes de gestion. Cette fourchette se resserre ensuite à mesure que sont prises en compte les limites  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  relatives aux consignes de gestion classées par ordre de priorité décroissante, en commençant par celles qui concernent la sécurité de l'ouvrage. Le processus s'arrête lorsque toutes les consignes envisagées ont été prises en compte, ou lorsque l'une d'entre elles s'avère incompatible avec les consignes de priorité supérieure. Dans ce dernier cas, la fourchette de débit à lâcher est réduite à une valeur unique, à la fois compatible avec les consignes de priorité supérieure, et la plus proche possible du débit demandé par la consigne incompatible. C'est finalement la borne inférieure de la fourchette résultante qui détermine le débit total à lâcher du barrage, qui doit être réparti dans les différents organes d'évacuation de façon à produire le maximum de puissance électrique pouvant être absorbée par le réseau.

On peut régler ainsi le débit lâché deux fois par jour en période de crue (juillet à octobre), afin de suivre au mieux l'évolution de la situation hydrologique. Le reste de l'année, un réglage par jour suffit, sauf s'il faut répondre à une demande d'énergie rapidement variable.

Avant de poursuivre, on notera que la gestion du barrage repose sur trois types de données bien distinctes :

- Les divers paramètres caractéristiques du barrage et de la retenue, ainsi que ceux qui décrivent l'étalonnage des stations hydrométriques et la propagation des débits entre les stations, sont des données relativement stables. Le gestionnaire de l'ouvrage ne sera amené à les modifier qu'en cas de mise à jour ou précision de l'un d'entre eux.
- Les paramètres relatifs aux consignes de gestion sont des données susceptibles d'être révisées au moins deux fois par an par l'Autorité compétente, au début et à la fin de la campagne d'hivernage. Des ajustements peuvent également être envisagés en cours d'exploitation par cette même Autorité, pour répondre à une modification des demande en eau ou en énergie.
- L'état des ressources en eau disponibles est décrit par des données pouvant varier très rapidement, qui doivent être suivies, surtout en période de crue, en temps quasi réel : débits naturels, niveau du lac, pertes par évaporation.

## **1.2. SUIVI DE LA SITUATION HYDROLOGIQUE**

### **1.2.1. Apports en eau : suivi des débits aux stations hydrométriques**

Plusieurs des objectifs assignés à l'ouvrage concernent un débit prédéfini à atteindre (soutien d'étiage pour l'irrigation ou la navigation, soutien de crue) ou au contraire à ne pas dépasser (laminage de crue) dans le Sénégal à Bakel. La réalisation de tels objectifs nécessite une connaissance assez précise des débits intermédiaires entre Manantali et Bakel, principalement concentrés dans le Bakoye et la Falémé. Le suivi en temps quasi réel des stations de Oualia sur le Bakoye et Gourbassy sur la Falémé, est donc un élément clé du dispositif de gestion du barrage de Manantali. Le suivi des stations de Kayes et Bakel est également indispensable pour opérer un contrôle continu des calculs en boucle fermée. Enfin, les temps de propagation de débit jusqu'à Bakel étant plus courts depuis Gourbassy que depuis Manantali, le suivi d'une station comme Fadougou sur la Falémé supérieure est également d'un grand intérêt pour affiner les calculs.

Sur le haut Bafing, le suivi de la station de Makana permet d'estimer les apports directs dans la retenue, et de calculer assez finement les débits lâchés permettant de maintenir le niveau du lac entre certaines cotes limites prédéfinies. L'importance des données en provenance de Makana est donc primordiale à chaque fois que le niveau du lac est soit très haut, soit très bas. La station de Daka Saidou présente un intérêt évident pour la protection contre les très fortes crues arrivant dans la retenue, puisqu'elle permet au gestionnaire d'anticiper sur l'arrivée de la crue d'au moins une journée, délai correspondant au temps de propagation des débits entre Daka Saidou et Makana. Une station située plus en amont permettrait encore d'accroître ce délai .

Enfin, d'une façon générale, toute station située en amont d'une station importante peut se révéler d'un grand intérêt en cas de panne de transmission au niveau de cette dernière. A ce titre, le suivi d'une station comme Diangola située en amont de Oualia sur le Bakoye, pourrait améliorer le niveau de sécurité du système de gestion.

Pour résumer, le suivi des stations en temps quasi réel peut être classé comme suit :

- Essentiel : Oualia, Gourbassy, Bakel, Daka Saidou, Kayes
- Important : Makana, Fadougou
- Souhaitable : Diangola sur le Bakoye , Bafing à l'amont de Daka Saidou

Le système actuel de suivi des débits par liaison radio bi ou tri quotidienne a doré et déjà montré sa robustesse et sa fiabilité. Doublé aux stations essentielles des limnigraphes télé transmetteurs CHLOE, il offre un bon degré de sécurité. Ce système d'acquisition de données sera donc conservé pour gérer l'ouvrage, avec un effort important développé au niveau de la maintenance et de l'entretien des appareils. Toute lacune de donnée, surtout en période de crue sur les stations essentielles, est en effet susceptible de dégrader la qualité de la gestion réalisée, même si des méthodes sont prévues pour palier de telles défaillances, comme on le verra plus loin.

### **1.2.2. Cote dans la retenue**

L'acquisition de cette donnée essentielle, rappelée ici pour mémoire, est effectuée au barrage même et ne pose pas de problème particulier.

### **1.2.3. Taux d'évaporation**

Egalement mesurée au barrage avec un dispositif approprié, cette donnée est beaucoup moins importante que la cote. Elle permet néanmoins d'affiner le calcul du débit pour toutes les consignes relatives au respect d'un certain niveau limite dans le lac.

### **1.2.4. Procédures utilisées en cas de données manquantes**

Aucune lacune de donnée ne peut être envisagée concernant le niveau de la retenue et le débit lâché. Par contre, toutes les autres données mentionnées ci-dessus pour la gestion de l'ouvrage sont susceptibles de pouvoir manquer un jour pour cause de défaillance matérielle ou humaine. Les données manquantes doivent alors être remplacées par des valeurs reconstituées par une des méthodes suivantes :

- **Modèle de propagation de débit** : la valeur manquante pour le débit d'une station est déduite des valeurs connues pour une station située à l'amont. Assez précise, c'est la méthode à utiliser en priorité lorsque cela est possible.
- **Modèle de tarissement** : en régime de tarissement, la décroissance des débits naturels est généralement bien décrite par un modèle exponentiel, qu'on pourra utiliser pour faire des prévisions allant jusqu'à l'horizon d'un mois.
- **Autorégression** : la valeur manquante est déduite des dernières valeurs connues pour la donnée en cause. Pour les débits de crue, cette méthode offre une précision assez moyenne aux horizons 1 et 2 jours pour les stations qui nous intéressent. Pour les pertes par évaporation, on pourra admettre la persistance des dernières valeurs mesurées pendant 10 jours.
- **Utilisation de valeurs moyennes ou médianes observées à la même date sur les années antérieures** : c'est la méthode la moins précise, acceptable pour les pertes par évaporation, mais à utiliser en dernier ressort pour les débits.

Plus son calcul reposera sur des données reconstituées peu fiables, plus la valeur de débit à lâcher devra être considérée avec prudence par le gestionnaire de l'ouvrage. L'expérience et le sens critique prendront alors toute leur importance face à une telle situation, qui en principe sera extrêmement rare.

## **1.3. CONTRAINTES DE GESTION**

En fonction du niveau  $H$  dans le lac, les caractéristiques de l'ouvrage imposent au débit total  $Q_t$  à lâcher, de se situer dans une fourchette  $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ .

### **A0 : limitation inférieure du débit lâché**

$Q_{\min}$ , fonction croissante de  $H$ , désigne le débit total lâché de l'ouvrage lorsque tous les organes d'évacuation sont soit fermés (turbines, vidange de fond), soit ouverts au minimum (vannes d'évacuateur de crue).  $Q_{\min}$  est donc nul pour les cotes inférieures à la limite de déversement de l'ouvrage ( $H_d = 208,05\text{m}$ ). Quand la surface libre dépasse cette cote, l'ouverture des vannes secteur du déversoir de crue est indispensable pour éviter tout risque de débordement au dessus de celles-ci.

### **B0 : limitation supérieure du débit lâché**

$Q_{\max}$ , fonction croissante de  $H$ , désigne le débit total lâché de l'ouvrage lorsque tous les organes d'évacuation sont ouverts au maximum.

## **1.4. CONSIGNES DE SECURITE ET CONSIGNES DE GESTION**

### **Avertissement**

En préalable à la gestion opérationnelle de l'ouvrage, les consignes de gestion, ainsi que leur ordre de priorité, doivent être définies par une Autorité compétente. On donne ci-dessous le principe de certaines consignes type, qui ont déjà fait l'objet de tests effectués par simulation numérique. Le résultat de ces tests, présenté dans le chapitre 3, peut servir de référence pour le choix des consignes et de leur priorité.

### **1.4.1. Consignes définissant une limite inférieure $Q_{min}$ pour le débit à lâcher du barrage**

#### **A1 : Précaution contre la submersion des digues du barrage (consigne B dans Progeman)**

Il s'agit d'une consigne de sécurité très importante qui consiste à lâcher le plus petit débit possible permettant à la fois :

- D'éviter que le niveau du lac ne dépasse la cote limite maximale de sécurité  $H_{max}$  (210,50m) dans les jours à venir
- De limiter au mieux le débit maximal lâché dans les jours à venir.

#### **A2 : Production d'énergie électrique (consigne E dans Progeman)**

La consigne de production d'électricité consiste à favoriser celle-ci lorsque le niveau du lac est haut, et à la limiter dans le cas contraire. Cette stratégie est celle qui permet de maximiser l'énergie produite par l'ouvrage sur le long terme, car elle se traduit en moyenne par un moindre volume d'eau turbiné par kWh produit. On a donc tout intérêt à la favoriser, même si elle présente l'inconvénient de ne pas pouvoir répondre à certaines pointes de demande, qui devront alors faire appel de façon importante aux autres moyens de production pour être satisfaites. Les arguments plaidant en faveur de ce mode

#### **A4 : Soutien de crue (consigne C dans Progeman)**

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme de crue  $Q_c(t)$  prédéfini. La décision de soutien de crue est prise une fois par an à une date prédéfinie  $T_c$ .

- Si la cote du lac à la date  $T_c$  est supérieure à un seuil  $H_s$  prédéfini, et si un hydrogramme de crue jugé suffisant n'a pas encore été observé dans l'année à Bakel, le soutien de crue est déclenché. La consigne est alors prise en compte pendant toute la durée nécessaire à la réalisation de l'hydrogramme  $Q_c(t)$  à Bakel.
- Dans le cas contraire, la consigne de soutien de crue n'est plus prise en compte jusqu'à l'année suivante.

Dans la pratique, la décision de faire ou non le soutien de crue à partir de la date  $T_c$  pourra souvent être prise avant cette date, en estimant la probabilité de voir la cote  $H_s$  dépassée à la date  $T_c$ . L'intérêt d'une telle anticipation de la décision consiste à prévenir à l'avance les populations.

Par ailleurs, il se peut qu'à la date de déclenchement du soutien de crue, le débit observé à Bakel soit depuis un certain temps supérieur à un hydrogramme équivalent à l'objectif avancé en temps. Par souci d'économie d'eau et aussi pour éviter une crue à double pointe, le soutien de crue pourra alors se limiter à la réalisation de la partie manquante de l'hydrogramme objectif ainsi avancé.

Pour un hydrogramme objectif de crue de type ORSTOM1 culminant à 2500 m<sup>3</sup>/s à Bakel pendant 6 jours, il a été montré (POGR, phase2, Rapport de synthèse, annexe 3.5, octobre 1999, IRD) que la date  $T_c$  optimale au regard de la dépense en eau se situait le 28 août. Voir figure 1.4.A.

#### **A5 : Soutien immédiat des basses eaux (consigne C dans Progeman)**

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme  $Q_{et}(t)$  prédéfini. Cet hydrogramme correspond au débit nécessaire pour la satisfaction de certains besoins. Deux consignes de ce type peuvent être prises en compte en même temps :

- La première vise à satisfaire des besoins sommables de consommation d'eau : irrigation, alimentation humaine. L'hydrogramme objectif doit alors être défini comme la somme de ces besoins, augmentée des pertes accompagnant le transit des débits jusqu'au lieu de la consommation, et encore augmentés d'un éventuel débit résiduel de sécurité.
- La deuxième vise à garantir un débit suffisant pour permettre la navigation (passage des seuils) à certains moments de l'année.

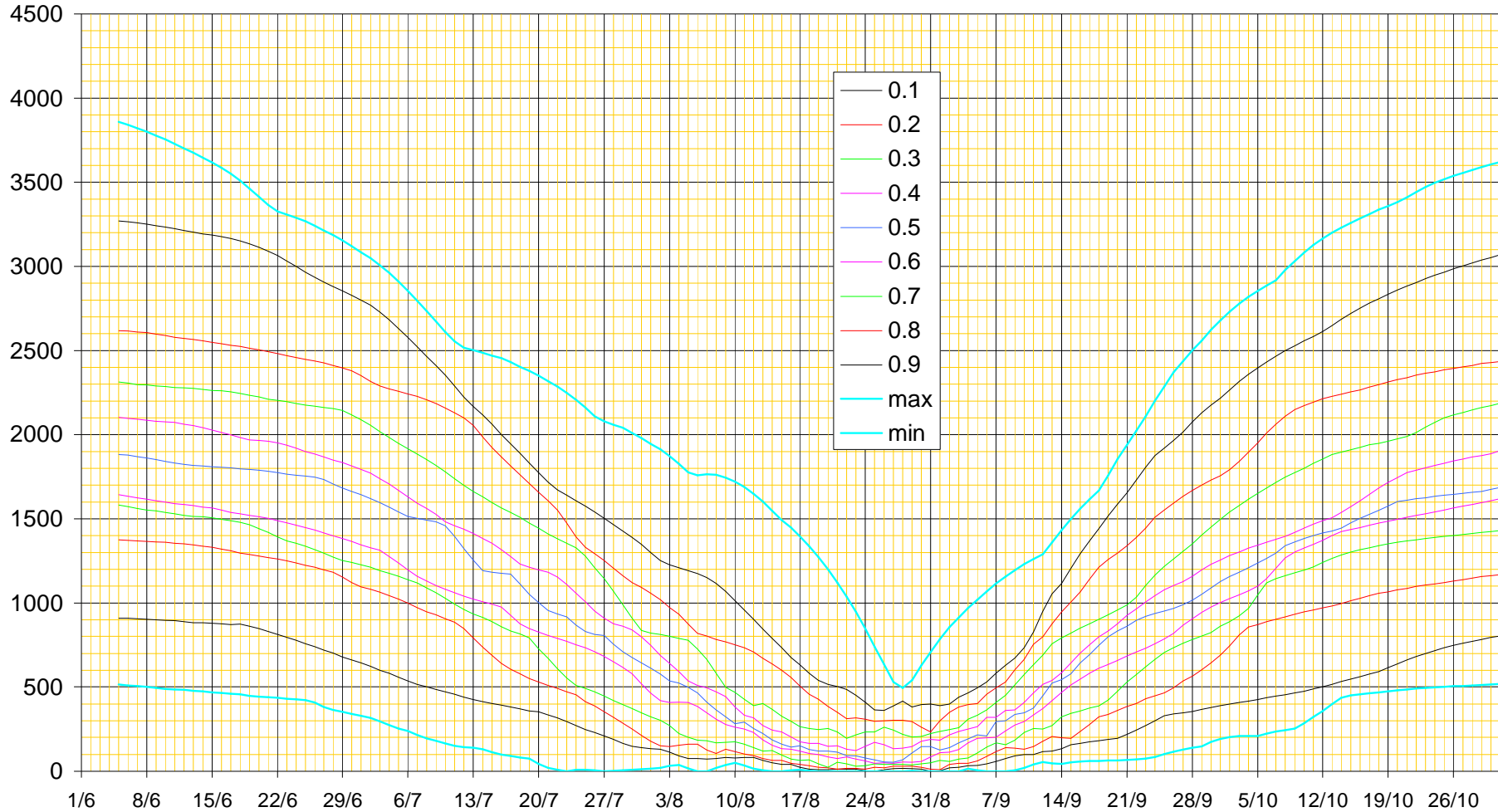
#### **A6 : Conservation d'une revanche suffisante pour le laminage futur des crues (consigne B dans Progeman)**

Il s'agit de lâcher un volume suffisant du barrage pour conserver une revanche (volume libre dans la retenue) permettant de laminar les crues futures avec un taux de réussite probable prédéfini. Ce stock correspond à une cote limite maximale  $H_{lam}$  du niveau dans le lac, variable dans l'année, qui est calculée à partir des grandeurs suivantes :

- Les débits observés sur le haut bassin du Sénégal durant une période de référence, débutant l'année  $A_{ld}$  et se terminant l'année  $A_{lf}$ .
- Le débit limite maximal qu'on vise à ne pas dépasser soit à la sortie du barrage ( $Q_{I1}$ ) soit à Bakel ( $Q_{I2}$ ).
- La fréquence  $T_I$  de réussite souhaitée pour le laminage

figure 1.4.A : répartition du gaspillage effectué pour le soutien de crue en plus de la dépense minimale d'eau (millions de m<sup>3</sup> lâchés au dessus de 600 m<sup>3</sup>/s), en fonction de la date T<sub>c</sub> du premier jour de palier à 2500 m<sup>3</sup>/s. Crues des années 1973 à 1997 .

Pour T<sub>c</sub> calé au 28 août, le volume non turbiné supplémentaire par rapport à la date optimale variable chaque année, n'excède jamais 500 millions de m<sup>3</sup>. Il est inférieur 2 années sur 3 à 200 millions de m<sup>3</sup>.



### **1.4.2. Consignes définissant une limite supérieure $Q_{max}$ pour le débit à lâcher du barrage**

#### **B1 : Submersion permanente de la partie basse du parement amont de l'ouvrage (consigne D dans Progeman)**

Il s'agit d'une consigne de sécurité qui consiste à limiter le débit lâché, afin que le lac ne descende pas en dessous de la cote  $H_{min}$  (187m) dans les 24 heures suivantes. Cette consigne est nécessaire du fait que la houle est susceptible d'endommager le parement amont de l'ouvrage en dessous de la cote 185.

#### **B2 : Laminage immédiat des crues (consigne A dans Progeman)**

Deux types de laminage des crues peuvent être envisagés :

- Le laminage immédiat des crues à la sortie du barrage consiste à lâcher un débit total  $Q_t$  inférieur ou égal à un certain débit limite  $Q_{I1}$  prédéfini.
- Le laminage des crues au niveau de Bakel consiste à lâcher un débit  $Q_t$  suffisamment faible pour que le débit des jours suivants à Bakel ne dépasse pas une limite  $Q_{I2}$  prédéfinie.

#### **B3 : Conservation d'un stock d'eau suffisant pour le soutien d'étiage futur (consigne D dans Progeman)**

Il s'agit de limiter le débit total lâché du barrage afin de conserver le stock nécessaire (dans la tranche utile des cotes supérieures à  $H_{min}=187m$ ) pour pouvoir satisfaire le soutien d'étiage futur avec un taux de réussite prédéfini  $T_e$ . Ce stock correspond à une cote limite minimale  $H_{et}$  du niveau dans le lac, variable dans l'année, qui est calculée à partir des grandeurs suivantes :

- Les débits observés sur le haut bassin du Sénégal durant une période de référence, débutant l'année  $Asd$  et se terminant l'année  $Asf$ .
- L'hydrogramme minimal souhaité au niveau de Bakel :  $Q_{et}(t)$
- La fréquence  $T_e$  de réussite souhaitée pour le soutien d'étiage

## **1.5. PRINCIPE DU CALCUL DE DEBIT A LACHER A TRAVERS LES DIFFERENTS ORGANES D'EVACUATION**

Le principe des procédures de calcul est donné ci-dessous, dans l'ordre où les opérations doivent être menées. Leur détail est présenté dans le chapitre suivant.

### **1.5.1. Calcul du débit total à lâcher**

Le calcul est fait dans l'optique de lâcher le débit minimal permettant de respecter le plus grand nombre possible des consignes qui auront été préalablement définies et classées par ordre de priorité. La procédure est la suivante :

- Calcul des limites  $Q_{\text{mino}}$  et  $Q_{\text{maxo}}$  imposées par les contraintes de gestion sur le débit total lâché
- Calcul des limites  $Q_{\text{min}}$  et  $Q_{\text{max}}$  imposées par les consignes de gestion sur le débit lâché total
- Calcul d'une fourchette de débit total lâché permettant de respecter le plus grand nombre de consignes. Pour cela, une fourchette initiale est déterminée à partir des limites  $Q_{\text{mino}}$  et  $Q_{\text{maxo}}$  relatives aux contraintes de gestion. Les valeurs limites  $Q_{\text{min}}$  et  $Q_{\text{max}}$  relatives aux différentes consignes sont ensuite prises en compte par ordre de priorité décroissante, pour réduire la fourchette de débit possible. Le processus s'arrête quand toutes les consignes retenues ont été prises en considération, ou que l'une d'entre elles se révèle impossible à respecter.
- Le débit total à lâcher du barrage est alors calé sur la limite inférieure de la fourchette obtenue, ce qui permet de respecter le maximum de consignes tout en préservant au mieux le volume d'eau emmagasiné dans la retenue

### **1.5.2. Calcul du débit turbiné $Q_e$ et de la puissance développée $P_e$**

A partir de la cote  $H$  dans le lac et du débit total à lâcher  $Q_t$ , les caractéristiques de l'installation permettent de déterminer la puissance maximale  $P_t$  qu'il est possible de produire, ainsi que le débit turbiné correspondant  $Q_{e1}$ . Deux cas sont alors à envisager, en fonction de la puissance électrique maximale  $P_r$  que le réseau peut absorber :

- Si  $P_t$  est inférieur à  $P_r$ , on turbine alors un débit  $Q_{e1}$  pour produire la puissance  $P_t$
- Si  $P_t$  est supérieur à  $P_r$ , on turbine alors le débit  $Q_{e2}$  permettant de produire la puissance  $P_r$

### **1.5.3. Calcul du débit évacué par la vidange de fond et par l'évacuateur de crue**

Les vannes de la vidange de fond et de l'évacuateur de crue seront réglées de façon à respecter les deux points suivants :

- La somme des débits passant par la vidange de fond et par l'évacuateur de crue doit être égale à la différence entre le débit total à lâcher  $Q_t$  et le débit turbiné  $Q_e$ .
- Les vannes de l'évacuateur de crue devront respecter l'ouverture minimale définie par le constructeur en fonction de la cote dans le lac, destinée à éviter le risque de leur submersion.



## 2. DETAIL DES PROCEDURES DE GESTION OPERATIONNELLE

Le processus de détermination des débits à évacuer par les différents organes du barrage est en grande partie automatisé, grâce au logiciel PROGEMAN mis à la disposition du gestionnaire de l'ouvrage. En pratique, ce dernier devra assurer la mise à jour des fichiers de données hydrologiques (une ou deux fois par jour), ainsi que les modifications nécessaires concernant la définition des consignes, lorsque l'Autorité compétente le décidera. Le logiciel assurera alors l'ensemble des calculs de débit à évacuer. Néanmoins, les principes exposés dans la première partie vont être détaillés ci-dessous pour permettre d'effectuer le calcul manuellement, en cas de besoin.

### 2.1. SITUATION HYDROLOGIQUE : PREPARATION DE LA BANQUE DE DONNEES

Le fichier de données hydrologiques utilisé pour faire le calcul de réglage des débits, est constitué des valeurs observées aux stations hydrométriques et au barrage. Il doit nécessairement intégrer les plus récentes valeurs connues, afin que la gestion puisse s'adapter à l'évolution de la situation hydrologique avec le moins de retard possible. Les données à saisir sont les suivantes :

- Cotes instantanées relevées aux échelles de Gourbassy( Falémé), Fadougou (Falémé), Makana (Bafing), Daka Saidou (Bafing), Diangola (Bakoye), Oualia (Bakoye), Kayes (Sénégal), Bakel (Sénégal).
- Débit turbiné instantané et réglage des vannes. En fonction du niveau de la retenue, ces données permettent d'estimer le débit total instantané lâché du barrage (cf notice du logiciel PROGEMAN)
- Cote instantanée de la surface libre du lac de Manantali
- Taux journalier de pertes par évaporation

Un premier traitement est effectué sur les données saisies, pour traduire les cotes instantanées des stations étalonnées en débits instantanés. Les étalonnages utilisés sont donnés dans le tableau 2-1-A. Sauf pour les stations de Bakel et Kayes, ils consistent en une relation unique (dite bi-univoque) entre la cote et le débit. A Bakel et Kayes, le débit du Sénégal dépend à la fois de la cote et de la vitesse de variation de celle-ci (gradient limnimétrique). L'étalonnage de ces stations est donc établi suivant la méthode du gradient limnimétrique, qui permet de calculer le débit de la façon suivante : si on note H (cm) la cote à l'échelle, G (cm/jour) la vitesse de variation de H, ou gradient limnimétrique, Q (m<sup>3</sup>/s) le débit en régime non permanent, et Q<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/s) le débit en régime permanent, alors :

$$Q = Q_0 (1+KG)^{0.5}$$

Le traitement suivant consiste à mettre à jour les fichiers de débits moyens journaliers observés à partir des valeurs instantanées, en utilisant la méthode des trapèzes. Lorsque le jour j à l'instant t marque la date du plus récent débit instantané connu à une station, on considère en première approximation que le débit moyen journalier du jour j à cette station est égal au débit moyen calculé entre 0 heure et l'instant t pour ce même jour.

Le dernier traitement s'applique à la fois aux stations réelles pour lesquelles les débits moyens journaliers ont été mis à jour, et à certaines stations fictives qui sont utilisées dans les calculs. Il consiste à étendre jusqu'à un certain horizon de temps après le jour du calcul, les valeurs journalières de débit en utilisant les méthodes suivantes, par ordre de priorité décroissante : modèle de propagation de débit depuis l'amont ; modèle corrélatif (débits intermédiaires entre les stations) ; autorégression ou modèle de tarissement (stations non influencées par le barrage); valeurs médianes observées en régime naturel (stations non influencées par le barrage). Ces méthodes sont également utilisées pour reconstituer d'éventuelles données manquantes. Le même type d'extension de donnée est également effectué pour les pertes par évaporation.

### Remarque concernant les modèles de propagation : correction en boucle fermée.

Pour les stations observées en temps réel, les débits calculés par modèle de propagation (prévision ou reconstitution de donnée manquante) peuvent être affinés par une procédure de régulation. Celle-ci tient compte des écarts constatés sur les jours voisins entre les résultats du modèle et les valeurs observées, pour effectuer en continu une correction en boucle fermée. La correction est très utile dans le cas où les apports intermédiaires entre les stations s'écartent beaucoup des valeurs estimées par modèle corrélatif. Elle peut également être efficace en cas d'erreur systématique affectant les données ou le tarage d'une station amont. La procédure de correction en boucle fermée est détaillée dans la notice du logiciel PROGEMAN.

La préparation de la banque de données est détaillée ci dessous. Les différentes opérations sont décrites dans l'ordre où elles doivent être effectuées le jour Jo avant de calculer le réglage de débit du barrage du jour même:

#### 2.1.1. Le Bakoye à Diangola

Le fichier de cotes journalières de cette station doit éventuellement être complété par la méthode suivante, jusqu'au jour Jo inclus.

**Autorégression** en cote aux horizons 2 et 1 jour, à utiliser en période de crue (juin à octobre). Le calcul est fait uniquement à partir de cotes journalières observées. La valeur obtenue par ce calcul pour le jour j+2 peut être étendue s'il le faut jusqu'au jour J+5.

$$H(j+2) = 1,23 * H(j) - 0,66 * H(j-1) + 0,40 * H(j-2) + 15,6$$

$$H(j+1) = 1,41 * H(j) - 0,73 * H(j-1) + 0,30 * H(j-2) + 6,2$$

#### 2.1.2. Le Bakoye à Oualia

Le fichier de débit journalier de cette station doit éventuellement être complété par les méthodes suivantes, jusqu'au jour Jo inclus.

**Modèle de propagation** (+ correction en boucle fermée) donnant le débit à Oualia au jour j+D en fonction de la cote au jour j à l'échelle de Diangola :

H(j) Diangola (cm)	0	120	160	220	301	389	503	604	700
Q(j+D) Oualia (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	24	62	143	282	435	603	713	779
D (jour)	0	0.2	1	2	2.7	3	3	3	3

**Modèle de tarissement**, utilisable de novembre à mai pour prévoir le débit entre les jours j+1 et j+30 à partir des débits observés connus jusqu'au jour j :

$$Q(j+n) = Q(j) * \exp(-k * n)$$

Le coefficient de tarissement  $k$  est réajusté en permanence en fonction des débits journaliers observés antérieurs au jour  $j$

**Autorégression** en débit aux horizons 2 et 1 jour, à utiliser en période de crue (juin à octobre). Le calcul est fait uniquement à partir de débits journaliers observés. La valeur obtenue par ce calcul pour le jour  $j+2$  peut être étendue s'il le faut jusqu'au jour  $J+5$ .

$$Q(j+2) = 1,021 * Q(j) - 0,160 * Q(j-1) + 0,097 * Q(j-2) + 12,39$$

$$Q(j+1) = 1,142 * Q(j) - 0,281 * Q(j-1) + 0,119 * Q(j-2) + 5,707$$

**Valeurs médianes** : ces valeurs (tableau 2-1-B) peuvent être utilisées en dernier ressort pour compléter les débits journaliers jusqu'au jour  $J_0$ .

### 2.1.3. La Falémé à Goubassy

Le fichier de débit journalier de cette station doit être complété par les méthodes suivantes, jusqu'au jour  $J_0 + 10$  inclus.

**Modèle de propagation** (+ correction en boucle fermée) donnant le débit à Goubassy au jour  $j+D$  en fonction du débit au jour  $j$  à Fadougou, calé sur la période 1954-1987 :

$Q(j)$ Fadougou ( $m^3 s^{-1}$ )	4	3000
$Q(j+D)$ Goubassy ( $m^3 s^{-1}$ )	0	4290
$D$ (jour)	2	2

**Modèle de tarissement**, utilisable de novembre à mai pour prévoir le débit entre les jours  $j+1$  et  $j+30$  à partir des débits connus jusqu'au jour  $j$  :

$$Q(j+n) = Q(j) * \exp(-k * n)$$

Le coefficient de tarissement  $k$  est réajusté en permanence en fonction des débits journaliers observés antérieurs au jour  $j$ .

**Autorégression** en débit aux horizons 2 et 1 jour, à utiliser en période de crue (juin à octobre). Le calcul est fait uniquement à partir de débits journaliers observés ou calculés par modèle de propagation. La valeur obtenue par ce calcul pour le jour  $j+2$  peut être étendue s'il le faut jusqu'au jour  $J+10$

$$Q(j+2) = 1,744 * Q(j) - 1,109 * Q(j-1) + 0,309 * Q(j-2) + 14,78$$

$$Q(j+1) = 1,587 * Q(j) - 0,787 * Q(j-1) + 0,178 * Q(j-2) + 5,78$$

**Valeurs médianes** : ces valeurs (tableau 2-1-C) peuvent être utilisées en dernier ressort pour compléter les débits journaliers jusqu'au jour Jo+10.

#### 2.1.4. Le Bafing à Daka Saidou

Le fichier de débit journalier de cette station doit être complété par les méthodes suivantes, jusqu'au jour Jo inclus.

**Modèle de tarissement**, utilisable de novembre à mai pour prévoir le débit entre les jours j+1 et j+30 à partir des débits connus jusqu'au jour j :

$$Q(j+n) = Q(j) * \exp(-k * n)$$

Le coefficient de tarissement k est réajusté en permanence en fonction des débits journaliers observés antérieurs au jour j

**Autorégression** en débit aux horizons 2 et 1 jour, à utiliser en période de crue (juin à octobre). Le calcul est fait uniquement à partir de débits journaliers observés ou calculés par modèle de propagation. La valeur obtenue par ce calcul pour le jour j+2 peut être étendue s'il le faut jusqu'au jour J+10.

$$Q(j+2) = 1,46 Q(j) - 0,68 Q(j-1) + 0,20 Q(j-2) + 4,27$$

$$Q(j+1) = 1,41 Q(j) - 0,53 Q(j-1) + 0,12 Q(j-2) + 1,80$$

**Valeurs médianes** : ces valeurs peuvent être utilisées en dernier ressort pour compléter les débits journaliers jusqu'au jour Jo+10.

#### 2.1.5. Le Bafing à Makana

Le fichier de débit journalier de cette station doit être complété par les méthodes suivantes, jusqu'au jour Jo +1 inclus.

**Modèle de propagation** (+ correction en boucle fermée) donnant le débit à Makana au jour j+D en fonction du débit au jour j à Daka Saidou :

Q(j) Daka Saidou (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	175	225	450	550	950	1050	2000
Q(j+D) Makana (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1	207	253	472	581	1112	1261	2469
D (jour)	1	1	1	1	1	1	1	1

**Modèle de tarissement**, utilisable de novembre à mai pour prévoir le débit entre les jours j+1 et j+30 à partir des débits connus jusqu'au jour j :

$$Q(j+n) = Q(j) * \exp (- k * n )$$

Le coefficient de tarissement k est réajusté en permanence en fonction des débits journaliers observés antérieurs au jour j

**Autorégression** en débit aux horizons 2 et 1 jour, à utiliser en période de crue (juin à octobre). Le calcul est fait uniquement à partir de débits journaliers observés ou calculés par modèle de propagation. La valeur obtenue par ce calcul pour le jour j+2 peut être étendue s'il le faut jusqu'au jour J+10.

$$Q(j+2) = 1,05 Q(j) - 0,22 Q(j-1) + 0,14 Q(j-2) + 7,44$$

$$Q(j+1) = 1,17 Q(j) - 0,32 Q(j-1) + 0,13 Q(j-2) + 3,43$$

**Valeurs médianes** : ces valeurs (tableau 2-1-D) peuvent être utilisées en dernier ressort pour compléter les débits journaliers jusqu'au jour Jo+1.

### 2.1.6. *Le Bafing à Soukoutali en régime naturel : station fictive*

Le fichier de débit journalier de cette station fictive (située au droit du barrage) doit être complété par la méthode suivante, jusqu'au jour Jo+1 inclus.

**Modèle de propagation** donnant le débit à Soukoutali au jour j+D en fonction du débit au jour j à Makana :

Q(j) Makana (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	125	500	1125	2000	2500
Q(j+D) Soukoutali (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	143	607	1212	2002	2436
D (jour)	0	0	0	0	0	0

### 2.1.7. *Débits intermédiaires Int1 entre Manantali, Oualia et Kayes : station fictive*

Le fichier de débit journalier de cette station fictive doit être complété par la méthode suivante, jusqu'au jour Jo inclus.

**Modèle corrélatif** donnant les débits intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes au jour j, en fonction de la somme des débits naturels à Oualia et Soukoutali au jour j:

Q(j) Oualia + Soukoutali ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	50	100	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	
Q(j)) Int1 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )		-11	-4	2	53	116	180	254	350	468	770	1160

### 2.1.8. Le Sénégal à Kayes en régime naturel : station fictive

Le fichier de débit journalier de cette station fictive doit être complété par la méthode suivante, jusqu'à l'horizon de temps le plus grand possible entre  $J_0+1$  et  $J_0+10$ .

**Modèle de propagation** donnant le débit à Kayes en régime naturel fictif au jour  $j+D$  en fonction de la somme des débits naturels du jour  $j$  à Oualia et Soukoutali, calé sur la période 1967-2000 :

Q(j) Oualia + Soukoutali ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	10	50	100	140	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Q(j+D) Kayes naturel ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	0	46	102	147	553	1116	1680	2254	2850	3468	4770	6160
D (jour)		8	7,2	4	2,9	2	2	2	2	2	2	2	2

### 2.1.9. Débits intermédiaires Int2 entre Kayes, Gourbassy et Bakel : station fictive

Le fichier de débit journalier de cette station fictive doit être complété par la méthode suivante, jusqu'à l'horizon de temps le plus grand possible, puis être extrapolé jusqu'à l'horizon  $J_0+10$ .

**Modèle corrélatif** donnant les débits intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel au jour  $j$ , en fonction de la somme des débits naturels à Kayes et Gourbassy au jour  $j$ :

Q(j) Kayes naturel + Gourb. ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	50	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	
Q(j)) Int2 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )		15	18	27	45	76	146	225	312	408	513

### 2.1.10. Le Sénégal à Kayes

Le fichier de débit journalier de cette station doit être complété par la méthode suivante, jusqu'à l'horizon de temps le plus grand possible entre  $J_0+1$  et  $J_0+10$ .

**Modèle de propagation** (+ correction en boucle fermée) donnant le débit à Kayes au jour  $j+D$  en fonction de la somme des débits observés à Oualia et Manantali, et des débits intermédiaires Int1 estimés entre Manantali, Oualia et Kayes :

Q(j) Oualia + Manantali ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	50	140	5000
D (jour)	8	4	2	2

Q(j) Oualia + Manantali + Int1 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	5000
Q (J+D) Kayes ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	5000

### 2.1.11. Le Sénégal à Bakel

Le fichier de débit journalier de cette station doit être complété par la méthode suivante, jusqu'à l'horizon de temps le plus grand possible entre  $J_0+1$  et  $J_0+10$ .

**Modèle de propagation** (+ correction en boucle fermée) donnant le débit à Bakel au jour  $j+D$  en fonction de la somme des débits observés à Kayes et Gourbassy, et des débits intermédiaires Int2 estimés entre Kayes, Gourbassy et Bakel :

Q(j) Gourbassy + Kayes ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	30	135	3210	3875	4135	4560	8000
D (jour)	2	2	1	1	2	2	3	3

Q(j) Gourbassy + Kayes + Int2 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	5000
Q (J+D) Bakel ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	5000

### 2.1.12. Pertes par évaporation

Le fichier de taux journalier de perte par évaporation sur la retenue doit être complété par les méthodes suivantes, jusqu'à l'horizon de temps  $J_0+1$ .

