



ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SENEGAL

( O . M . V . S . )

**PROVISOIRE**

## PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS

PHASE II

MANUEL DES CONSIGNES DE GESTION

auteur : JC Bader

Mars 1999

## TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS.....	1
1. Principe de la Gestion.....	2
1.1. Généralités .....	2
1.2. Suivi de la situation hydrologique.....	3
1.4. Consignes de gestion .....	4
1.5. Principe du calcul de débit à lâcher à travers les différents organes d'évacuation .....	7
2. Détail des procédures de gestion opérationnelle.....	8
2.1. Situation hydrologique : préparation de la banque de données .....	9
2.2. Calcul des limites $Q_{\text{mino}}$ et $Q_{\text{maxo}}$ relatives aux contraintes de gestion .....	17
2.3. Calcul des limites $Q_{\text{min}}$ et $Q_{\text{max}}$ imposées par les consignes de gestion .....	20
2.4. Combinaison des différentes limites : calcul du débit total à lâcher $Q_t$ .....	33
2.5. Détermination du débit à évacuer par les différents organes du barrage.....	34
2.6. Réglage des organes d'évacuation du barrage .....	35
3. Etude d'un cas de gestion type .....	35
3.1. Consignes de gestion retenues.....	35
3.2. Résultats obtenus .....	36
Annexe A : Liste des paramètres de gestion et des variables utilisés.....	51
Annexe B : limnigrammes de cotes limites maximales à respecter dans le lac, pour permettre de laminier les crues futures	52
Annexe C : limnigrammes de cotes limites minimales à respecter dans le lac, pour permettre de soutenir les futures basses eaux.....	63
Annexe D : Note sur la consigne de gestion du barrage de Manantali, relative au laminage des crues exceptionnelles de la rivière Bafing	

## 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 seront en grande partie automatisés.

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.

# 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 Diangola 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 lâché 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 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, Diangola
- Souhaitable : Bakoye à l'amont de Oualia, 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 :

- 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 un mois.
- 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.
- 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.
- 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 [ $Q_{\text{mino}}$ ,  $Q_{\text{maxo}}$ ]

- $Q_{\text{mino}}$ , 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).  $Q_{\text{mino}}$  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.
- $Q_{\text{maxo}}$ , 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 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 A LACHER DU BARRAGE**

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

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**

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.

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, les caractéristiques de l'installation permettent d'évaluer le débit minimal  $Q_{min}$  évacué de l'ouvrage, permettant de produire la puissance visée. Dans le troisième cas, le débit total  $Q_t$  à lâcher du barrage, est déterminé uniquement à partir des autres consignes, ainsi que la puissance produite  $P_e$  qui découle de  $Q_t$ .

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

Il s'agit de lâcher du barrage un débit total  $Q_t$  supérieur ou égal à un débit réservé  $Q_r$  prédéfini.

#### **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 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.

#### **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  $Q_e(t)$  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**

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 ( $Q_{l1}$ ) soit à Bakel ( $Q_{l2}$ ).
- La fréquence  $T_l$  de réussite souhaitée pour le laminage

### **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**

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**

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.

#### **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 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  $A_{sd}$  et se terminant l'année  $A_{sf}$ .
- 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 sera en grande partie automatisé, grâce à un logiciel qui sera 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), Oualia (Bakoye), Kayes (Sénégal), Bakel (Sénégal).
- Débit total instantané lâché du barrage
- 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 la station de Bakel, ils consistent en une relation unique (dite bi-univoque) entre la cote et le débit. A Bakel, 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 cette station 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). Le même type d'extension de donnée est également effectué pour les pertes par évaporation. Le détail des opérations est donné ci-dessous, dans l'ordre où celles-ci doivent être effectuées le jour Jo avant de calculer le réglage de débit du barrage du jour même:

### 2.1.1. 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 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.

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

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

#### Modèle de propagation inverse

Cette méthode utilise le débit observé au jour Jo à Kayes, qui doit donc être connu. Il s'agit simplement d'appliquer en sens inverse, le modèle de propagation de débit utilisé entre Manantali, Oualia et Kayes en régime naturel (cf § 2-1-6). On détermine dans un premier temps le temps de propagation D des débits passés à Manantali et Oualia, qui sont à l'origine du débit observé le jour Jo à Kayes. Le modèle donne alors la somme des débits de Manantali et Oualia du jour Jo-D. Le débit de Manantali du jour Jo-D étant connu, on en déduit celui de Oualia, qu'on extrapole jusqu'au jour Jo. En principe, on ne sera amené que très rarement à utiliser cette méthode assez approximative.

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

### 2.1.2. La Falémé à Gourbassy

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

**Modèle de propagation** donnant le débit à Gourbassy au jour j+D en fonction du débit au jour j à Fadougou, calé sur la période 1954-1987 :

Q(j) Fadougou (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4	3000
Q(j+D) Gourbassy (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	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

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

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

### Modèle de propagation inverse

Cette méthode utilise le débit observé au jour Jo à Bakel, qui doit donc être connu. Il s'agit simplement d'appliquer en sens inverse, le modèle de propagation de débit utilisé entre Kayes, Gourbassy et Bakel. On détermine dans un premier temps le temps de propagation D des débits passés à Kayes et Gourbassy (§ 2-1-9), qui sont à l'origine du débit observé le jour Jo à Bakel. En calcul manuel, on se contente ensuite d'évaluer le débit du jour Jo-D à Gourbassy comme la différence entre le débit du jour Jo à Bakel, et de celui du jour Jo-D à Kayes. On extrapole enfin jusqu'au jour Jo, le débit évalué pour le jour Jo-D à Gourbassy. En principe, on ne sera amené que très rarement à utiliser cette méthode assez approximative.

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

### 2.1.3 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** 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.

### 2.1.4 Le Bafing à Soukoutali en régime naturel : station fictive

Le fichier de débit journalier de cette station fictive 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 ( $m^3 s^{-1}$ )	0	125	500	1125	2000	2500
Q(j+D) Soukoutali ( $m^3 s^{-1}$ )	0	143	607	1212	2002	2436
D (jour)	0	0	0	0	0	0

### 2.1.5 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 ( $m^3 s^{-1}$ )	0	381	523	621	685	1000	2000	2500	3000	3500
Q(j)) Int1 ( $m^3 s^{-1}$ )	0	-28	-2	-26	-4	40	207	210	365	455

### 2.1.6 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 Jo+1 et Jo+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 1967-1971 :

Q(j) Oualia + Manantali ( $m^3 s^{-1}$ )	10	17	29	50	59	69	80	100	134	145	172	205	227	244	285	301	381
Q(j+D) Kayes ( $m^3 s^{-1}$ )	10	19	31	51	58	64	78	99	125	135	166	188	210	222	263	277	353
D (jour)	4	5	8.5	7.5	7	5	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2
Q(j) Oualia + Manantali ( $m^3 s^{-1}$ )	405	425	444	523	563	621	664	685	1000	2000	2500	3000	3500				
Q(j+D) Kayes ( $m^3 s^{-1}$ )	380	399	430	521	554	595	649	681	1040	2207	2710	3365	3955				
D (jour)	2	1.5	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2				

### 2.1.7 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 Jo+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 + Oualia ( $m^3 s^{-1}$ )	0	125	250	375	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000	4000	4500	5000
Q(j)) Int2 ( $m^3 s^{-1}$ )	0	12	25	27	21	15	34	70	98	119	136	152	158	390	506	611
Q(j) Kayes naturel + Oualia ( $m^3 s^{-1}$ )	5500	6000														
Q(j)) Int2 ( $m^3 s^{-1}$ )	577	515														

### 2.1.8. 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 Jo+1 et Jo+10.

**Modèle de propagation** 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 ( $m^3 s^{-1}$ ) + int1	10	17	29	50	59	69	80	100	285	301	405	425	444	664	685
Q(j+D) Kayes ( $m^3 s^{-1}$ )	10	17	29	50	59	69	80	100	285	301	405	425	444	664	685
D (jour)	4	5	8.5	7.5	7	5	3.5	2.5	2.5	2	2	1.5	1	1	1.5
Q(j) Oualia + Manantali ( $m^3 s^{-1}$ ) + int1	2500	3000	3500												
Q(j+D) Kayes ( $m^3 s^{-1}$ )	2500	3000	3500												
D (jour)	1.5	2	2												

### 2.1.9. 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 Jo+ 1 et Jo+10.

**Modèle de propagation** 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) Kayes + Gourbassy + Int2 ( $m^3 s^{-1}$ )	0	3500	4000	6000
Q(j+D) Kayes ( $m^3 s^{-1}$ )	0	3500	4000	6000
D (jour)	1	1	2	2