**Extension** de la dernière valeur mesurée sur 10 jours au maximum.

**Valeurs moyennes mensuelles** : voir le tableau 2-1-E

Falémé Fadougou		Bafing daka Saidou		Bafing Makana		Bakoye Oualia		Falémé Gourbassy		Sénégal Kayes				Sénégal Bakel			
Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	K	Ho	Qo	Ho	K
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0.010
4	0	4	0	4	1	40	0	10	0	10	0	1400	0.001	30	0	350	0.010
10	1	12	2	13	4	50	1	30	1	30	1			50	9	400	0.006
17	2	20	4	28	9	60	2	50	5	50	6			75	26	450	0.004
32	5	30	7	50	18	75	5	75	13	75	20			100	50	500	0.003
48	10	50	20	78	30	100	16	100	26	100	48			125	81	550	0.002
70	20	100	80	100	41	125	35	125	44	125	86			150	113	564	0.002
100	38	200	270	141	64	150	60	150	66	150	132			200	195	650	0.002
132	61	300	500	160	76	200	124	200	122	200	243			250	288	1300	0.002
180	101	400	800	200	104	250	193	250	188	250	374			300	396		
220	144	500	1150	254	147	300	280	300	273	300	523			400	668		
260	194	600	1650	280	170	400	490	400	493	400	863			500	998		
300	255	760	2600	440	307	500	719	500	754	500	1255			600	1389		
400	415			520	392	600	970	600	1033	600	1694			700	1831		
500	590			580	473	700	1256	700	1309	700	2177			800	2277		
600	775			620	541	800	1580	800	1595	800	2713			900	2829		
700	995			640	587	900	1917	900	1888	900	3344			1000	3505		
800	1250			680	711	1000	2265	950	2037	1000	4140			1100	4526		
1000	1820			720	882	1100	2617			1100	4986			1200	5961		
1200	2440			760	1130	1200	2971			1200	6007			1300	7721		
				799	1460					1300	7156			1400	9838		
				900	2680					1400	8418						
				950	3340												

Tableau 2-1-A : étalonnage des stations, donnant le débit Qo (m<sup>3</sup>/s) et éventuellement le coefficient de correction de gradient K (jour/cm) en fonction de la cote à l'échelle Ho (cm)



	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	7	2	0	0	0	0	29	215	448	278	83	23
2	8	2	0	0	0	0	28	230	497	281	81	23
3	7	2	0	0	0	0	29	231	485	264	78	22
4	7	2	0	0	0	0	29	225	492	245	73	22
5	7	2	0	0	0	0	45	236	534	237	68	21
6	6	2	0	0	0	0	38	202	525	232	63	21
7	6	2	0	0	0	0	39	231	598	218	61	20
8	6	2	0	0	0	0	42	236	589	211	59	20
9	6	2	0	0	0	0	50	241	632	198	56	19
10	6	2	0	0	0	0	60	250	600	189	52	18
11	6	2	0	0	0	0	69	249	561	188	50	17
12	5	2	0	0	0	1	65	267	609	180	48	16
13	5	2	0	0	0	3	71	296	554	174	46	15
14	5	1	0	0	0	3	73	347	551	156	44	14
15	5	1	0	0	0	3	72	318	511	148	41	14
16	5	1	0	0	0	4	86	310	472	137	40	13
17	4	1	0	0	0	6	91	307	484	131	38	13
18	4	1	0	0	0	7	87	285	471	128	37	12
19	4	1	0	0	0	10	84	340	442	128	35	12
20	4	1	0	0	0	8	95	362	476	124	33	12
21	4	1	0	0	0	11	115	411	474	119	31	11
22	4	1	0	0	0	11	114	492	449	110	30	11
23	3	1	0	0	0	10	129	442	467	106	30	10
24	3	1	0	0	0	12	141	388	433	100	28	10
25	3	1	0	0	0	14	144	385	430	100	27	10
26	3	1	0	0	0	17	159	419	396	97	26	9
27	3	1	0	0	0	18	167	456	381	99	25	9
28	3	1	0	0	0	19	187	490	394	93	25	9
29	3		0	0	0	25	205	475	363	89	25	8
30	3		0	0	0	23	203	422	319	81	24	8
31	3		0		0		229	419		84		7

Tableau 2-1-B : valeurs médianes du débit moyen journalier (m<sup>3</sup>/s) observé à Oualia sur le Bakoye entre 1950 et 1998

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	12	6	2	0	0	0	11	186	418	335	67	23
2	12	6	2	0	0	0	16	214	419	301	66	23
3	12	6	2	0	0	0	15	206	443	286	62	22
4	11	6	2	0	0	0	14	223	516	271	59	22
5	11	6	1	0	0	0	15	213	493	258	54	22
6	11	6	1	0	0	0	16	218	489	233	50	22
7	10	5	1	0	0	0	17	224	490	214	48	21
8	10	5	1	0	0	0	20	190	523	237	46	20
9	10	5	1	0	0	0	25	190	525	223	45	20
10	10	4	1	0	0	0	28	210	474	206	44	19
11	9	4	1	0	0	0	33	271	490	191	42	18
12	9	4	1	0	0	1	32	300	501	176	40	18
13	9	4	1	0	0	2	37	288	465	161	39	18
14	9	4	1	0	0	2	38	313	446	154	38	17
15	9	4	1	0	0	2	39	297	448	144	36	17
16	9	3	1	0	0	2	46	309	457	142	34	17
17	9	3	1	0	0	3	54	334	447	133	33	16
18	9	3	1	0	0	3	55	338	439	131	32	16
19	8	3	1	0	0	5	61	350	464	136	32	15
20	8	3	1	0	0	5	60	389	494	134	30	15
21	8	3	1	0	0	6	80	372	452	122	30	15
22	8	3	1	0	0	8	87	389	416	115	29	14
23	8	2	1	0	0	7	87	440	384	116	28	14
24	7	2	1	0	0	9	93	382	343	105	28	14
25	7	2	1	0	0	9	98	449	323	96	28	14
26	7	2	1	0	0	9	96	466	333	88	27	14
27	7	2	1	0	0	9	95	543	334	83	26	14
28	7	2	0	0	0	10	102	488	345	77	26	14
29	7		0	0	0	11	140	463	359	74	25	13
30	7		0	0	0	11	144	481	365	71	24	13
31	6		0		0		166	450		68		13

Tableau 2-1-C : valeurs médianes du débit moyen journalier (m<sup>3</sup>/s) observé à Goubassy sur la Falémé, entre 1950 et 1998

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	61	35	17	8	2	12	104	463	906	736	292	118
2	61	35	17	7	3	13	103	508	954	708	286	113
3	58	34	16	7	3	15	106	520	1018	666	283	111
4	58	33	16	7	3	16	110	516	1034	663	275	106
5	57	31	16	6	3	18	114	610	984	654	263	101
6	56	31	15	6	3	21	121	632	977	670	250	100
7	56	31	15	6	2	22	124	600	914	655	239	98
8	55	30	15	5	2	24	131	603	922	615	231	97
9	54	29	15	5	3	28	133	580	896	611	219	95
10	54	29	14	5	3	33	169	627	933	592	210	95
11	53	28	14	4	2	36	199	650	936	592	201	92
12	52	28	14	4	3	39	190	669	918	560	189	90
13	51	27	14	4	3	40	221	636	954	533	178	90
14	50	27	13	4	3	45	228	692	988	517	174	88
15	50	26	13	4	3	49	245	692	996	498	170	87
16	48	24	12	3	3	48	248	689	1002	478	165	85
17	48	23	12	3	3	53	240	774	971	471	165	83
18	47	23	12	3	2	57	248	800	994	465	161	81
19	46	23	12	3	3	58	244	805	965	459	156	80
20	45	22	11	3	2	58	263	796	926	437	150	79
21	44	22	11	2	3	62	312	868	929	435	146	78
22	43	22	11	2	4	61	332	898	896	424	140	77
23	42	21	10	2	4	71	339	895	856	414	134	76
24	41	21	10	2	5	69	327	909	828	411	134	75
25	40	20	9	2	4	73	370	870	790	405	130	72
26	39	20	9	2	5	77	378	844	791	393	127	70
27	39	18	9	2	6	77	389	887	770	350	121	68
28	38	17	9	2	8	84	369	881	853	338	117	66
29	38		8	2	9	82	417	875	845	338	121	65
30	37		8	1	9	101	432	859	758	315	123	63
31	36		8		12		448	868		306		62

Tableau 2-1-D : valeurs médianes du débit moyen journalier (m<sup>3</sup>/s) observé à Makana sur le Bakoye, entre 1950 et 1998

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septem.	octobre	novem.	décem.
E (mm/mois)	156	184	234	234	204	98	-92	-181	-60	48	96	99
$10^9 * E$ (m/s)	58,2	76,1	87,4	90,3	76,2	37,8	-34,3	-67,6	-23,1	17,9	37,0	37,0

Tableau 2-1-E : valeurs moyennes mensuelles du taux d'évaporation nette sur la retenue (source : étude Gibb)

## 2.2. CALCUL DES LIMITES QMINO ET QMAXO RELATIVES AUX CONTRAINTES DE GESTION

Le plus récent niveau de surface libre relevé dans le lac est utilisé pour calculer la fourchette de débit [Qmino,Qmaxo] qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage.

### 2.2.1. Débit minimal Qmino

Il est toujours possible de fermer complètement les vannes d'alimentation des turbines et celles de la vidange de fond du barrage. Le débit minimal Qmino ne concerne donc que l'évacuateur de crue, pour lequel une ouverture est nécessaire dès que la cote du lac dépasse 208,05m. Cette ouverture est destinée à maintenir une certaine revanche entre la surface libre et le sommet des vannes secteur, afin d'éviter tout risque de submersion de ces dernières. Compte tenu des dimensions des vannes, les lois de l'hydraulique permettent de faire une estimation de la relation Qmino(H), dont les résultats figurent dans le tableau 2-2-A et la figure 2-2-A.

### 2.2.2. Débit maximal Qmaxo

Le débit maximal qu'il est physiquement possible d'évacuer du barrage se compose du débit transitant par l'évacuateur de crue et la vidange de fond à pleines ouvertures, augmenté du débit maximal qu'il est possible de turbiner dans ces conditions. La relation Qmaxo(H) donnée dans le tableau 2-2-B et la figure 2-2-B est déduite des valeurs caractéristiques indiquées dans les deux documents suivants, en supposant 5 turbines installées :

- Pour la vidange de fond et l'évacuateur de crue : Etude d'exécution du barrage de Manantali - Rapport final - Projet définitif du génie civil – volume 1 : mémoire descriptif – Groupement Manantali – Dortmund, Bruxelles, Dakar. 1979.
- Pour les turbines : Centrale hydroélectrique de Manantali. Offre n° 82975. Sulzer Hydro. 13.01.1995

H	Qmino	H	Qmino	H	Qmino	H	Qmino
208,05	0	208,70	343	209,40	748	210,10	1193
208,10	26	208,80	399	209,50	807	210,20	1261
208,20	77	208,90	454	209,60	871	210,30	1328
208,30	129	209,00	510	209,70	934	210,40	1396
208,40	180	209,10	569	209,80	998	210,50	1464
208,50	232	209,20	629	209,90	1061	210,60	1536
208,60	288	209,30	688	210,00	1125	210,70	1608

Tableau 2-2-A : relation Qmino(H) donnant le débit minimal (m3/s) qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac (m).

H	Qmaxo	H	Qmaxo	H	Qmaxo	H	Qmaxo	H	Qmaxo	H	Qmaxo	
	160,00	544	170,00	1505	180,00	2509	190,00	3085	200,00	3571	210,00	7564
	161,00	659	171,00	1582	181,00	2571	191,00	3134	201,00	3620	211,00	8011
	162,00	774	172,00	1659	182,00	2632	192,00	3182	202,00	3663		
	163,00	890	173,00	1736	183,00	2693	193,00	3231	203,00	3663		
	164,00	1005	174,00	2059	184,00	2754	194,00	3280	204,00	4670		
155,28	0	165,00	1120	175,00	2202	185,00	2816	195,00	3329	205,00	5172	
156,00	83	166,00	1197	176,00	2264	186,00	2878	196,00	3377	206,00	5674	
157,00	198	167,00	1274	177,00	2325	187,00	2940	197,00	3426	207,00	6173	
158,00	313	168,00	1351	178,00	2387	188,00	2988	198,00	3474	208,00	6672	
159,00	429	169,00	1428	179,00	2448	189,00	3037	199,00	3523	209,00	7118	

Tableau 2-2-B : relation Qmaxo(H) donnant le débit maximal ( $m^3/s$ ) qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac (m).

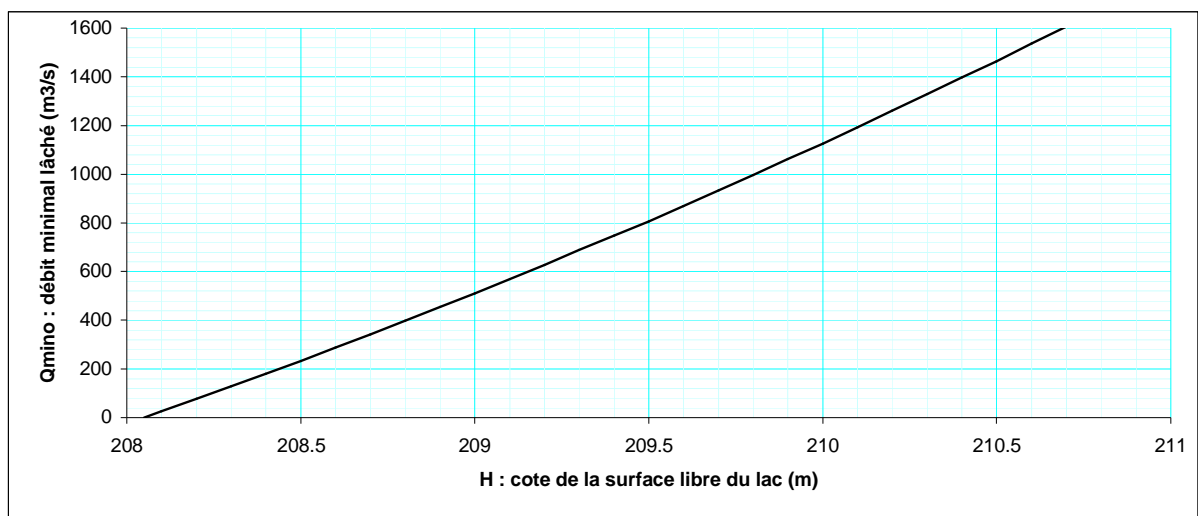


Figure 2-2-A : relation Qmino(H) donnant le débit minimal qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac.

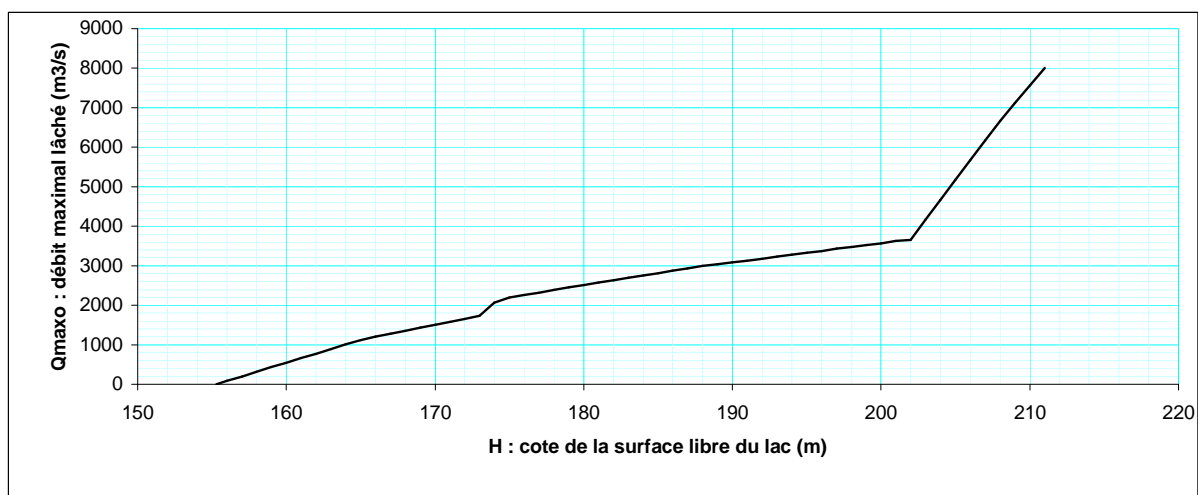


Figure 2-2-B : relation Qmaxo(H) donnant le débit maximal qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac.

## **2.3. CALCUL DES LIMITES QMIN ET QMAX IMPOSEES PAR LES CONSIGNES DE GESTION**

### **2.3.1. Mode de calcul du débit lâché donnant à Bakel un débit prédéfini pour les jours suivants : consignes A4, A5 et B2 (C et A dans Progeman)**

Pour le soutien de crue (consigne A4), le soutien de basses eaux (consigne A5) et le laminage immédiat de crue dans le Sénégal (consigne B2), le gestionnaire doit déterminer le débit total lâché  $Q_{tc}$  dont la propagation occasionnera quelques jours plus tard dans le Sénégal à Bakel, un débit égal à une valeur prédéfinie. Dans les deux premiers cas,  $Q_{tc}$  correspondra à une limite minimale de débit à lâcher, alors que dans le troisième cas, il s'agira d'une limite maximale. Le principe du calcul est cependant identique dans les trois cas.

On note  $Q_{bp}(t)$  l'hydrogramme de débit objectif à Bakel. Dans le cas du soutien de crue ou de basses eaux, il s'agit du débit minimal qu'on souhaite obtenir à Bakel. Dans le cas du laminage de crue, il s'agit au contraire du débit maximal qu'on souhaite ne pas voir dépassé à cette station. Le calcul de  $Q_{tc}$  s'effectue de la façon suivante :

On utilise les modèles de propagation décrits dans le paragraphe 2-1 (situation hydrologique : préparation de la banque de données) pour déterminer le débit lâché  $Q_{tc}$  ( $J_0$ ), sensé faire coïncider le débit du Sénégal à Bakel avec l'hydrogramme objectif. Pour les stations observées, y compris celles qui sont situées à l'aval du barrage (Kayes, Bakel), ces modèles peuvent être affinés par la correction en boucle fermée mentionnée plus haut et décrite dans la notice du logiciel PROGEMAN. Si l'on tient compte des temps de propagation variables en fonction du débit, le calcul doit être mené de façon itérative. Par encadrements successifs, on ajuste ainsi la valeur de  $Q_{tc}$  ( $J_0$ ) jusqu'à ce qu'elle entraîne pour Bakel un débit calculé égal à  $Q_{bp}(J_0+n_1+n_2)$ , où  $n_1$  et  $n_2$  représentent respectivement les temps de propagation entre Manantali et Kayes, et entre Kayes et Bakel. En pratique, la combinaison de  $Q_{tc}(J_0)$  au débit du Bakoye à Oualia et aux débits intermédiaires  $Int_1$  du jour  $J_0$ , donne un débit à Kayes au jour  $J_0+n_1$ . Ce dernier, à son tour combiné au débit de la Falémé à Gourbassy et aux débits intermédiaires  $Int_2$  du jour  $J_0+n_1$ , donne un débit à Bakel au jour  $J_0+n_1+n_2$ .

### **2.3.2. mode de calcul du débit lâché minimal permettant de maintenir le niveau du lac en dessous d'une limite prédéfinie dans les jours à venir : consignes A1 et A6 (B dans Progeman)**

Le but de la consigne de sécurité A1 est d'éviter la submersion des digues du barrage. La consigne A6 vise quant à elle à maintenir un certain volume libre dans la retenue, destiné au laminage des crues. Dans les deux cas, on veut maintenir le niveau de la retenue en dessous d'une limite fixe (A1) ou variable dans l'année (A6), tout en limitant au maximum le débit lâché.

Le calcul du débit minimal à lâcher tient compte des débits naturels entrant dans la retenue ainsi que des pertes par évaporation. Il est basé sur un bilan de volume, détaillé ci-dessous.

Au jour  $J_0$ , les débits entrant dans la retenue sont estimés pour la station fictive de Manantali jusqu'au jour  $J_0+N_s$ , à partir des débits observés aux stations situées à l'amont. Avec la configuration de stations adoptée pour le moment sur le haut Bafing (Makana et Daka Saidou), le délai de prévision  $N_s$  est de 1 jour. Il pourrait éventuellement être rallongé, pour une meilleure sécurité, avec l'installation d'une station située à l'amont de Daka Saidou.

Pour chaque jour  $J_0+i$  compris entre  $J_0$  et  $J_0+N_s$ , il est possible de calculer le volume lâché entre les jours  $J_0$  et  $J_0+i$  pour amener le niveau du lac à la valeur  $HI(J_0+i)$  à la date  $J_0+i+24$  heures. Pour minimiser la pointe de débit lâché entre les jours  $J_0$  et  $J_0+i$ , ce volume doit être lâché à l'aide du débit constant suivant :

$$Q_i(J_0) = \max(0; (V(H(J_0)) - V(HI(J_0+i))) / ((i+1) * 86400) - (S(H(J_0)) + S(HI(J_0+i))) * E(J_0) / 2 + (Q_{sou}(J_0) + \dots + Q_{sou}(J_0+i)) / (i+1))$$

- V : volume d'eau emmagasiné dans la retenue
- H : cote de la surface libre
- S : superficie de la surface libre
- E : taux de perte par évaporation
- HI : cote limite à respecter dans le lac, (= Hmax pour consigne A1 ; Hlam pour consigne A6)
- Qsou : débit naturel du Bafing à la station fictive de Soukoutali

Il suffit de conserver la valeur maximale des  $Q_i(Jo)$  ainsi obtenus (pour  $i$  allant de 0 à  $N_s$ ) comme débit minimal à lâcher le jour  $Jo$ . Ce débit permet de maintenir le niveau du lac en dessous de la limite maximale  $HI$  entre les jours  $Jo$  et  $Jo+N_s$ , tout en limitant au maximum les pointes de débit lâché sur cette période.

Les relations  $V(H)$  et  $S(H)$  caractéristiques de la retenue sont données dans les tableaux 2-3-A et 2-3-B, ainsi que sur les figures 2-3-A et 2-3-B. Elles sont tirées du document suivant :

*Gibb and partners. Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS. Rapport de phase 2, volume 2A. Scénarios d'utilisation de l'eau. (Annexe 6a ). Juin 1987*

Ce document se réfère lui-même, pour les relations en question, à la source suivante :

*EDF. Plan directeur de la production et du transport. Tome 1 : moyens de production 1985.*

Les relations  $V(H)$  et  $S(H)$  décrites dans ces documents semblent présenter quelques légères anomalies, mises en évidence par intégration de  $S(H)$ . Il serait souhaitable de préciser ces relations par exploitation de photos satellite prises lors de différents niveaux de remplissage.

H (m)	150,0	170,0	175,0	180,0	187,5	200,0	208,0	213,0
V (km3)	0,00	0,75	1,40	2,15	3,70	7,70	11,27	14,35

Tableau 2-3-A : relation entre cote de surface libre et volume d'eau emmagasiné dans la retenue de Manantali.

H (m)	150,0	170,0	175,0	180,0	187,5	200,0	208,0	213,0
S (km2)	0	80	140	240	280	410	477	535

Tableau 2-3-B : relation entre cote de surface libre et superficie de la retenue

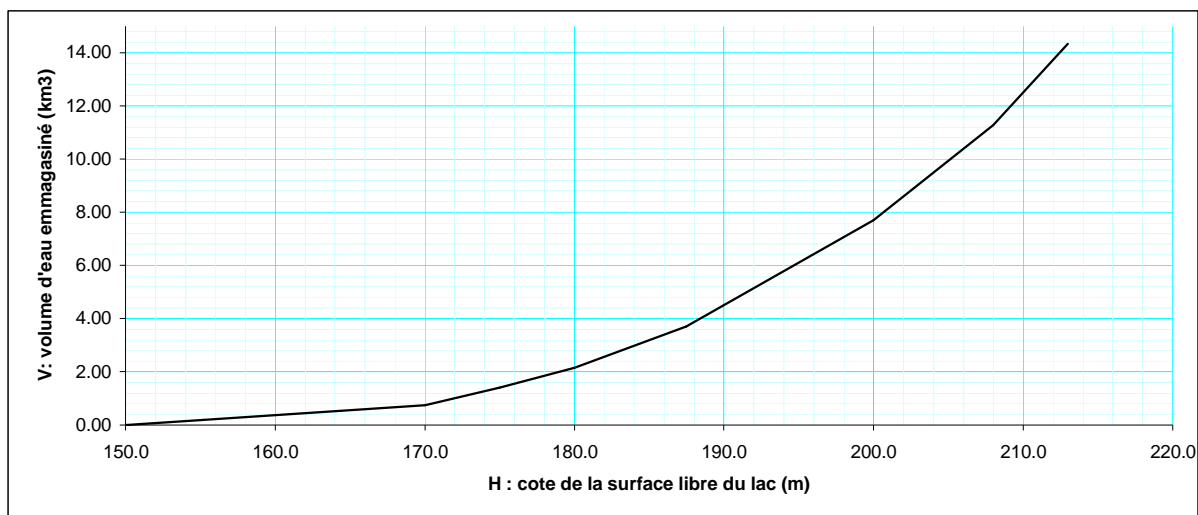


Figure 2-3-A : relation entre cote de surface libre et volume d'eau emmagasiné dans la retenue de Manantali.

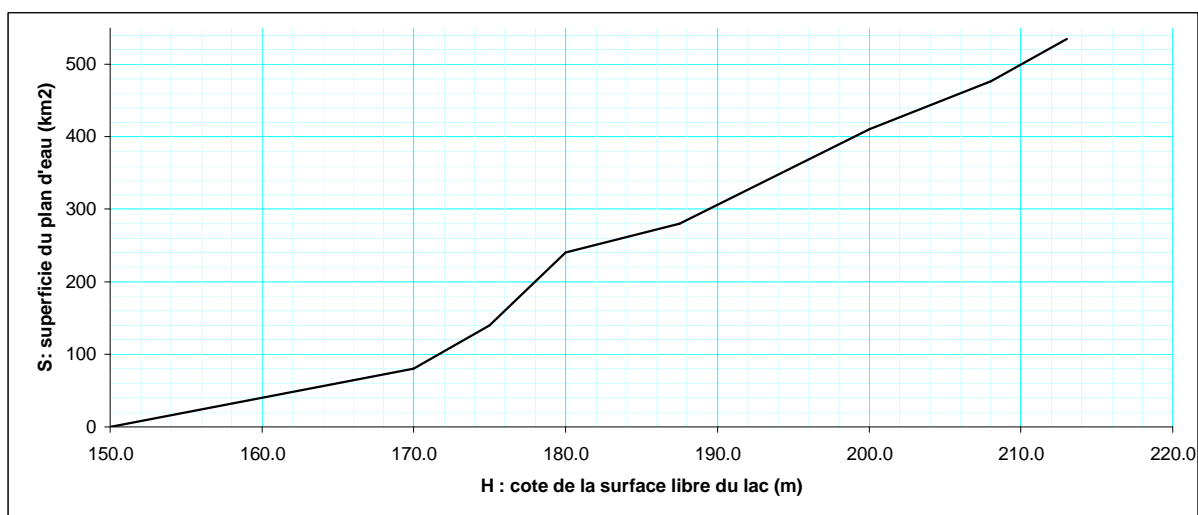


Figure 2-3-B : relation entre cote de surface libre et superficie de la retenue

### **2.3.3. Mode de calcul du débit lâché maximal permettant de maintenir le niveau du lac au dessus d'une limite prédéfinie dans les jours à venir : consignes B1 et B3 (D dans Progeman)**

Le but de la consigne de sécurité B1 est de maintenir la partie basse du parement amont de l'ouvrage en submersion permanente. La consigne B3 vise le maintien d'un stock d'eau suffisant pour la satisfaction de certaines demandes en eau. Dans les deux cas, on veut maintenir le niveau de la retenue au dessus d'une limite fixe (B1) ou variable dans l'année (B3), tout en assurant un débit lâché minimal le plus haut possible.



Le principe du calcul de débit maximal à lâcher est le même que pour les consignes A1 et A6 envisagées au paragraphe précédent, et ne sera donc pas détaillé ici. Les seules différences portent sur les points suivants :

- La limite maximale HI correspond à Hmin (187 m) pour la consigne B1, et Het pour la consigne B3
- Le débit maximal à lâcher pour respecter la consigne correspond cette fois à la valeur minimale des débits  $Q_i(Jo)$  obtenus pour  $i$  allant de 0 à Ns.

### **2.3.4. Mode de calcul du débit minimal relatif à la consigne de production d'énergie : A2 (E dans Progeman)**

#### **2.3.4.1. Potentiel de production de l'usine hydroélectrique**

Les caractéristiques des turbines sont déduites du document suivant :

*Centrale hydroélectrique de Manantali. Offre N°82 975 . Sulzer Hydro. 13/1/95*

En fonction de la chute nette, ce document donne la puissance garantie en fonctionnement normal (hors cavitation excessive) ainsi que les rendements à différentes fractions de cette dernière. Il ne précise pas s'il s'agit de puissance mécanique mesurée au niveau de l'axe des turbines, ou bien de puissance électrique mesurée à la sortie des alternateurs. Il apparaît que la puissance maximale productible en fonctionnement normal s'élève à 41 Mw par groupe.

A partir des caractéristiques des turbines et de celles des diverses vannes (cf document cité au paragraphe 2-2-2), il est possible de déterminer des abaques décrivant la production théorique d'énergie de l'ouvrage. Sur ces courbes représentées sur les figures 2-3-C à 2-3-J, il n'est pas tenu compte des pertes dues aux transformateurs, à l'autoconsommation de la centrale, et au transport de l'énergie vers les centres urbains éloignés, ni des pertes de charge dans les conduites d'amenée aux turbines.

#### **2.3.4.2. Mode de production d'énergie préconisé**

Il semble souhaitable d'utiliser le barrage pour assurer une production de base variable en fonction des conditions de chute, plutôt que pour satisfaire au plus juste les pointes de demande d'énergie. Les raisons de ce choix sont expliquées ci-dessous.

Une fois que les moyens de production thermique existent, on peut considérer en première approximation que le coût (en litres de carburant) du kilowattheure produit par ces équipements est relativement constant (aux coûts de stockage près), et indépendant de la date de production (heure de pointe ou non). Au contraire, le volume d'eau dépensé au barrage pour produire ce kilowattheure peut varier du simple au double selon le niveau de la surface libre du lac (fig. 2.3.J). Pour satisfaire la demande d'électricité au moindre coût sur le long terme, il apparaît donc qu'on a intérêt à maximiser la production moyenne réalisée au barrage. Cette maximisation peut difficilement tenir compte des pointes de demande en énergie, puisque ces dernières ne se produisent pas forcément quand les conditions de chute sont favorables.

Le mode de gestion préconisé consiste donc à ne produire une forte puissance que lorsque le lac est très haut. Pour des niveaux moyens, on envisage une puissance modérée. Quand le lac est trop bas, il n'est turbiné que le débit nécessaire à la satisfaction des autres usages. Même si le barrage de Manantali n'avait été destiné qu'à la production électrique, ces principes auraient déjà pu être avancés. Mais du fait des autres objectifs assignés à l'ouvrage, ils peuvent être doublement conseillés. En effet, ils permettent de produire en moyenne une puissance importante grâce à un niveau maintenu globalement élevé dans le lac. Le débit turbiné modéré peut alors être valorisé en grande partie une seconde fois à l'aval, pour satisfaire d'autres usages (soutien d'étiage). Au contraire, un fort débit turbiné, destiné à satisfaire une pointe de demande d'énergie, peut parfois excéder fortement la demande des autres usages. Seule une fraction de ce débit trop élevé peut alors être valorisée deux fois, le reste partant vers la mer.

Enfin, les pertes en ligne par effet joule sont proportionnelles au carré de l'intensité et à la distance de transport entre les centres de production et de consommation. Ceci plaide également en faveur d'une production de pointe effectuée en partie par les centrales thermiques qui, certes bien moins souples, sont situées beaucoup plus près des villes que le barrage de Manantali.

Une certaine modulation de puissance produite peut bien sûr être envisagée au pas de temps journalier pour répondre en partie aux fluctuations de demande. Il semble toutefois souhaitable de respecter un débit moyen adapté aux conditions de chute, faute de quoi la production à long terme de l'ouvrage ne serait pas maximisée.

#### **2.3.4.3. Consigne de gestion associée à la production d'énergie**

En accord avec ce qui précède, la consigne envisagée pour la demande de production d'énergie est définie par les trois paramètres de gestion  $P_o$ ,  $S_1$  et  $S_2$ . Le débit minimal  $Q_{min}$  à lâcher du barrage, permettant de respecter cette consigne, est déterminé de la façon suivante :

##### **1<sup>er</sup> cas : la cote de la surface libre du lac est inférieure à $S_1$**

La consigne se traduit alors par une valeur nulle de  $Q_t$ , ce qui revient à dire que le débit total lâché du barrage est déterminé sans tenir compte de la demande de production d'énergie.

##### **2eme cas : la cote de la surface libre est comprise entre $S_1$ et $S_2$**

On vise alors à produire une puissance  $P$  définie par :  $P = \min(P_o ; P_{max})$ . Dans cette expression,  $P_{max}$  désigne la puissance maximale qu'il est possible de produire avec les turbines.

La première étape du calcul consiste à déterminer  $P_{max}$ . Cette puissance dépend du nombre de turbines exploitables et de leurs caractéristiques techniques, ainsi que de la chute nette existant entre la surface libre du lac et celle de la restitution dans le canal de fuite. La cote dans le canal de fuite dépend quant à elle du débit total évacué du barrage, qui intègre à la fois le débit turbiné et le débit minimal déversé par l'évacuateur de crue. Pour une cote  $H$  donnée dans le lac, la puissance  $P_{max}$  peut donc être déterminée à partir des caractéristiques des turbines, de la relation hauteur-débit dans le canal de fuite, et de la relation  $Q_{min}(H)$  donnant le débit minimal déversé par les vannes de surface. La puissance  $P_{max}$ , ainsi que le débit total lâché minimal correspondant, sont représentés en fonction de la cote  $H$  du lac sur la figure 2-3-E, dans le cas où 5 turbines sont utilisables. Ces relations sont également données dans le tableau 2-3-C.

Si  $P_{max}$  est inférieur à  $P_o$ , le débit total lâché minimal  $Q_{min}$  permettant de respecter la consigne de production d'énergie, est déterminé à partir de la figure 2-3-E ou du tableau 2-3-C. Dans le cas contraire, il est déterminé à partir de la figure 2-3-I ou du tableau 2-3-D.

##### **3eme cas : la cote de la surface libre est supérieure à $S_2$**

On vise alors à produire la puissance maximale productible  $P_{max}$ . Le débit total lâché minimal permettant de produire cette puissance est déterminé, comme dans le cas précédent, à partir de la figure 2-3-E ou du tableau 2-3-C.

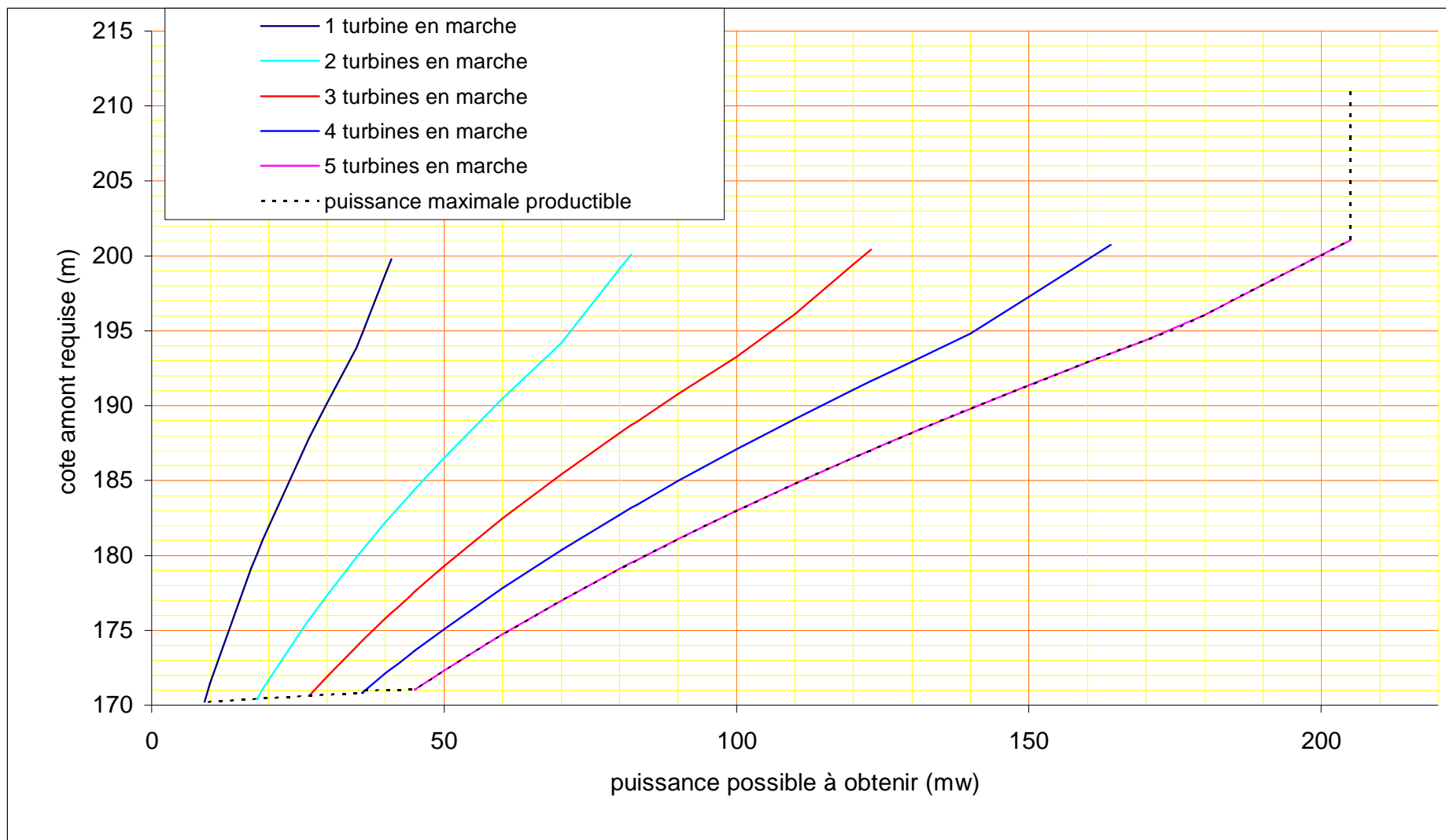


Figure 2-3-C : cote minimale du lac permettant de produire une puissance donnée, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal

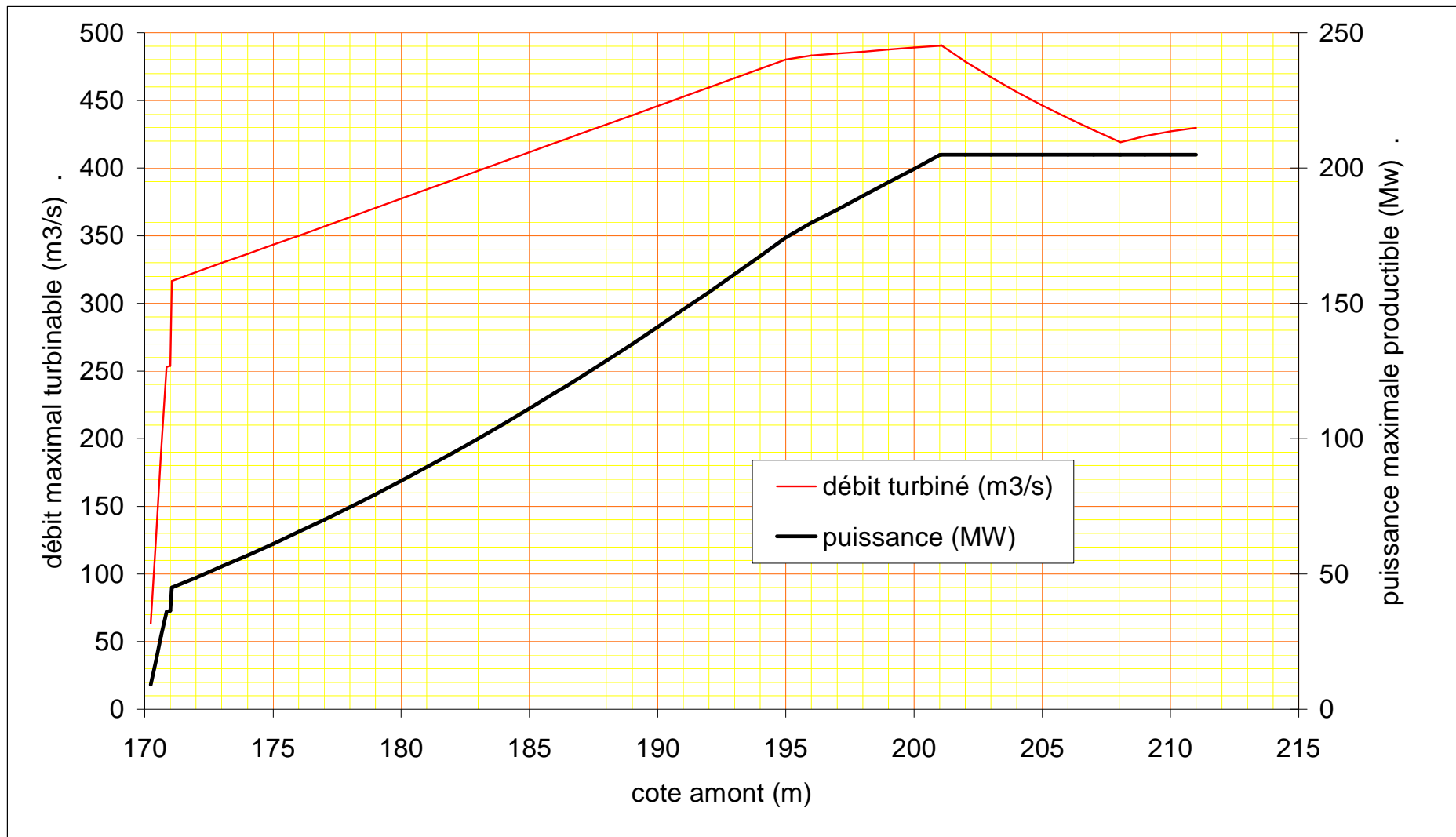


Figure 2-3-D : débit maximal turbinable et puissance obtenue en fonction de la cote du lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal, et pour 5 turbines potentiellement utilisables

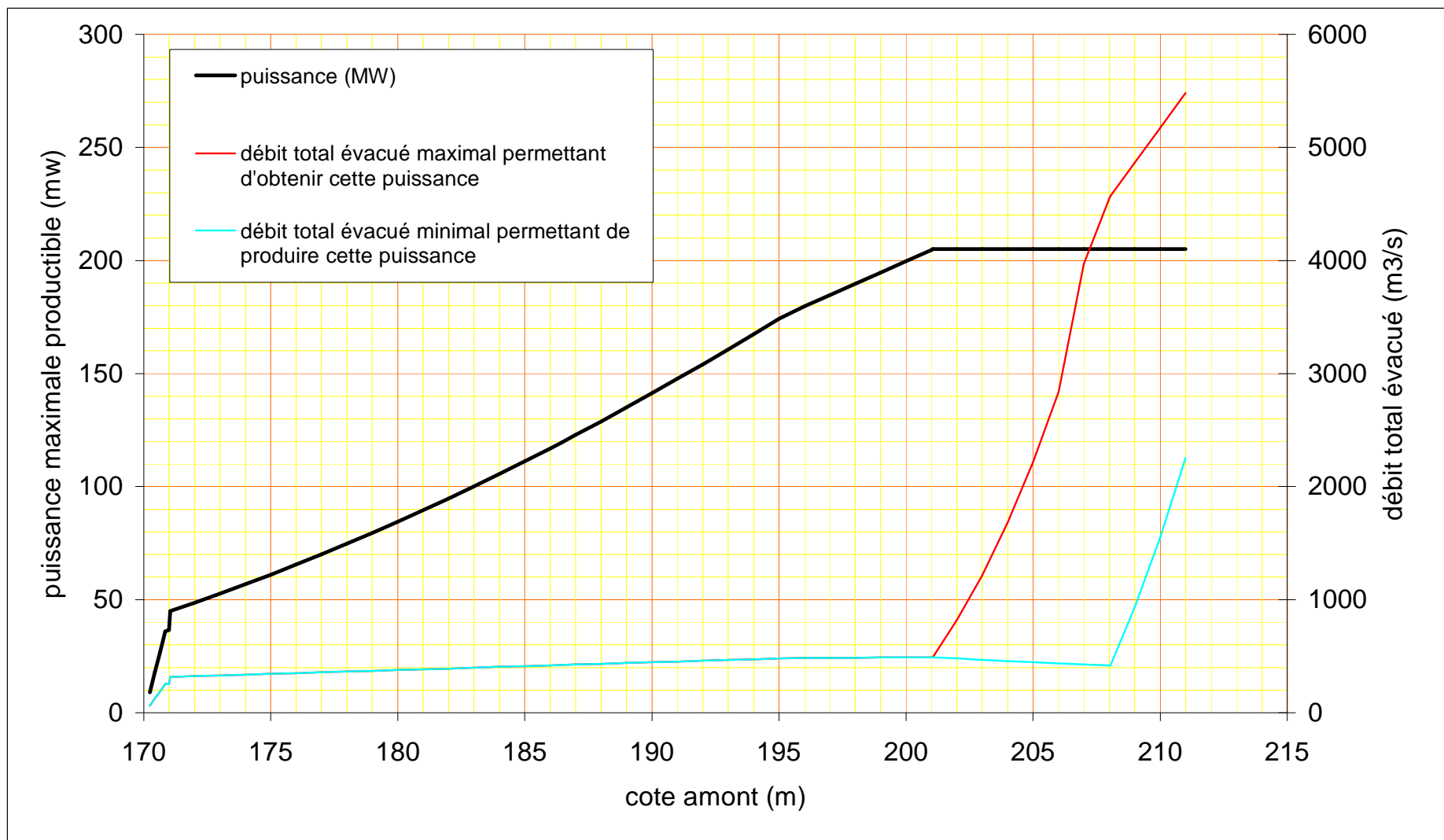


Figure 2-3-E : puissance maximale produisible et extremums de débit total lâché permettant de produire cette puissance, en fonction de la cote du lac, dans le cas de 5 turbines potentiellement utilisables

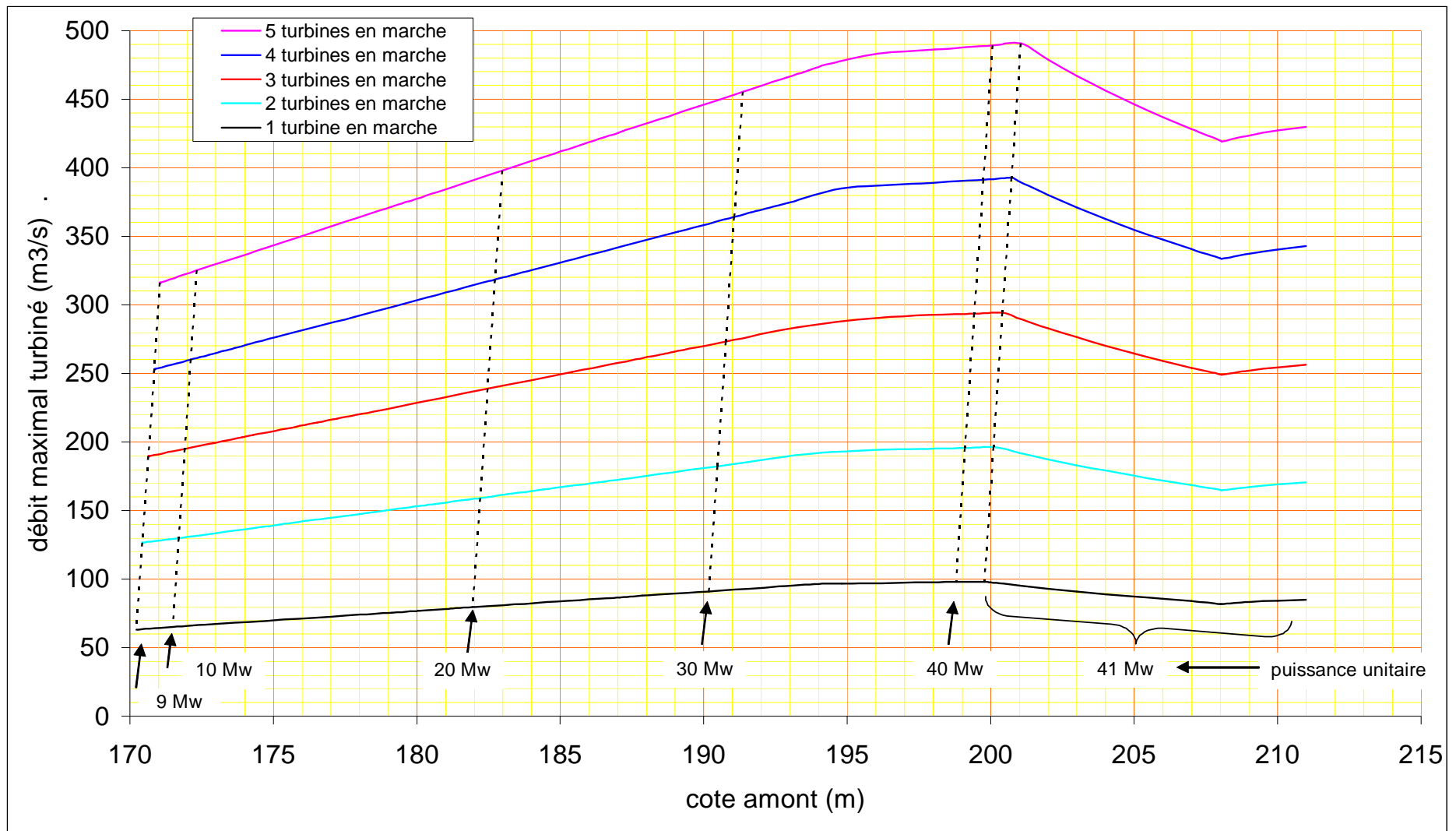


Figure 2-3-F : débit maximal turbinable en fonction de la cote du lac et du nombre de turbines exploitées, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal.

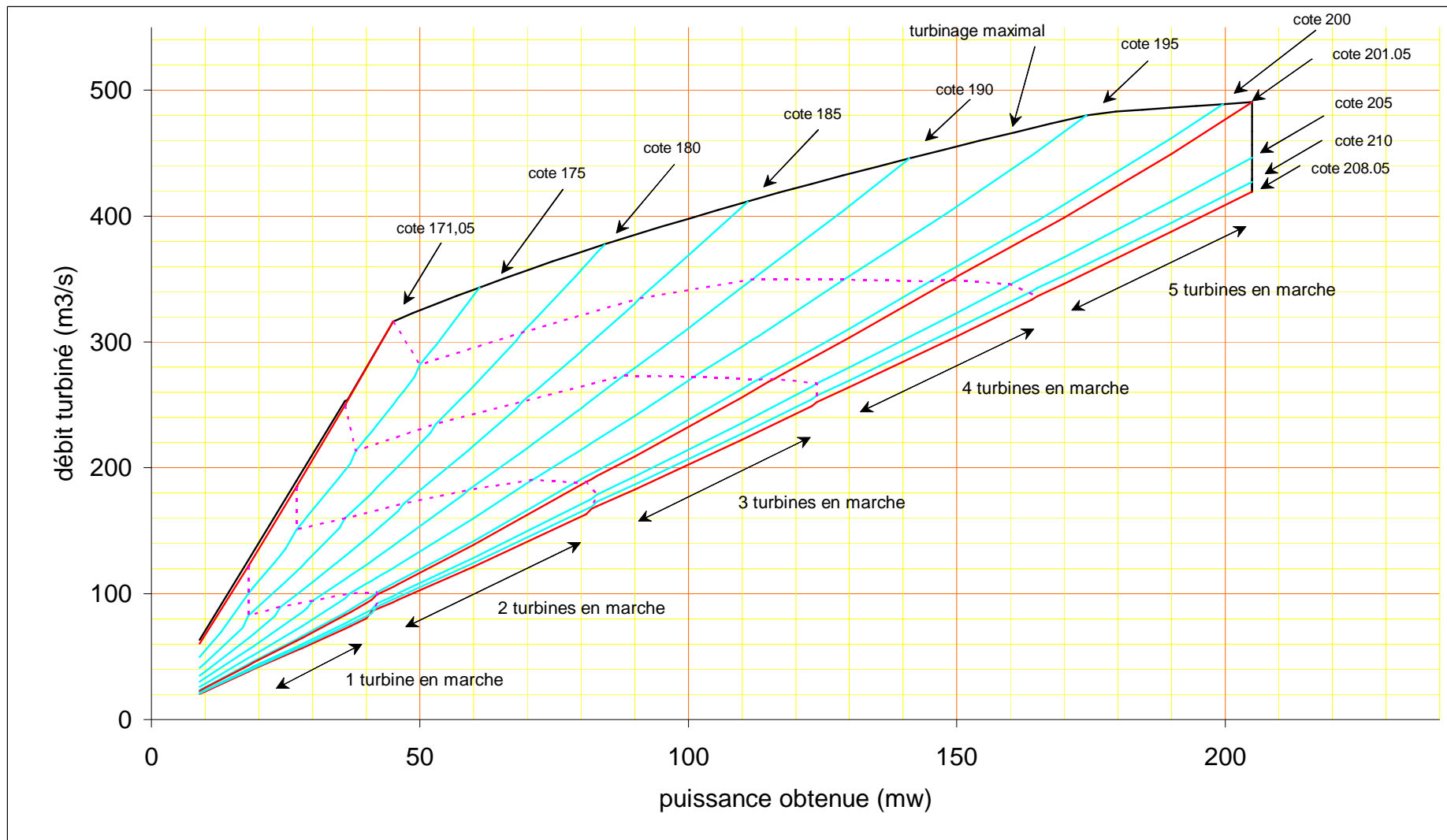


Figure 2-3-G : relation entre puissance obtenue et débit turbiné, établie pour différentes valeurs de cote dans le lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal.

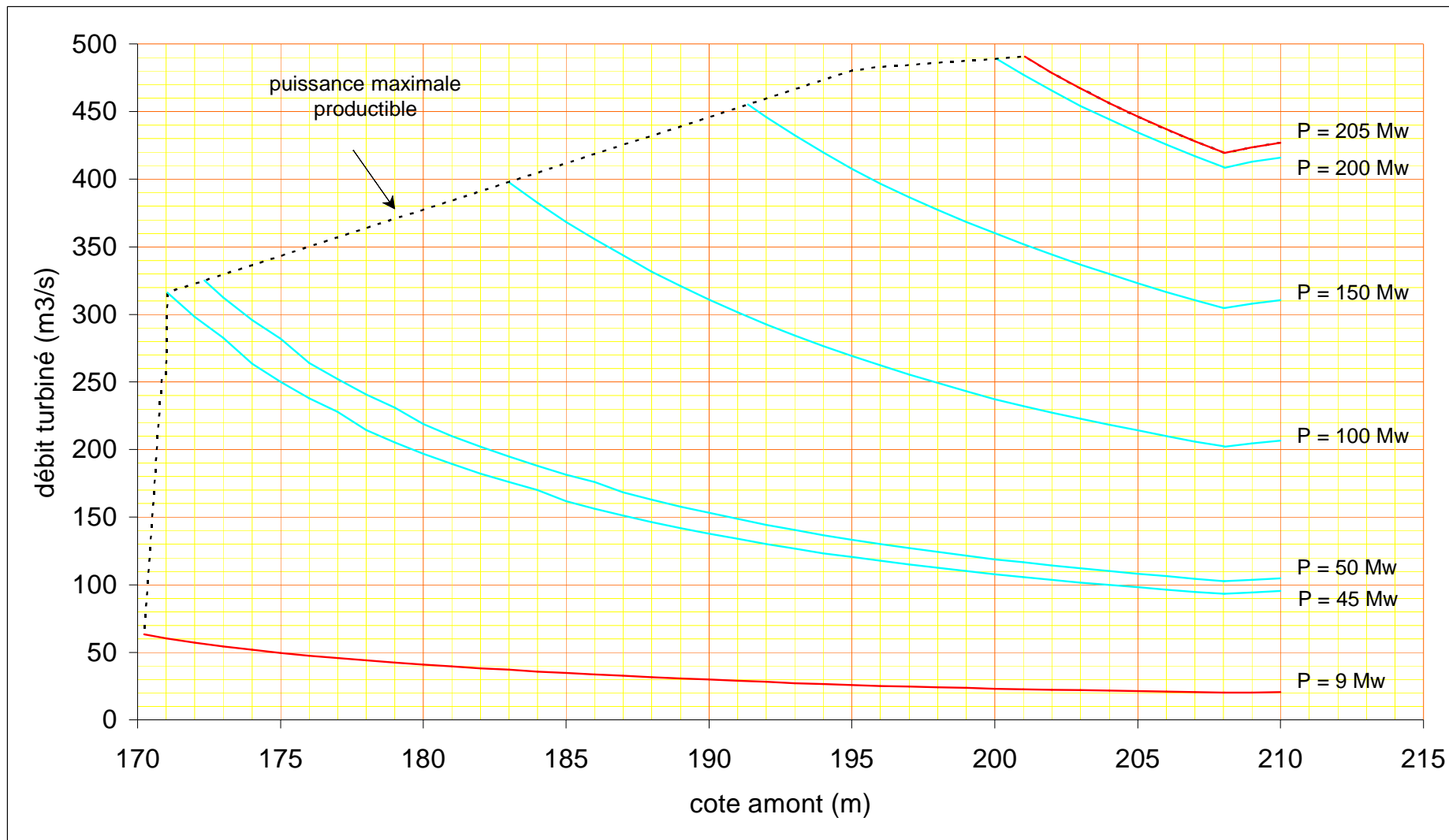


Figure 2-3-H : débit turbiné en fonction de la cote dans le lac, pour différentes valeurs de puissance produite, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal



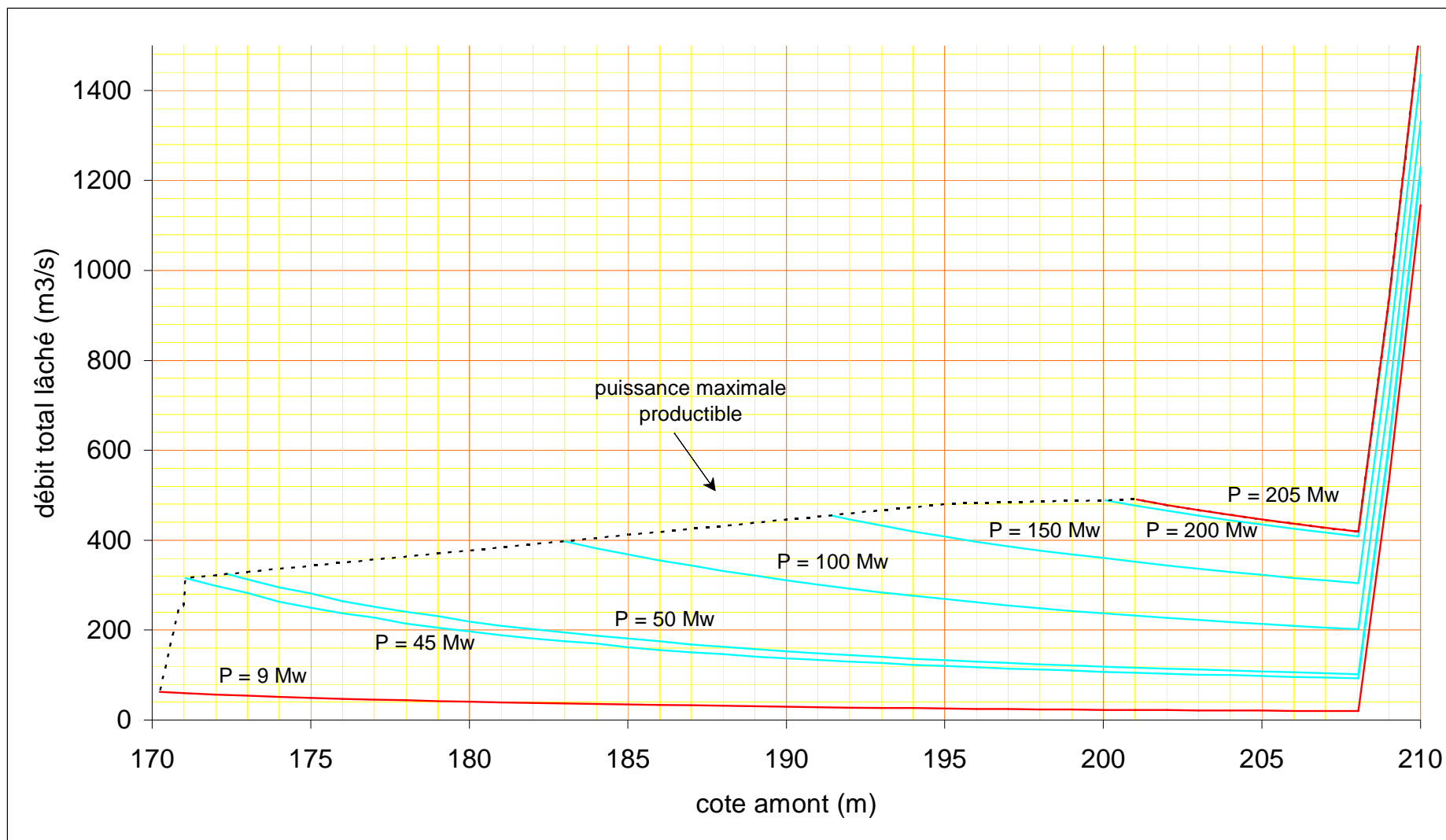


Figure 2-3-I : débit total lâché minimal (turbines + déversoir) permettant de produire une puissance donnée en fonction de la cote dans le lac

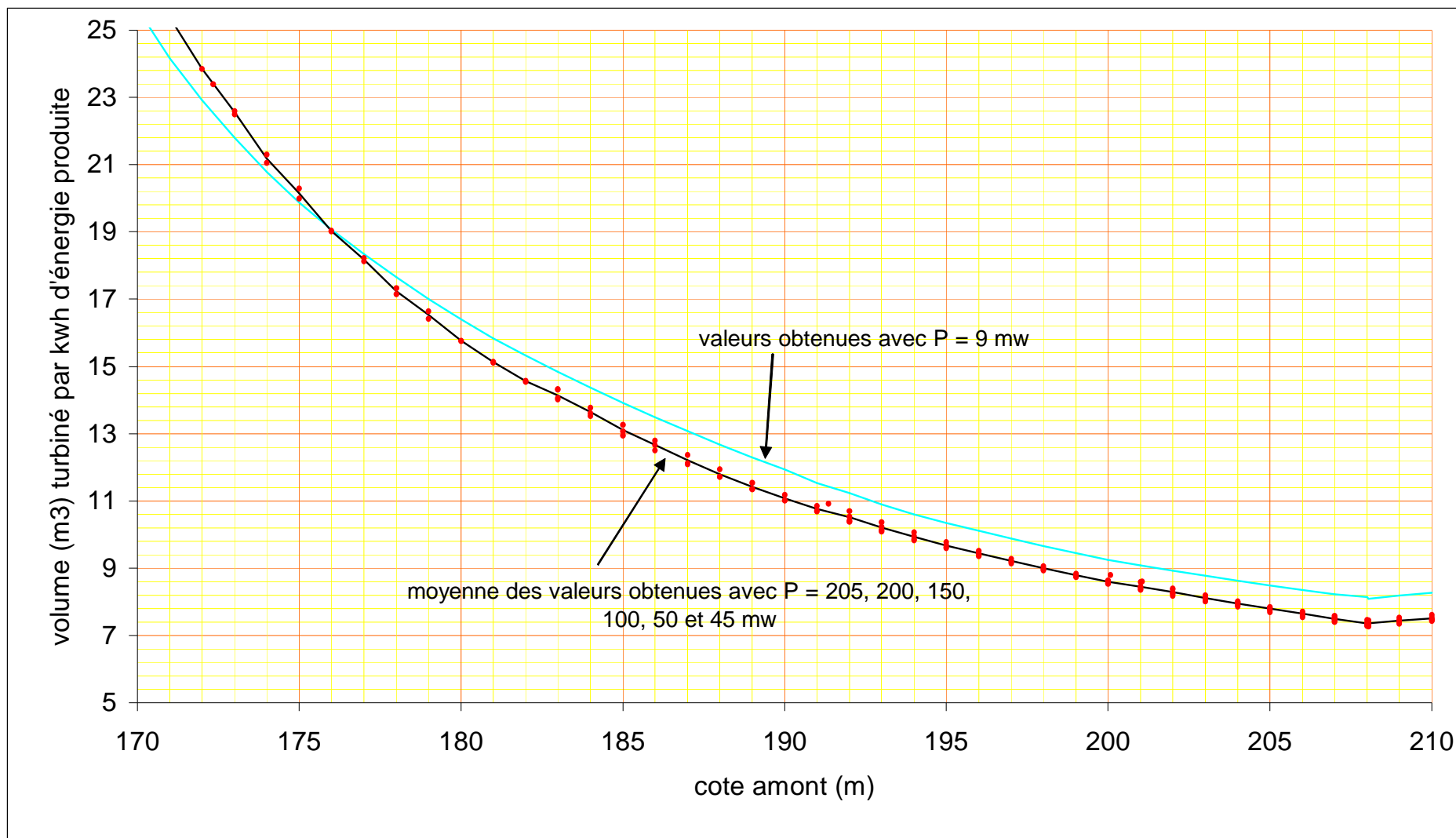


Figure 2-3-J : volume d'eau turbiné par kWh d'énergie produite, en fonction de la cote dans le lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal

H	Pmax	Qmin	H	Pmax	Qmin	H	Pmax	Qmin	H	Pmax	Qmin	H	Pmax	Qmin
			209	205,0	934	199	194,7	488	189	135,0	439	179	79,5	371
			208	205,0	420	198	189,7	486	188	128,8	432	178	74,7	364
			207	205,0	428	197	184,7	485	187	122,8	425	177	70,1	357
			206	205,0	437	196	179,7	483	186	116,9	419	176	65,6	350
			205	205,0	446	195	174,3	480	185	111,2	412	175	61,1	343
			204	205,0	456	194	167,5	473	184	105,6	405	174	56,8	336
			203	205,0	467	193	160,8	467	183	100,1	398	173	52,7	330
			202	205,0	479	192	154,2	460	182	94,7	391	172	48,7	323
211	205,0	2253	201	204,8	491	191	147,7	453	181	89,5	384	171	36,5	254
210	205,0	1552	200	199,7	489	190	141,3	446	180	84,4	378	170	0,0	0

Tableau 2-3-C : puissance maximale productible Pmax (Mw) et débit total lâché minimal Qmin (m<sup>3</sup>/s) permettant de produire cette puissance, en fonction de la cote du lac H (m), dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal, et pour 5 turbines potentiellement utilisables

H	Po	205	200	150	100	50	45	9
170,23								63
171,00								60
171,05							316	
172,00							298	57
172,34						325		
173,00						313	283	55
174,00						296	263	52
175,00						282	250	50
176,00						264	238	48
177,00						252	228	46
178,00						241	214	44
179,00						231	205	43
180,00						219	197	41
181,00						210	189	40
182,00						202	182	38
182,99				398				
183,00				398	195	176	176	37
184,00				383	188	170	170	36
185,00				369	182	162	162	35
186,00				356	176	156	156	34
187,00				344	169	151	151	33
188,00				332	163	147	147	32
189,00				321	158	142	142	31
190,00				311	153	138	138	30
191,00				301	149	134	134	29
191,36			455					
192,00			446	293	144	130	130	28
193,00			432	284	140	127	127	27
194,00			420	277	137	123	123	26
195,00			408	269	133	120	120	26
196,00			397	262	130	118	118	25
197,00			387	256	127	115	115	25
198,00			377	249	124	113	113	24
199,00			369	243	122	110	110	24
200,00			360	237	119	108	108	23
200,06		489						
201,00		477	352	232	117	106	106	23
201,05	491							
202,00	479	465	344	227	114	104	104	22
203,00	467	454	337	223	112	102	102	22
204,00	456	444	330	218	110	100	100	22
205,00	446	435	323	214	108	98	98	21
206,00	437	426	317	210	106	96	96	21
207,00	428	417	311	206	104	95	95	21
208,00	420	409	305	202	103	93	93	20
208,05	419	409	305	202	103	93	93	20
209,00	934	923	818	714	614	604	604	530
210,00	1552	1541	1436	1332	1230	1220	1220	1146

tableau 2-3-D : débit total lâché minimal  $Q_{min}$  ( $m^3/s$ ) permettant de produire la puissance  $P_o$  (Mw) demandée, en fonction de la cote du lac H (m)

## **2.4. COMBINAISON DES DIFFERENTES LIMITES : CALCUL DU DEBIT TOTAL A LACHER QT**

Après avoir calculé les limites  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  relatives aux différentes contraintes et consignes de gestion, on détermine la fourchette envisageable pour le débit total à lâcher du barrage.

Les limites minimales  $Qt1$  et maximales  $Qt2$  de la fourchette sont initialisées à partir des limites  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  relatives aux contraintes de gestion :

$$Qt1 = Q_{min}$$

$$Qt2 = Q_{max}$$

Ensuite, les différentes valeurs de  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  sont prises en compte, en commençant par celles qui concernent les consignes de gestion A1 et B1, liées à la sécurité de l'ouvrage. Viennent enfin celles qui ont été déterminées pour les autres consignes de gestion, prises par ordre de priorité décroissante. Etant donnés  $Qt1$  et  $Qt2$ , la prise en compte d'une limite  $Q_{min}$  ou  $Q_{max}$  se fait toujours selon le principe suivant :

### **Pour une limite minimale $Q_{min}$ :**

- si  $Q_{min} < Qt1$  alors  $Q_{min}$  n'a aucun effet sur  $Qt1$  et  $Qt2$
- si  $Qt1 < Q_{min} < Qt2$  alors on adopte  $Q_{min}$  comme nouvelle valeur de  $Qt1$
- si  $Qt2 < Q_{min}$  alors on adopte  $Qt2$  comme nouvelle valeur de  $Qt1$ , et les limites  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  déterminées à partir des consignes de priorité moindre ne sont pas prises en compte

### **Pour une limite maximale $Q_{max}$ :**

- si  $Q_{max} > Qt2$  alors  $Q_{max}$  n'a aucun effet sur  $Qt1$  et  $Qt2$
- si  $Qt1 < Q_{max} < Qt2$  alors on adopte  $Q_{max}$  comme nouvelle valeur de  $Qt2$
- si  $Q_{max} < Qt1$  alors on adopte  $Qt1$  comme nouvelle valeur de  $Qt2$ , et les limites  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  déterminées à partir des consignes de priorité moindre ne sont pas prises en compte.

Le processus de resserrement de la fourchette  $Qt1 - Qt2$  s'arrête lorsque toutes les consignes ont été prises en considération, ou dès lors que  $Qt1 = Qt2$ . Le débit total à lâcher du barrage doit dans tous les cas être pris égal à  $Qt1$ , qui représente le plus petit débit total lâché permettant de respecter simultanément le plus grand nombre possible de consignes.

## **2.5. DETERMINATION DU DEBIT A EVACUER PAR LES DIFFERENTS ORGANES DU BARRAGE**

A partir de la cote  $H$  dans le lac et du débit total à lâcher  $Qt$ , on détermine la puissance maximale productible  $P_t$  à l'aide de la figure 2-5-A ou du tableau 2-5-A. La puissance à produire  $P_e$  est ensuite fixée égale à la valeur minimale de  $P_t$  et  $P_r$  (puissance maximale que le réseau peut absorber). Ainsi, on va pouvoir produire le maximum de puissance à la fois productible et consommable, tout en lâchant du barrage le débit minimal permettant de respecter un maximum de consignes.

La valeur de la puissance à produire  $P_e$ , du débit total lâché  $Qt$  et de la cote dans le lac  $H$ , doivent maintenant être utilisées pour déterminer le débit à turbiner  $Q_e$ . En calcul manuel, on admettra une valeur de 0,9 pour le rendement des turbines, et on procédera donc comme indiqué ci-dessous, avec les notations suivantes:

$\rho$  : masse volumique de l'eau (=1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : accélération de la pesanteur (=9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H_f$  : cote de la surface libre dans le canal de fuite (figure 2-5-B ou tableau 2-5-B).

$$Q_e = P_e / ( 0,9 * \rho * g * ( H - H_f ( Q_t ) ) )$$

Enfin, les débits à lâcher par la vidange de fond et les vannes de surface sont déterminés de façon à respecter l'ouverture minimale de sécurité de l'évacuateur de crue, et à obtenir le débit total lâché souhaité.