### 2.1.10. 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 Jo+ 1.

**Extension** de la dernière valeur mesurée sur 30 jours au maximum.

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

Falémé Fadougou		Bafing daka Saïdou		Bafing Makana		Bakoye Oualia		Falémé Gourbassy		Sénégal Kayes		Sénégal Bakel			
Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	Qo	Ho	K
0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	10	0	40	0	0	0.0015
4	0	4	0	4	1	50	0	25	3	30	1	50	4	220	0.0015
10	1	12	2	13	4	70	4	70	14	45	5	70	15	350	0.0009
17	2	20	4	28	9	90	11	100	25	65	15	80	22	900	0.0005
32	5	30	7	50	18	120	30	140	52	86	29	100	41	1300	0.0005
48	10	50	20	78	30	160	71	200	117	117	69	120	64		
70	20	100	80	100	41	200	124	240	169	162	156	140	91		
100	38	200	270	141	64	240	177	280	228	200	254	190	177		
132	61	300	500	160	76	280	231	320	294	252	414	250	311		
180	101	400	800	200	104	320	300	360	372	300	579	325	517		
220	144	500	1150	254	147	360	388	400	463	390	925	400	755		
260	194	600	1650	280	170	400	479	440	564	496	1370	450	945		
300	255	760	2600	440	307	440	577	480	675	500	1390	500	1170		
400	415			520	392	560	877	520	790	616	1940	600	1640		
500	590			580	473	580	928	560	904	700	2380	700	2170		
600	775			620	541	600	978	600	1020	887	3560	800	2750		
700	995			640	587	650	1120	640	1140	900	3660	900	3510		
800	1250			680	711	750	1420	700	1310	1100	4720	1000	4360		
1000	1820			720	882	900	1850	800	1600	1150	5000	1100	5265		
1200	2440			760	1130	1100	2450	950	2040	1400	6400	1200	6270		
				799	1460							1300	7600		
				900	2680										
				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 Gourbassy 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 (m3/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 $Q_{MINO}$ ET $Q_{MAXO}$ RELATIVES AUX CONTRAINTES DE GESTION**

Le plus récent niveau de surface libre relevé dans le lac est utilisé pour calculer la fourchette de débit [ $Q_{minO}$ ,  $Q_{maxO}$ ] qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage.

### **2.2.1. Débit minimal $Q_{minO}$**

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  $Q_{minO}$  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  $Q_{minO}(H)$ , dont les résultats figurent dans le tableau 2-2-A et la figure 2-2-A.

### **2.2.2. Débit maximal $Q_{maxO}$**

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  $Q_{maxO}(H)$  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 (m<sup>3</sup>/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	H	Qmaxo
		160,00	544	170,00	1505	180,00	2509	190,00	3085	200,00	3620	210,00	8011
		161,00	659	171,00	1582	181,00	2571	191,00	3134	201,00	3663	211,00	8457
		162,00	774	172,00	1659	182,00	2632	192,00	3182	202,00	4167		
		163,00	890	173,00	1736	183,00	2693	193,00	3231	203,00	4670		
		164,00	1005	174,00	2059	184,00	2754	194,00	3280	204,00	5172		
155,28	0	165,00	1120	175,00	2202	185,00	2816	195,00	3377	205,00	5674		
156,00	83	166,00	1197	176,00	2264	186,00	2878	196,00	3426	206,00	6173		
157,00	198	167,00	1274	177,00	2325	187,00	2940	197,00	3474	207,00	6672		
158,00	313	168,00	1351	178,00	2387	188,00	2988	198,00	3523	208,00	7118		
159,00	429	169,00	1428	179,00	2448	189,00	3037	199,00	3571	209,00	7564		

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

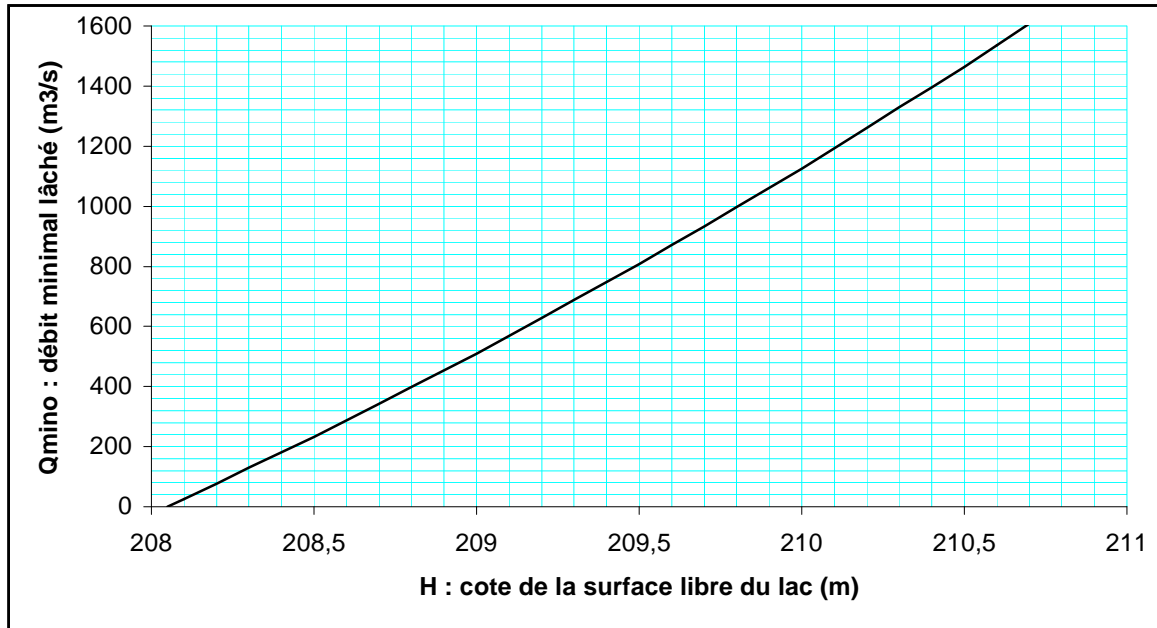


Figure 2-2-A : relation  $Q_{\text{mino}}(H)$  donnant le débit minimal qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac.

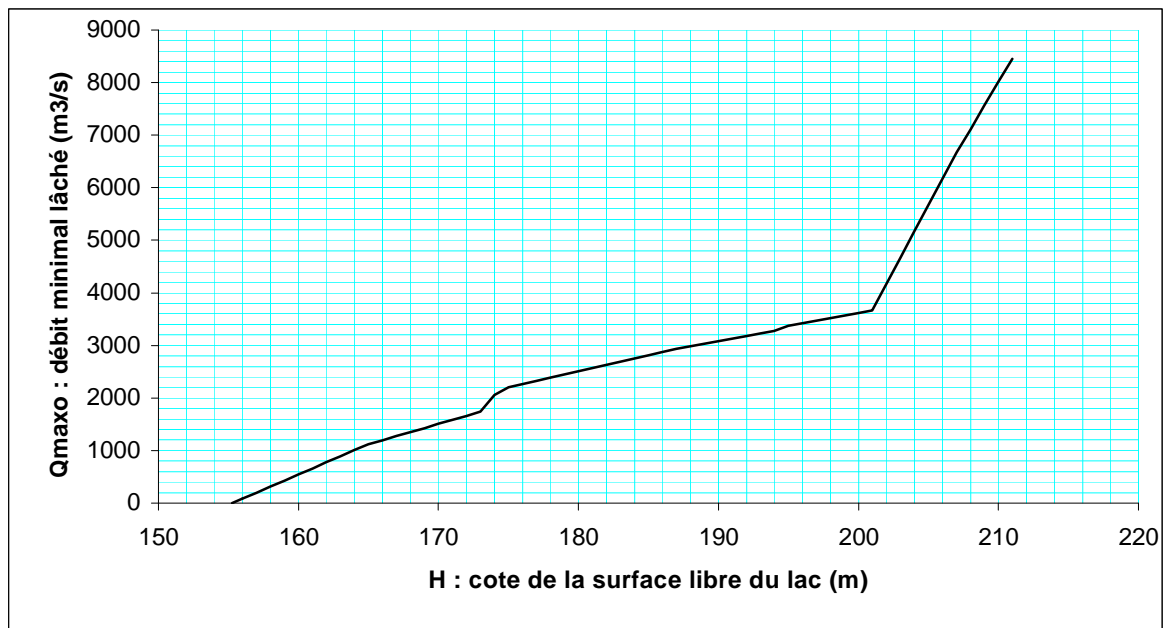


Figure 2-2-B : relation  $Q_{\text{maxo}}(H)$  donnant le débit maximal qu'il est physiquement possible de lâcher du barrage en fonction de la cote dans le lac.

## **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**

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 suivant les deux procédures décrites ci-dessous :

#### **2.3.1.1. Débit à lâcher $Q_{tp}$ calculé à partir des modèles de propagation**

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  $Q_{tp}$  ( $J_0$ ), sensé faire coïncider le débit du Sénégal à Bakel avec l'hydrogramme objectif. Si l'on tient compte des temps de propagation variables en fonction du débit, ce calcul doit être mené de façon itérative. Par encadrements successifs, on ajuste ainsi la valeur de  $Q_{tp}$  ( $J_0$ ) 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  $Q_{tp}(J_0)$  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  $J_0+n_1+n_2$ .

#### **2.3.1.2. Correction en boucle fermée du débit calculé à partir des modèles de propagation**

La procédure de correction en boucle fermée vise à affiner le calcul du débit à lâcher, en tenant compte des débits effectivement observés aux stations situées à l'aval du barrage, qui résultent des lâchers antérieures. Elle est très utile dans le cas où les apports intermédiaires entre les stations s'écartent beaucoup des valeurs estimées par modèle corrélatif (cf paragraphe 2-1). Elle peut également être efficace en cas d'erreur systématique affectant les données ou le tarage d'une station (Oualia, Gourbassy ou Manantali).

Le calcul peut être fait à partir des débits observés à Bakel (prioritairement) ou à Kayes, pourvu que la date  $J_c$  du dernier débit observé et connu à la station utilisée soit supérieure ou égale à  $J_0-2$ . Autrement dit, il faut que le débit observé à Kayes ou Bakel qu'on utilise pour faire la correction ne date pas plus de deux jours au moment de faire le calcul.

Le principe de ce calcul est le suivant pour le jour  $J_0$ , en adoptant les notations suivantes :

$Q_b$  : débit observé dans le Sénégal à Bakel  
 $Q_{bp}$  : débit objectif prédéfini du Sénégal à Bakel  
 $Q_{lâché}$  : débit total effectivement lâché du barrage de Manantali  
 $Q_{tp}(J_0)$  : débit total à lâcher le jour  $J_0$ , calculé à partir des modèles de propagation pour réaliser à Bakel un débit coïncidant avec l'hydrogramme objectif  $Q_{bp}$  à la date  $J_0+n_1+n_2$   
 $Q_{tc}(J_0)$  : débit total qu'il est souhaitable de lâcher à Manantali pour réaliser à Bakel un débit coïncidant avec l'hydrogramme objectif  $Q_{bp}$  à la date  $J_0+n_1+n_2$ , compte tenu de la correction par boucle fermée appliquée au débit  $Q_{tp}$   
 $Q_k$  : débit observé à Kayes

Qkp : débit prévu à Kayes, calculé à partir des modèles de propagation en fonction du débit à lâcher Qtp,  
 Corr : correction à appliquer au débit Qtp pour trouver Qtc

**1<sup>er</sup> cas : correction à partir des débits observés à Bakel :**

$$\text{Corr} ( J_o ) = 0,7 \{ Q_{bp} ( J_c ) - Q_b ( J_c ) + Q_{lâché} ( J_c-3 ) - Q_{tp} ( J_c-3 ) \}$$

**2eme cas : correction à partir des débits observés à Kayes :**

$$\text{Corr} ( J_o ) = 0,7 \{ Q_{kp} ( J_c ) - Q_k ( J_c ) + Q_{lâché} ( J_c-2 ) - Q_{tp} ( J_c-2 ) \}$$

Dans la pratique, on limitera la correction à la fourchette [-700 +700] m<sup>3</sup>/s . Dans les très rares cas où les débits observés à Bakel et Kayes ne seront pas connus depuis plus de 2 jours, on appliquera une correction nulle. La valeur limite de débit total à lâcher pour respecter la consigne sera finalement:

$$Q_{tc} ( J_o ) = Q_{tp} ( J_o ) + \text{Corr} ( J_o )$$

**2.3.2. mode de calcul du débit lâché amenant le niveau du lac à une valeur prédéfinie au bout de 24h : consignes A6, B1 et B3**

Trois consignes sont concernées par ce type de calcul : la conservation d'un volume libre dans la retenue destiné au laminage des crues (A6) ; la submersion permanente de la partie basse du parement amont de l'ouvrage (B1) ; la conservation d'un stock d'eau suffisant destiné à la satisfaction de certaines demandes en eau (B3). La première consigne vise à maintenir la surface libre du lac en dessous d'une cote limite variable dans l'année, alors que les deux autres visent au contraire à la maintenir au dessus d'une cote limite, fixe pour B1, et variable dans l'année pour B3. Mais le principe du calcul permettant de déterminer la limite de débit total lâché Qt, est le même pour ces trois consignes. Pour le jour Jo, il repose sur un simple bilan de volume d'eau, donné ci-dessous avec les notations suivantes :

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  
 Hl : cote limite à respecter dans le lac, égale à Het pour la consigne B3, Hlam pour la consigne A6, et Hmin (187m) pour la consigne B1.  
 Qsou : débit naturel du Bafing à la station fictive de Soukoutali

$$Q_t ( J_o ) = \max ( 0 ; ( V ( H ( J_o ) ) - V ( H_l ( J_o + 1 ) ) ) / 86400 - S ( H ( J_o ) ) * E ( J_o ) + Q_{sou} ( J_o ) )$$

Les relations V(H) et S(H) caractéristique 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.

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

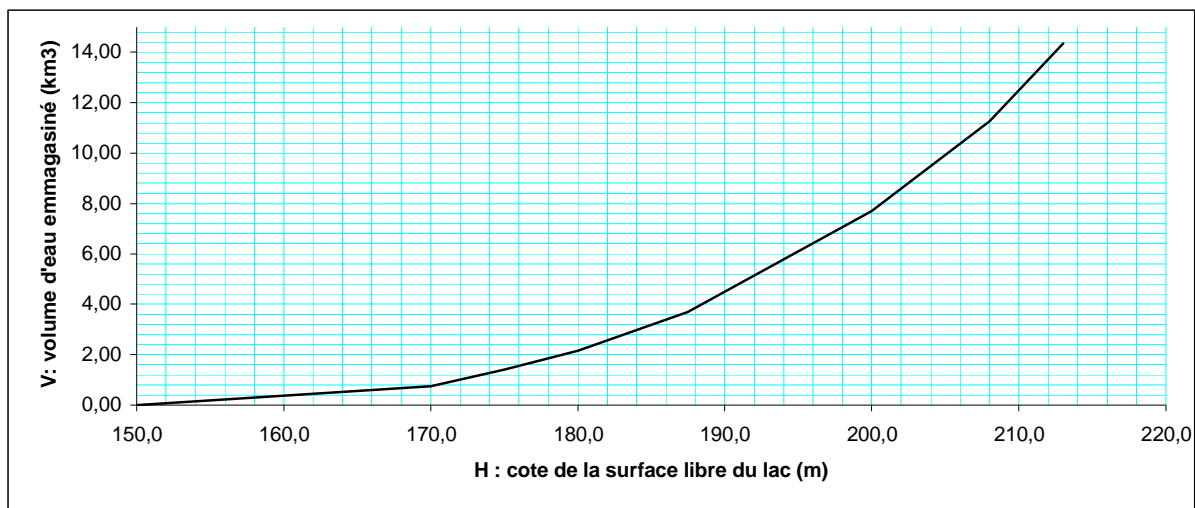


Figure 2-3-A : relation entre cote de surface libre et volume d'eau emmagasiné dans la retenue de Manantali.

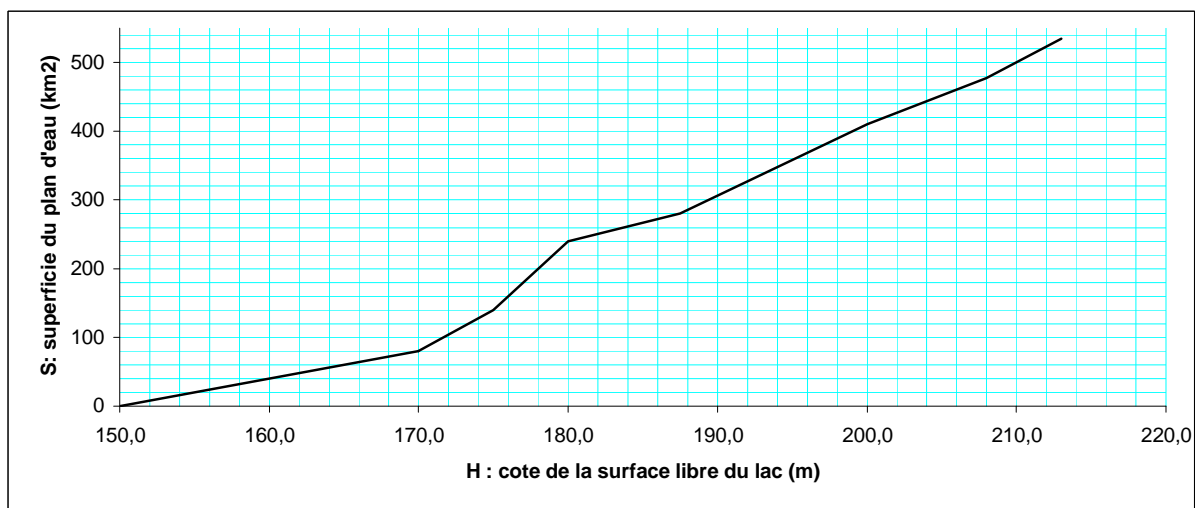


Figure 2-3-B : relation entre cote de surface libre et superficie de la retenue

### 2.3.3. Mode de calcul du débit minimal permettant d'éviter la submersion des digues du barrages : consigne A1

Le but de la consigne A1 est d'éviter la submersion des digues du barrage, tout en limitant au maximum les pointes de débit déstockés à partir de la retenue. Elle tient compte de l'ensemble des débits naturels entrant dans la retenue ainsi que des pertes par évaporation, pour estimer le débit minimal à lâcher.