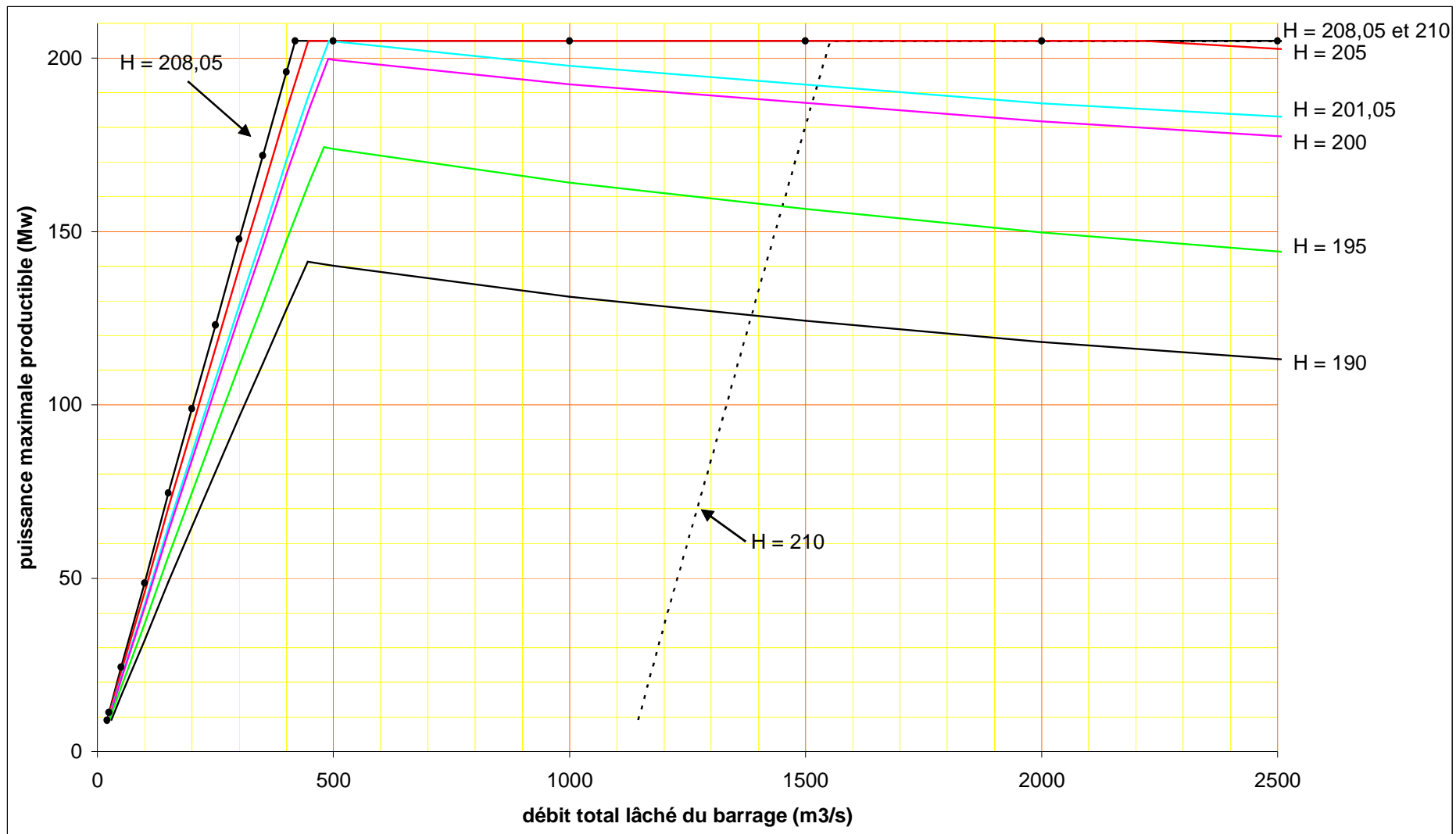


figure 2-5-A : puissance maximale productible  $P_t$  en fonction de la cote du lac  $H$  (m) et du débit total lâché  $Q_t$ , dans le cas de 5 turbines potentiellement utilisables

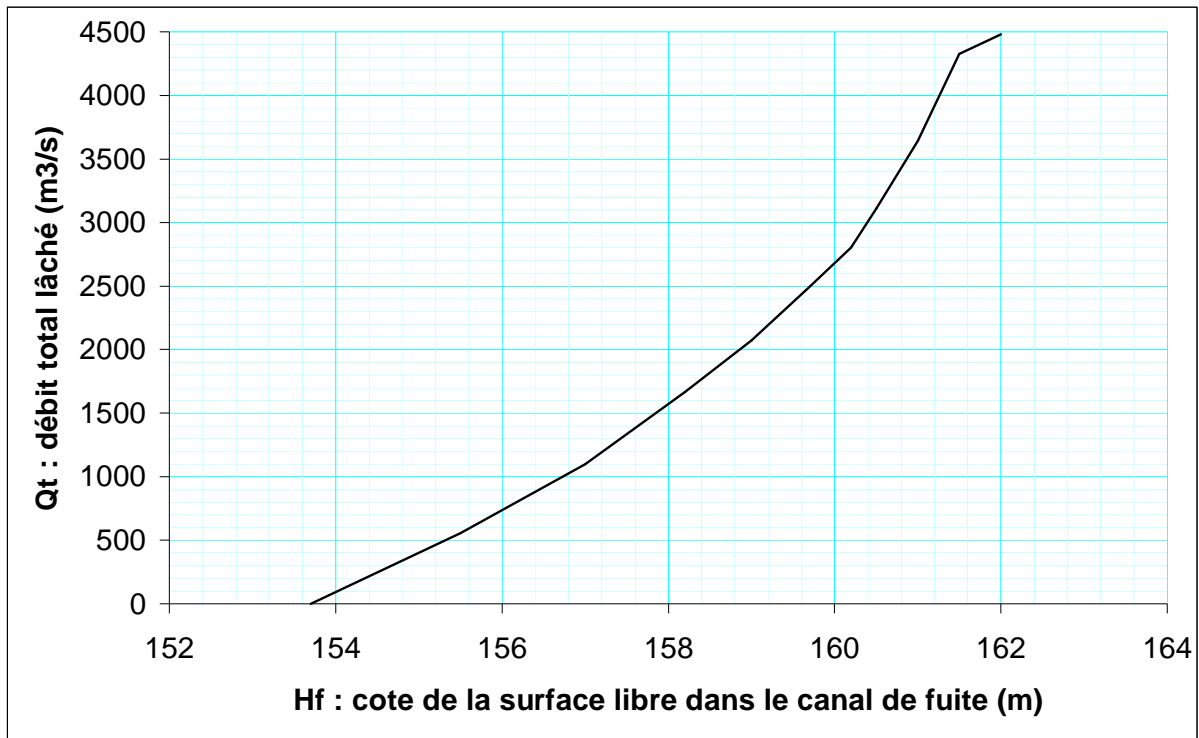


figure 2-5-B : relation hauteur débit dans le canal de fuite

H = 210		H = 208,05		H = 205		H = 201,051		H = 200		H = 195		H = 190	
Qt	Pt	Qt	Pt	Qt	Pt	Qt	Pt	Qt	Pt	Qt	Pt	Qt	Pt
2500	205	2500	205	2500	203	2500	183	2500	178	2500	144	2500	113
2000	205	2000	205	2215	205	2000	187	2000	182	2000	150	2000	118
1900	205	1500	205	2000	205	1000	198	1000	192	1500	156	1500	124
1800	205	1000	205	1500	205	500	205	500	200	1000	164	1000	131
1700	205	500	205	1000	205	491	205	489	200	500	174	500	140
1600	205	419	205	500	205	490	205	450	186	480	174	446	141
1552	205	400	196	446	205	450	190	400	167	450	165	400	128
1500	181	350	172	400	185	400	171	350	146	400	147	350	112
1400	133	300	148	350	162	350	149	300	126	350	129	300	97
1300	84	250	123	300	139	300	129	250	105	300	111	250	81
1200	37	200	99	250	117	250	108	200	84	250	93	200	65
1146	9	150	75	200	93	200	86	150	64	200	75	150	49
		100	49	150	70	150	65	100	42	150	56	100	32
		50	24	100	46	100	42	50	21	100	37	50	16
		25	11	50	23	50	21	23	9	50	19	30	9
		20	9	25	11	23	9			26	9		
				21	9								

tableau 2-5-A : puissance maximale productible Pt (Mw) en fonction de la cote du lac H (m) et du débit total lâché Qt (m<sup>3</sup>/s), dans le cas de 5 turbines potentiellement utilisables

Hf (m)	153,7	155,5	157	158,2	159	159,7	160,2	160,5	161	161,5	162
Qt (m <sup>3</sup> /s)	0	555	1100	1665	2070	2500	2800	3110	3645	4325	4480

tableau 2-5-B : relation hauteur débit dans le canal de fuite



## **2.6. REGLAGE DES ORGANES D'EVACUATION DU BARRAGE**

Afin de minimiser les risques pour les populations riveraines installées à l'aval de l'ouvrage, le gestionnaire veillera à éviter les augmentations brutales de débit. Lorsque celles-ci seront néanmoins imposées par les consignes de gestion, il les effectuera de façon progressive, réparties sur la journée. Lorsqu'elles seront connues à l'avance (pour le soutien de crue par exemple), il devra en informer les autorités et les médias. Ces dispositions, dorénavant et déjà mises en pratique à Manantali, semblent donner satisfaction jusqu'à présent.

# DEUXIEME PARTIE : SIMULATION DE SCENARIOS DE GESTION

## 3. ETUDE D'UN CAS DE GESTION TYPE

A l'aide du logiciel Simulsen, le fonctionnement du barrage de Manantali a été simulé numériquement de l'année 1950 à l'année 1998, au pas de temps journalier. Les calculs se basent donc sur les débits naturels observés sur le haut bassin du Sénégal durant cette période, qui sera considérée comme période de référence. La période 1970-1998 est également utilisée comme période de référence pour l'analyse du productible. Les résultats obtenus sur la première (hypothèse optimiste) ou la deuxième (hypothèse pessimiste) de ces deux périodes pourront être considérés comme une représentation probable des performances qu'on peut attendre de l'ouvrage à l'avenir.

Un unique jeu de consignes a été testé, en faisant toutefois varier certains de leurs paramètres. En tout, 162 scénarios de gestion ont pu ainsi être simulés, en explorant un éventail assez large (mais non exhaustif) des possibilités offertes par l'ouvrage. Les résultats obtenus permettent de préciser les consignes à retenir ou au contraire à écarter, en fonction du dosage souhaité pour les différents objectifs assignés au barrage

### 3.1. CONSIGNES DE GESTION RETENUES

Les scénarios testés envisagent une puissance installée de 205 Mw au barrage, et sont basés sur les consignes de gestion suivantes, listées par ordre de priorité décroissante :

- A1** : Précaution contre la submersion des digues du barrage :  $H_{max} = 210,50$  m
- A3** : lâcher d'un débit sanitaire réservé  $Q_r$  de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$
- B1** : précaution contre l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage :  $H_{min} = 187$  m
- B2** : laminage immédiat des crues du Sénégal à Bakel, avec un débit journalier  $Q_{I2}$  limité à  $4500 \text{ m}^3/\text{s}$
- A6** : conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, pour pouvoir assurer le laminage futur des crues du Sénégal à Bakel en dessous de  $Q_{I2} = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$  avec un taux de réussite  $T_I$  de 49 années sur 50, en référence à la période Ald-Alf de 1950-1998. Le limnigramme  $H_{lam}$  de cote maximale à respecter dans le lac est donné en annexe B, avec d'autres limnigrammes correspondant à des laminages différents.
- A5** : soutien des basses eaux, concernant les usages suivants : agriculture irriguée, alimentation humaine, navigabilité. Pour fixer les ordres de grandeur, une valeur constante ( de 100, 150 ou  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  ) a été retenue pour le débit  $Q_{et}$  à assurer en permanence au niveau de Bakel. Dans une étape ultérieure, le soutien d'étiage pourra être testé de façon plus précise en tenant compte des besoins réels de débit, variables dans l'année, sans oublier la compensation des pertes (ordre de grandeur :  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  entre Manantali et Diama)
- B3** : conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour permettre le soutien futur de basses eaux. Le débit objectif  $Q_{et}$  envisagé est le même que dans la consigne A5, et le taux de

réussite  $T_e$  retenu est de 24 années sur 25 sur la période Asd-Asf de 1950-1998. Le limnigramme Het de cote minimale à respecter dans le lac est donné en annexe C, avec d'autres limnigrammes correspondant à des laminages différents.

**A2 :** production d'énergie électrique

La consigne de production d'énergie est prise en compte seulement lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S1, pour lequel trois valeurs ont été testées : 187, 192 et 197 m

La consigne vise à produire la puissance maximale productible  $P_{max}$  lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S2, pour lequel deux valeurs ont été testées : 202 et 206 m.

Enfin, quand la cote du lac se situe entre S1 et S2, la consigne vise à produire une puissance  $P = \min(P_o ; P_{max})$  où  $P_o$  désigne une puissance constante pour laquelle trois valeurs ont été testées : 70, 90 et 110 mw.

**A4 :** soutien de crue

L'hydrogramme objectif de crue  $Q_c$  retenu a déjà été mentionné dans des documents précédents, sous la dénomination "ORSTOM1". Il culmine à 2500 m<sup>3</sup>/s et varie de façon linéaire entre les points suivants : 0 m<sup>3</sup>/s le 22 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 28 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 2 septembre ; 0 m<sup>3</sup>/s le 16 octobre.

Le soutien de crue est déclenché à la date  $T_c$  du 28 août, si et seulement si la cote du lac se situe au dessus du seuil  $H_s$ , pour lequel trois valeurs ont été testées : 192, 195 et 198 m.

Il est supposé dans toutes les simulations effectuées, que la puissance électrique qui peut être absorbée sur le réseau est toujours supérieure à la puissance installée au barrage. Enfin, la retenue est supposée pleine ( $H=208,05m$ ) au début de chaque calcul, le 1<sup>er</sup> janvier 1950.

Les 9 consignes envisagées ci dessus (A1, A3, B1, B2, A6, A5, B3, A2, A4) correspondent aux nomenclatures suivantes dans les logiciels associés au manuel : B, C, D, A, B, C, D, E, C dans PROGEMAN ; 2, 10, 3, 4, 4, 6, 3, 5, 7 dans SIMULSEN.

### **3.2. RESULTATS OBTENUS**

Vu le grand nombre de scénarios testés, l'analyse des résultats ne porte que sur un nombre limité de paramètres. Ce sont les suivants :

- W1 : l'énergie annuelle moyenne produite sur la période 1950-1998
- W2 : l'énergie annuelle moyenne produite sur la période 1970-1998
- Nss : Le nombre d'années pendant lesquelles la crue, non soutenue, a présenté un hydrogramme (même éventuellement décalé) inférieur à l'hydrogramme objectif ORSTOM1. Le dénombrement de ces années, effectué par visualisation graphique, ne présente pas d'ambiguïté.
- Nsi : Le nombre d'années pendant lesquelles un soutien de crue a été effectué de façon incomplète, avec un arrêt provoquant un grave déficit d'écoulement à Bakel pour des débits objectifs supérieurs à 1000 m<sup>3</sup>/s . Le dénombrement de ces années est également effectué par visualisation graphique.
- R : Le pourcentage d'années présentant une crue insuffisante, évalué sur la période 1950-1998. Il s'agit en fait des années appartenant à l'une des deux catégories précédentes.
- Le nombre de jours N10, N25 et N50 comptabilisés sur la période 1950-1998 (17896 jours), pendant lesquels un déficit supérieur à 10%, 25% ou 50% a été constaté à Bakel par rapport au débit objectif de basses eaux.
- Le nombre d'années pendant lesquelles un déficit d'écoulement a été constaté à Bakel, par rapport au débit objectif de basses eaux.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 3-2-A, 3-2-B et 3-2-C pour le soutien d'étiage fixé à 100, 150 et 200 m<sup>3</sup>/s respectivement.

### 3.2.1. Laminage des crues

La cote maximale de sécurité de la retenue a été fixée à 210,50m. Lorsque la surface libre de la retenue se situe à ce niveau, il est possible d'évacuer du barrage un débit supérieur à 8000 m<sup>3</sup>/s (figure 2.2.B), valeur jamais observée dans le Bafing durant le siècle passé, a fortiori sur la période 1950-1998. Avec la consigne de sécurité A1 (maintien du niveau de surface libre en dessous de la cote 210,50 m) placée en première priorité dans tous les scénarios de gestion, tout dépassement de la cote maximale est donc exclu.

Pour tous les scénarios testés, les échecs de laminage (dépassement de 4500 m<sup>3</sup>/s à Bakel) se produisent très rarement, avec une fréquence de l'ordre de celle qui est prévue dans la consigne A6 (1/50). Ces dépassements de débit limite à Bakel résultent d'une revanche insuffisante ménagée dans la retenue.

### 3.2.2. Analyse des défaillances pour le soutien des basses eaux

Le nombre de jours de défaillances N10, N25 ou N50 peut être relié en moyenne aux paramètres de gestion Po (Mw), S2 (m), S1 (m) et Hs (m), de la façon suivante:

Pour un débit objectif Qe = 100 m<sup>3</sup>/s :

$$N10 = 1960 + 0,971 * Po - 2,472 * S2 + 9,783 * S1 - 17,093 * Hs \quad (r2 = 0,762)$$

$$N25 = 1631 + 0,510 * Po - 0,472 * S2 + 0,444 * S1 - 8,370 * Hs \quad (r2 = 0,550)$$

$$N50 = 1421 + 0,351 * Po + 0,120 * S2 - 0,428 * S1 - 7,028 * Hs \quad (r2 = 0,517)$$

Pour un débit objectif Qe = 150 m<sup>3</sup>/s :

$$N10 = 2737 + 1,078 * Po - 0,889 * S2 + 1,089 * S1 - 14,213 * Hs \quad (r2 = 0,554)$$

$$N25 = 2573 + 0,583 * Po - 0,065 * S2 - 2,167 * S1 - 10,991 * Hs \quad (r2 = 0,508)$$

$$N50 = 2271 + 0,464 * Po + 0,074 * S2 - 2,289 * S1 - 9,463 * Hs \quad (r2 = 0,499)$$

Pour un débit objectif Qe = 200 m<sup>3</sup>/s :

$$N10 = 2380 + 1,100 * Po - 3,074 * S2 - 1,172 * S1 - 7,778 * Hs \quad (r2 = 0,557)$$

$$N25 = 2237 + 0,533 * Po - 0,648 * S2 - 4,489 * S1 - 6,296 * Hs \quad (r2 = 0,660)$$

$$N50 = 1973 + 0,429 * Po - 0,306 * S2 - 4,161 * S1 - 5,620 * Hs \quad (r2 = 0,651)$$

Même si ces relations sont assez lâches, on voit se dessiner les tendances suivantes :

Le nombre des défaillances, quelle qu'en soit la gravité, augmente nettement avec la puissance Po demandée et diminue nettement avec le seuil Hs conditionnant le déclenchement du soutien de crue.

Le nombre des défaillances légères diminue avec le seuil S2 qui conditionne la demande de puissance maximale turbinable.

L'augmentation du seuil S1 de prise en compte de la demande de production d'énergie, entraîne plutôt une augmentation du nombre des défaillances légères, et une diminution du nombre de défaillances graves.

Le fait de placer la consigne B3 de préservation de stock, avant les consignes entraînant de fortes lâchers( A2 pour l'énergie, et A4 pour le soutien de crue), permet toujours d'obtenir un taux de réussite élevé pour le soutien d'étiage, dans la gamme de débit envisagée de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s. Tous scénarios confondus, le nombre de jours présentant une défaillance supérieure à 25 ou 50 % du débit objectif de basses eaux, ne dépasse pas 112 et 93, ce qui représente 0,6% et 0,5% du temps respectivement.

Enfin, le nombre d'années concernées par les défaillances de soutien de basses eaux ne dépasse pas trois, quel que soit le scénario de gestion envisagé. Ces années se situent toujours sur la période 1970-1998.

### **3.2.3. Analyse de la fréquence des faibles crues obtenues**

On s'intéresse au pourcentage R, évalué sur la période 1950-1998, des faibles crues non soutenues ou soutenues de façon trop incomplète. Ce pourcentage peut être relié en moyenne aux paramètres de gestion Po (Mw), S2 (m), S1 (m), Hs (m) et Qe (m<sup>3</sup>/s), de la façon suivante :

Pour un débit objectif de basses eaux Qe = 100 m<sup>3</sup>/s :

$$R = 162,7 + 0,147 * Po - 0,630 * S2 - 1,506 * S1 + 1,315 * Hs \quad (r2 = 0,843)$$

Pour un débit objectif de basses eaux Qe = 150 m<sup>3</sup>/s :

$$R = 124,5 + 0,150 * Po - 0,667 * S2 - 0,672 * S1 + 0,741 * Hs \quad (r2 = 0,792)$$

Pour un débit objectif de basses eaux Qe = 200 m<sup>3</sup>/s :

$$R = 135,8 + 0,114 * Po - 0,806 * S2 - 0,322 * S1 + 0,519 * Hs \quad (r2 = 0,799)$$

Pour l'ensemble des scénarios de gestion envisagés :

$$R = 131,8 + 0,137 * Po - 0,701 * S2 - 0,833 * S1 + 0,858 * Hs + 0,061 * Qe \quad (r2 = 0,730)$$

On constate donc que le pourcentage de crues trop faibles augmente avec la puissance Po demandée, avec le seuil Hs conditionnant le soutien de crue et avec le débit objectif Qe de basses eaux. Il diminue par contre avec le seuil S1 permettant de prendre en compte la demande de production d'énergie, et avec le seuil S2 entraînant la demande de production de puissance maximale turbinable. Le soutien de crue apparaît donc clairement comme antagoniste avec le soutien d'étiage et la production d'énergie, ce qu'on savait déjà et qui est encore confirmé par la relation moyenne suivante, établie sur les 162 scénarios :

$$R = -76,1 + 0,0271 * Qe + 0,1009 * W1 \quad (r2 = 0,744)$$

Sur l'ensemble des scénarios testés, la proportion des années à crue trop faible se répartit entre 6% et 61%, alors que cette proportion s'élève à 31% en régime naturel. Pour tous les scénarios, les crues trop faibles ont tendance à se concentrer sur la période déficitaire des années 80, comme en régime naturel.

### 3.2.4. Analyse de l'énergie annuelle moyenne produite

L'énergie annuelle moyenne produite sur la période 1950-1998 (W1) ou sur la période 1970-1998 (W2), exprimée en GWh. par année, peut être reliée en moyenne aux paramètres de gestion  $P_o$  (Mw),  $S_2$  (m),  $S_1$  (m),  $H_s$  (m) et  $Q_e$  ( $m^3/s$ ), de la façon suivante :

Pour un débit objectif de basses eaux  $Q_e = 100 m^3/s$  :

$$W1 = 2261 + 1,334 * P_o - 12,605 * S_2 - 5,552 * S_1 + 10,932 * H_s \quad (r2 = 0,815)$$

$$W2 = -806 + 0,309 * P_o - 2,691 * S_2 - 7,553 * S_1 + 17,702 * H_s \quad (r2 = 0,730)$$

Pour un débit objectif de basses eaux  $Q_e = 150 m^3/s$  :

$$W1 = 2155 + 1,500 * P_o - 13,364 * S_2 - 3,266 * S_1 + 10,000 * H_s \quad (r2 = 0,837)$$

$$W2 = -1012 + 0,583 * P_o - 3,683 * S_2 - 3,949 * S_1 + 16,217 * H_s \quad (r2 = 0,708)$$

Pour un débit objectif de basses eaux  $Q_e = 200 m^3/s$  :

$$W1 = 2333 + 1,169 * P_o - 12,746 * S_2 - 1,520 * S_1 + 6,988 * H_s \quad (r2 = 0,871)$$

$$W2 = -527 + 0,389 * P_o - 3,739 * S_2 - 1,133 * S_1 + 11,263 * H_s \quad (r2 = 0,703)$$

Pour l'ensemble des scénarios de gestion envisagés :

$$W1 = 2198 + 0,339 * Q_e + 1,335 * P_o - 12,905 * S_2 - 3,446 * S_1 + 9,307 * H_s \quad (r2 = 0,819)$$

$$W2 = -857 + 0,500 * Q_e + 0,427 * P_o - 3,371 * S_2 - 4,212 * S_1 + 15,061 * H_s \quad (r2 = 0,701)$$

Pour les deux périodes de référence envisagées, on constate que l'énergie annuelle moyenne produite augmente avec la puissance demandée  $P_o$ , le seuil de déclenchement du soutien de crue  $H_s$  et le débit objectif de basses eaux  $Q_e$ . Elle diminue par contre avec les seuils  $S_1$  et  $S_2$  permettant respectivement de prendre en compte la demande de production d'énergie, et de demander la production de la puissance maximale productible.

Sur l'ensemble des scénarios, les valeurs obtenues pour W1 (1950-1998) se répartissent entre 768 et 987 Gwh/an, alors que celles de W2 (1970-1998) se répartissent entre 578 et 801 Gwh/an.

Enfin, sur l'ensemble des scénarios, W1 (Gwh/an) peut être relié en moyenne à  $Q_e$  ( $m^3/s$ ) et  $R$  (%) de la façon suivante :

$$W1 = 780,2 + 6,907 * R - 0,0842 * Q_e \quad (r2 = 0,720)$$

On voit donc que de façon globale, la puissance produite augmente nettement avec le pourcentage de faibles crues obtenues, et diminue très légèrement avec le débit soutenu en basses eaux.

### 3.2.5. Scénarios de gestion optimaux

Tous les scénarios testés privilégient le soutien de basses eaux par rapport aux autres objectifs, du fait qu'ils incluent une consigne B3 de préservation de stock, prioritaire par rapport aux consignes A2 et A4 relatives respectivement à la production d'énergie et au soutien de crue. De ce fait, même s'il

varie en fonction des paramètres de gestion (voir plus haut), le taux de défaillances affectant le soutien de basses eaux reste dans tous les cas relativement bas.

Par contre, l'énergie annuelle moyenne obtenue ( $W1$  ou  $W2$ ) et la proportion  $R$  des années à crues trop faibles peuvent varier beaucoup d'un scénario à l'autre. En moyenne, ces paramètres augmentent avec  $Po$ ,  $Hs$  et  $Qe$ , et diminuent avec  $S1$  et  $S2$ , ce qui montre une fois de plus que le taux de bonnes crues obtenues variera globalement en sens inverse de l'énergie produite, quel que soit le mode de gestion retenu.

Ces constatations permettent de juger comme optimaux les scénarios qui, étant donné un certain débit objectif  $Qe$  de basses eaux, donnent pour un taux  $R$  de faibles crues, la meilleure énergie produite. Pour les identifier, on procède de la façon suivante pour chaque valeur de  $Qe$ :

- Les 54 scénarios sont triés par ordre croissant sur les valeurs de  $R$  obtenues
- Pour chaque valeur de  $R$  obtenue, on ne conserve que le scénario ayant donné la meilleure énergie produite
- Parmi les scénarios restant, on élimine ceux qui pour une valeur de  $R$ , présentent une énergie produite inférieure à celle d'un scénario donnant une valeur de  $R$  inférieure.

On obtient ainsi les scénarios présentant la relation  $R(W1)$  ou  $R(W2)$  la plus basse possible, ou encore la relation  $W1(R)$  ou  $W2(R)$  la plus haute possible. Ces scénarios optimaux, signalés dans les tableaux 3-2-A, 3-2-B et 3-2-C, sont regroupés dans le tableau 3-2-D avec un code d'identification pour ceux qui concernent la relation  $R(W1)$ . Ils sont par ailleurs représentés sur les figures 3-2-A à 3-2-C pour la relation  $W1(R)$ , et 3-2-D à 3-2-F pour la relation  $W2(R)$ . Sur ces figures est également représenté l'ensemble des couples ( $W1 ; R$ ) ou ( $W2 ; R$ ), avec des symboles permettant d'identifier les valeurs des paramètres  $Po$ ,  $S1$ ,  $S2$  et  $Hs$  qui ont permis de les obtenir. Pour les personnes chargées de définir la stratégie de gestion du barrage, ces figures peuvent indiquer les valeurs à donner aux paramètres de gestion en fonction du soutien souhaité en basses eaux et du dosage qui sera retenu entre production d'énergie et fréquence de soutien de crue.

### 3.2.5.1. Résultats divers concernant les scénarios de gestion optimaux

A énergie annuelle moyenne produite  $W1$  (1950-1998) égale, les scénarios incluant un seuil  $S1$  de 187 m donnent un taux  $R$  de faibles crues, toujours supérieur à celui du scénario optimal. Ces scénarios doivent donc être rejetés, si l'on se réfère à la période 1950-1998. Sur la période 1970-1998, un seuil  $S1$  de 187 m peut être optimal à condition d'être combiné à :  $Po=70$  Mw ;  $S2 = 206$  m ;  $Hs = 198$  m ; Mais il ne s'agit là que d'un résultat marginal, et on peut donc conclure d'une façon générale qu'un seuil  $S1$  de 187 m ne doit pas être préconisé.

Parmi les scénarios optimaux concernant un soutien de basses eaux à 100 ou 150  $m^3/s$ , ceux qui incluent un seuil  $S1$  de 197 m permettent globalement de produire une faible énergie et d'obtenir peu de crues faibles (pour  $Qe= 100 m^3/s$  :  $W1<910$  Gwh/an et  $R<25\%$  ; pour  $Qe = 150 m^3/s$  :  $W1<960$  GWh/an et  $R<40\%$ ). Au contraire, un seuil  $S1$  de 192m favorise la production d'énergie au détriment du nombre de bonnes crues. Cette tendance est moins nette quand on fixe à 200  $m^3/s$  le débit objectif de basses eaux.

Sur la période 1950-1998, les scénarios optimaux incluant un seuil  $S2$  de 206 m permettent globalement de produire une faible énergie et d'obtenir peu de crues faibles, à l'inverse du seuil  $S2$  de 202 m. Cette tendance se constate également sur la période 1970-1998, sauf pour les scénarios concernant un soutien de basses eaux à 100  $m^3/s$ .

Que l'on se réfère à la période 1950-1998 ou à la période 1970-1998, on constate que le seuil  $Hs$  conditionnant le soutien de crue peut être fixé à 192m si le débit  $Qe$  soutenu en basses eaux vaut 100  $m^3/s$ , et si le seuil  $S1$  vaut 197 m. On obtient alors une faible énergie et peu de crues faibles. Cette valeur de 192 m est par contre trop faible dès lors que  $Qe$  vaut 150 ou 200  $m^3/s$ . Sur la période 1970-1998, il apparaît qu'un seuil  $Hs$  de 198 m est souhaitable si  $Qe$  vaut 150 ou 200  $m^3/s$ .

Sur les figures 3-2-G et 3-2-H sont respectivement représentées les relations optimales  $W1(R)$  et  $W2(R)$ , relatives aux trois valeurs testées pour le débit  $Qe$  de soutien de basses eaux : 100, 150 et 200  $m^3/s$ . Sur la période 1950-1998, on remarque que les trois relations  $W1(R)$  sont pratiquement confondues pour les valeurs de  $R$  supérieures à 40%. En dessous de cette valeur par contre, il

apparaît clairement que l'augmentation du débit soutenu en basses eaux fait augmenter la proportion R de faibles crues (à énergie produite W1 constante), et fait baisser W1 (à R constant). Bien que moins évidente, cette tendance se remarque également sur les relations W2(R), pour les valeurs de R inférieures à 30%.

### **3.2.5.2. Variabilité de la production d'énergie pour les scénarios de gestion optimaux**

Le tableau 3-2-E montre qu'en moyenne interannuelle, même sur la base des faibles apports en eau observés entre 1970 et 1998, la production d'énergie dépasse nettement 500 GWh par année pour tous les scénarios "optimaux".

Néanmoins, cette production présente une variabilité interannuelle assez importante. Sur la base des apports en eau observés entre 1950 et 1998, le coefficient de variation interannuel (écart type divisé par moyenne) de la production d'énergie se situe selon les scénarios entre 0,25 et 0,46. Le tableau 3-2-E donne la fonction de répartition de l'énergie produite annuellement pour chaque scénario. Il montre qu'une production inférieure à 500 Gwh peut être obtenue certaines années pour les scénarios associés à un soutien de crue assez fréquent. Ceci ne se produit cependant pas plus d'une année sur 4. Par exemple, le premier scénario présenté dans le tableau donne une production annuelle inférieure ou égale à 480 Gwh une année sur 4, et inférieure ou égale à 413 Gwh une année sur 5.

La production d'énergie présente également une variabilité saisonnière importante, comme on peut le constater dans le tableau 3-2-F. Par exemple pour le premier scénario, la production mensuelle (tous mois confondus) est inférieure ou égale à 52 Mw 1 mois sur 4, inférieure ou égale à 70 Mw 1 mois sur 3, et supérieure ou égale à 108 Mw 1 mois sur 4. Quel que soit le scénario de gestion, la puissance maximale produite se situe en moyenne vers le mois d'octobre, et la puissance minimale vers le mois de juillet. Pendant les mois d'avril à juillet, la puissance produite ne dépasse jamais la valeur Po (puissance demandée) fixée dans la consigne de gestion relative à l'énergie.

### **3.2.6. Conclusion**

Les tests effectués ici permettent d'esquisser un panorama des possibilités offertes par l'ouvrage, qui bien qu'assez large, est loin d'être exhaustif. En effet on n'a testé qu'un unique jeu de consignes, dans lequel le soutien de basses eaux intervient en priorité par rapport aux autres objectifs. Certains paramètres de gestion (hydrogramme objectif de crue : "ORSTOM1" ; débit sanitaire réservé : 10 m<sup>3</sup>/s ; etc..) ont été figés, alors que les autres ont été testés sur une gamme de variation forcément restreinte :

- Qe, débit objectif de basses eaux : 100, 150 et 200 m<sup>3</sup>/s
- Po, puissance électrique demandée : 70, 90 et 110 Mw
- HS, cote minimale du lac permettant de déclencher le soutien de crue : 192, 195 et 198 m
- S1, cote minimale du lac pour prendre en compte la demande de production d'énergie : 187, 192 et 197 m
- S2, cote minimale du lac à partir de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible : 202 et 206 m

Sur l'ensemble des scénarios testés, on peut faire les constatations suivantes :

Grâce à la consigne B3 de préservation de stock, placée en priorité par rapport aux consignes A2 et A4 relatives à la production d'énergie et au soutien de crue, tous les scénarios testés présentent un taux de défaillance relativement faible pour le soutien des basses eaux.

Les figures 3-2-D à 3-2-F permettent de déterminer la valeur des paramètres de gestion Po, S1, S2 et Hs qui pour un soutien de basses eaux Qe donné, permettent d'obtenir la meilleure énergie annuelle moyenne produite en fonction de la fréquence R admise pour les crues trop faibles (non soutenues ou soutenues de façon très incomplète). Il s'agit là des relations W1(R) ou W2(R) optimales.



Les relations optimales  $W1(R)$  et  $W2(R)$  montrent que l'énergie annuelle qu'on peut espérer obtenir en moyenne, augmente en fonction de la fréquence  $R$  admise pour les crues trop faibles. Ce résultat se retrouve sur l'ensemble des scénarios testés, puisqu'on constate globalement que  $W1$ ,  $W2$  et  $R$  s'accroissent en fonction de  $Q_e$ ,  $P_o$  et  $H_s$ , et diminuent en fonction de  $S1$  et  $S2$ .

Parmi les scénarios optimaux, le fait de fixer des valeurs faibles aux seuils  $S1$  (192m) et  $S2$  (202m), permet de privilégier la production d'énergie au prix d'une forte fréquence de crues trop faibles. Inversement, des valeurs hautes de  $S1$  (197m) et  $S2$  (206m) privilégient le soutien de crue au détriment de la production d'énergie. La valeur 187m, trop basse et quasiment jamais optimale, est à proscrire pour le paramètre  $S1$ .