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  $J_0 + N_s$ , on calcule une valeur minimale  $Q_i$  de débit à déstocker le jour  $J_0$  selon les principes suivants :



- La surface libre du lac ne doit pas dépasser la cote limite de sécurité Hmax à la date Jo+ i +24 heures.
- La valeur maximale de débit lâché entre les jours Jo et Jo+i doit être la plus faible possible

Le calcul repose une fois encore sur un bilan de volume. Pour permettre une économie d'eau maximale, il doit tenir compte de la relation Qmino(H) caractéristique du barrage. Ceci n'est envisageable qu'en calcul automatique. Une procédure simplifiée, tout aussi sûre sur le plan de la sécurité, mais moins économe sur les débits déversés, est proposée ci-dessous pour le calcul manuel. Elle revient à calculer le débit constant, lâché entre les jours Jo et Jo+i, qui amène la surface libre du lac à la cote Hmax à la date Jo + i +24 heures :

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

On conserve finalement la valeur maximale des Qi(Jo) obtenus (pour i allant de 0 à Ns) comme débit minimal à lâcher le jour Jo permettant de respecter la consigne A1.

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

Les caractéristiques des turbines et des divers organes d'évacuation du barrage sont données dans les deux documents cités au paragraphe 2-2-2. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer des abaques décrivant la production théorique d'énergie de l'ouvrage. Ces courbes sont représentées sur les figures 2-3-C à 2-3-J.

On rappelle que la consigne envisagée pour la demande de production d'énergie est définie par les trois paramètres de gestion Po, S1 et S2. Le débit minimal Qmin 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 S1**

La consigne se traduit alors par une valeur nulle de Qt, 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 S1 et S2**

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

La première étape du calcul consiste à déterminer Pmax. 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 Pmax peut donc être déterminée à partir des caractéristiques des turbines, de la relation hauteur-débit dans le canal de fuite, et de la relation Qmino(H) donnant le débit minimal déversé par les vannes de surface. La puissance Pmax, 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 Pmax est inférieur à Po, le débit total lâché minimal Qmin 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 S2**

On vise alors à produire la puissance maximale productible Pmax. 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.

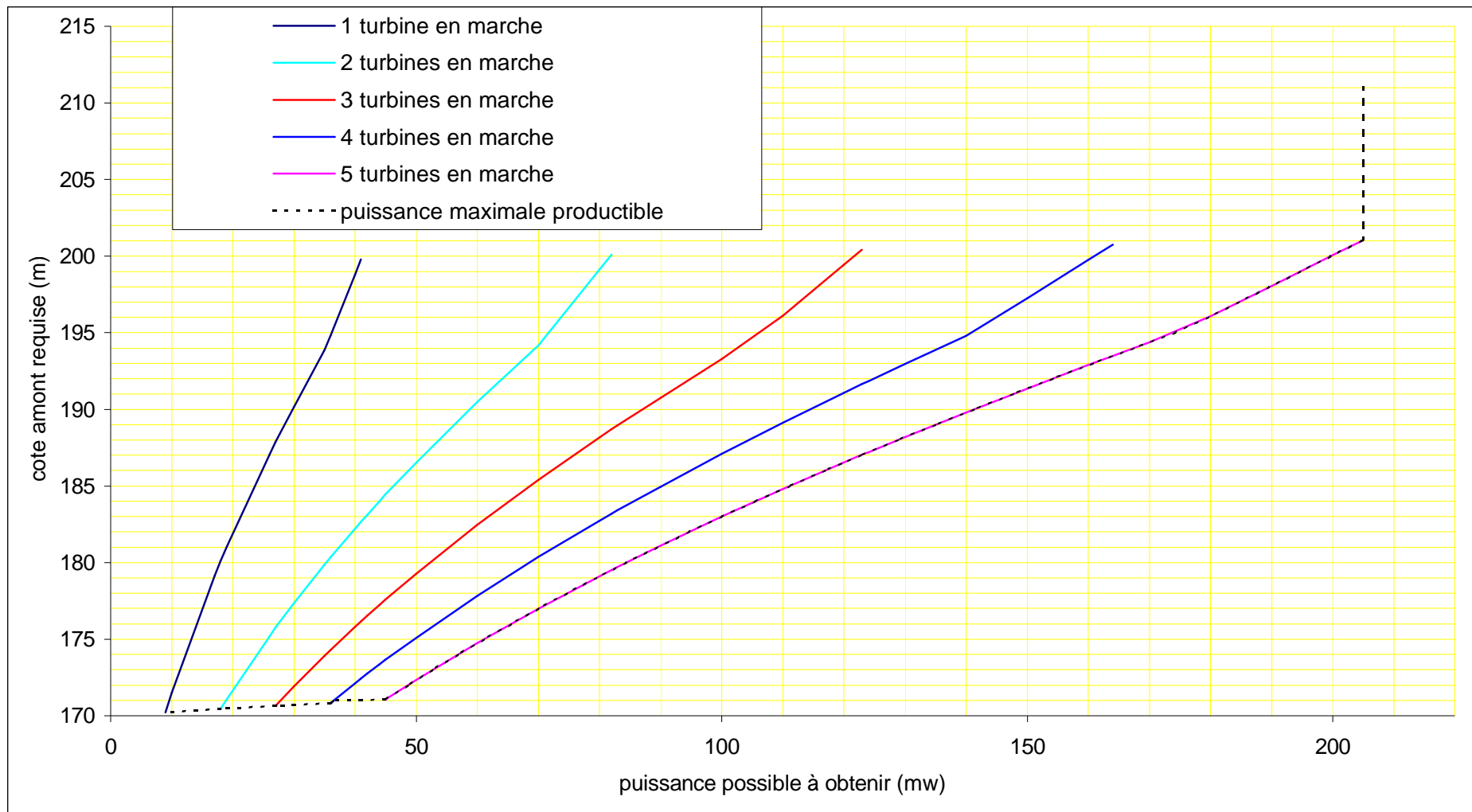


Figure 2-3-C : cote minimale du lac permettant de produire une puissance donnée, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal

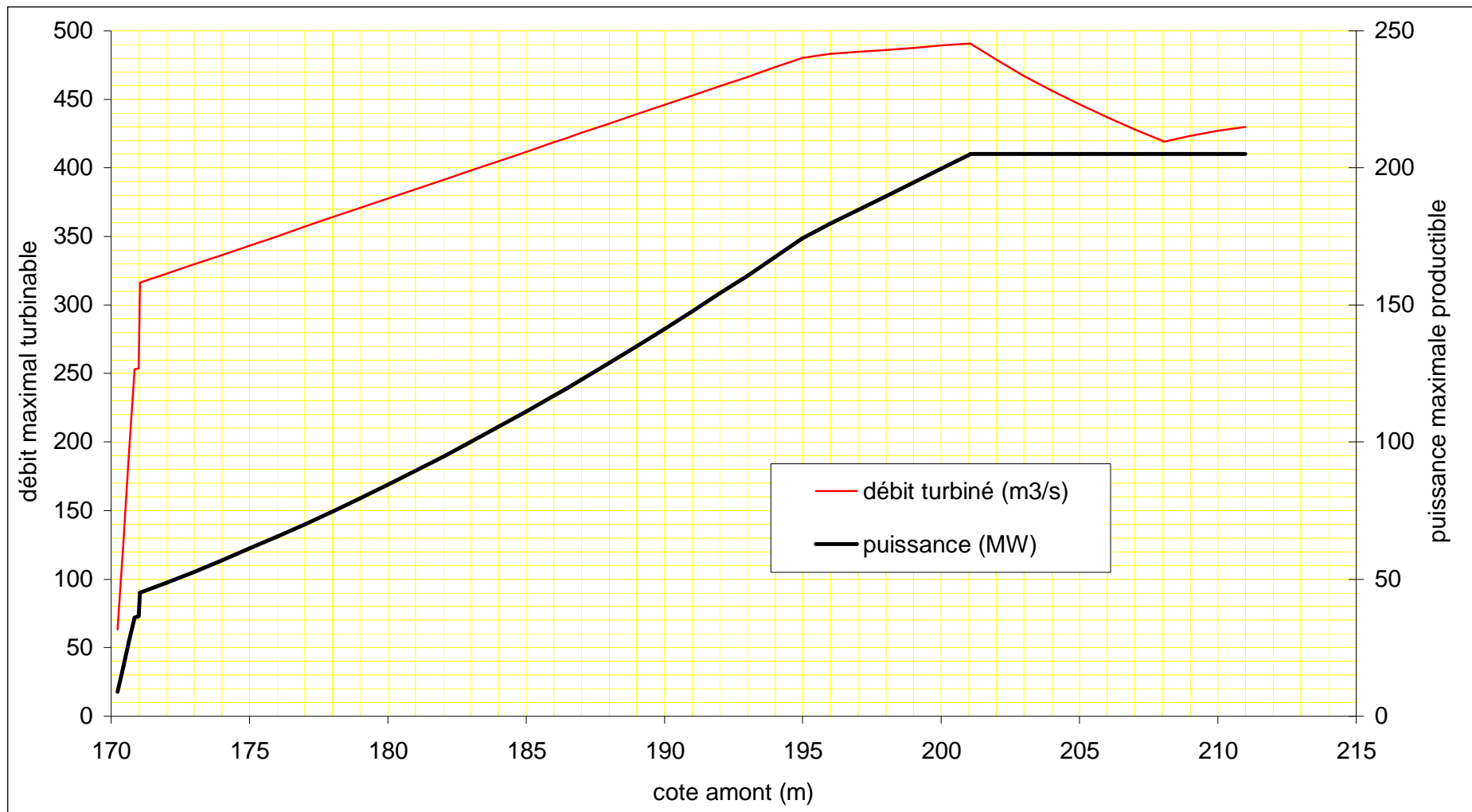


Figure 2-3-D : débit maximal turbinable et puissance obtenue en fonction de la cote du lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal, et pour 5 turbines potentiellement utilisables

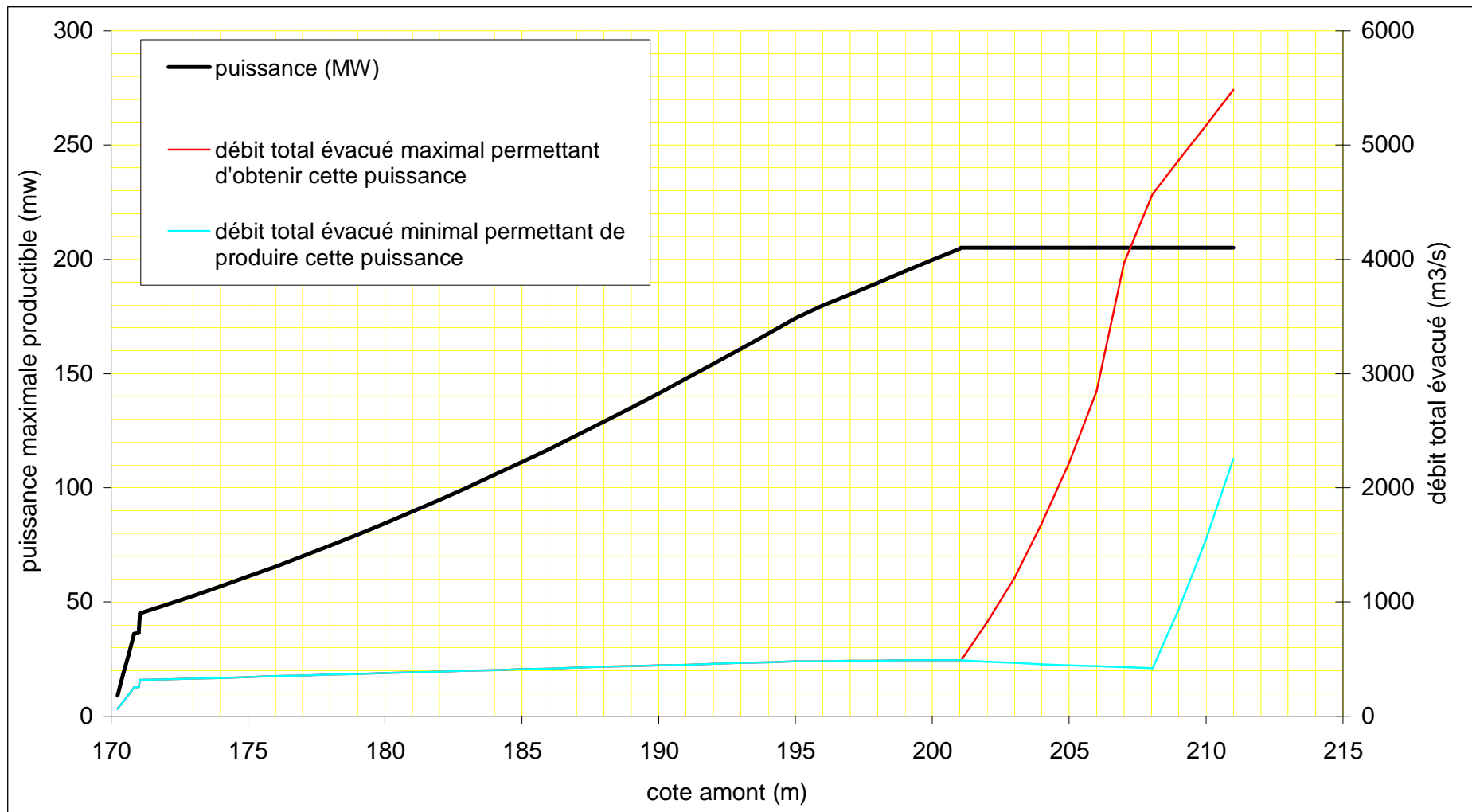


Figure 2-3-E : puissance maximale produisible et extremums de débit total lâché permettant de produire cette puissance, en fonction de la cote du lac, dans le cas de 5 turbines potentiellement utilisables

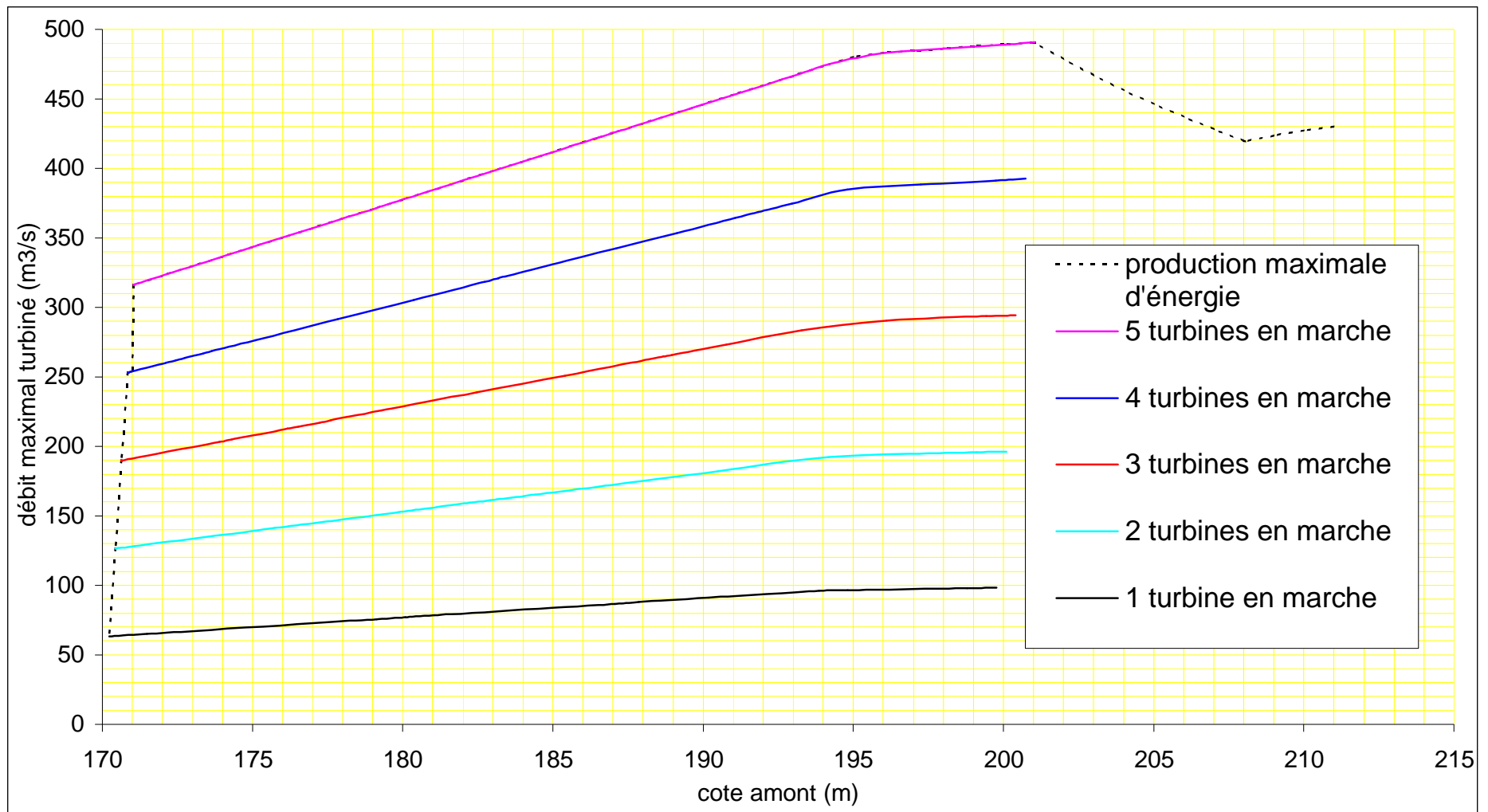


Figure 2-3-F : débit maximal turbinable en fonction de la cote du lac et du nombre de turbines exploitées, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal.