Une valeur très faible de 192 m ne peut être envisagée pour le paramètre  $H_s$ , que si elle est associée à un faible soutien de basses eaux ( $Q_e = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). On obtient alors un fort taux de crues soutenues, au prix d'une faible production d'énergie. Avec un soutien de basses eaux de 150 ou 200  $\text{m}^3/\text{s}$ , une valeur de 195 ou 198 m doit être envisagée pour  $H_s$ . Si on se réfère à une période déficitaire en eau, il apparaît même que seule une valeur de 198m peut être retenue pour  $H_s$  dans ce dernier cas.

paramètres définissant les consignes de gestion					énergie annuelle moyenne obtenue (Gwh/an)		crues			basses eaux				scénario optimal pour crue et puissance	
							nombre d'années		R (%)	nombre de jours de déficit			nombre d'années		
Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	W1 (50-98)	W2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet	crues faibles	N10 10%	N25 25%	N50 50%	avec déficit	W1	W2
100	192	70	187	202	877	663	14	2	33	44	15	13	1		
100	192	70	187	206	815	665	11	2	27	44	15	13	3		
100	192	70	192	202	831	589	5	3	16	155	81	66	3		
100	192	70	192	206	774	597	4	3	14	149	80	66	3		
100	192	70	197	202	829	592	2	2	8	224	84	66	2		*
100	192	70	197	206	768	588	2	1	6	176	80	66	3	*	*
100	192	90	187	202	923	705	22	0	45	44	34	27	1		
100	192	90	187	206	870	700	20	0	41	50	35	27	1		
100	192	90	192	202	844	578	3	5	16	165	81	66	3		
100	192	90	192	206	802	588	3	6	18	161	81	66	2		
100	192	90	197	202	835	587	2	2	8	257	93	66	3		
100	192	90	197	206	798	582	2	2	8	178	86	66	2		
100	192	110	187	202	929	699	24	0	49	61	47	41	1		
100	192	110	187	206	902	698	23	0	47	61	47	41	1		
100	192	110	192	202	859	582	4	6	20	176	83	66	1		
100	192	110	192	206	833	587	4	6	20	164	81	66	2		
100	192	110	197	202	837	582	2	2	8	275	96	66	2	*	
100	192	110	197	206	820	581	2	2	8	260	90	66	2		
100	195	70	187	202	889	684	15	0	31	14	15	13	1		
100	195	70	187	206	825	682	13	0	27	24	15	13	2		
100	195	70	192	202	884	676	12	2	29	50	4	0	1		
100	195	70	192	206	814	664	10	1	22	26	2	0	1		
100	195	70	197	202	845	619	4	2	12	124	9	0	2		*
100	195	70	197	206	785	616	4	2	12	103	6	0	2		
100	195	90	187	202	939	733	27	0	55	44	34	27	1		
100	195	90	187	206	878	712	27	0	55	44	34	27	1		
100	195	90	192	202	936	730	18	1	39	40	14	7	1	*	
100	195	90	192	206	878	713	15	0	31	40	14	7	1		*
100	195	90	197	202	850	612	4	2	12	150	17	0	1	*	
100	195	90	197	206	814	609	4	2	12	111	5	0	0		
100	195	110	187	202	930	699	26	0	53	61	47	41	1		
100	195	110	187	206	913	716	24	0	49	61	47	41	1		
100	195	110	192	202	948	725	21	1	45	73	30	18	1	*	
100	195	110	192	206	921	733	20	1	43	64	28	18	1		
100	195	110	197	202	858	617	5	2	14	163	20	0	0	*	
100	195	110	197	206	843	619	5	2	14	147	14	0	0		*
100	198	70	187	202	950	785	23	0	47	3	2	0	1		
100	198	70	187	206	838	704	14	0	29	18	15	13	1		*
100	198	70	192	202	955	793	23	0	47	2	1	0	2	*	*
100	198	70	192	206	834	697	13	0	27	7	0	0	0		
100	198	70	197	202	887	687	9	0	18	79	6	0	2	*	*
100	198	70	197	206	826	683	8	0	16	43	3	0	1		*
100	198	90	187	202	939	733	29	0	59	44	34	27	1		
100	198	90	187	206	878	713	21	0	43	44	34	27	1		
100	198	90	192	202	973	790	27	0	55	35	12	5	1	*	
100	198	90	192	206	900	749	19	0	39	29	11	5	1		*
100	198	90	197	202	903	700	11	0	22	22	12	0	0	*	*
100	198	90	197	206	853	674	8	0	16	54	5	0	0		
100	198	110	187	202	944	703	29	0	59	61	47	41	1		
100	198	110	187	206	913	711	25	0	51	61	47	41	1		
100	198	110	192	202	987	776	29	0	59	65	30	18	1	*	
100	198	110	192	206	948	778	24	0	49	53	28	18	1		
100	198	110	197	202	911	704	12	0	24	93	12	0	0	*	*
100	198	110	197	206	889	695	11	0	22	85	6	0	0		

tableau 3-2-A : résultats des 54 scénarios simulés dans le cas d'un soutien de basses eaux fixé à 100 m<sup>3</sup>/s

paramètres définissant les consignes de gestion					énergie annuelle moyenne obtenue (Gwh/an)		crues			basses eaux				scénario optimal pour crue et puissance	
							nombre d'années		R (%)	nombre de jours de déficit			nombre d'années		
Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	W1 (50-98)	W2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet	crues faibles	N10 10%	N25 25%	N50 50%	avec déficit	W1	W2
150	192	70	187	202	883	674	14	2	33	40	27	20	1		
150	192	70	187	206	820	673	14	0	29	40	27	20	1		
150	192	70	192	202	845	612	7	5	24	159	106	93	1		
150	192	70	192	206	786	617	9	3	24	156	106	93	2		
150	192	70	197	202	844	615	6	6	24	180	108	88	1		
150	192	70	197	206	783	612	7	5	24	159	105	88	2		
150	192	90	187	202	926	710	21	1	45	91	70	61	2		
150	192	90	187	206	872	704	18	1	39	91	70	61	2		
150	192	90	192	202	862	606	12	3	31	172	108	93	2		
150	192	90	192	206	818	613	7	6	27	168	108	93	2		
150	192	90	197	202	851	612	5	8	27	119	111	90	3		
150	192	90	197	206	815	611	4	8	24	166	105	88	2		
150	192	110	187	202	931	703	24	0	49	129	95	81	2		
150	192	110	187	206	905	704	22	1	47	129	95	81	2		
150	192	110	192	202	884	622	11	4	31	183	110	93	2		
150	192	110	192	206	858	627	12	4	33	169	108	93	2		
150	192	110	197	202	856	610	10	3	27	203	112	90	2		
150	192	110	197	206	842	615	10	3	27	186	110	88	2		
150	195	70	187	202	892	690	14	2	33	30	24	20	1		
150	195	70	187	206	827	686	12	1	27	30	24	20	1		
150	195	70	192	202	892	688	13	3	33	113	84	75	1		
150	195	70	192	206	818	670	10	3	27	112	84	75	1		
150	195	70	197	202	875	666	9	3	24	60	7	0	0	*	
150	195	70	197	206	810	656	7	3	20	37	3	0	0		
150	195	90	187	202	940	734	22	0	45	91	70	61	2		
150	195	90	187	206	878	714	20	0	41	91	70	61	2		
150	195	90	192	202	941	737	19	1	41	58	23	19	1		
150	195	90	192	206	879	715	16	1	35	51	22	19	1		
150	195	90	197	202	891	677	10	3	27	82	11	2	1	*	
150	195	90	197	206	849	667	9	3	24	54	4	0	0		
150	195	110	187	202	932	703	23	0	47	129	95	81	2		
150	195	110	187	206	915	719	23	0	47	129	95	81	2		
150	195	110	192	202	971	763	24	0	49	69	30	23	2	*	
150	195	110	192	206	931	754	22	0	45	57	29	23	2		
150	195	110	197	202	898	680	12	3	31	69	8	2	1		
150	195	110	197	206	881	680	11	2	27	77	9	0	0		
150	198	70	187	202	950	785	22	0	45	0	0	0	0		
150	198	70	187	206	838	704	13	0	27	26	24	20	1		*
150	198	70	192	202	955	793	22	0	45	6	0	0	0		*
150	198	70	192	206	839	705	12	2	29	20	3	0	0		*
150	198	70	197	202	906	718	13	2	31	44	4	0	0	*	*
150	198	70	197	206	820	673	9	1	20	33	3	0	0	*	*
150	198	90	187	202	940	735	25	0	51	91	70	61	2		
150	198	90	187	206	879	714	20	0	41	91	70	61	2		
150	198	90	192	202	969	785	27	0	55	53	23	19	1		
150	198	90	192	206	896	743	18	0	37	46	22	19	1		
150	198	90	197	202	933	747	16	1	35	63	8	2	1	*	*
150	198	90	197	206	879	716	13	2	31	40	4	0	0		
150	198	110	187	202	946	706	26	0	53	129	95	81	2		
150	198	110	187	206	915	719	24	0	49	129	95	81	2		
150	198	110	192	202	982	768	27	0	55	67	30	23	2	*	
150	198	110	192	206	944	771	24	0	49	57	29	23	2		
150	198	110	197	202	957	777	20	0	41	60	8	2	1	*	*
150	198	110	197	206	914	734	16	1	35	50	6	0	0		

tableau 3-2-B : résultats des 54 scénarios simulés dans le cas d'un soutien de basses eaux fixé à 150 m<sup>3</sup>/s

paramètres définissant les consignes de gestion					énergie annuelle moyenne obtenue (Gwh/an)		crues			basses eaux				scénario optimal pour crue et puissance	
							nombre d'années		R (%)	nombre de jours de déficit			nombre d'années		
Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	W1 (50-98)	W2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet	crues faibles	N10 10%	N25 25%	N50 50%	avec déficit	W1	W2
200	192	70	187	202	902	696	20	0	41	110	81	71	1		
200	192	70	187	206	846	693	17	2	39	110	81	71	1		
200	192	70	192	202	887	671	13	5	37	131	79	70	1		
200	192	70	192	206	830	668	11	5	33	131	79	70	1		
200	192	70	197	202	877	665	9	9	37	166	80	68	1		
200	192	70	197	206	826	661	11	4	31	132	77	68	1		
200	192	90	187	202	935	725	22	0	45	130	96	85	1		
200	192	90	187	206	880	717	19	1	41	130	96	85	1		
200	192	90	192	202	910	686	17	3	41	145	80	71	1		
200	192	90	192	206	864	690	15	4	39	136	80	71	1		
200	192	90	197	202	889	671	13	6	39	88	81	69	1		
200	192	90	197	206	852	671	13	5	37	135	78	69	1		
200	192	110	187	202	942	720	25	0	51	146	103	88	1		
200	192	110	187	206	918	725	24	0	49	142	101	88	1		
200	192	110	192	202	924	688	17	3	41	161	84	71	1		
200	192	110	192	206	897	692	17	3	41	138	80	71	1		
200	192	110	197	202	900	679	14	5	39	174	82	69	1	*	
200	192	110	197	206	884	684	14	3	35	164	81	69	1	*	
200	195	70	187	202	924	732	19	2	43	77	67	61	1		
200	195	70	187	206	856	709	16	2	37	79	67	61	1		
200	195	70	192	202	922	729	16	4	41	57	25	21	1		
200	195	70	192	206	855	709	14	2	33	57	25	21	1		
200	195	70	197	202	903	706	14	6	41	142	71	62	1		
200	195	70	197	206	843	689	12	3	31	100	64	58	1	*	*
200	195	90	187	202	945	742	25	0	51	130	96	85	1		
200	195	90	187	206	883	721	19	1	41	130	96	85	1		
200	195	90	192	202	954	759	23	1	49	110	60	54	1		
200	195	90	192	206	889	731	19	1	41	99	60	54	1		
200	195	90	197	202	915	715	16	4	41	77	9	2	1		
200	195	90	197	206	873	707	13	5	37	52	5	2	1		
200	195	110	187	202	944	720	24	0	49	146	103	88	1		
200	195	110	187	206	925	736	24	0	49	142	101	88	1		
200	195	110	192	202	968	757	25	0	51	126	66	57	1	*	
200	195	110	192	206	935	756	24	1	51	104	64	57	1		
200	195	110	197	202	935	735	18	3	43	107	27	20	1	*	
200	195	110	197	206	909	725	18	3	43	103	26	20	1		
200	198	70	187	202	957	788	24	0	49	62	55	50	1		
200	198	70	187	206	873	737	16	1	35	29	21	17	1		*
200	198	70	192	202	965	801	24	0	49	44	21	17	1		*
200	198	70	192	206	868	729	14	2	33	47	25	21	1	*	*
200	198	70	197	202	948	782	20	2	45	65	3	0	0	*	*
200	198	70	197	206	858	713	13	3	33	34	0	0	0		
200	198	90	187	202	945	742	26	0	53	130	96	85	1		
200	198	90	187	206	885	725	20	1	43	136	96	85	1		
200	198	90	192	202	965	777	25	0	51	107	60	54	1		
200	198	90	192	206	901	751	19	1	41	93	60	54	1		
200	198	90	197	202	961	791	23	1	49	130	9	2	1		
200	198	90	197	206	895	742	15	3	37	40	6	2	1	*	*
200	198	110	187	202	956	723	29	0	59	146	103	88	1		
200	198	110	187	206	925	737	24	0	49	142	101	88	1		
200	198	110	192	202	979	762	30	0	61	123	66	57	1	*	
200	198	110	192	206	943	768	25	0	51	104	64	57	1		
200	198	110	197	202	966	788	24	0	49	104	27	20	1	*	
200	198	110	197	206	931	762	19	1	41	93	26	20	1	*	*

tableau 3-2-C : résultats des 54 scénarios simulés dans le cas d'un soutien de basses eaux fixé à 200 m<sup>3</sup>/s

code scénario	paramètres définissant les consignes de gestion					énergie moyenne produite par année (Gwh)		fréquence des crues trop faibles
	Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	W1 (50-98)	W2 (70-98)	R (%)
A100	100	192	70	197	206	768	588	6
B100	100	192	110	197	202	837	582	8
C100	100	195	90	197	202	850	612	12
D100	100	195	110	197	202	858	617	14
E100	100	198	70	197	202	887	687	18
F100	100	198	90	197	202	903	700	22
G100	100	198	110	197	202	911	704	24
H100	100	195	90	192	202	936	730	39
I100	100	195	110	192	202	948	725	45
J100	100	198	70	192	202	955	793	47
K100	100	198	90	192	202	973	790	55
L100	100	198	110	192	202	987	776	59
A150	150	198	70	197	206	820	673	20
B150	150	195	70	197	202	875	666	24
C150	150	195	90	197	202	891	677	27
D150	150	198	70	197	202	906	718	31
E150	150	198	90	197	202	933	747	35
F150	150	198	110	197	202	957	777	41
G150	150	195	110	192	202	971	763	49
H150	150	198	110	192	202	982	768	55
A200	200	195	70	197	206	843	689	31
B200	200	198	70	192	206	868	729	33
C200	200	192	110	197	206	884	684	35
D200	200	198	90	197	206	895	742	37
E200	200	192	110	197	202	900	679	39
F200	200	198	110	197	206	931	762	41
G200	200	195	110	197	202	935	735	43
H200	200	198	70	197	202	948	782	45
I200	200	198	110	197	202	966	788	49
J200	200	195	110	192	202	968	757	51
K200	200	198	110	192	202	979	762	61

tableau 3-2-D : résultats concernant l'énergie moyenne produite par année et la fréquence des crues trop faibles, pour les scénarios de gestion identifiés comme optimaux vis à vis de la relation W1(R).

code scénario	paramètres définissant les					énergie produite par année (Gwh/an)															fréquence des crues trop faibles R (%)		
	consignes de gestion					moyenne interannuelle		Répartition des valeurs obtenues sur la période 1950-1998															
						W1 (50-98)	W2 (70-98)	récurrence (années)															
	Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	50	20	10	7	5	4	3	2	3	4	5	7	10	20	50			
A100	100	192	70	197	206	768	588	267	321	365	375	413	480	589	822	1006	1030	1055	1075	1087	1099	1134	6
B100	100	192	110	197	202	837	582	267	303	363	374	408	447	539	805	1163	1203	1249	1269	1321	1351	1418	8
C100	100	195	90	197	202	850	612	322	345	373	439	463	491	570	817	1147	1190	1239	1256	1307	1333	1381	12
D100	100	195	110	197	202	858	617	314	326	373	415	473	536	601	805	1163	1203	1249	1269	1321	1351	1418	14
E100	100	198	70	197	202	887	687	370	430	485	502	567	609	725	857	1130	1172	1224	1241	1269	1298	1327	18
F100	100	198	90	197	202	903	700	371	448	507	529	582	646	727	834	1147	1190	1239	1256	1307	1333	1381	22
G100	100	198	110	197	202	911	704	365	454	490	562	624	663	720	823	1163	1203	1249	1269	1321	1351	1418	24
H100	100	195	90	192	202	936	730	434	546	569	592	653	672	710	876	1223	1248	1286	1300	1326	1338	1381	39
I100	100	195	110	192	202	948	725	487	502	547	561	607	680	729	873	1229	1285	1322	1365	1383	1407	1440	45
J100	100	198	70	192	202	955	793	568	612	614	674	706	721	771	954	1157	1191	1223	1243	1269	1298	1327	47
K100	100	198	90	192	202	973	790	508	597	637	667	704	712	778	983	1220	1248	1286	1301	1326	1338	1381	55
L100	100	198	110	192	202	987	776	512	551	604	671	684	714	766	963	1248	1301	1349	1365	1383	1407	1440	59
A150	150	198	70	197	206	820	673	408	444	460	472	565	641	714	817	1006	1030	1055	1075	1087	1099	1134	20
B150	150	195	70	197	202	875	666	406	434	482	502	523	574	634	833	1137	1173	1224	1241	1269	1298	1327	24
C150	150	195	90	197	202	891	677	407	460	481	499	546	585	698	825	1156	1192	1238	1259	1308	1333	1381	27
D150	150	198	70	197	202	906	718	406	503	537	580	619	639	721	892	1137	1173	1224	1241	1269	1298	1327	31
E150	150	198	90	197	202	933	747	499	563	598	613	632	699	726	912	1156	1192	1238	1259	1308	1333	1381	35
F150	150	198	110	197	202	957	777	575	630	644	653	666	702	732	930	1171	1212	1255	1278	1321	1349	1418	41
G150	150	195	110	192	202	971	763	517	585	610	630	675	689	743	919	1230	1286	1322	1363	1383	1407	1440	49
H150	150	198	110	192	202	982	768	517	585	610	630	675	689	743	955	1248	1302	1349	1363	1383	1407	1440	55
A200	200	195	70	197	206	843	689	468	522	532	546	592	612	670	798	1042	1076	1093	1105	1124	1139	1174	31
B200	200	198	70	192	206	868	729	527	564	591	615	637	664	731	811	1042	1076	1093	1105	1124	1139	1174	33
C200	200	192	110	197	206	884	684	436	506	532	552	583	607	652	866	1129	1166	1212	1240	1269	1275	1305	35
D200	200	198	90	197	206	895	742	568	574	615	625	639	667	704	867	1096	1111	1144	1160	1181	1186	1219	37
E200	200	192	110	197	202	900	679	436	506	532	552	569	607	659	823	1183	1220	1266	1287	1324	1354	1418	39
F200	200	198	110	197	206	931	762	540	613	637	656	678	704	726	903	1129	1166	1212	1240	1269	1275	1305	41
G200	200	195	110	197	202	935	735	508	555	609	644	659	677	696	871	1183	1220	1266	1287	1324	1354	1418	43
H200	200	198	70	197	202	948	782	561	572	600	673	716	729	748	950	1149	1182	1224	1250	1285	1312	1339	45
I200	200	198	110	197	202	966	788	540	608	644	653	676	693	777	964	1183	1220	1266	1287	1324	1354	1418	49
J200	200	195	110	192	202	968	757	520	522	605	662	674	681	748	942	1229	1286	1321	1365	1383	1407	1440	51
K200	200	198	110	192	202	979	762	520	522	605	662	674	681	749	942	1249	1302	1349	1365	1383	1407	1440	61

tableau 3-2-E : variabilité inter annuelle de l'énergie produite annuellement, pour les scénarios de gestion "optimaux".

code scénario	paramètres définissant les					énergie annuelle (Gwh/an)		puissance moyenne mensuelle produite (Mw)																				fréquence des crues trop faibles								
	consignes de gestion					moyenne interannuelle		Répartition des valeurs obtenues sur la période 1950-1998, tous mois confondus												moyenne interannuelle (1950-1998), mois par mois																
	Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	W1 (50-98)	W2 (70-98)	récurrence (mois)															janv	févr	mars	avr	mai		juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	R (%)
								50	20	10	7	5	4	3	2	3	4	5	7	10	20	50														
A100	100	192	70	197	206	768	588	6	21	32	34	37	52	70	70	70	108	140	188	205	205	205	73	61	61	58	56	53	46	100	162	133	132	115	6	
B100	100	192	110	197	202	837	582	3	12	24	30	33	34	37	85	114	154	187	205	205	205	124	107	76	65	46	29	31	103	163	136	136	131	8		
C100	100	195	90	197	202	850	612	4	15	26	32	34	36	38	90	112	160	201	205	205	205	125	105	72	62	51	34	34	99	164	146	139	133	12		
D100	100	195	110	197	202	858	617	4	12	24	31	34	35	37	94	119	163	194	205	205	205	127	109	77	65	47	30	32	101	162	148	143	135	14		
E100	100	198	70	197	202	887	687	5	20	32	35	38	46	70	70	118	178	205	205	205	205	127	103	68	58	52	40	36	101	169	167	155	138	18		
F100	100	198	90	197	202	903	700	6	17	30	34	37	38	57	90	120	168	205	205	205	205	135	113	74	63	52	34	34	101	165	167	156	142	22		
G100	100	198	110	197	202	911	704	4	14	27	33	36	37	39	110	128	168	205	205	205	205	140	113	78	66	47	31	32	104	165	167	159	146	24		
H100	100	195	90	192	202	936	730	13	28	33	49	81	90	90	90	94	131	171	205	205	205	131	119	88	80	70	55	56	101	139	159	148	138	39		
I100	100	195	110	192	202	948	725	6	20	31	33	34	67	110	110	110	128	161	205	205	205	137	123	94	78	64	53	51	104	139	158	153	143	45		
J100	100	198	70	192	202	955	793	54	70	70	70	70	70	70	105	168	205	205	205	205	205	129	109	75	69	69	67	66	99	147	182	156	140	47		
K100	100	198	90	192	202	973	790	22	30	47	70	90	90	90	92	142	194	205	205	205	205	134	121	91	84	73	56	58	99	137	172	159	146	55		
L100	100	198	110	192	202	987	776	8	22	32	33	57	92	110	110	110	133	173	205	205	205	143	127	100	82	67	55	53	103	140	168	162	151	59		
A150	150	198	70	197	206	820	673	11	37	53	57	70	70	70	70	109	136	188	205	205	205	80	68	67	66	65	62	53	95	154	144	142	123	20		
B150	150	195	70	197	202	875	666	10	23	42	49	54	55	66	70	102	162	204	205	205	205	126	106	71	64	61	51	38	91	153	155	147	133	24		
C150	150	195	90	197	202	891	677	6	17	38	46	52	54	57	90	104	158	198	205	205	205	132	114	81	71	64	48	34	86	149	155	148	138	27		
D150	150	198	70	197	202	906	718	15	25	44	52	56	60	70	70	109	168	205	205	205	205	132	107	73	65	62	52	39	92	157	171	154	137	31		
E150	150	198	90	197	202	933	747	13	23	39	48	54	57	69	90	113	164	205	205	205	205	139	119	83	73	65	48	35	88	155	174	157	144	35		
F150	150	198	110	197	202	957	777	10	17	36	47	53	56	58	110	122	169	203	205	205	205	146	122	87	77	63	46	32	81	158	178	165	157	41		
G150	150	195	110	192	202	971	763	15	26	44	49	53	63	110	110	110	128	165	205	205	205	138	125	97	86	75	63	51	95	138	162	158	143	49		
H150	150	198	110	192	202	982	768	15	29	45	49	53	67	110	110	110	129	166	205	205	205	140	126	98	87	76	65	53	93	139	163	159	146	55		
A200	200	195	70	197	206	843	689	15	33	61	68	70	71	75	81	87	93	114	176	205	205	205	89	81	83	82	79	69	55	83	134	133	140	127	31	
B200	200	198	70	192	206	868	729	34	59	70	70	70	72	75	82	87	93	115	176	205	205	205	90	81	83	83	80	71	62	94	137	135	142	127	33	
C200	200	192	110	197	206	884	684	9	28	43	56	66	70	74	110	110	120	150	198	205	205	110	95	93	91	85	71	55	83	112	133	145	137	35		
D200	200	198	90	197	206	895	742	18	35	64	72	77	88	90	90	90	90	121	166	203	205	205	99	88	87	85	83	77	62	86	136	143	146	133	37	
E200	200	192	110	197	202	900	679	9	23	37	47	57	66	71	84	110	131	172	205	205	205	138	121	94	85	74	57	34	78	120	137	151	144	39		
F200	200	198	110	197	206	931	762	4	28	52	66	70	74	94	110	110	125	150	198	205	205	115	102	97	93	89	72	56	76	130	150	153	143	41		
G200	200	195	110	197	202	935	735	3	20	37	52	63	68	73	97	110	143	183	205	205	205	142	124	95	86	76	58	35	68	133	157	160	149	43		
H200	200	198	70	197	202	948	782	16	28	47	61	70	73	77	80	106	171	205	205	205	205	136	116	85	79	76	63	39	75	148	181	158	144	45		
I200	200	198	110	197	202	966	788	3	21	37	54	66	70	75	110	110	158	199	205	205	205	145	126	96	86	76	59	35	65	142	171	166	156	49		
J200	200	195	110	192	202	968	757	18	33	51	63	67	73	83	110	110	128	162	205	205	205	136	124	100	93	83	72	56	89	130	150	154	140	51		
K200	200	198	110	192	202	979	762	19	33	52	64	67	74	84	110	110	128	165	205	205	205	138	125	101	93	84	73	57	88	132	153	154	144	61		

tableau 3-2-F : variabilité de la puissance produite sur les différents mois de l'année, pour les scénarios de gestion "optimaux"

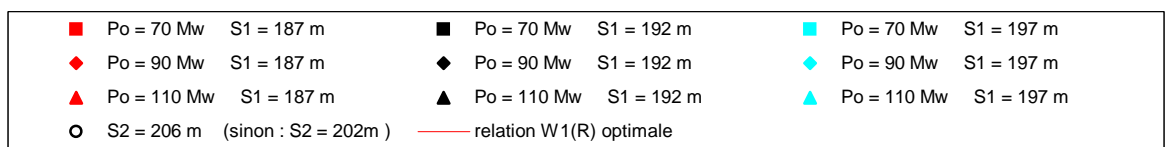
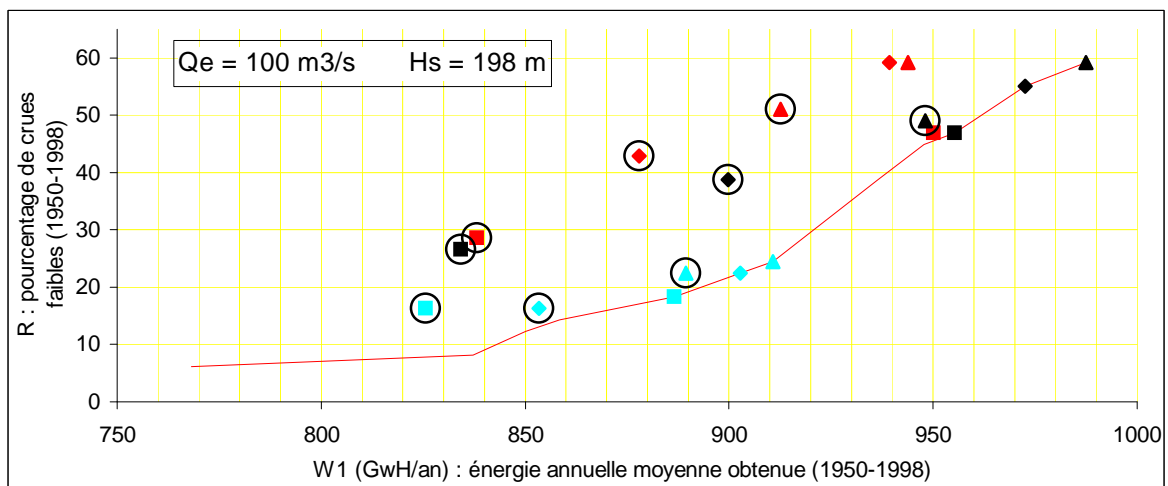
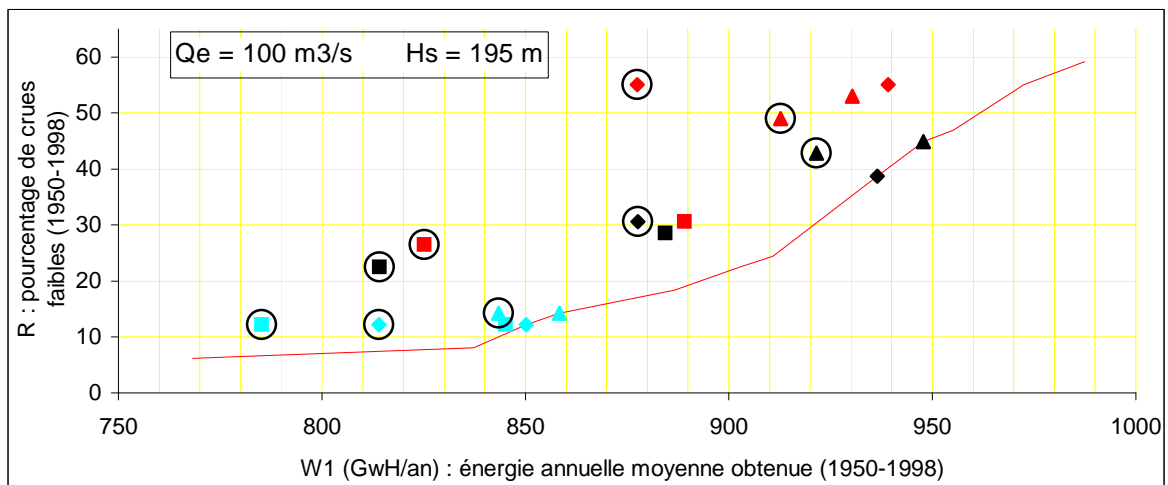
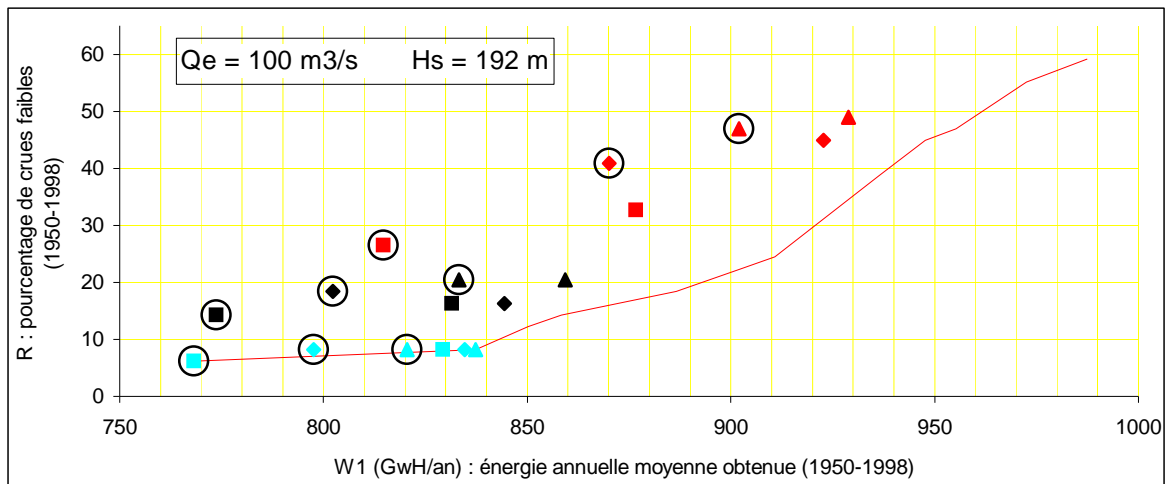


figure 3-2-A : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et W1, énergie annuelle moyenne produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'étiage à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$



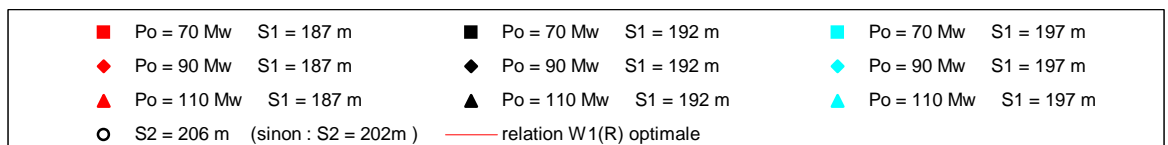
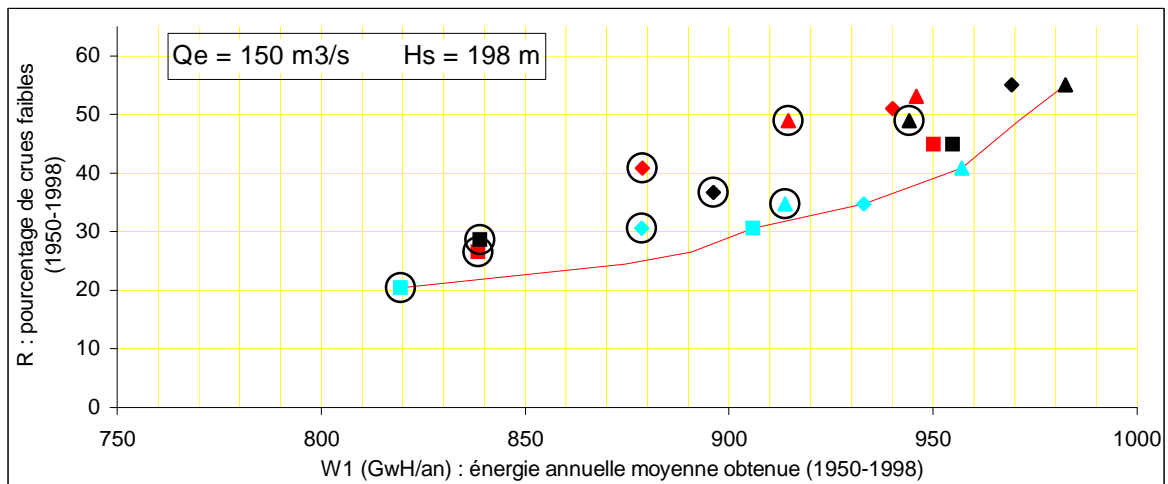
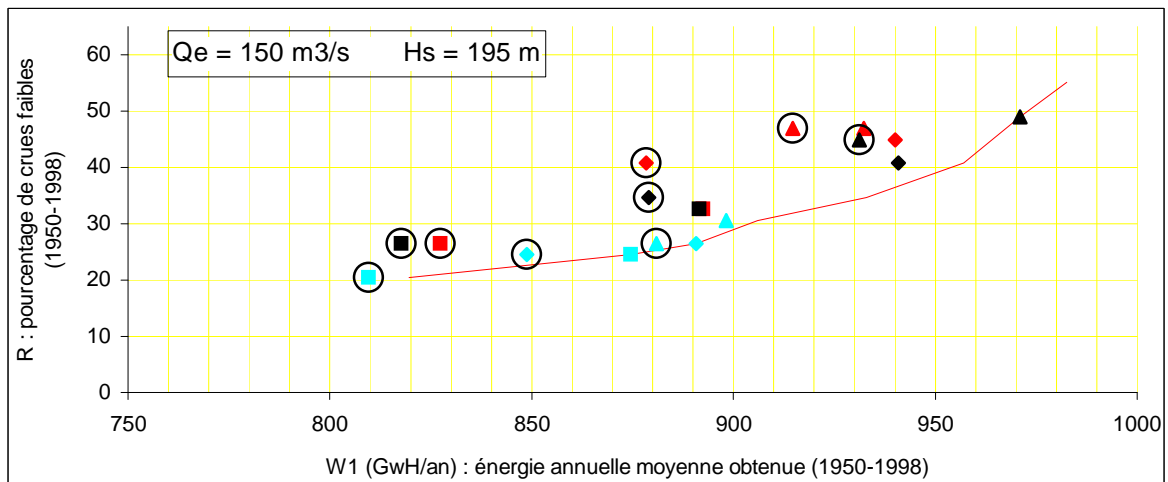
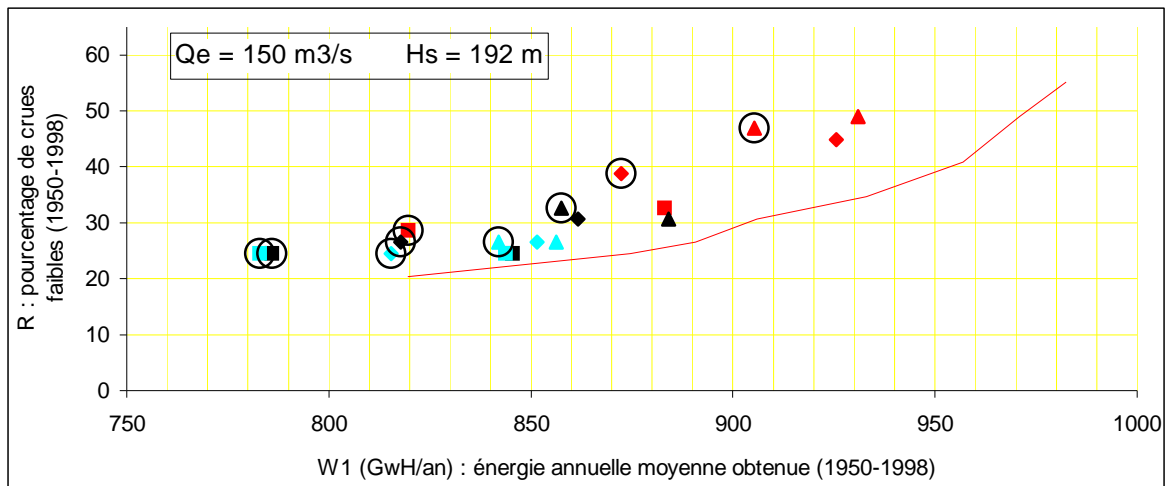


figure 3-2-B : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et W1, énergie annuelle moyenne produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'étiage à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$

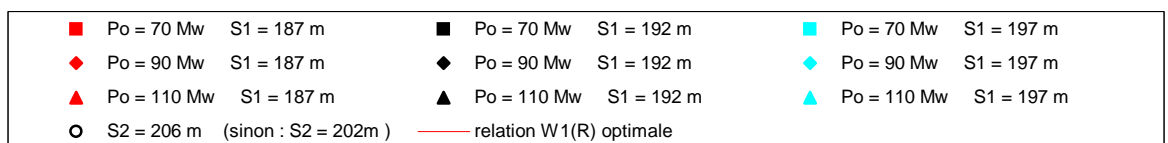
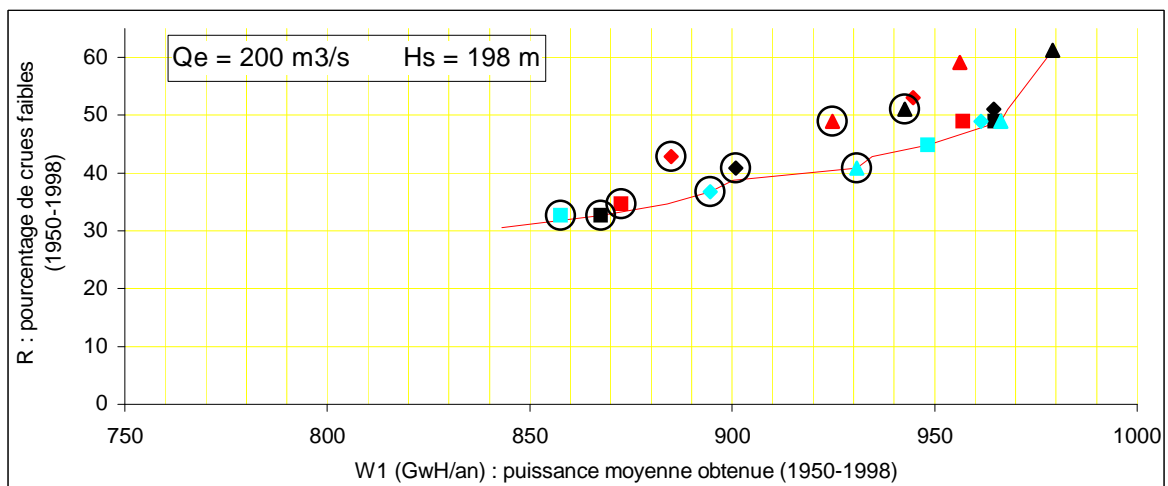
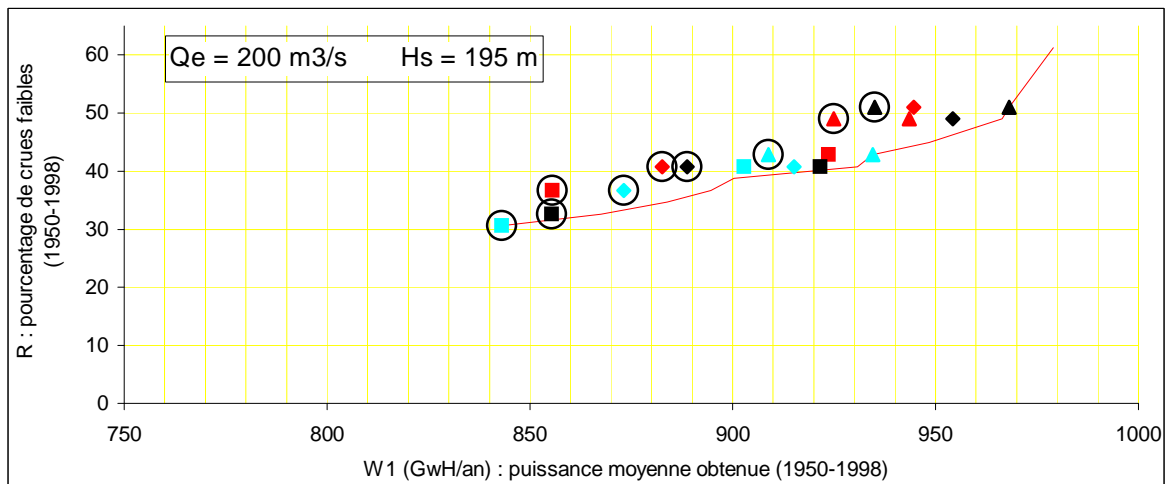
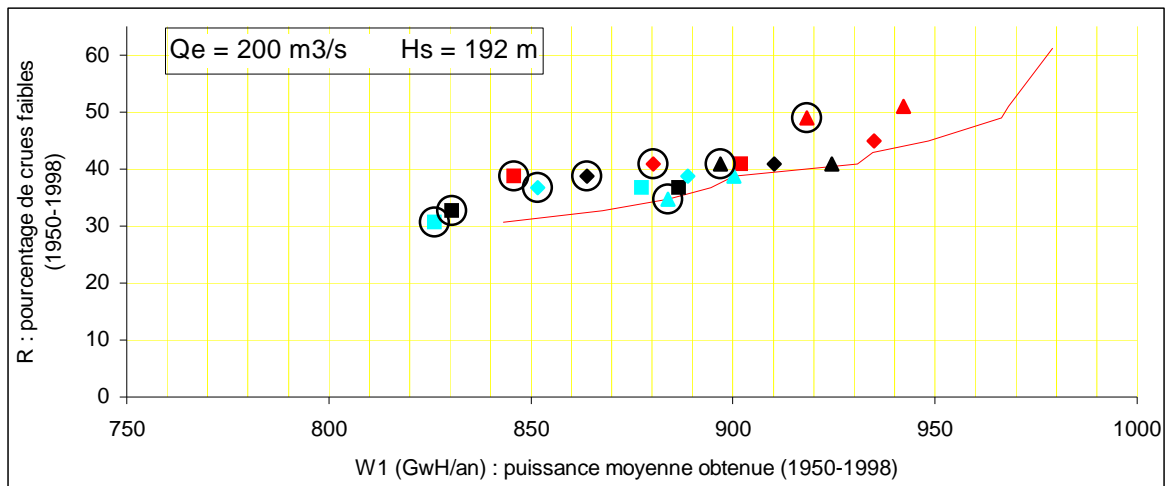


figure 3-2-C : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et W1, énergie annuelle moyenne produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'étiage à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$

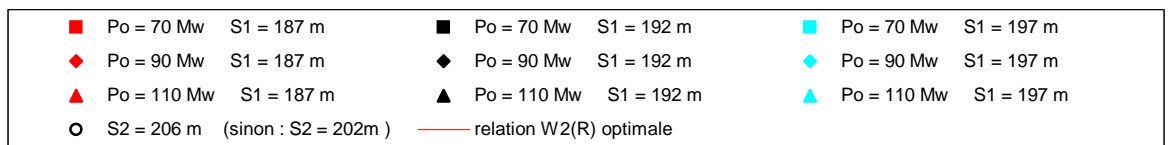
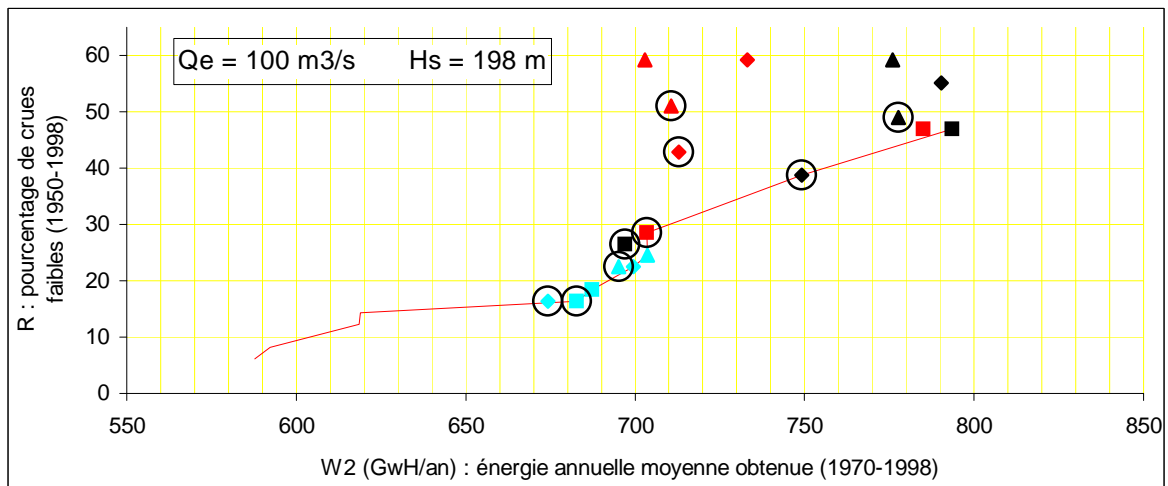
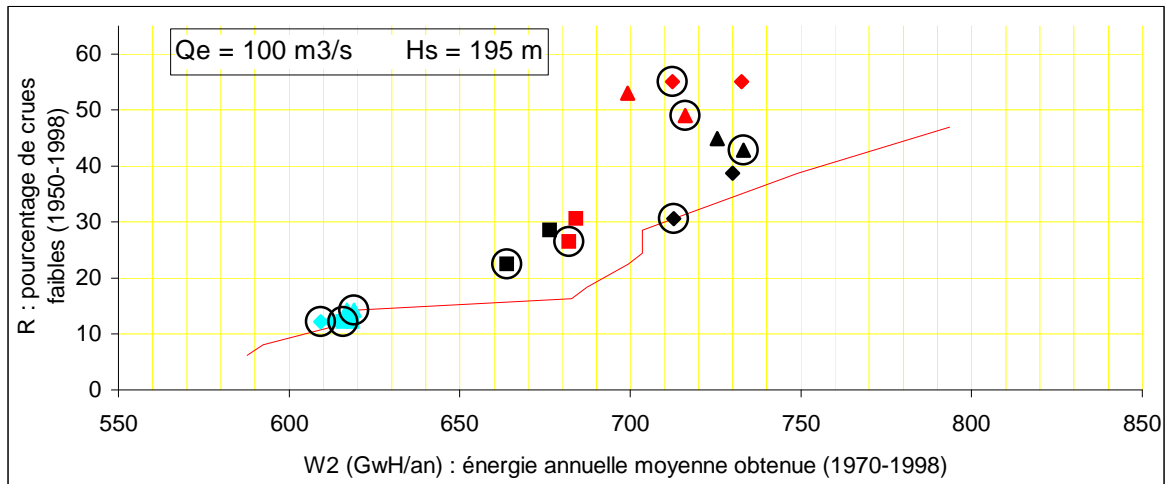
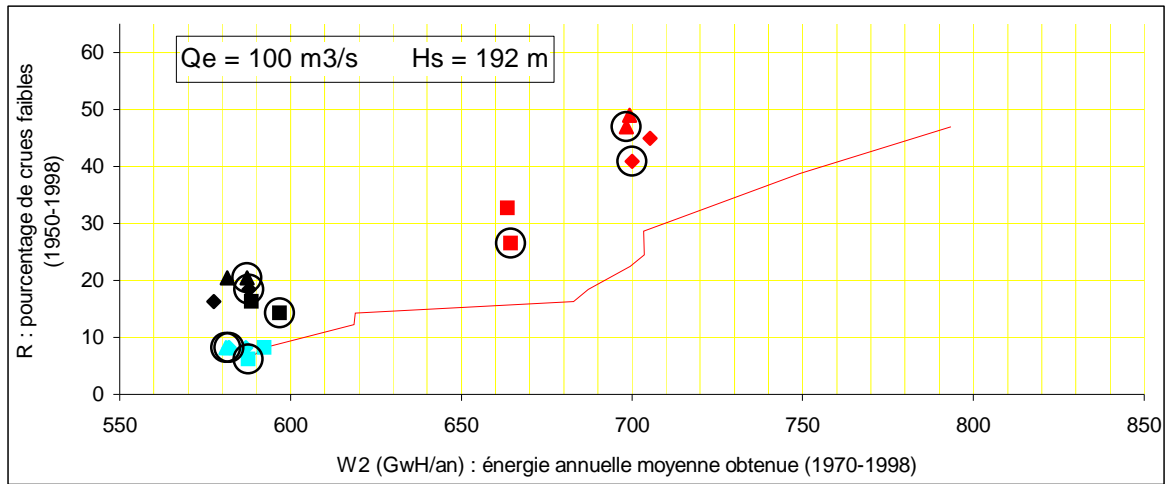
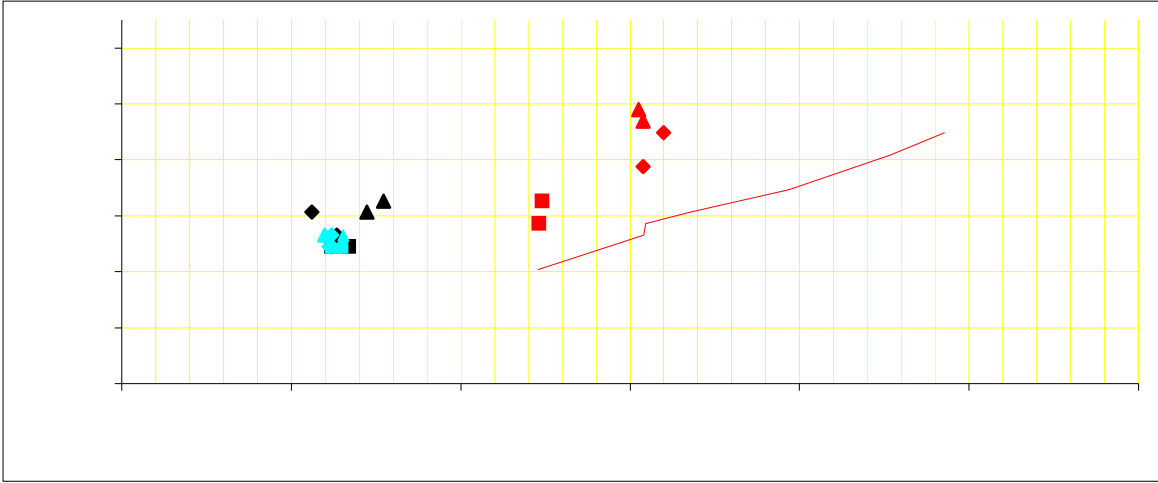


figure 3-2-D : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et W2, énergie annuelle moyenne produite sur la période 1970-1998, dans le cas d'un soutien d'étiage à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$



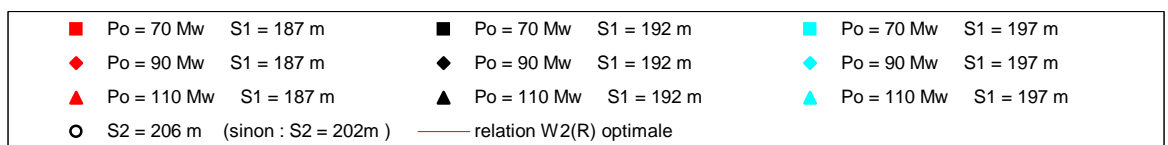
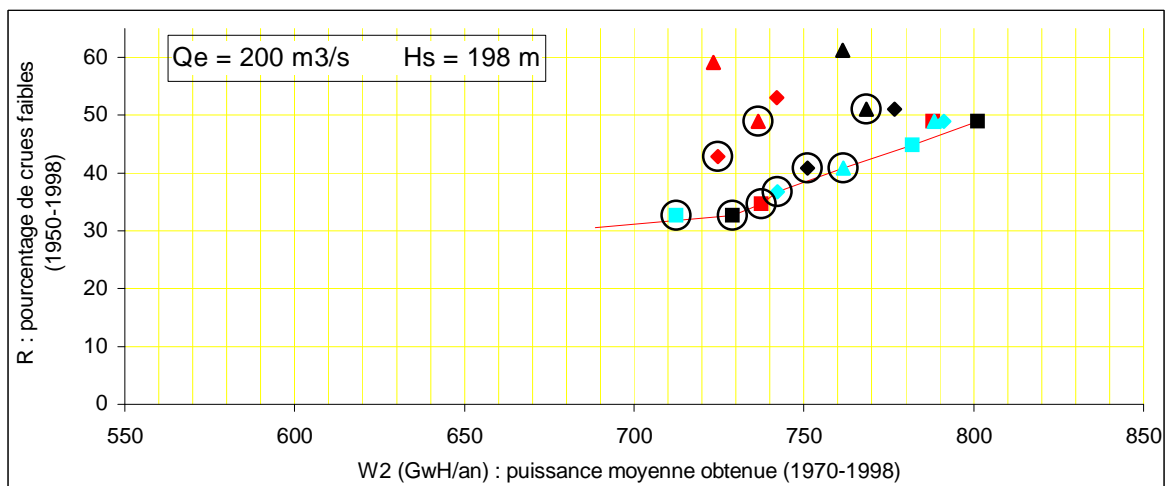
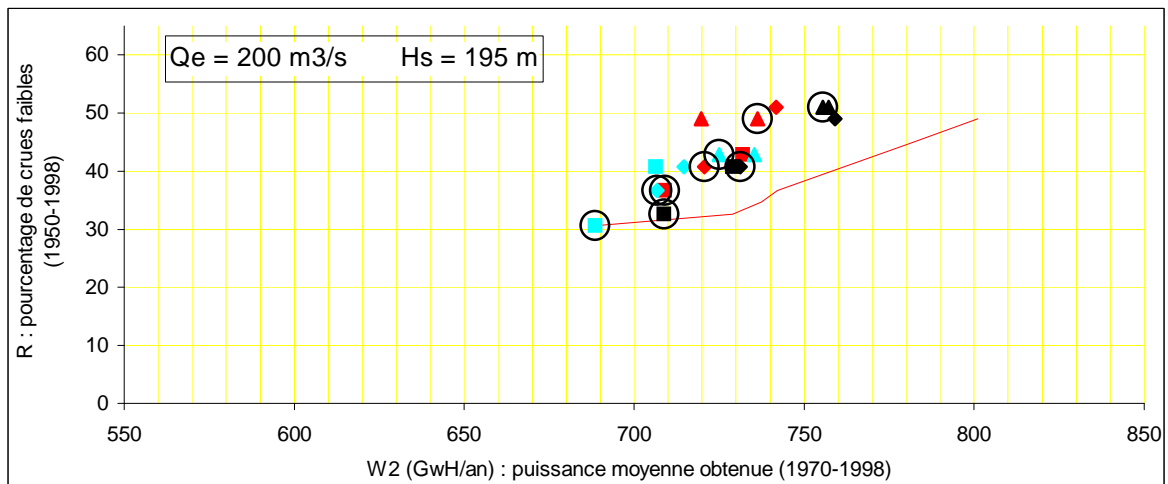
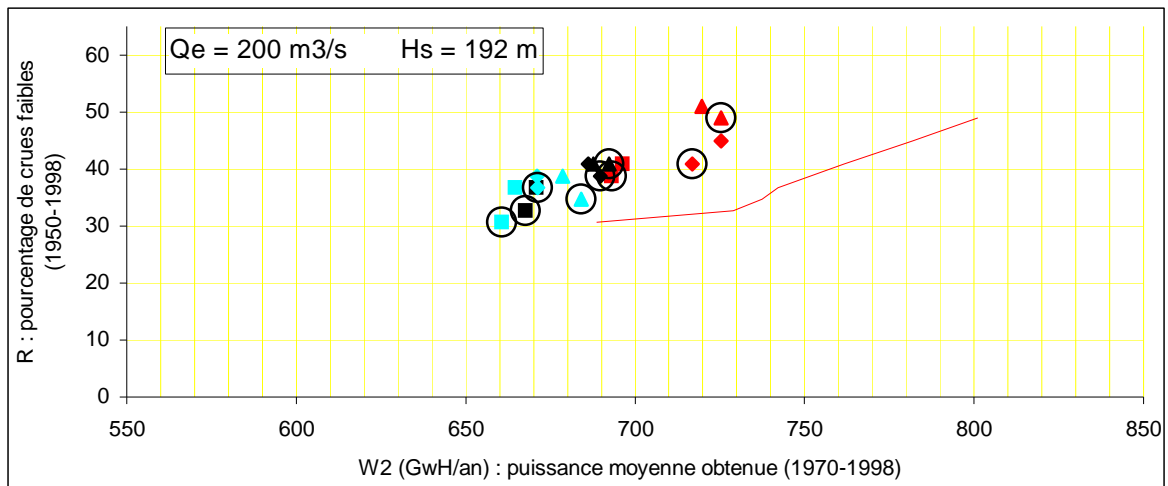


figure 3-2-F : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et W2, énergie annuelle moyenne produite sur la période 1970-1998, dans le cas d'un soutien d'étiage à 200 m<sup>3</sup>/s

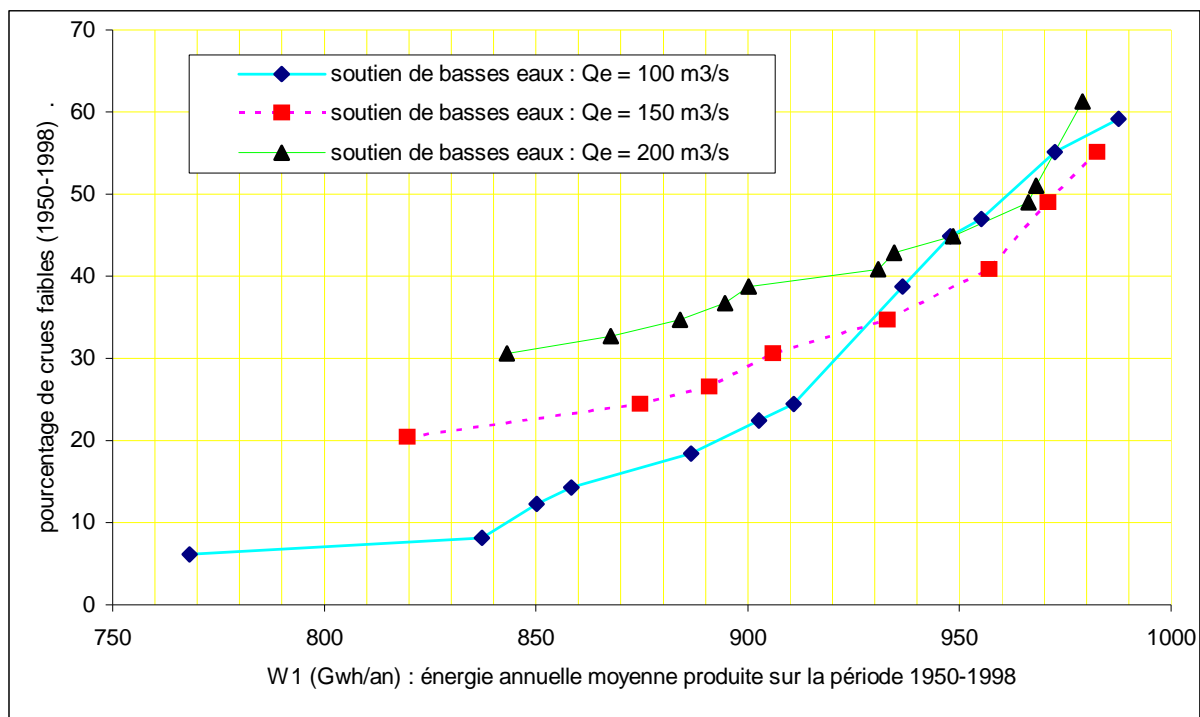


figure 3-2-G : relation R(W1) optimale, donnant la meilleure moyenne d'énergie annuelle produite sur la période 1950-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la même période.

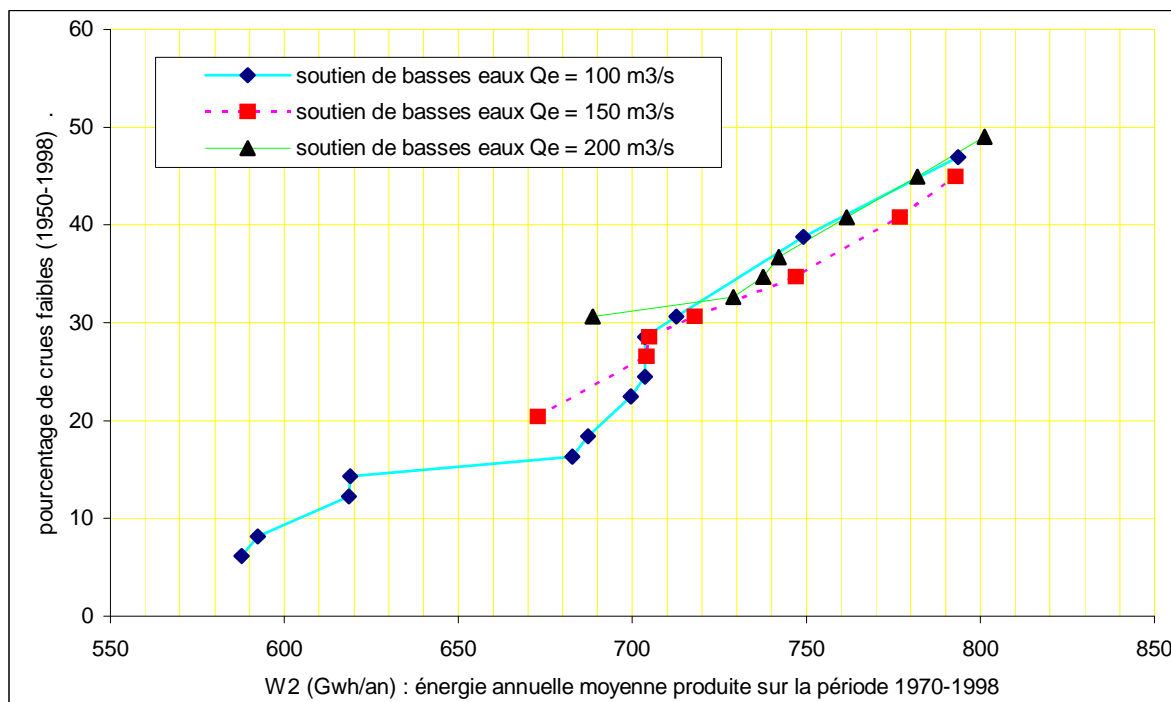


figure 3-2-H : relation R(W2) optimale, donnant la meilleure moyenne d'énergie annuelle produite sur la période 1970-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la période 1950-1998

## **4. ANALYSE DES POSSIBILITES DE SOUTIEN D'ETIAGE A 300 M<sup>3</sup>/S**

### **4.1. OBJECTIF ET METHODE**

Il s'agit ici d'évaluer la possibilité de soutenir le débit d'étiage du Sénégal à Bakel, à hauteur de 300 m<sup>3</sup>/s. On effectue pour cela diverses simulations numériques basées sur les apports en eau de la période 1950-1998.

Dans un premier temps, on calcule la capacité utile de retenue qui aurait été nécessaire pour pouvoir soutenir en permanence le débit du Sénégal à 300 m<sup>3</sup>/s.

La gestion du barrage est ensuite simulée au pas de temps journalier, tout d'abord en envisageant le soutien à 300 m<sup>3</sup>/s comme unique objectif, puis en ajoutant cet objectif aux consignes envisagées plus haut dans l'analyse d'un cas de gestion type. L'analyse des résultats porte sur le soutien d'étiage, la production d'énergie et le soutien de crue.

### **4.2. CAPACITE DE RETENUE NECESSAIRE PERMETTANT UN SOUTIEN PERMANENT A 300 M<sup>3</sup>/S**

Le maintien d'un débit supérieur ou égal à 300 m<sup>3</sup>/s en permanence au niveau de Bakel, nécessite un volume théorique de réserve utile de 24,4 km<sup>3</sup> au niveau de Manantali (Voir Annexe D). Or, la réserve utile existante correspond à la tranche d'eau comprise entre les cotes 187 m (limite inférieure de surface libre ne risquant pas d'endommager le parement amont), et la cote 208,05 m (les tranches d'eau supérieures ne peuvent être conservées de façon durable du fait de l'ouverture inévitable des vannes de déversoir de crue). Cette réserve représente donc un volume de 7,7 km<sup>3</sup>, puisque le stock aux cotes 187 et 208,05 s'élève respectivement à 3,6 et 11,3 km<sup>3</sup>. Sur la base des données de la période 1950-1998, il manque donc un volume de 16,7 km<sup>3</sup> à la réserve utile de Manantali pour pouvoir garantir en permanence à Bakel, un débit supérieur ou égal à 300 m<sup>3</sup>/s.

### **4.3. GESTION ENVISAGEANT LE SOUTIEN A 300 M<sup>3</sup>/S COMME UNIQUE OBJECTIF**

La gestion de la retenue a été simulée au pas de temps journalier en tenant compte de ses caractéristiques réelles, et en supposant le soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s comme unique objectif. Les consignes envisagées sont donc les suivantes, en reprenant les notations du manuel : A1 (maintien de la surface libre en dessous de la cote 210,50 m) ; B1 (maintien de la surface libre au dessus de la cote 187 m) ; A3 (débit sanitaire réservé de 10 m<sup>3</sup>/s à la sortie du barrage) ; A5 (soutien immédiat de basses eaux : 300 m<sup>3</sup>/s à Bakel). Les résultats confirment l'impossibilité de garantir le soutien à 300 m<sup>3</sup>/s, puisqu'un échec est constaté (débit nul ou très largement inférieur à 300 m<sup>3</sup>/s à Bakel, durant 1 à 5 mois consécutifs) 12 années sur 49 (fréquence 24%), avec un épuisement de la réserve utile ces années là.

### **4.4. GESTION ENVISAGEANT LE SOUTIEN A 300 M<sup>3</sup>/S ASSOCIE AUX AUTRES OBJECTIFS**

Le soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s a été simulé sur 54 scénarios de gestion. Ceux-ci sont très comparables aux 162 scénarios envisagés plus haut dans l'étude d'un cas de gestion type, puisqu'ils reprennent la même liste de consignes, en y insérant simplement une consigne de type A5 supplémentaire juste avant la consigne A4 relative au soutien de crue (voir Annexe E).

Les 54 scénarios étudiés diffèrent tous par les valeurs retenues pour les paramètres S1 (187, 192 ou 197 m), S2 (202 ou 206 m), P0 (70, 90 ou 110 Mw) et Hs (192, 195 ou 198 m) concernant

respectivement la consigne relative à la production d'énergie pour les trois premiers, et la consigne relative au soutien de crue pour le dernier.

Les consignes retenues provoquent l'effet suivant pour le soutien d'étiage : tant que la réserve disponible dans le lac se situe au dessus du seuil nécessaire pour garantir le soutien à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  (24 années sur 25), on soutient  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  à Bakel. Dès que la réserve devient insuffisante, on ne soutient plus que  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ainsi, tous les scénarios aboutissent à un débit de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  soutenu à Bakel avec un très faible taux de défaillance, comparable à celui des scénarios étudiés dans le manuel.

Les résultats diffèrent donc d'un scénario à l'autre, essentiellement pour l'énergie produite ( $W1$ , période 1950-1998), la fréquence des crues trop faibles ( $R$ , période 1950-1998, défini dans le manuel), et l'importance des défaillances concernant le soutien à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ces défaillances peuvent être caractérisées par les deux paramètres suivants :

**Nj** : nombre total de jours de la période 1950-1998, pendant lesquels le débit obtenu à Bakel est inférieur à  $225 \text{ m}^3/\text{s}$ , et présente donc un déficit de plus de 25% par rapport à l'objectif de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**R1** : pourcentage des années de la période 1950-1998 présentant de graves défaillances pour le soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , avec un débit inférieur à  $225 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant plus de 100 jours à Bakel.

Le tableau 4.1 donne les résultats obtenus pour les scénarios optimaux suivant la relation  $R(W1)$ , au sens défini plus haut dans l'étude d'un cas de gestion type: ce sont les scénarios qui offrent la plus forte énergie  $W1$  produite pour la plus petite fréquence  $R$  possible de crues trop faibles (inférieures à l'hydrogramme 'ORSTOM1'). On constate qu'avec un soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'augmentation de l'énergie produite s'accompagne d'une fréquence accrue des crues trop faibles. Ce résultat est conforme à ceux qui sont présentés plus haut pour des soutiens d'étiage à 100, 150 ou  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La figure 4.1 permet de comparer les résultats de production d'énergie et de soutien de crue pour les scénarios optimaux de gestion incluant le soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , avec ceux qui ont été obtenus plus haut pour un soutien à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fort logiquement, il apparaît que pour une production d'énergie donnée, les crues trop faibles sont plus fréquentes avec un soutien d'étiage à 300 plutôt qu'à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Avec un soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , la fréquence  $R$  des crues trop faibles est nettement supérieure à celle observée en régime naturel (31%), pour chacun des 54 scénarios testés.

Pour les scénarios optimaux du point de vue de l'énergie ( $W1$ ) et du soutien de crue ( $R$ ), la fréquence  $R1$  des années présentant de graves défaillances pour le soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  se situe entre 35 et 41% (fig.4.2). Ces scénarios ne sont pas optimaux pour le soutien d'étiage.

Les résultats concernant les scénarios optimaux du point de vue du soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , sont donnés dans les tableaux 4.2 à 4.3 et représentés sur les figures 4.3 à 4.4. Pour une fréquence donnée  $R1$  de graves défaillances concernant le soutien d'étiage à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , le tableau 4.2 et la figure 4.3 concernent les scénarios qui donnent le moins possible de crues trop faibles ( $R$ ), alors que le tableau 4.3 et la figure 4.4 concernent ceux qui donnent le plus d'énergie produite ( $W1$ ). Bien qu'optimaux pour le soutien d'étiage, tous ces scénarios présentent de graves défaillances pour cet objectif sur au moins 27% des années de la période 1950-1998. Ils entraînent par ailleurs une fréquence très forte (>43%) des crues insuffisantes.



paramètres définissant les consignes de gestion				énergie moyenne produite par année (Gw h)		fréquence des crues trop faibles	fréquence des années présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel pendant plus de 100 jours	nombre de jours présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel.
Hs	P0	S1	S2	W1	W2	R	R1	Nj
(m)	(Mw)	(m)	(m)	(50-98)	(70-98)	(%)	(%)	
192	90	197	206	899	707	43	39	3735
192	70	197	202	923	709	45	37	3600
192	90	192	202	934	709	47	41	4259
192	70	187	202	948	736	49	39	4070
195	90	192	202	961	750	51	35	3840
195	110	192	202	963	747	53	41	4203
198	110	192	202	975	750	57	39	4100

tableau 4.1 : Résultats obtenus pour les scénarios optimaux du point de vue de la relation R(W1) , offrant la plus forte production d'énergie W1 pour une fréquence R de faibles crues donnée.

- $Q_e$  (m<sup>3</sup>/s) : débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel
- Hs (m) : cote minimale de la surface libre du lac au 20 août, permettant d'engager le soutien de crue annuel.
- Po (w) : puissance électrique demandée
- S1 (m) : cote limite de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne relative à la demande de production d'énergie n'est pas prise en considération.
- S2 (m) : cote limite de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible en fonction de la cote
- W1 (Gwh) : énergie moyenne produite par année sur la période 1950-1998.
- W2 (Gwh) : comme W1, mais sur la période 1970-1998
- R : fréquence des crues trop faibles obtenues

paramètres définissant les consignes de gestion				énergie moyenne produite par année (Gw h)		fréquence des crues trop faibles	fréquence des années présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel pendant plus de 100 jours	nombre de jours présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel.
Hs	P0	S1	S2	W1	W2	R	R1	Nj
(m)	(Mw)	(m)	(m)	(50-98)	(70-98)	(%)	(%)	
195	70	197	206	915	743	47	27	2582
198	110	197	206	946	774	51	29	2901
195	70	192	206	921	744	49	31	3053
195	110	197	202	957	758	51	33	3476
192	90	197	202	927	714	47	35	3772
192	70	197	202	923	709	45	37	3600
192	70	197	206	892	705	43	39	3494
192	70	192	206	899	707	45	41	3899
192	110	192	202	939	708	49	43	4511

tableau 4.2 : Résultats obtenus pour les scénarios qui, pour une valeur de R1 donnée (défaillance de soutien à 300 m<sup>3</sup>/s), donnent les plus petites valeurs de R (fréquence de crues trop faibles).

paramètres définissant les consignes de gestion				énergie moyenne produite par année (Gw h)		fréquence des crues trop faibles	fréquence des années présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel pendant plus de 100 jours	nombre de jours présentant un débit inférieur à 225 m <sup>3</sup> /s à Bakel.
Hs	P0	S1	S2	W1	W2	R	R1	Nj
(m)	(Mw)	(m)	(m)	(50-98)	(70-98)	(%)	(%)	
198	90	197	206	942	778	51	27	2471
198	110	197	206	946	774	51	29	2901
198	90	197	202	961	760	55	31	3093
198	110	197	202	963	758	55	33	3390
198	90	192	202	971	755	57	35	3733
192	70	197	202	923	709	45	37	3600
198	110	192	202	975	750	57	39	4100
195	110	192	202	963	747	53	41	4203
192	110	187	202	943	720	55	43	4803

tableau 4.3 : Résultats obtenus pour les scénarios qui, pour une valeur de R1 donnée (défaillance de soutien à 300 m<sup>3</sup>/s), donnent les plus fortes valeurs de W1 (énergie produite)

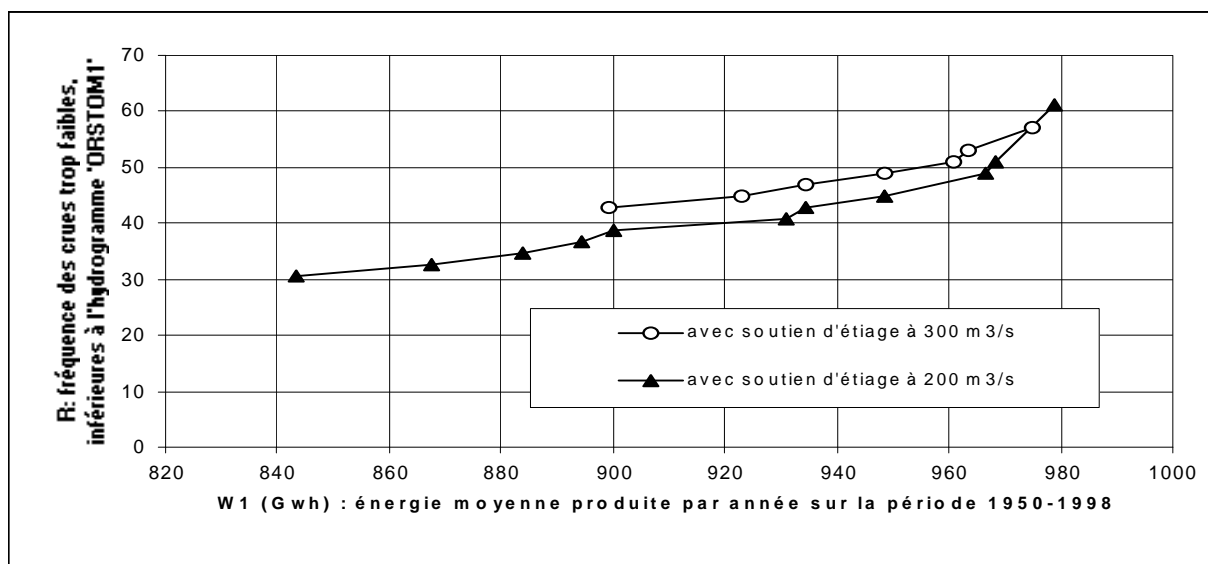


figure 4.1 : comparaison des résultats obtenus pour les scénarios optimaux (offrant le plus d'énergie produite pour le moins de faibles crues possible), avec un soutien d'étiage à 200 m<sup>3</sup>/s ou 300 m<sup>3</sup>/s

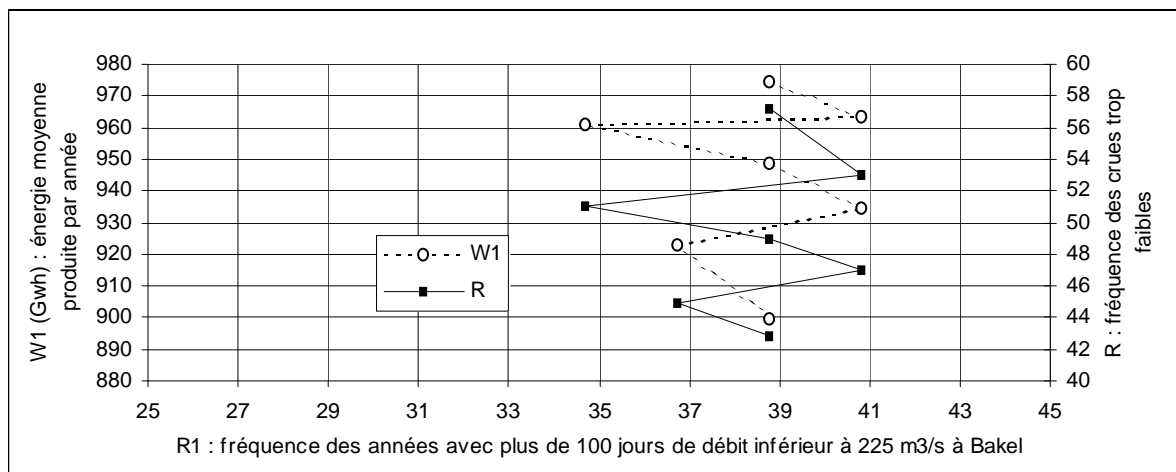


figure 4.2 : Résultats obtenus pour les scénarios optimaux (donnant les plus fortes valeurs d'énergie W1 pour une fréquence R donnée de crues trop faibles)

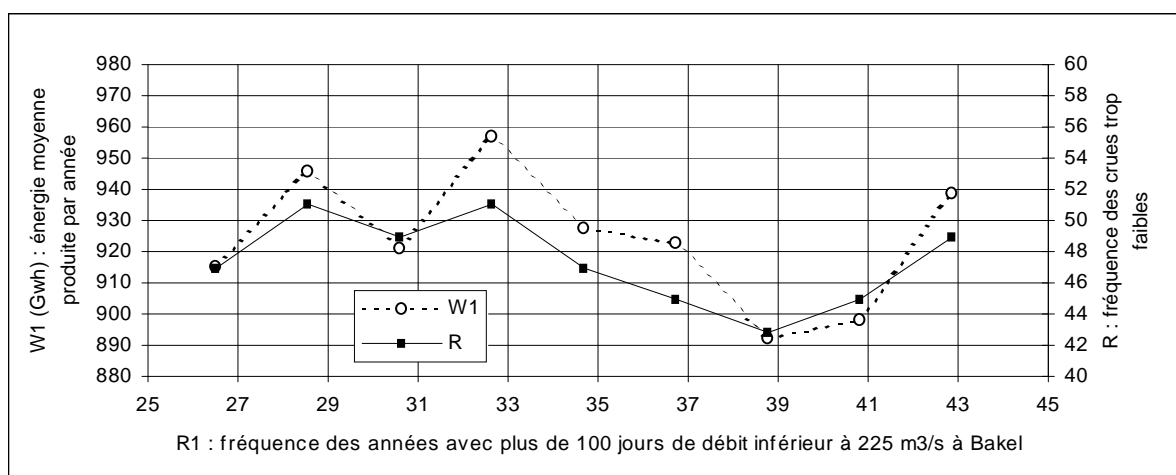


figure 4.3 : Résultats obtenus pour les scénarios présentant, pour R1 donné (fréquence des défaillances pour le soutien à 300 m³/s), les plus petites valeurs de R (fréquence de crue trop faible)