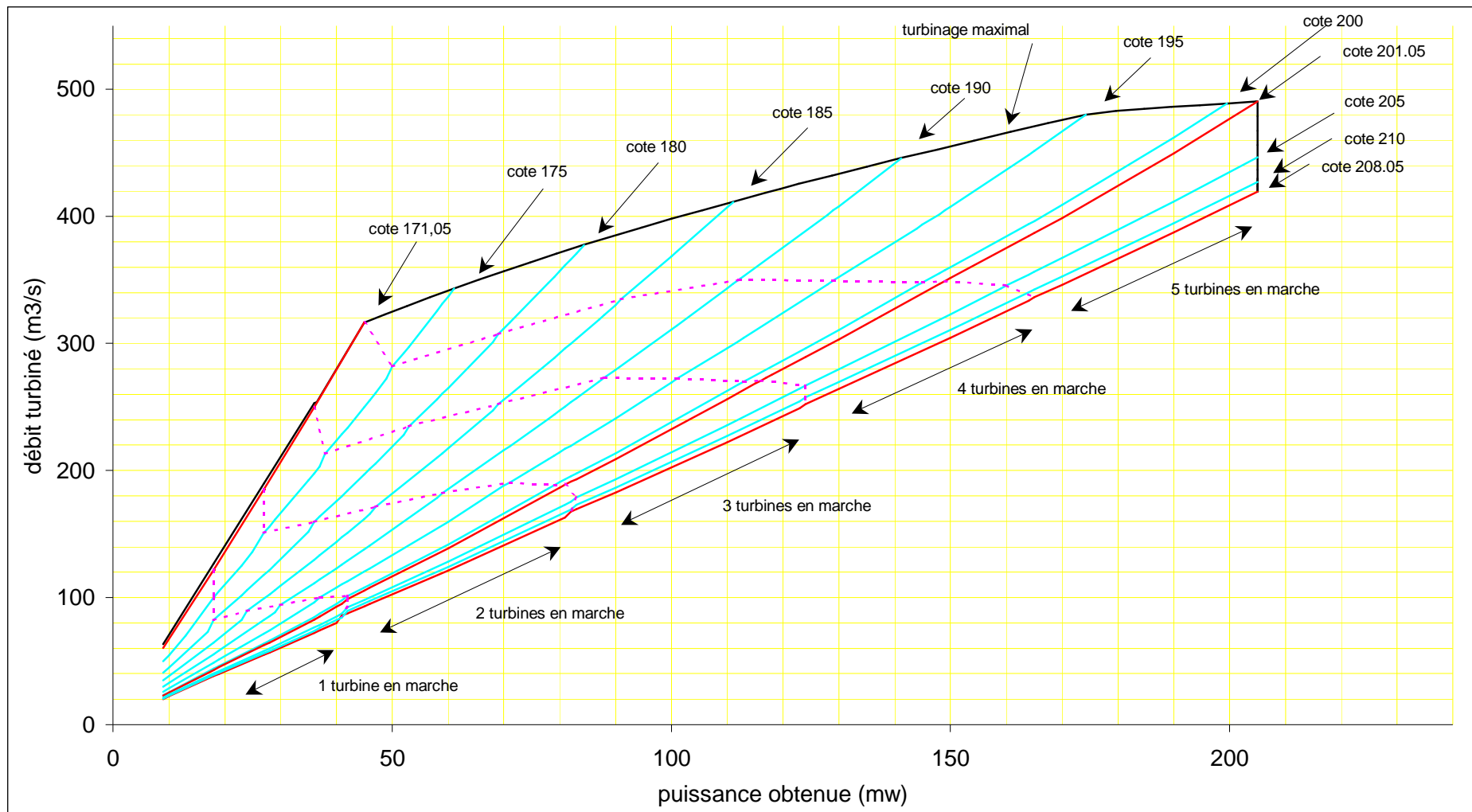


Figure 2-3-G : relation entre puissance obtenue et débit turbiné, établie pour différentes valeurs de cote dans le lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal.

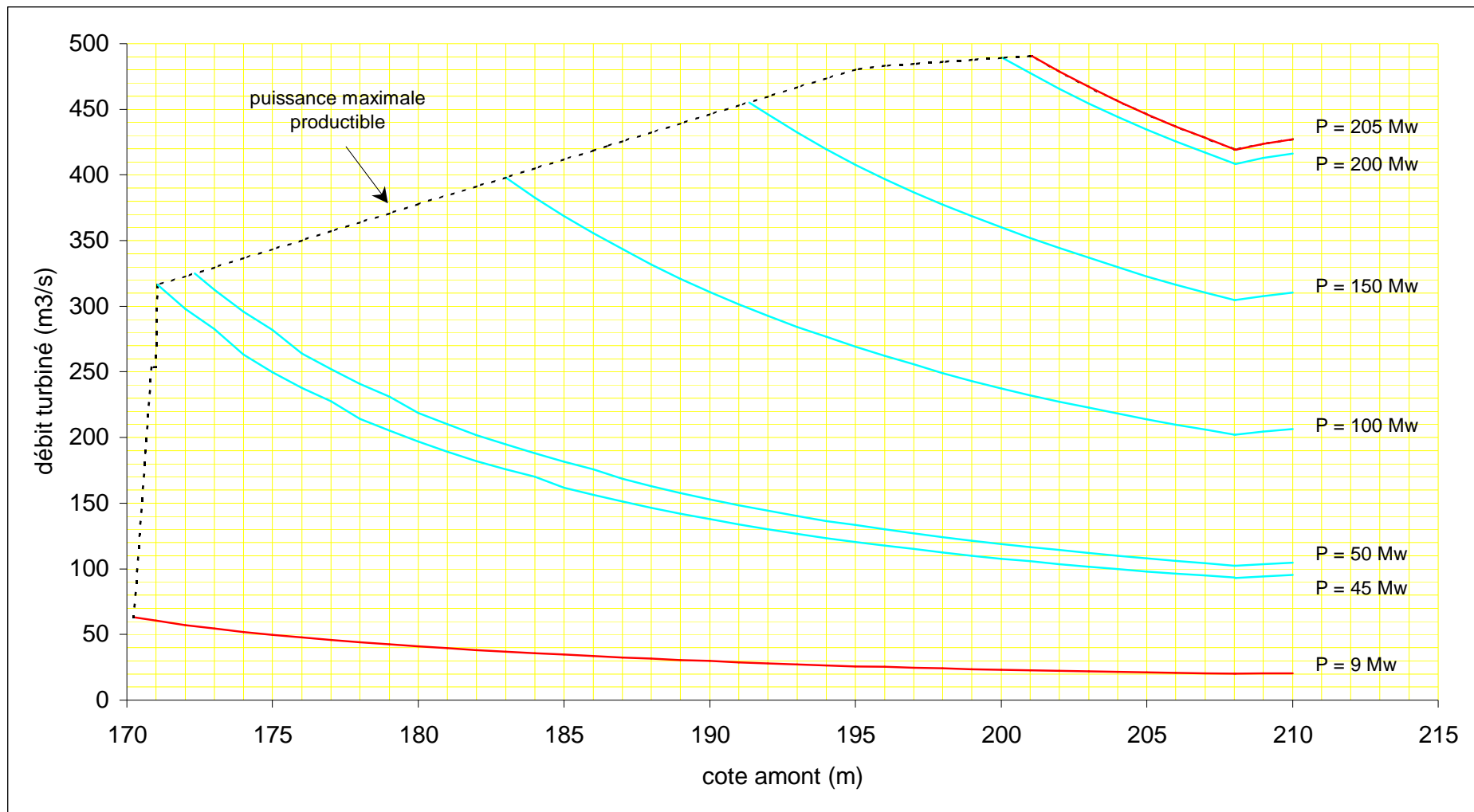


Figure 2-3-H : débit turbiné en fonction de la cote dans le lac, pour différentes valeurs de puissance produite, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal