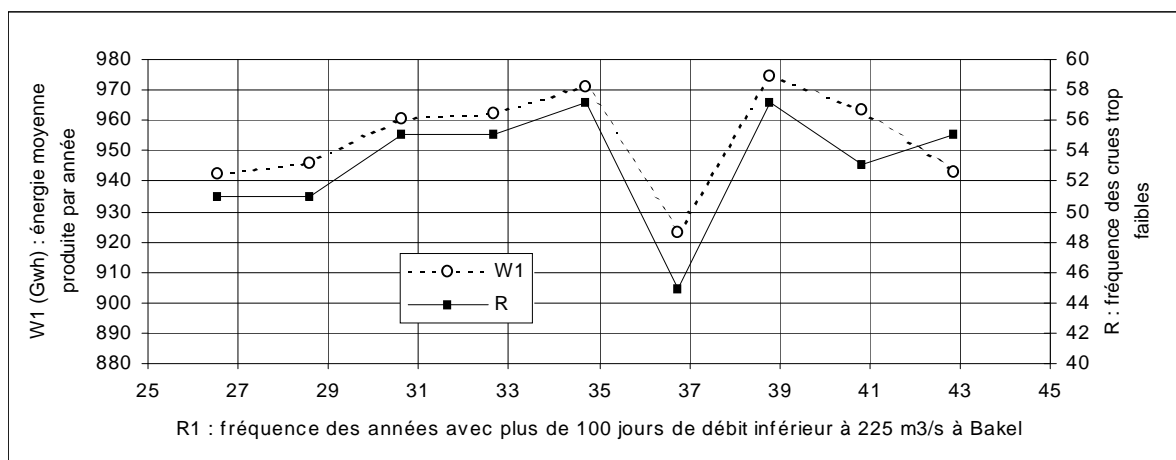


figure 4.4 : Résultats obtenus pour les scénarios présentant, Pour R1 donné (fréquence des défaillances pour le soutien à 300m³/s), les plus fortes valeurs de W1 (énergie produite)

# ANNEXES

## ANNEXE A : LISTE DES PARAMETRES DE GESTION ET DES VARIABLES UTILISES

### *Variables*

E (m/s) :	taux de perte par évaporation
H (m) :	cote de la surface libre du lac de Manantali, mesurée dans le système NG
Hd (m) :	cote limite de déversement de l'ouvrage (= 208,05m)
Int1 (m <sup>3</sup> /s) :	débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes
Int2 (m <sup>3</sup> /s) :	débit des apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel
Jc (date) :	jour du plus récent débit observé connu à Bakel ou à Kayes
Jo (date) :	jour pour lequel on désire calculer le réglage de débit du barrage
n1 (jour) :	temps de propagation des débits entre Manantali et Kayes
n2 (jour) :	temps de propagation des débits entre Kayes et Bakel
Nss :	nombre d'années sans soutien de crue sur la période 1950-1998
Nsi :	nombre d'années avec soutien de crue incomplet sur la période 1950-1998
P (w) :	puissance électrique que l'on vise à produire, quand le niveau de la surface libre du lac se situe entre les seuils S1 et S2
Pe (w) :	puissance électrique produite
Pmax (w) :	puissance maximale productible , dans le cas d'une fermeture de la vidange de fond, et d'une ouverture minimale de l'évacuateur de crue. Pmax est une fonction croissante de la cote H dans la retenue.
Pt (w) :	puissance maximale productible, pour une cote H et un débit total évacué Qt donnés
Qb (m <sup>3</sup> /s) :	débit observé dans le Sénégal à Bakel
Qe (m <sup>3</sup> /s) :	débit turbiné
Qe1 (m <sup>3</sup> /s) :	débit turbiné permettant de produire la puissance Pt
Qk (m <sup>3</sup> /s) :	débit observé à Kayes
Qlâché (m <sup>3</sup> /s) :	débit effectivement lâché du barrage de Manantali
Qmaxo (m <sup>3</sup> /s) :	débit total lâché de l'ouvrage lorsque tous ses organes d'évacuation sont ouverts au maximum
Qmax (m <sup>3</sup> /s) :	valeur maximale imposée par le respect d'une contrainte ou d'une consigne de gestion, sur le débit total lâché du barrage

- Qmin (m<sup>3</sup>/s) : valeur minimale imposée par le respect d'une contrainte ou d'une consigne de gestion, sur le débit total lâché du barrage
- Qmino (m<sup>3</sup>/s) : débit total lâché de l'ouvrage lorsque tous les organes d'évacuation sont soit fermés (turbines, vidange de fond), soit ouverts au minimum (vannes d'évacuateur de crue).
- Qbp (m<sup>3</sup>/s) : débit objectif défini pour le Sénégal à Bakel
- Qsou (m<sup>3</sup>/s) : débit naturel du Bafing à la station fictive de Soukoutali
- Qt (m<sup>3</sup>/s) : débit total à lâcher du barrage, par l'ensemble de ses organes d'évacuation
- Qt1 (m<sup>3</sup>/s) : valeur minimale de débit total lâché du barrage, permettant de respecter les consignes de gestion
- Qt2 (m<sup>3</sup>/s) : valeur maximale de débit total lâché du barrage, permettant de respecter les consignes de gestion
- Qtc (m<sup>3</sup>/s) : débit total à lâcher du barrage, souhaitable pour faire coïncider le débit du Sénégal avec un hydrogramme objectif prédéfini. Ce débit est calculé à l'aide des modèles de propagation, corrigés si possible en boucle fermée.
- R : pourcentage d'années présentant une crue trop faible
- V (m<sup>3</sup>) : volume d'eau emmagasiné dans la retenue
- S (m<sup>2</sup>) : superficie de la retenue
- W1 (Gwh/an) : énergie produite par année, moyenne sur la période 1950-1998
- W2 (Gwh/an) : énergie produite par année, moyenne sur la période 1970-1998

### ***Paramètres de gestion***

- Ald : année de début de la période de référence sur laquelle est établi, pour le laminage de crue, un limnigramme de cote limite maximale à respecter dans le lac.
- Alf : année de fin de la période de référence sur laquelle est établi, pour le laminage de crue, un limnigramme de cote limite maximale à respecter dans le lac.
- Asd : année de début de la période de référence sur laquelle est établi, pour le soutien d'étiage, un limnigramme de cote limite minimale à respecter dans le lac.
- Asf : année de fin de la période de référence sur laquelle est établi, pour le soutien d'étiage, un limnigramme de cote limite minimale à respecter dans le lac.
- Het : limite au dessus de laquelle le niveau du lac doit se situer avec une fréquence Te, pour que le soutien d'étiage souhaité soit réalisable.
- HI (m) : cote limite à respecter dans le lac
- Hlam : limite en dessous de laquelle le niveau du lac doit se situer avec une fréquence TI, pour que le laminage souhaité soit réalisable.
- Hmax (m) : cote limite maximale autorisée pour le lac de Manantali (210,50m). Le dépassement de cette cote peut entraîner, en cas de forte houle, un risque grave de submersion des digues de l'ouvrage.
- Hmin (m) : cote limite minimale de surface libre, autorisée pour le lac de Manantali. En dessous de cette cote, la houle est susceptible de dégrader à moyen terme le parement amont des digues de l'ouvrage

Hs (m) :	cote minimale de la surface libre du lac à la date Tc, permettant d'engager le soutien de crue annuel.
Po (w) :	puissance électrique demandée
Pr (w) :	puissance électrique maximale que le réseau peut absorber
Qc (m3/s) :	débit objectif de crue, défini pour le Sénégal à Bakel
Qet (m3/s) :	débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel
Ql1 (m3/s) :	débit limite maximal qu'on souhaite ne pas voir dépassé à la sortie du barrage
Ql2 (m3/s) :	débit limite maximal qu'on souhaite ne pas voir dépassé à Bakel
Qr (m3/s) :	débit sanitaire réservé, imposé à la sortie du barrage.
S1 (m) :	cote limite de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne relative à la demande de production d'énergie n'est pas prise en considération.
S2 (m) :	cote limite de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible en fonction de la cote
Tc :	date à laquelle doit être prise la décision annuelle de soutien de crue. Pour tenir compte du délai de propagation des débits entre Manantali et Bakel, cette date précède de quelques jours le début de l'hydrogramme objectif défini à Bakel.
Te :	fréquence minimale de réussite souhaitée pour le soutien d'étiage envisagé
Tl :	fréquence minimale de réussite souhaitée pour le laminage de crue envisagé

## **ANNEXE B : LIMNIGRAMMES DE COTES LIMITES MAXIMALES A RESPECTER DANS LE LAC, POUR PERMETTRE DE LAMINER LES CRUES FUTURES**

Les cotes limites maximales à respecter dans le lac de Manantali peuvent être calculées à l'aide du logiciel Simulsen selon le principe suivant :

- On élabore dans un premier temps la chronique de lâchers journalières maximales théoriques, qui aurait été compatibles avec le laminage de crues souhaité sur une période d'observation donnée. Ce calcul ne tient compte d'aucune limitation imposée sur les lâchers par les caractéristiques du barrage et de la retenue.
- On calcule ensuite en sens chronologique inverse, la chronique de niveaux du lac qui aurait été compatible avec les lâchers maximales calculées ci-dessus. Ce calcul est réitéré jusqu'à ce que la cote imposée pour initialiser le calcul, coïncide avec la médiane des cotes obtenues pour le même quantième. Il tient compte des différentes caractéristiques du barrage et de la retenue.
- Enfin, pour chacun des 365 jours de l'année, les cotes ainsi obtenues sont classées sur toute la période. On peut alors élaborer des limnigrammes isofréquence, qui représentent les niveaux à ne pas dépasser dans le lac, correspondant à différents risques d'échec pour le laminage souhaité.

On donne ci-dessus quelques exemples de limnigrammes limites maximaux, tous calculés sur la période 1950-1998. Ils correspondent aux laminages de crue suivants :

4500 m<sup>3</sup>/s dans le Sénégal à Bakel : tableaux B-1 et B-2, et figure B-1

1000 m<sup>3</sup>/s dans le Bafing à la sortie du barrage : tableaux B-3 et B-4, et figure B-2

2000 m<sup>3</sup>/s dans le Bafing à la sortie du barrage : tableaux B-5 et B-6, et figure B-3.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nove	dece
1	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,66	207,41	208,69	210,50	210,50
2	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,43	207,63	208,76	210,50	210,50
3	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,22	207,78	209,36	210,50	210,50
4	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	208,87	207,96	209,54	210,50	210,50
5	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	208,45	208,13	210,05	210,50	210,50
6	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	208,08	208,28	210,16	210,50	210,50
7	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,82	208,43	210,50	210,50	210,50
8	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,55	208,57	210,50	210,50	210,50
9	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,27	208,72	210,50	210,50	210,50
10	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,96	208,87	210,50	210,50	210,50
11	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,71	208,99	210,50	210,50	210,50
12	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,50	209,12	210,50	210,50	210,50
13	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,27	209,19	210,50	210,50	210,50
14	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,02	209,24	210,50	210,50	210,50
15	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,83	209,33	210,50	210,50	210,50
16	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,70	209,42	210,50	210,50	210,50
17	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,51	209,49	210,50	210,50	210,50
18	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,34	209,51	210,50	210,50	210,50
19	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,30	209,48	210,50	210,50	210,50
20	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,43	209,47	210,50	210,50	210,50
21	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,60	209,48	210,50	210,50	210,50
22	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,85	209,48	210,50	210,50	210,50
23	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,08	209,34	210,50	210,50	210,50
24	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,09	209,17	210,50	210,50	210,50
25	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,06	209,13	210,50	210,50	210,50
26	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,22	209,18	210,50	210,50	210,50
27	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,37	208,98	210,50	210,50	210,50
28	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,55	208,88	210,50	210,50	210,50
29	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,48	206,73	208,77	210,50	210,50	210,50
30	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,20	206,96	208,70	210,50	210,50	210,50
31	210,50		210,50		210,50		209,90	207,15		210,50		210,50
moy	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	206,83				



	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	208,44	206,02	208,19	210,50	210,50
2	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	208,13	206,25	208,27	210,50	210,50
3	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,81	206,48	208,45	210,50	210,50
4	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,49	206,77	208,65	210,50	210,50
5	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	207,21	207,04	209,16	210,50	210,50
6	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,98	207,30	209,28	210,50	210,50
7	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,79	207,55	209,60	210,50	210,50
8	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,65	207,71	209,64	210,50	210,50
9	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,49	207,78	209,67	210,50	210,50
10	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,36	207,81	209,69	210,50	210,50
11	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,26	207,83	209,72	210,50	210,50
12	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,19	207,85	209,81	210,50	210,50
13	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	206,08	207,82	209,90	210,50	210,50
14	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,87	207,79	210,44	210,50	210,50
15	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,65	207,82	210,50	210,50	210,50
16	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,41	207,89	210,50	210,50	210,50
17	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,12	208,06	210,50	210,50	210,50
18	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	204,94	208,15	210,50	210,50	210,50
19	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	204,91	208,24	210,50	210,50	210,50
20	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,01	208,36	210,50	210,50	210,50
21	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	205,08	208,50	210,50	210,50	210,50
22	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,43	205,23	208,62	210,50	210,50	210,50
23	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,23	205,62	208,72	210,50	210,50	210,50
24	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,09	205,87	208,99	210,50	210,50	210,50
25	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,98	205,94	209,00	210,50	210,50	210,50
26	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,86	205,78	208,82	210,50	210,50	210,50
27	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,72	205,67	208,68	210,50	210,50	210,50
28	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,59	205,61	208,60	210,50	210,50	210,50
29	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	209,44	205,58	208,38	210,50	210,50	210,50
30	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	209,08	205,63	208,23	210,50	210,50	210,50
31	210,50		210,50		210,50		208,75	205,78		210,50		210,50
moy	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,25	206,11	207,90	209,97	210,50	210,50

tableau B-2 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Sénégal à Bakel à 4500 m<sup>3</sup>/s . Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner 1 fois sur 50, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Calcul statistique effectué sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nove	dece
1	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	208,59	204,03	200,88	203,86	208,39	209,77	209,76
2	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	208,45	203,89	200,84	204,06	208,49	209,77	209,75
3	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	208,32	203,76	200,82	204,23	208,61	209,77	209,76
4	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	208,18	203,62	200,79	204,40	208,69	209,77	209,75
5	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	208,05	203,46	200,77	204,59	208,73	209,77	209,76
6	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	207,89	203,31	200,87	204,78	208,76	209,77	209,75
7	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	207,73	203,16	200,95	204,98	208,79	209,77	209,76
8	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	207,58	203,03	201,01	205,16	208,83	209,77	209,75
9	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	207,43	202,91	201,04	205,34	208,87	209,76	209,76
10	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	207,28	202,80	201,06	205,50	208,97	209,77	209,75
11	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	207,12	202,70	201,10	205,68	209,08	209,76	209,76
12	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	206,96	202,61	201,14	205,85	209,21	209,77	209,75
13	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	206,80	202,51	201,16	206,02	209,34	209,76	209,76
14	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	206,64	202,41	201,17	206,18	209,46	209,77	209,75
15	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	206,49	202,30	201,20	206,38	209,53	209,76	209,76
16	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	206,34	202,19	201,28	206,58	209,54	209,77	209,75
17	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	206,18	202,10	201,33	206,80	209,61	209,76	209,76
18	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	206,02	202,01	201,38	207,01	209,65	209,76	209,75
19	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	205,86	201,94	201,45	207,16	209,68	209,76	209,76
20	209,76	209,75	209,75	209,76	209,76	205,70	201,86	201,56	207,27	209,70	209,76	209,75
21	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	205,54	201,78	201,67	207,40	209,70	209,76	209,76
22	209,76	209,75	209,75	209,76	209,75	205,39	201,69	201,80	207,54	209,71	209,76	209,75
23	209,75	209,76	209,76	209,75	209,75	205,24	201,61	202,00	207,68	209,72	209,76	209,76
24	209,76	209,75	209,75	209,76	209,71	205,09	201,51	202,25	207,81	209,73	209,76	209,75
25	209,75	209,76	209,76	209,75	209,57	204,93	201,42	202,48	207,93	209,73	209,76	209,76
26	209,76	209,75	209,75	209,76	209,43	204,78	201,33	202,71	208,05	209,74	209,75	209,75
27	209,75	209,76	209,76	209,75	209,29	204,63	201,24	202,94	208,14	209,75	209,76	209,76
28	209,76	209,75	209,75	209,76	209,15	204,47	201,17	203,13	208,23	209,77	209,75	209,75
29	209,75		209,76	209,75	209,01	204,32	201,08	203,30	208,27	209,76	209,76	209,76
30	209,76		209,75	209,76	208,87	204,17	201,00	203,47	208,33	209,77	209,75	209,75
31	209,75		209,76		208,73		200,94	203,64		209,77		209,76
moy	209,76	209,76	209,76	209,76	209,62	206,41	202,30	201,65	206,37	209,33	209,76	209,75

Tableau B-3 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminer à 1000 m<sup>3</sup>/s les crues du Bafing à la sortie du barrage . Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner 1 fois sur 25, l'impossibilité de laminer au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Calcul statistique effectué sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	208,37	203,34	200,00	203,10	207,88	209,77	209,75
2	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	208,23	203,19	200,01	203,28	207,98	209,76	209,75
3	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	208,08	203,03	200,13	203,42	208,09	209,77	209,75
4	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	207,92	202,88	200,28	203,56	208,23	209,76	209,75
5	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	207,75	202,73	200,42	203,71	208,37	209,77	209,75
6	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	207,56	202,59	200,52	203,86	208,51	209,76	209,75
7	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	207,37	202,44	200,61	204,02	208,63	209,76	209,75
8	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	207,18	202,31	200,71	204,16	208,75	209,76	209,75
9	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,98	202,20	200,76	204,30	208,86	209,76	209,75
10	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,79	202,07	200,79	204,47	208,93	209,76	209,75
11	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,60	201,96	200,82	204,67	208,99	209,76	209,75
12	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,41	201,84	200,86	204,85	209,09	209,76	209,75
13	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,23	201,73	200,89	205,04	209,21	209,76	209,75
14	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	206,04	201,61	200,94	205,24	209,35	209,76	209,75
15	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,87	201,50	201,01	205,46	209,45	209,76	209,75
16	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,70	201,38	201,07	205,69	209,51	209,76	209,75
17	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,54	201,26	201,14	205,94	209,54	209,76	209,75
18	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,37	201,14	201,23	206,19	209,54	209,75	209,75
19	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,20	201,03	201,35	206,40	209,54	209,75	209,75
20	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	205,03	200,92	201,48	206,59	209,55	209,75	209,75
21	209,75	209,75	209,75	209,75	209,75	204,87	200,81	201,63	206,77	209,56	209,75	209,75
22	209,75	209,75	209,75	209,75	209,70	204,73	200,71	201,78	206,94	209,58	209,75	209,75
23	209,75	209,75	209,75	209,75	209,62	204,58	200,63	201,87	207,09	209,59	209,75	209,75
24	209,75	209,75	209,75	209,75	209,52	204,43	200,54	201,99	207,22	209,61	209,75	209,75
25	209,75	209,75	209,75	209,75	209,38	204,28	200,47	202,15	207,35	209,62	209,75	209,75
26	209,75	209,75	209,75	209,75	209,23	204,12	200,39	202,30	207,44	209,66	209,75	209,75
27	209,75	209,75	209,75	209,75	209,09	203,96	200,33	202,46	207,50	209,70	209,75	209,75
28	209,75	209,75	209,75	209,75	208,94	203,81	200,25	202,59	207,59	209,74	209,75	209,75
29	209,75		209,75	209,75	208,80	203,65	200,18	202,71	207,68	209,75	209,75	209,75
30	209,75		209,75	209,75	208,65	203,49	200,12	202,82	207,78	209,77	209,75	209,75
31	209,75		209,75		208,51		200,05	202,94		209,76		209,75
moy	209,75	209,75	209,75	209,75	209,55	205,87	201,47	201,30	205,58	209,17	209,76	209,75

Tableau B-4 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminer à 1000 m<sup>3</sup>/s les crues du Bafing à la sortie du barrage . Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner 1 fois sur 50, l'impossibilité de laminer au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Calcul statistique effectué sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,48	210,44	210,50	210,50
2	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,45	210,48	210,43	210,50	210,50
3	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,45	210,47	210,45	210,50	210,50
4	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,46	210,47	210,49	210,50	210,50
5	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,46	210,47	210,50	210,50	210,50
6	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,49	210,50	210,50	210,50
7	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,50	210,50	210,50
8	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,50	210,50	210,50
9	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,50	210,50	210,50
10	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,46	210,50	210,50	210,50
11	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,41	210,46	210,50	210,50	210,50
12	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,36	210,45	210,50	210,50	210,50
13	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,30	210,44	210,50	210,50	210,50
14	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,26	210,44	210,50	210,50	210,50
15	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,21	210,44	210,50	210,50	210,50
16	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,14	210,44	210,50	210,50	210,50
17	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,10	210,46	210,50	210,50	210,50
18	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,07	210,48	210,50	210,50	210,50
19	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,05	210,48	210,50	210,50	210,50
20	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,10	210,50	210,50	210,50	210,50
21	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,15	210,50	210,50	210,50	210,50
22	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,17	210,50	210,50	210,50	210,50
23	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,24	210,50	210,50	210,50	210,50
24	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,30	210,50	210,50	210,50	210,50
25	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,33	210,50	210,50	210,50	210,50
26	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,37	210,50	210,50	210,50	210,50
27	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,42	210,50	210,50	210,50	210,50
28	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,46	210,50	210,50	210,50	210,50
29	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,50	210,50	210,50	210,50
30	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,47	210,48	210,50	210,50	210,50
31	210,50		210,50		210,50		210,50	210,46		210,50		210,50
moy	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,34	210,48	210,49	210,50	210,50

Tableau B-5 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier à 2000 m<sup>3</sup>/s les crues du Bafing à la sortie du barrage . Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner 1 fois sur 25, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Calcul statistique effectué sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,40	210,44	210,36	210,50	210,50
2	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,40	210,45	210,33	210,50	210,50
3	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,40	210,44	210,34	210,50	210,50
4	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,41	210,43	210,37	210,50	210,50
5	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,43	210,43	210,40	210,50	210,50
6	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,40	210,45	210,43	210,50	210,50
7	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,36	210,43	210,46	210,50	210,50
8	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,32	210,40	210,48	210,50	210,50
9	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,28	210,36	210,49	210,50	210,50
10	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,21	210,34	210,50	210,50	210,50
11	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,16	210,35	210,49	210,50	210,50
12	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,10	210,34	210,49	210,50	210,50
13	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,06	210,33	210,50	210,50	210,50
14	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,01	210,34	210,50	210,50	210,50
15	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,98	210,36	210,50	210,50	210,50
16	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,97	210,39	210,50	210,50	210,50
17	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,95	210,43	210,50	210,50	210,50
18	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,98	210,45	210,50	210,50	210,50
19	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,02	210,47	210,50	210,50	210,50
20	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,00	210,49	210,50	210,50	210,50
21	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,97	210,49	210,50	210,50	210,50
22	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	209,97	210,49	210,50	210,50	210,50
23	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,07	210,50	210,50	210,50	210,50
24	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,20	210,50	210,50	210,50	210,50
25	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,30	210,49	210,50	210,50	210,50
26	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,35	210,49	210,50	210,50	210,50
27	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,48	210,40	210,49	210,50	210,50	210,50
28	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,39	210,42	210,49	210,50	210,50	210,50
29	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,35	210,40	210,47	210,50	210,50	210,50
30	210,50		210,50	210,50	210,50	210,50	210,33	210,40	210,42	210,50	210,50	210,50
31	210,50		210,50		210,50		210,36	210,41		210,50		210,50
moy	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,50	210,48	210,22	210,43	210,47	210,50	210,50

Tableau B-6 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminer à 2000 m<sup>3</sup>/s les crues du Bafing à la sortie du barrage . Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner 1 fois sur 50, l'impossibilité de laminer au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Calcul statistique effectué sur la période 1950-1998.

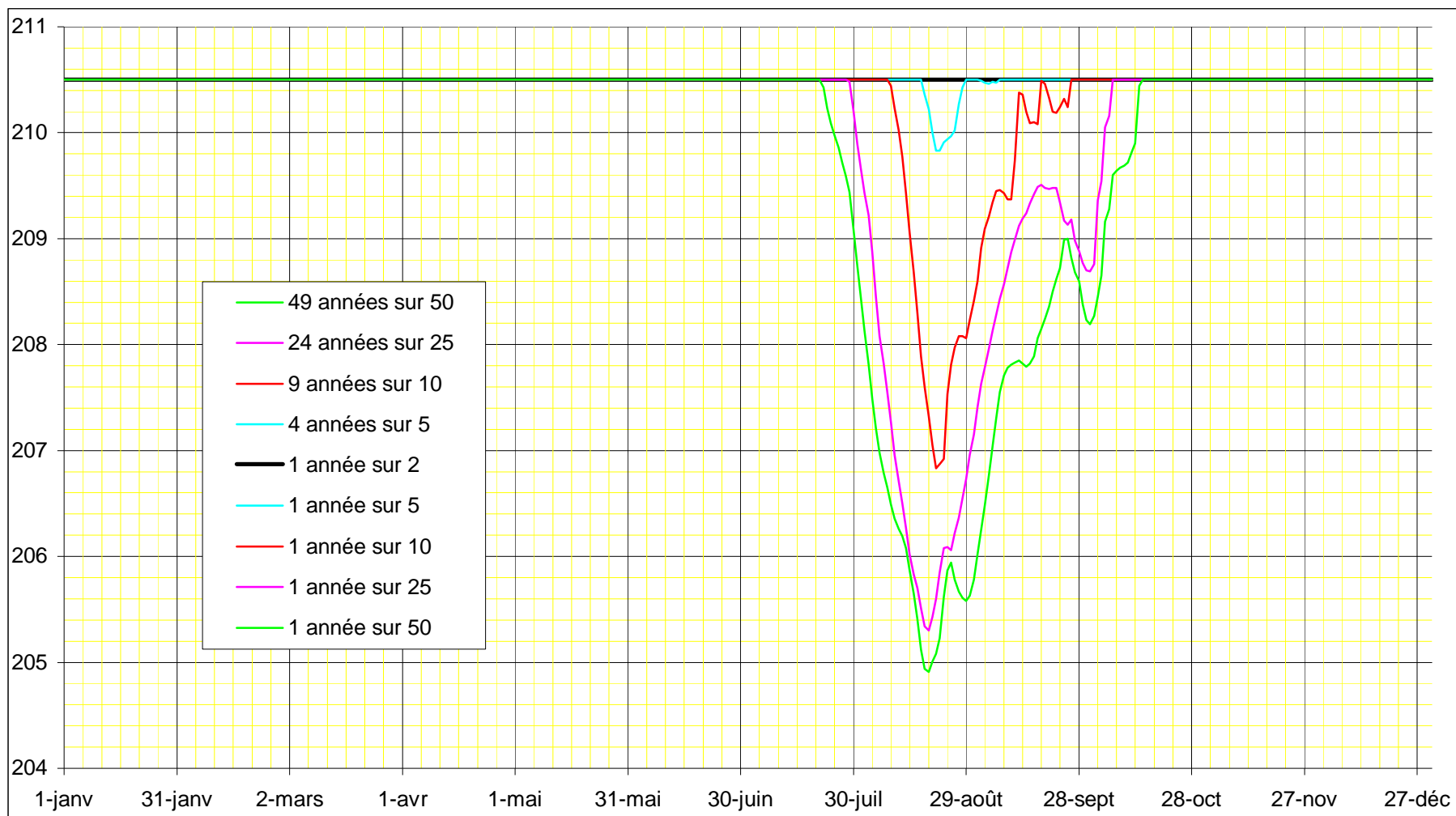


figure B-1 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Sénégal à Bakel à 4500 m<sup>3</sup>/s. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

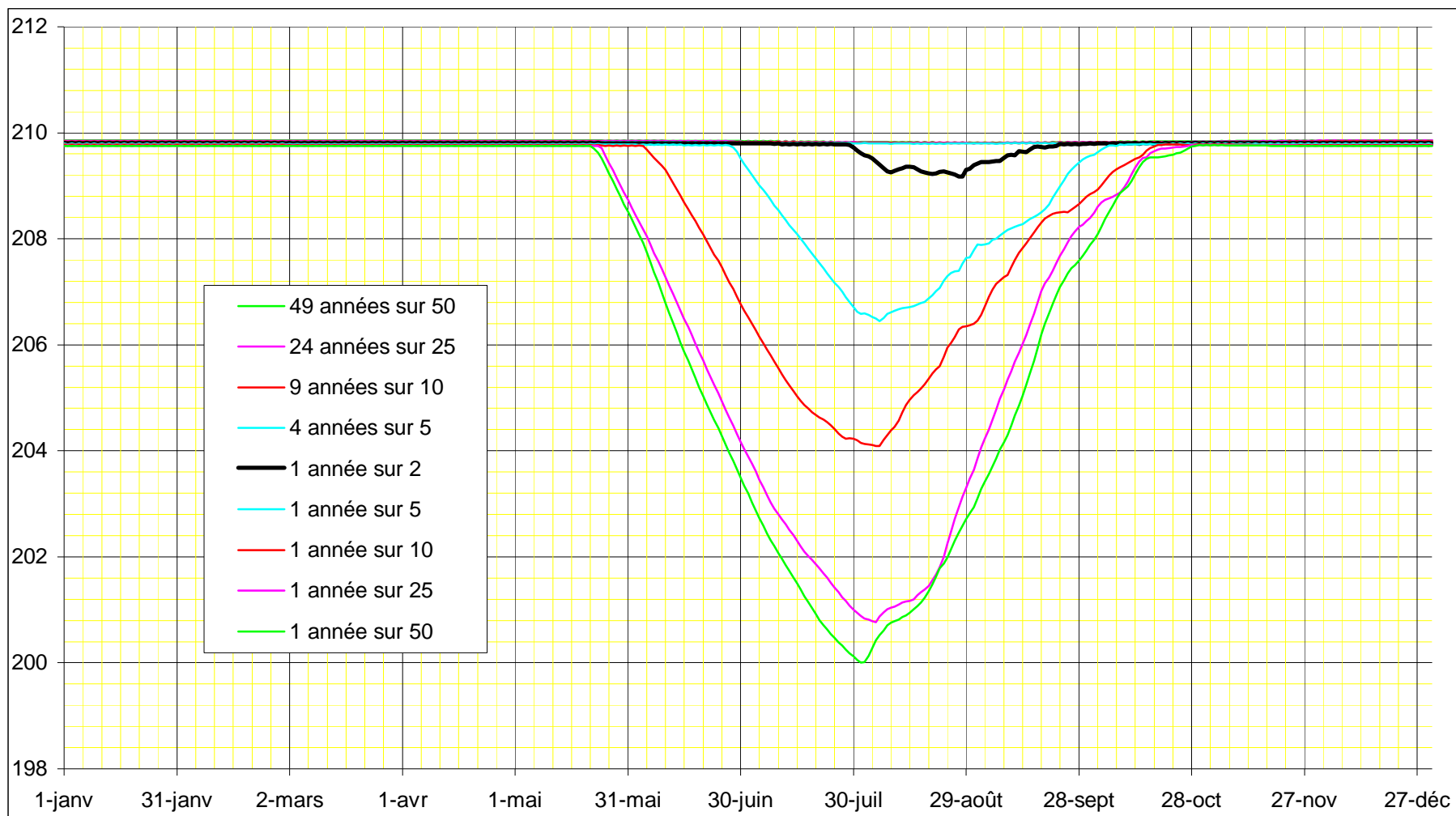


figure B-2 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Bafing à 1000 m<sup>3</sup>/s à la sortie du barrage. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

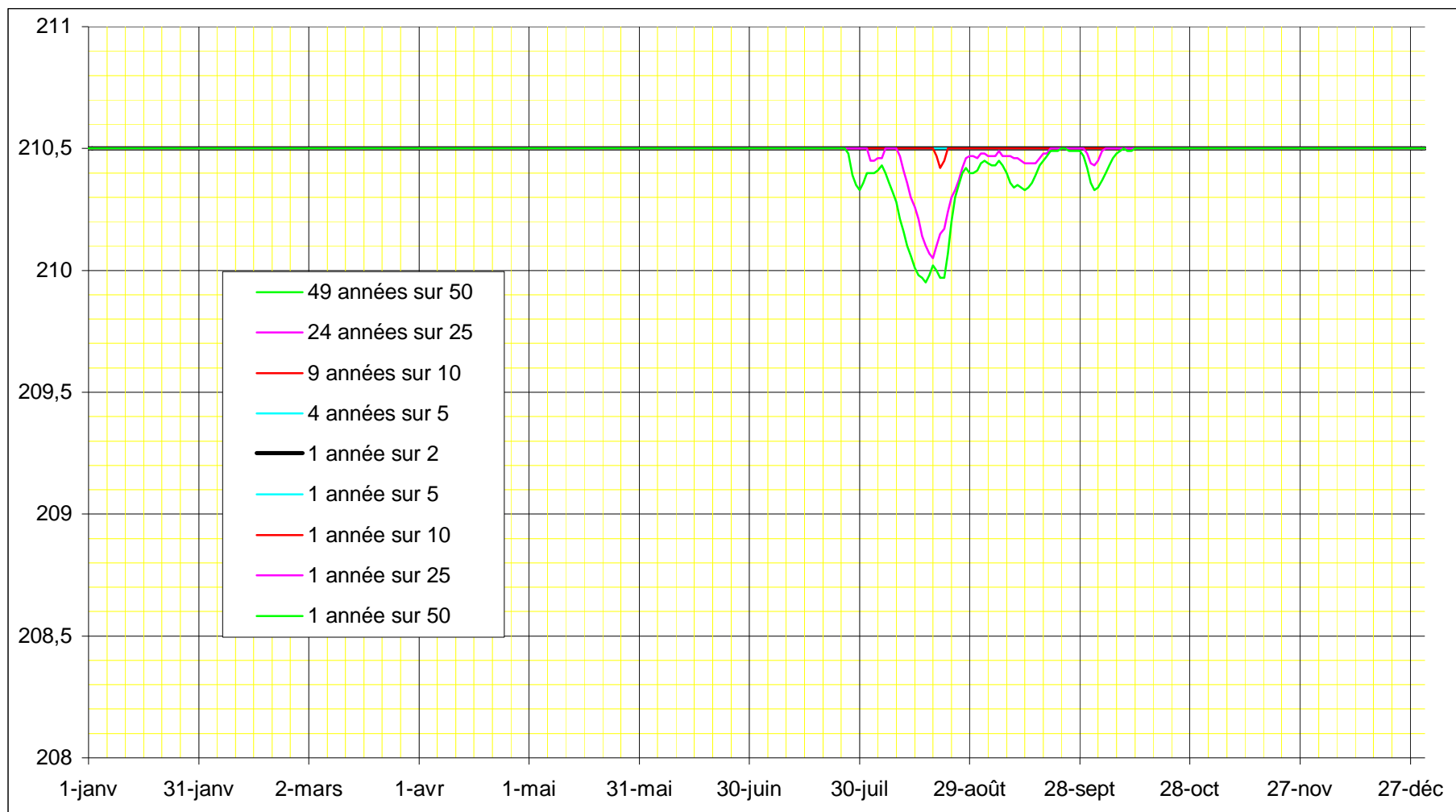


figure B-3 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Bafing à 2000 m<sup>3</sup>/s à la sortie du barrage. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si on avait gardé une revanche suffisante dans le lac. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.



## **ANNEXE C : LIMNIGRAMMES DE COTES LIMITES MINIMALES A RESPECTER DANS LE LAC, POUR PERMETTRE DE SOUTENIR LES FUTURES BASSES EAUX**

Les cotes limites minimales à respecter dans le lac de Manantali peuvent être calculées à l'aide du logiciel Simulsen, selon un principe identique à celui des limites maximales. On notera simplement que le calcul doit être fait en supposant une relation hauteur volume relative à la seule tranche utile du réservoir ( $H > 187$  m).

On donne ci-dessous quelques exemples de limnigrammes limites minimaux, tous calculés sur la période 1950-1998. Ils correspondent aux objectifs suivants, pour le soutien des basses eaux dans le Sénégal à Bakel :

100 m<sup>3</sup>/s: tableaux C-1 et C-2, et figure C-1

150 m<sup>3</sup>/s: tableaux C-3 et C-4, et figure C-2

200 m<sup>3</sup>/s: tableaux C-5 et C-6, et figure C-3.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nove	dece
1	192,78	192,03	191,13	190,05	189,00	187,96	187,05	187,11	187,16	190,05	192,78	193,16
2	192,76	192,00	191,10	190,02	188,97	187,93	187,06	187,11	187,14	190,18	192,82	193,16
3	192,74	191,97	191,06	189,98	188,93	187,90	187,04	187,12	187,16	190,30	192,85	193,15
4	192,72	191,94	191,03	189,95	188,90	187,87	187,06	187,12	187,15	190,42	192,88	193,14
5	192,70	191,91	190,99	189,91	188,86	187,84	187,05	187,12	187,16	190,54	192,91	193,14
6	192,67	191,88	190,96	189,88	188,83	187,81	187,05	187,12	187,15	190,68	192,94	193,13
7	192,65	191,85	190,92	189,84	188,80	187,78	187,05	187,12	187,16	190,84	192,96	193,12
8	192,63	191,81	190,89	189,80	188,76	187,75	187,05	187,12	187,15	190,99	192,99	193,11
9	192,61	191,78	190,85	189,77	188,73	187,72	187,05	187,12	187,16	191,13	193,01	193,10
10	192,59	191,75	190,82	189,73	188,69	187,69	187,06	187,13	187,16	191,27	193,03	193,09
11	192,56	191,72	190,79	189,70	188,66	187,66	187,05	187,12	187,16	191,40	193,04	193,08
12	192,54	191,69	190,75	189,66	188,63	187,63	187,06	187,13	187,16	191,51	193,06	193,07
13	192,52	191,66	190,72	189,63	188,59	187,60	187,05	187,12	187,16	191,62	193,08	193,05
14	192,49	191,62	190,68	189,59	188,56	187,58	187,06	187,13	187,16	191,73	193,09	193,04
15	192,47	191,59	190,65	189,56	188,53	187,55	187,05	187,12	187,21	191,82	193,10	193,03
16	192,45	191,56	190,61	189,52	188,49	187,52	187,06	187,13	187,39	191,91	193,12	193,02
17	192,42	191,53	190,58	189,49	188,46	187,49	187,08	187,13	187,51	191,99	193,13	193,00
18	192,40	191,49	190,54	189,45	188,42	187,46	187,09	187,13	187,78	192,07	193,14	192,99
19	192,38	191,46	190,51	189,42	188,39	187,41	187,09	187,13	187,98	192,15	193,15	192,98
20	192,35	191,43	190,47	189,38	188,36	187,37	187,09	187,13	188,17	192,22	193,15	192,96
21	192,33	191,40	190,44	189,35	188,32	187,33	187,10	187,13	188,35	192,29	193,16	192,95
22	192,30	191,36	190,40	189,31	188,29	187,29	187,09	187,15	188,54	192,35	193,16	192,93
23	192,27	191,33	190,37	189,28	188,26	187,25	187,10	187,13	188,73	192,41	193,17	192,92
24	192,25	191,30	190,33	189,24	188,22	187,21	187,11	187,15	188,92	192,46	193,17	192,90
25	192,22	191,26	190,30	189,21	188,19	187,17	187,10	187,13	189,10	192,51	193,17	192,89
26	192,19	191,23	190,26	189,17	188,16	187,14	187,11	187,15	189,28	192,55	193,17	192,87
27	192,17	191,20	190,23	189,14	188,12	187,12	187,10	187,13	189,44	192,60	193,17	192,86
28	192,14	191,17	190,19	189,10	188,09	187,09	187,11	187,15	189,60	192,64	193,17	192,84
29	192,11		190,16	189,07	188,05	187,08	187,10	187,13	189,76	192,67	193,17	192,83
30	192,09		190,12	189,03	188,02	187,06	187,11	187,15	189,91	192,71	193,17	192,81
31	192,06		190,09		187,99		187,10	187,14		192,75		192,79
moy	192,44	191,60	190,61	189,54	188,49	187,51	187,08	187,13	187,93	191,70	193,06	193,00

tableau C-1 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 100 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, 1 fois sur 25, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	192,93	192,09	191,17	190,08	189,03	187,99	187,10	187,12	187,28	190,48	193,31	193,43
2	192,91	192,06	191,13									

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	195,33	194,15	192,86	191,36	189,90	188,43	187,26	187,16	187,38	193,74	196,17	196,14
2	195,29	194,10	192,81	191,31	189,85	188,39	187,24	187,14	187,62	193,88	196,19	196,12
3	195,26	194,06	192,76	191,26	189,80	188,34	187,21	187,16	187,81	194,00	196,21	196,10
4	195,22	194,01	192,71	191,21	189,75	188,30	187,19	187,16	188,02	194,12	196,23	196,08
5	195,19	193,97	192,66	191,16	189,71	188,26	187,17	187,16	188,23	194,23	196,25	196,06
6	195,15	193,92	192,61	191,11	189,66	188,21	187,15	187,16	188,46	194,35	196,26	196,03
7	195,12	193,88	192,56	191,06	189,61	188,17	187,13	187,16	188,73	194,51	196,27	196,01
8	195,08	193,83	192,52	191,02	189,56	188,12	187,12	187,16	189,00	194,66	196,28	195,99
9	195,05	193,79	192,47	190,97	189,52	188,08	187,11	187,18	189,25	194,80	196,28	195,96
10	195,01	193,74	192,42	190,92	189,47	188,03	187,11	187,16	189,49	194,93	196,29	195,94
11	194,97	193,70	192,37	190,87	189,42	187,99	187,09	187,18	189,72	195,05	196,29	195,91
12	194,94	193,65	192,32	190,82	189,37	187,95	187,09	187,16	189,98	195,17	196,30	195,89
13	194,90	193,61	192,27	190,77	189,33	187,90	187,06	187,18	190,23	195,27	196,30	195,86
14	194,86	193,56	192,22	190,72	189,28	187,87	187,08	187,16	190,49	195,36	196,30	195,84
15	194,83	193,51	192,18	190,67	189,23	187,83	187,06	187,18	190,74	195,44	196,30	195,81
16	194,79	193,47	192,13	190,63	189,18	187,79	187,08	187,16	190,98	195,51	196,30	195,78
17	194,75	193,42	192,08	190,58	189,14	187,75	187,07	187,18	191,20	195,58	196,29	195,76
18	194,71	193,38	192,03	190,53	189,09	187,72	187,08	187,16	191,41	195,65	196,29	195,73
19	194,67	193,33	191,98	190,48	189,04	187,68	187,07	187,18	191,63	195,72	196,29	195,70
20	194,64	193,28	191,93	190,43	189,00	187,64	187,08	187,16	191,83	195,77	196,28	195,67
21	194,60	193,24	191,89	190,38	188,95	187,60	187,08	187,18	192,04	195,83	196,27	195,65
22	194,56	193,19	191,84	190,33	188,90	187,57	187,09	187,16	192,24	195,88	196,26	195,62
23	194,52	193,14	191,79	190,28	188,85	187,53	187,10	187,18	192,43	195,92	196,25	195,59
24	194,48	193,10	191,74	190,24	188,81	187,50	187,10	187,16	192,62	195,96	196,24	195,56
25	194,44	193,05	191,69	190,19	188,76	187,46	187,10	187,18	192,80	195,99	196,23	195,53
26	194,39	193,00	191,65	190,14	188,71	187,43	187,10	187,17	192,97	196,02	196,21	195,50
27	194,35	192,96	191,60	190,09	188,67	187,39	187,12	187,18	193,14	196,05	196,20	195,47
28	194,31	192,91	191,55	190,04	188,62	187,36	187,14	187,17	193,30	196,08	196,19	195,44
29	194,27		191,50	189,99	188,57	187,33	187,12	187,21	193,46	196,10	196,17	195,41
30	194,23		191,45	189,94	188,52	187,29	187,15	187,17	193,60	196,13	196,15	195,38
31	194,19		191,41		188,48		187,13	187,22		196,15		195,35
moy	194,78	193,53	192,13	190,65	189,19	187,83	187,12	187,17	190,69	195,29	196,25	195,77

tableau C-3 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 150 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, 1 fois sur 25, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	195,46	194,19	192,88	191,37	189,90	188,44	187,32	187,59	189,39	194,14	196,69	196,39
2	195,42	194,15	192,83	191,32	189,85	188,39	187,29	187,65	189,52	194,28	196,69	196,37
3	195,39	194,10	192,78	191,27	189,81	188,35	187,28	187,73	189,66	194,42	196,70	196,35
4	195,35	194,06	192,73	191,22	189,76	188,31	187,26	187,81	189,81	194,56	196,71	196,32
5	195,31	194,01	192,69	191,17	189,71	188,26	187,24	187,87	189,99	194,70	196,71	196,30
6	195,27	193,96	192,64	191,12	189,66	188,22	187,22	187,94	190,18	194,85	196,71	196,27
7	195,23	193,92	192,59	191,07	189,62	188,18	187,20	188,01	190,40	195,01	196,71	196,24
8	195,19	193,87	192,54	191,02	189,57	188,13	187,18	188,07	190,61	195,16	196,71	196,22
9	195,15	193,82	192,49	190,97	189,52	188,09	187,15	188,14	190,80	195,30	196,71	196,19
10	195,11	193,78	192,44	190,92	189,47	188,05	187,13	188,18	190,99	195,43	196,70	196,16
11	195,07	193,73	192,39	190,88	189,43	188,01	187,10	188,24	191,17	195,56	196,70	196,13
12	195,03	193,69	192,34	190,83	189,38	187,96	187,09	188,28	191,36	195,69	196,69	196,10
13	194,99	193,64	192,29	190,78	189,33	187,92	187,06	188,34	191,54	195,80	196,68	196,07
14	194,95	193,59	192,25	190,73	189,28	187,88	187,09	188,38	191,72	195,91	196,67	196,05
15	194,91	193,54	192,20	190,68	189,24	187,85	187,07	188,44	191,89	196,01	196,66	196,02
16	194,87	193,50	192,15	190,63	189,19	187,81	187,09	188,47	192,06	196,09	196,64	195,99
17	194,83	193,45	192,10	190,58	189,14	187,78	187,08	188,53	192,23	196,17	196,63	195,95
18	194,79	193,40	192,05	190,53	189,09	187,75	187,09	188,57	192,39	196,24	196,62	195,92
19	194,75	193,36	192,00	190,48	189,05	187,72	187,08	188,64	192,54	196,31	196,60	195,89
20	194,71	193,31	191,95	190,44	189,00	187,68	187,09	188,67	192,69	196,37	196,59	195,86
21	194,67	193,26	191,90	190,39	188,95	187,65	187,09	188,74	192,84	196,42	196,57	195,83
22	194,62	193,21	191,85	190,34	188,91	187,62	187,10	188,77	192,99	196,47	196,56	195,80
23	194,58	193,17	191,81	190,29	188,86	187,59	187,12	188,83	193,14	196,51	196,54	195,77
24	194,54	193,12	191,76	190,24	188,81	187,56	187,11	188,87	193,28	196,54	196,53	195,73
25	194,50	193,07	191,71	190,19	188,76	187,54	187,12	188,94	193,42	196,57	196,51	195,70
26	194,45	193,02	191,66	190,14	188,72	187,51	187,11	188,98	193,55	196,60	196,49	195,67
27	194,41	192,98	191,61	190,09	188,67	187,47	187,18	189,05	193,68	196,62	196,47	195,63
28	194,37	192,93	191,56	190,05	188,62	187,44	187,30	189,09	193,80	196,63	196,46	195,60
29	194,32		191,51	190,00	188,58	187,40	187,35	189,17	193,92	196,65	196,43	195,56
30	194,28		191,46	189,95	188,53	187,35	187,44	189,18	194,03	196,66	196,41	195,53
31	194,24		191,41		188,48		187,50	189,25		196,68		195,50
moy	194,86	193,57	192,15	190,66	189,19	187,86	187,18	188,47	191,85	195,82	196,62	195,97

tableau C-4 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 150 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, 1 fois sur 50, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	198,04	196,34	194,64	192,72	190,86	189,00	187,66	187,30	191,96	197,91	200,07	199,40
2	197,99	196,28	194,58	192,66	190,80	188,95	187,64	187,34	192,14	198,04	200,06	199,36
3	197,94	196,22	194,52	192,60	190,74	188,89	187,61	187,42	192,32	198,17	200,06	199,33
4	197,89	196,16	194,45	192,53	190,68	188,84	187,59	187,46	192,53	198,30	200,05	199,29
5	197,83	196,10	194,39	192,47	190,62	188,78	187,56	187,61	192,74	198,43	200,05	199,25
6	197,78	196,04	194,33	192,41	190,56	188,73	187,54	187,77	192,96	198,57	200,03	199,21
7	197,73	195,98	194,27	192,35	190,50	188,67	187,51	187,89	193,20	198,72	200,02	199,17
8	197,67	195,92	194,20	192,28	190,44	188,62	187,47	188,02	193,43	198,87	200,01	199,13
9	197,62	195,86	194,14	192,22	190,38	188,57	187,42	188,14	193,66	199,00	200,00	199,09
10	197,57	195,80	194,08	192,16	190,32	188,51	187,38	188,27	193,87	199,13	199,98	199,05
11	197,51	195,74	194,01	192,10	190,26	188,46	187,33	188,40	194,07	199,25	199,96	199,00
12	197,46	195,68	193,95	192,03	190,20	188,41	187,29	188,55	194,27	199,37	199,95	198,96
13	197,41	195,62	193,89	191,97	190,14	188,36	187,25	188,70	194,48	199,48	199,93	198,92
14	197,35	195,56	193,83	191,91	190,08	188,31	187,22	188,85	194,69	199,58	199,91	198,87
15	197,30	195,50	193,77	191,85	190,02	188,26	187,19	189,00	194,89	199,67	199,89	198,83
16	197,24	195,44	193,71	191,78	189,96	188,21	187,17	189,15	195,09	199,74	199,86	198,79
17	197,19	195,38	193,65	191,72	189,90	188,16	187,14	189,32	195,31	199,80	199,84	198,74
18	197,13	195,32	193,59	191,66	189,84	188,12	187,13	189,53	195,55	199,86	199,81	198,70
19	197,08	195,26	193,52	191,59	189,78	188,08	187,10	189,74	195,81	199,90	199,78	198,65
20	197,02	195,20	193,46	191,53	189,72	188,04	187,12	189,93	196,05	199,94	199,75	198,61
21	196,97	195,14	193,40	191,47	189,66	188,00	187,08	190,11	196,28	199,97	199,72	198,56
22	196,91	195,08	193,34	191,41	189,60	187,96	187,14	190,27	196,52	200,00	199,69	198,52
23	196,86	195,02	193,28	191,35	189,54	187,92	187,09	190,42	196,74	200,02	199,66	198,47
24	196,80	194,96	193,22	191,29	189,48	187,89	187,14	190,58	196,97	200,04	199,63	198,42
25	196,74	194,89	193,15	191,23	189,42	187,85	187,10	190,75	197,17	200,05	199,60	198,38
26	196,69	194,83	193,09	191,17	189,36	187,82	187,16	190,92	197,36	200,06	199,57	198,33
27	196,63	194,77	193,03	191,11	189,30	187,78	187,10	191,09	197,48	200,07	199,54	198,28
28	196,57	194,71	192,97	191,05	189,24	187,75	187,16	191,27	197,60	200,07	199,51	198,23
29	196,52		192,91	190,98	189,18	187,72	187,10	191,44	197,70	200,07	199,47	198,19
30	196,46		192,84	190,92	189,12	187,69	187,16	191,61	197,81	200,07	199,44	198,14
31	196,40		192,78		189,06		187,20	191,79		200,07		198,09
moy	197,23	195,53	193,71	191,82	189,96	188,28	187,28	189,31	195,02	199,43	199,83	198,77

tableau C-5 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 200 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, 1 fois sur 25, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	juil	aout	sept	octo	nove	dece
1	198,64	197,04	195,36	193,43	191,57	189,70	188,50	189,84	193,96	198,21	200,29	199,82
2	198,59	196,99	195,30	193,37	191,51	189,65	188,48	189,97	194,07	198,34	200,29	199,80
3	198,55	196,93	195,23	193,31	191,45	189,59	188,46	190,09	194,20	198,48	200,29	199,77
4	198,50	196,87	195,17	193,25	191,39	189,54	188,46	190,22	194,33	198,61	200,29	199,74
5	198,45	196,81	195,11	193,18	191,33	189,48	188,45	190,36	194,48	198,74	200,29	199,71
6	198,40	196,76	195,05	193,12	191,27	189,43	188,44	190,48	194,62	198,87	200,28	199,68
7	198,35	196,70	194,99	193,06	191,21	189,38	188,42	190,61	194,76	199,01	200,28	199,65
8	198,31	196,64	194,93	193,00	191,15	189,33	188,41	190,72	194,89	199,13	200,27	199,61
9	198,26	196,58	194,86	192,93	191,09	189,27	188,40	190,83	195,02	199,25	200,26	199,58
10	198,21	196,53	194,80	192,87	191,03	189,23	188,40	190,94	195,14	199,37	200,25	199,54
11	198,16	196,47	194,74	192,81	190,97	189,18	188,43	191,05	195,27	199,50	200,24	199,50
12	198,11	196,41	194,68	192,75	190,91	189,13	188,49	191,18	195,39	199,61	200,23	199,47
13	198,06	196,35	194,61	192,68	190,85	189,09	188,54	191,31	195,51	199,72	200,22	199,43
14	198,01	196,29	194,55	192,62	190,79	189,05	188,60	191,44	195,64	199,81	200,21	199,39
15	197,96	196,23	194,49	192,56	190,73	189,00	188,66	191,56	195,77	199,90	200,19	199,35
16	197,91	196,17	194,43	192,50	190,66	188,96	188,72	191,69	195,93	199,96	200,18	199,31
17	197,86	196,11	194,37	192,43	190,60	188,92	188,78	191,85	196,09	200,01	200,16	199,27
18	197,80	196,05	194,30	192,37	190,54	188,88	188,83	192,04	196,24	200,06	200,14	199,23
19	197,75	195,99	194,24	192,31	190,48	188,84	188,87	192,24	196,44	200,09	200,12	199,19
20	197,70	195,93	194,18	192,25	190,42	188,80	188,94	192,41	196,62	200,12	200,10	199,15
21	197,65	195,87	194,12	192,18	190,36	188,77	188,99	192,56	196,81	200,15	200,07	199,11
22	197,60	195,81	194,06	192,12	190,30	188,74	189,07	192,70	196,98	200,17	200,05	199,07
23	197,55	195,75	193,99	192,06	190,24	188,71	189,10	192,84	197,14	200,20	200,03	199,02
24	197,50	195,69	193,93	192,00	190,18	188,68	189,19	192,97	197,31	200,21	200,01	198,98
25	197,44	195,63	193,87	191,94	190,12	188,64	189,23	193,10	197,46	200,23	199,98	198,94
26	197,37	195,57	193,81	191,87	190,06	188,61	189,33	193,24	197,60	200,24	199,96	198,89
27	197,31	195,51	193,74	191,81	190,00	188,59	189,36	193,37	197,73	200,25	199,93	198,85
28	197,26	195,45	193,68	191,75	189,94	188,57	189,46	193,50	197,86	200,26	199,91	198,80
29	197,21		193,62	191,69	189,88	188,55	189,49	193,62	197,98	200,27	199,88	198,76
30	197,15		193,56	191,63	189,82	188,52	189,59	193,73	198,09	200,28	199,85	198,71
31	197,10		193,49		189,76		189,70	193,85		200,29		198,67
moy	197,89	196,26	194,43	192,53	190,66	189,03	188,83	191,82	195,98	199,66	200,14	199,29

Tableau C-6 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 200 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, 1 fois sur 50, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998

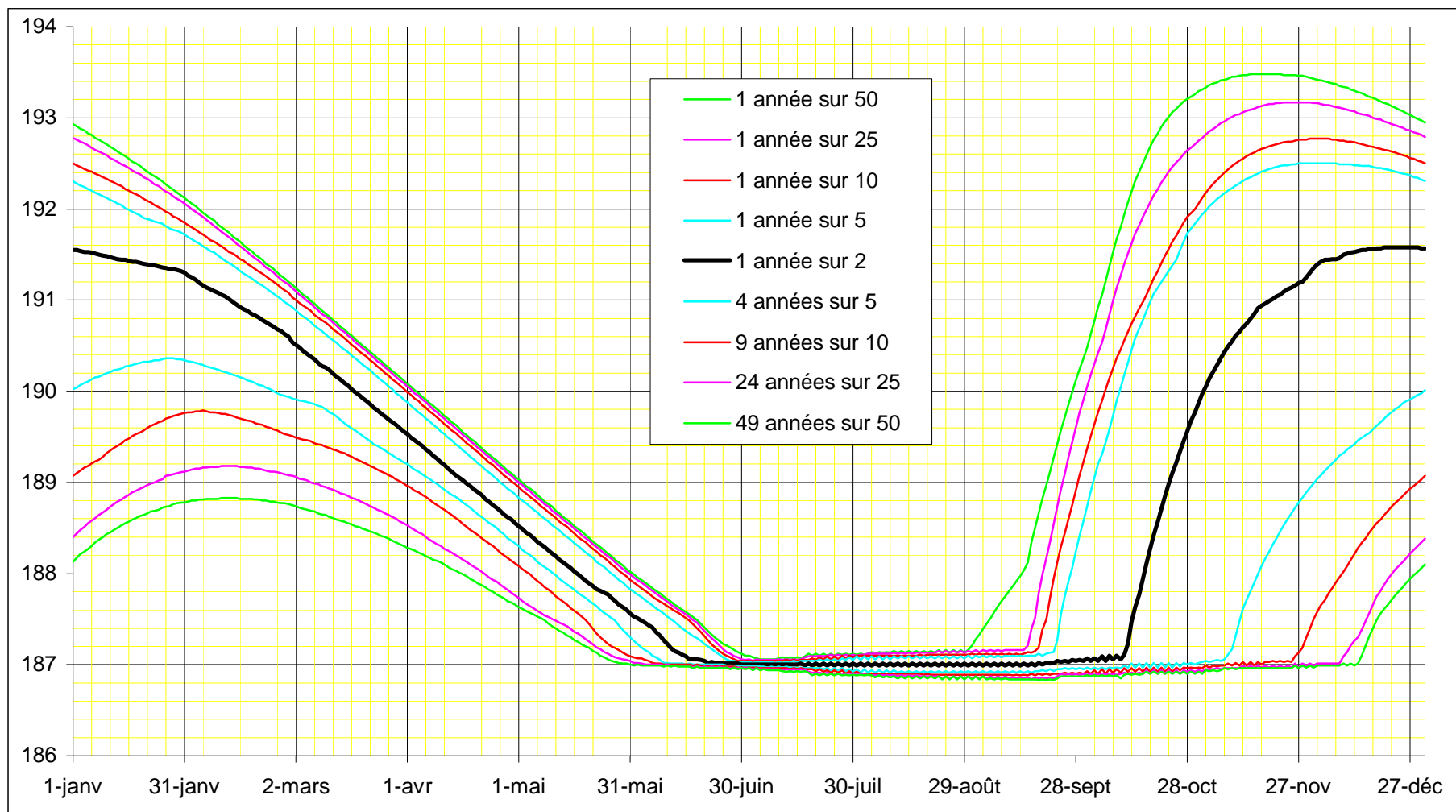


figure C-1 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 100 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.



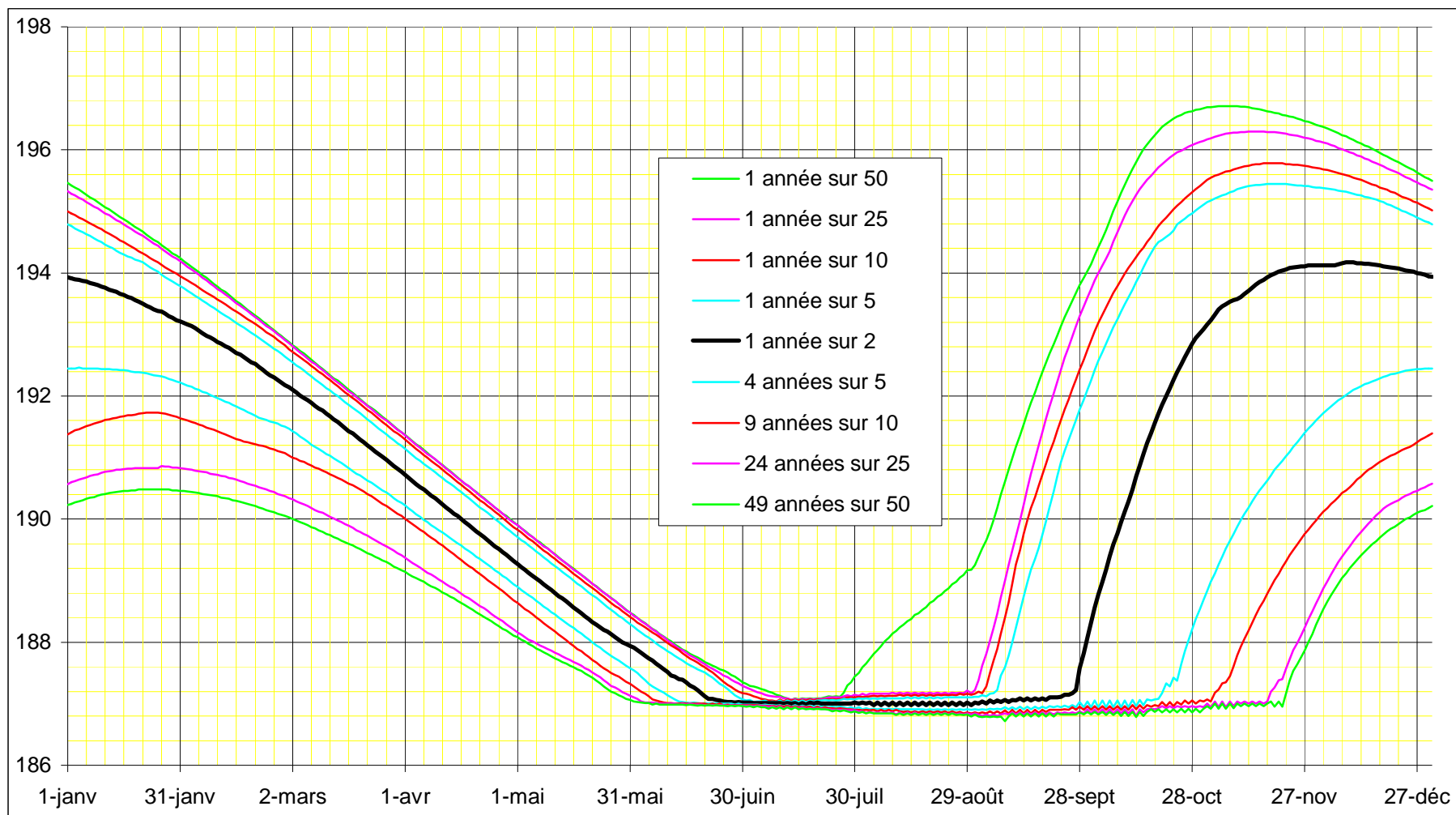


figure C-2 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 150 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998.

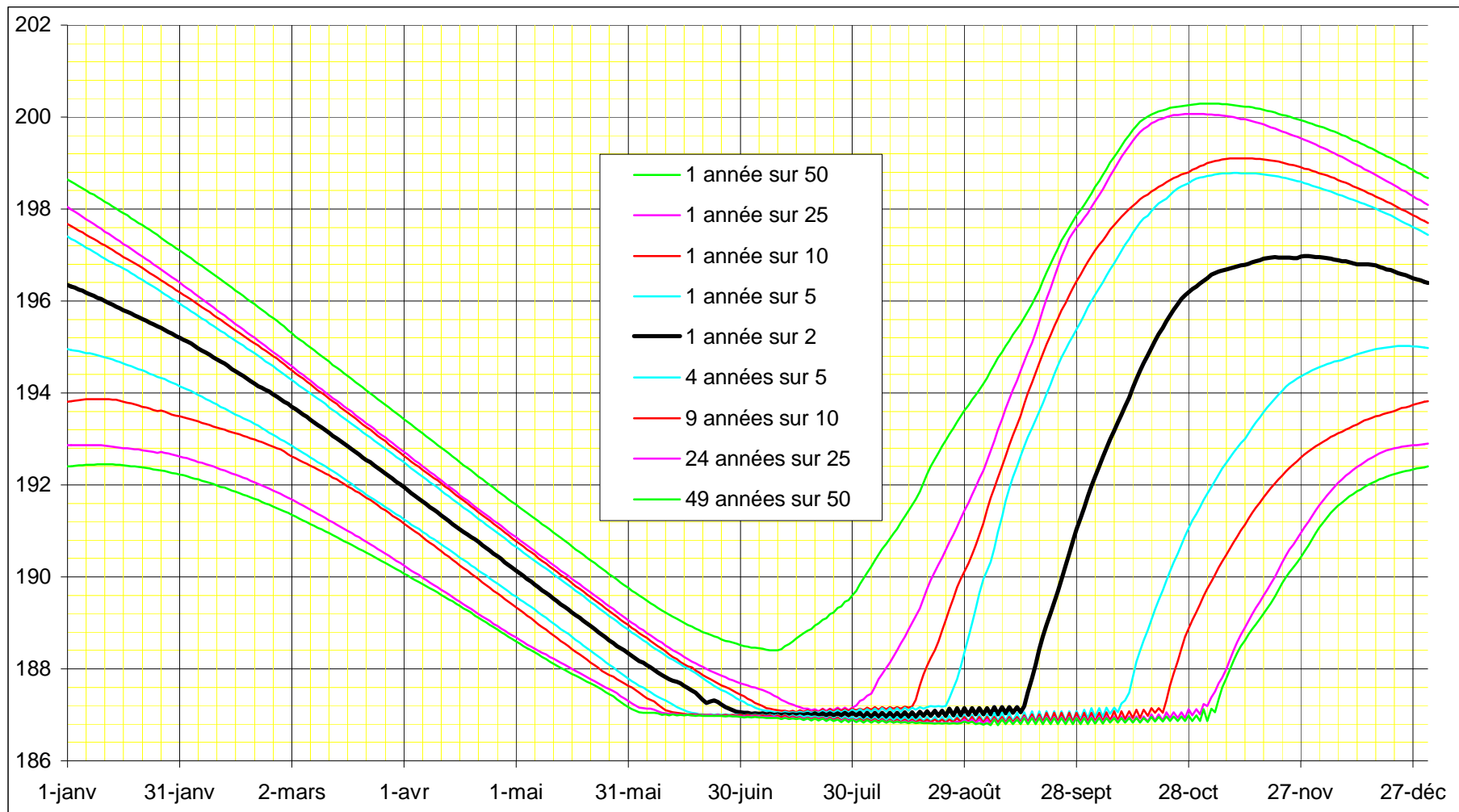


figure C-3 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 200 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir le débit du Sénégal au dessus du seuil souhaité. Les cotes représentées sont calculées statistiquement sur la période 1950-1998

## **ANNEXE D : CALCUL DE LA CAPACITE DE RETENUE PERMETTANT DE GARANTIR LE SOUTIEN PERMANENT D'UN DEBIT DE 300 M3/S A BAKEL**

On simule le fonctionnement du barrage au pas de temps journalier sur la période 1971-1998. La seule consigne de gestion prises en compte est la réalisation systématique du soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s à Bakel. Aucune contrainte de gestion (dimensions de retenue, organes d'évacuation) n'est envisagée. Le calcul ainsi mené nous donne la chronique des débits journaliers lâchés d'un barrage de Manantali idéalement dimensionné, qui aurait permis de réaliser en permanence le soutien d'étiage sur la période 1971-1998. Cette chronique permet d'évaluer une série de volumes annuels lâchés Vs, calculés du 1<sup>er</sup> juillet au 30 juin de l'année suivante.

On connaît par ailleurs la chronique des débits journaliers du Bafing au droit du barrage de Manantali : données observées à la station de Soukoutali jusque 1983 ; données reconstituées à partir de celles de Bafing Makana à depuis 1984. Cette chronique nous permet d'évaluer une série de volumes annuels entrés Ve, calculés du 1<sup>er</sup> juillet au 30 juin de l'année suivante.

Enfin nous considérons un volume moyen annuel Vp perdu par évaporation sur la retenue, égal à 832 millions de m<sup>3</sup>. Cette valeur correspond à une évaporation moyenne journalière de 5,7 mm jour<sup>-1</sup> (valeur mesurée par Cogels et Gac sur le lac de Guiers) et une superficie moyenne de 400 km<sup>2</sup>.

Les valeurs de Ve (régime naturel) et Vs sont données dans le tableau 1 ci-dessous.

A partir de Ve, Vs et Vp, il est possible d'évaluer le stockage net annuel Sn dans la retenue :

$$S_n = V_e - V_s - V_p$$

Les valeurs de Sn sont également données dans le tableau D-1. Elles représentent le gain théorique de volume emmagasiné chaque année dans la retenue entre le 1<sup>er</sup> juillet et le 30 juin de l'année suivante. On remarque que la moyenne de Sn est négative, ce qui signifie que le soutien d'étiage envisagé aurait entraîné une baisse du stock d'eau sur l'ensemble de la période (30/06/1971 – 30/06/1998).

Comme il est dit plus haut, les simulations qui ont abouti aux valeurs de stockage net annuel Sn ont été faites en supposant une capacité de réservoir illimitée derrière le barrage. La capacité qui aurait été nécessaire pour pouvoir réaliser systématiquement le soutien de débit envisagé sur la période 1971-1998 peut être évaluée de la façon suivante :

Notons Vi le volume d'eau emmagasiné dans la retenue le 30 juin de l'année i+1. Une valeur arbitraire V<sub>1970</sub> étant attribuée au 30/06/71, on en déduit les valeurs des années suivantes par :

$$V_i = V_{1970} + \sum_{j=1971 \dots i} (S_n)$$

La capacité C de retenue nécessaire est alors donnée par :

$$C = \text{MAX}_{i=1971 \dots 1997} [ \text{Max}_{j=1970 \dots i-1} (V_j) - V_i ]$$

On obtient une valeur de C égale à 24376 millions de m<sup>3</sup>, soit 24,4 km<sup>3</sup>.

année	période	Ve : volume entré	Vs : volume lâché	Vp : volume évaporé	Sn :stockage net
1971	01/07/71--30/06/72	9011	6078	832	2101
1972	01/07/72--30/06/73	7475	7125	832	-482
1973	01/07/73--30/06/74	7110	7127	832	-849
1974	01/07/74--30/06/75	10157	6162	832	3163
1975	01/07/75--30/06/76	8957	6361	832	1765
1976	01/07/76--30/06/77	9393	5933	832	2628
1977	01/07/77--30/06/78	5167	6690	832	-2355
1978	01/07/78--30/06/79	7780	6281	832	667
1979	01/07/79--30/06/80	5345	7077	832	-2564
1980	01/07/80--30/06/81	7005	7001	832	-828
1981	01/07/81--30/06/82	6736	7051	832	-1147
1982	01/07/82--30/06/83	5818	7087	832	-2101
1983	01/07/83--30/06/84	6786	8183	832	-2229
1984	01/07/84--30/06/85	4392	7661	832	-4101
1985	01/07/85--30/06/86	6554	7240	832	-1518
1986	01/07/86--30/06/87	6911	7199	832	-1120
1987	01/07/87--30/06/88	6727	7633	832	-1738
1988	01/07/88--30/06/89	7303	6714	832	-243
1989	01/07/89--30/06/90	6614	7057	832	-1275
1990	01/07/90--30/06/91	6823	7003	832	-1012
1991	01/07/91--30/06/92	8393	6652	832	909
1992	01/07/92--30/06/93	6863	7475	832	-1444
1993	01/07/93--30/06/94	5789	7233	832	-2276
1994	01/07/94--30/06/95	9338	5953	832	2553
1995	01/07/95--30/06/96	8584	6440	832	1312
1996	01/07/96--30/06/97	8042	6707	832	503
1997	01/07/97--30/06/98	8013	6599	832	581
	moyenne	7299	6879	832	-411

tableau D-1 : volumes annuels (millions de m<sup>3</sup>) entrés dans la retenue et lâchés par le barrage, et valeurs du stockage net annuel, dans le cas d'un soutien d'étiage à 300 m<sup>3</sup>/s à Bakel réalisé à partir d'une retenue de capacité illimitée.

## **ANNEXE E : LISTE DES CONSIGNES DE GESTION SIMULEES POUR L'ANALYSE DU SOUTIEN D'ETIAGE A 300 M<sup>3</sup>/S**

Remarque : Seules les parties soulignées diffèrent de la liste des consignes étudiée dans le cas de gestion type.

**A1** : Précaution contre la submersion des digues du barrage, en maintenant le niveau du plan d'eau en dessous de la cote 210,50 m

**A3** : lâcher d'un débit sanitaire réservé de 10 m<sup>3</sup>/s

**B1** : précaution contre l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage, en maintenant le niveau du plan d'eau au dessus de la cote 187 m.

**B2** : laminage immédiat des crues du Sénégal à Bakel, avec un débit journalier limité à 4500 m<sup>3</sup>/s

**A6** : conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, pour pouvoir assurer le laminage futur des crues du Sénégal à Bakel en dessous de 4500 m<sup>3</sup>/s avec un taux de réussite de 49 années sur 50, en référence à la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote maximale à respecter dans le lac est donné dans le manuel provisoire.

**A5** : soutien des basses eaux, concernant les usages suivants : agriculture irriguée, alimentation humaine, navigabilité. Une valeur constante de 200 m<sup>3</sup>/s a été retenue pour le débit Qe à assurer en permanence au niveau de Bakel.

**B3** : conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour permettre le soutien futur de basses eaux. Le débit objectif Qe envisagé est le même que dans la consigne A5 précédente, et le taux de réussite retenu est de 24 années sur 25 sur la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote minimale à respecter dans le lac est donné dans le manuel provisoire.

**A2** : production d'énergie électrique

La consigne de production d'énergie est prise en compte seulement lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S1, pour lequel trois valeurs ont été testées : 187, 192 et 197 m

La consigne vise à produire la puissance maximale productible Pmax lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S2, pour lequel deux valeurs ont été testées : 202 et 206 m.

Enfin, quand la cote du lac se situe entre S1 et S2, la consigne vise à produire une puissance P= min (Po ; Pmax) où Po désigne une puissance constante pour laquelle trois valeurs ont été testées : 70, 90 et 110 mw.

**A5 : soutien des basses eaux, concernant la navigabilité pour les bateaux à fort tirant d'eau. Une valeur constante de 300 m<sup>3</sup>/s a été retenue pour le débit Qe à assurer en permanence au niveau de Bakel.**

**A4 : soutien de crue**

L'hydrogramme objectif de crue retenu pour Bakel, dénommé "ORSTOM1", est le suivant :

0 m<sup>3</sup>/s le 22 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 28 août ; 2500 m<sup>3</sup>/s le 2 septembre ; 0 m<sup>3</sup>/s le 16 octobre.

Le soutien de crue est déclenché à la date Tc du 20 août, si et seulement si la cote du lac se situe au dessus du seuil Hs, pour lequel trois valeurs ont été testées : 192, 195 et 198 m.