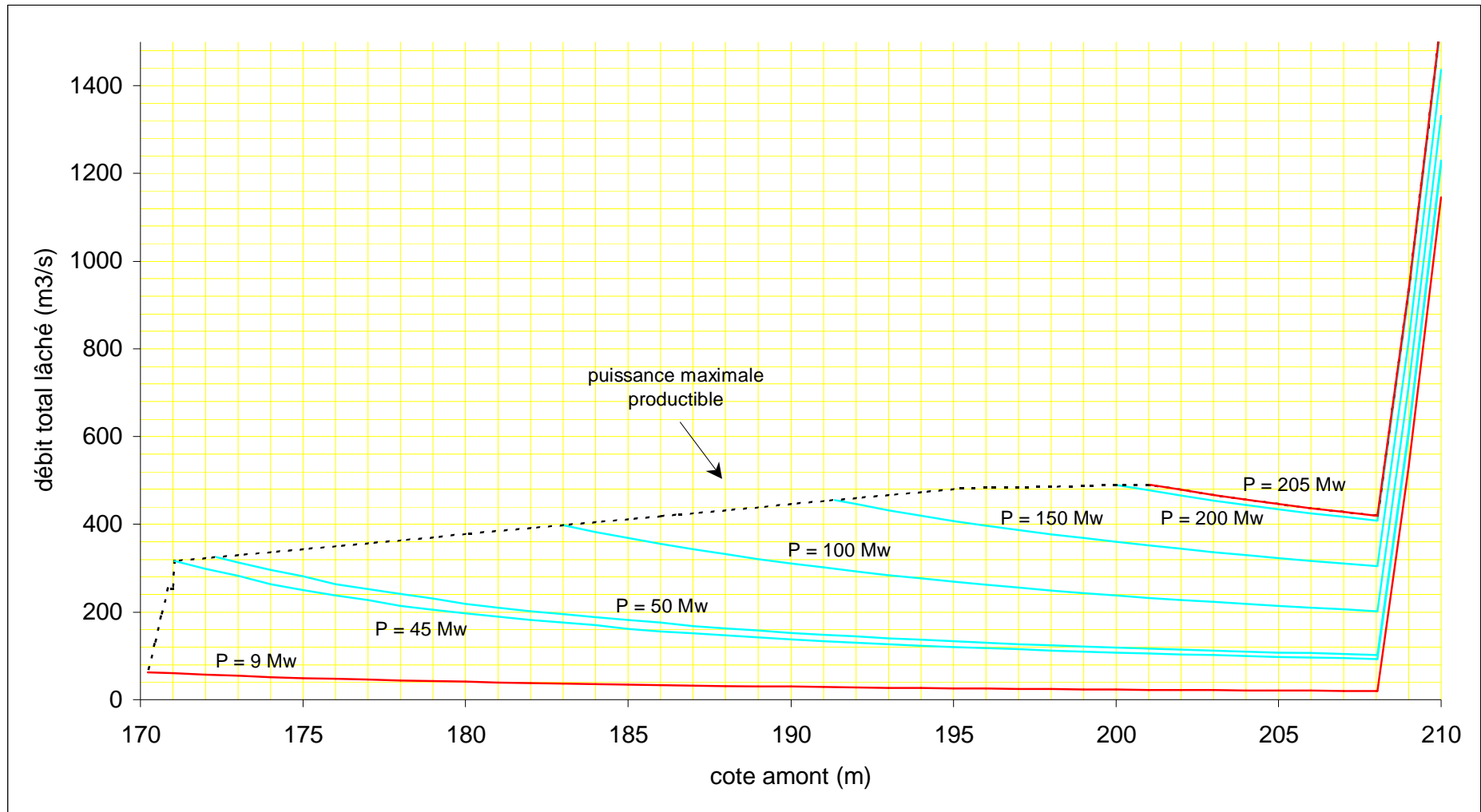


Figure 2-3-I : débit total lâché minimal (turbines +déversoir) permettant de produire une puissance donnée en fonction de la cote dans le lac



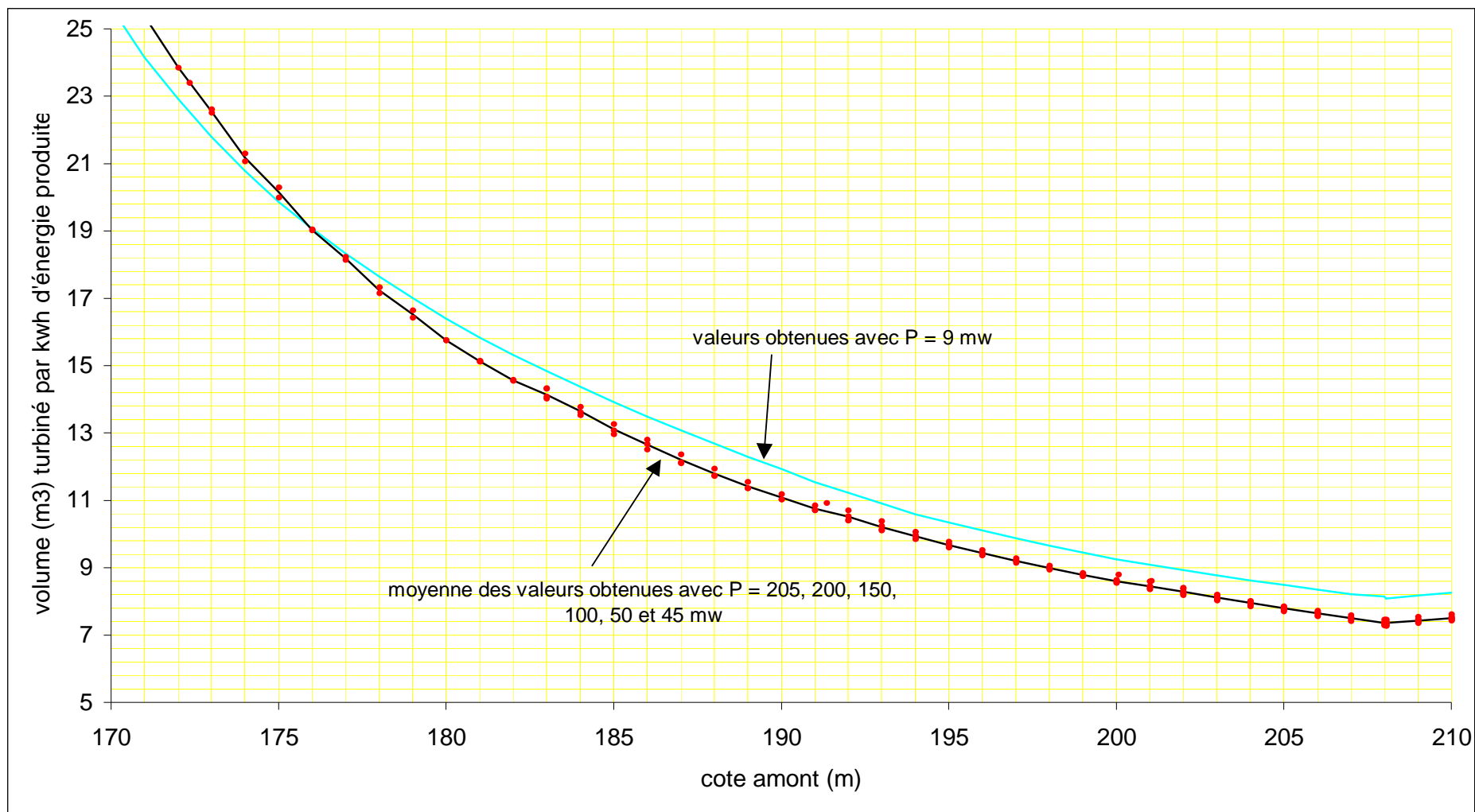


Figure 2-3-J : volume d'eau turbiné par kWh d'énergie produite, en fonction de la cote dans le lac, dans le cas d'un débit vidangé nul et d'un débit déversé minimal

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	30
191,00					301	149	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	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 :

$$Qt1 = Q_{min}$$

$$Qt2 = Qmaxo$$

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  $Pt$  à l'aide de la figure 2-5-A ou du tableau 2-5-A. La puissance à produire  $Pe$  est ensuite fixée égale à la valeur minimale de  $Pt$  et  $Pr$  (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  $Pe$ , du débit total lâché  $Qt$  et de la cote dans le lac  $H$ , doivent maintenant être utilisées pour déterminer le débit à turbiner  $Qe$ . 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).

$$Qe = Pe / ( 0,9 * \rho * g * ( H - Hf ( Qt ) ) )$$

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.

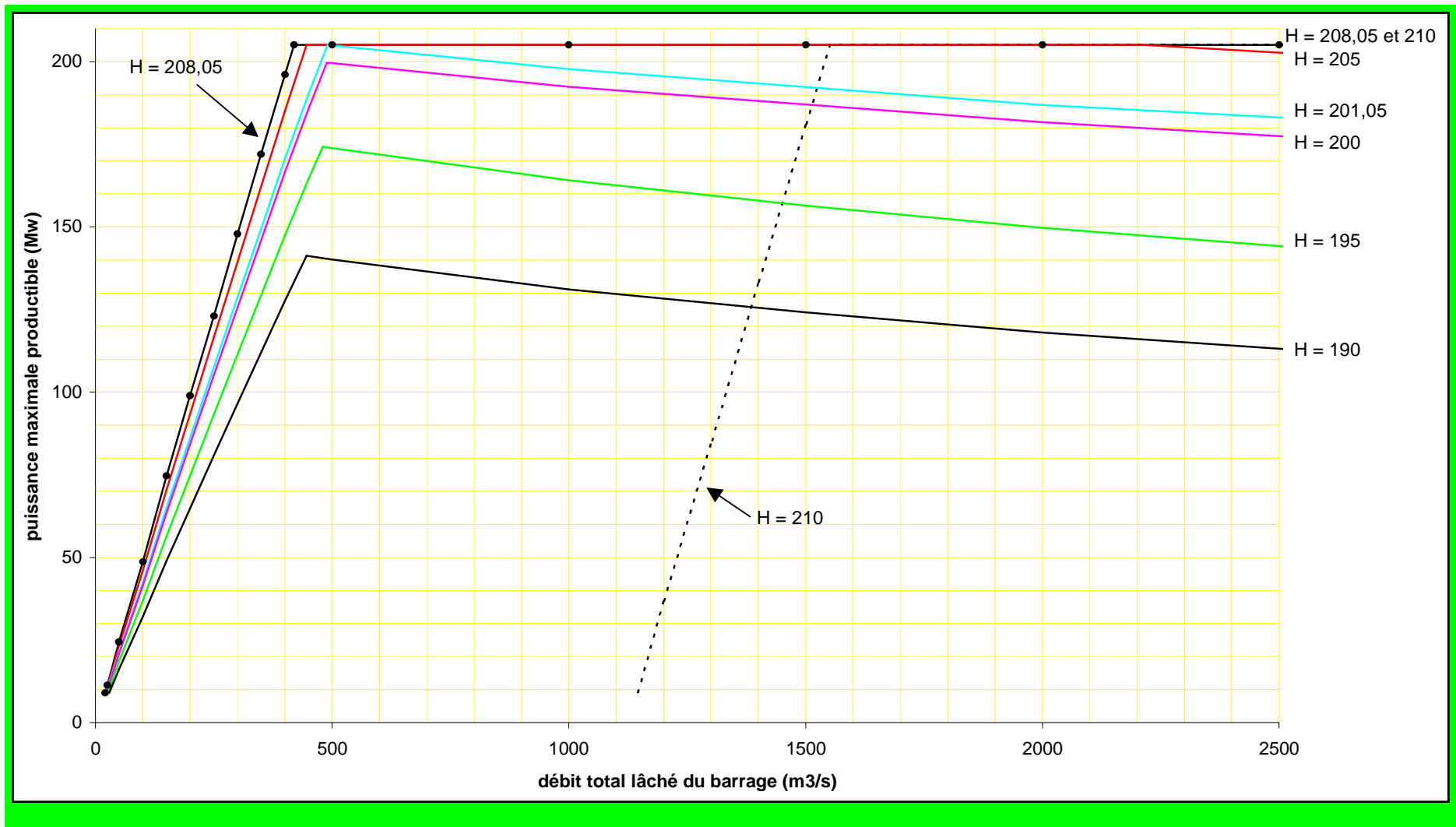


figure 2-5-A : puissance maximale productible  $P_t$  en fonction de la cote du lac  $H$  (m) et du débit total lâché  $Q_t$ , dans le cas de 5 turbines potentiellement utilisables

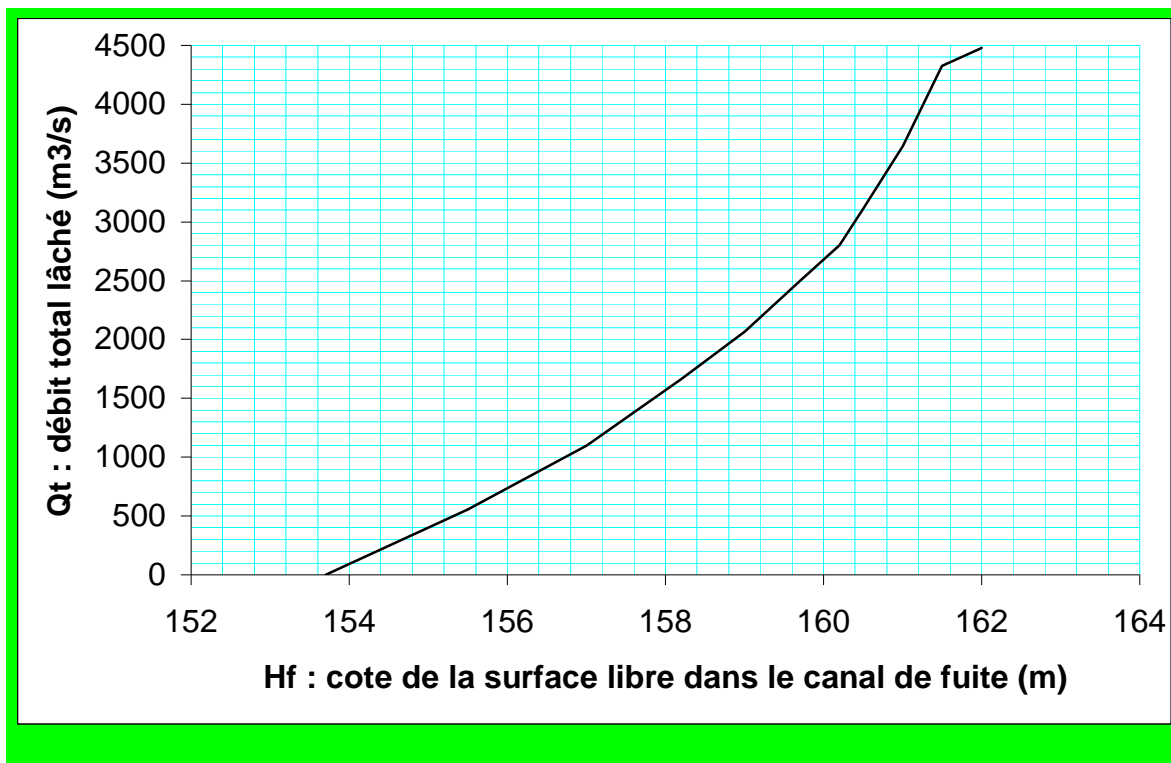


figure 2-5-B : relation hauteur débit dans le canal de fuite

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.

## **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. 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.

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  $H_{et}$  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 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  $P = \min(P_o ; P_{max})$  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.

### 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 :

- P1 : la puissance moyenne interannuelle obtenue sur la période 1950-1998
- P2 : la puissance moyenne interannuelle obtenue 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. 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  $P_o$  (Mw),  $S_2$  (m),  $S_1$  (m) et  $H_s$  (m), de la façon suivante:

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

$$N10 = 1960 + 0,971 * P_o - 2,472 * S_2 + 9,783 * S_1 - 17,093 * H_s \quad (r2 = 0,762)$$

$$N25 = 1631 + 0,510 * P_o - 0,472 * S_2 + 0,444 * S_1 - 8,370 * H_s \quad (r2 = 0,550)$$

$$N50 = 1421 + 0,351 * P_o + 0,120 * S_2 - 0,428 * S_1 - 7,028 * H_s \quad (r2 = 0,517)$$

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

$$N10 = 2737 + 1,078 * P_o - 0,889 * S_2 + 1,089 * S_1 - 14,213 * H_s \quad (r2 = 0,554)$$

$$N25 = 2573 + 0,583 * P_o - 0,065 * S_2 - 2,167 * S_1 - 10,991 * H_s \quad (r2 = 0,508)$$



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

Pour un débit objectif  $Qe = 200 \text{ m}^3/\text{s}$  :

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

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

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

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  $\text{m}^3/\text{s}$ . 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.

### **3.2.2. 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  $Qe$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), de la façon suivante :

Pour un débit objectif de basses eaux  $Qe = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  :

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

Pour un débit objectif de basses eaux  $Qe = 150 \text{ m}^3/\text{s}$  :

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

Pour un débit objectif de basses eaux  $Qe = 200 \text{ m}^3/\text{s}$  :

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

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 :

$$R = -76,1 + 0,0271 * Qe + 0,1009 * P1 \quad (r2 = 0,744)$$

Sur l'ensemble des scénarios testés, la proportion des années à crue trop faible se répartit entre 3% et 30%.

### 3.2.3. Analyse de la puissance moyenne interannuelle produite

La puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1950-1998 (P1) ou sur la période 1970-1998 (P2), exprimée en gWh. par année, peut être reliée 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 :

$$P1 = 2261 + 1,334 * Po - 12,605 * S2 - 5,552 * S1 + 10,932 * Hs \quad (r2 = 0,815)$$

$$P2 = -806 + 0,309 * Po - 2,691 * S2 - 7,553 * S1 + 17,702 * Hs \quad (r2 = 0,730)$$

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

$$P1 = 2155 + 1,500 * Po - 13,364 * S2 - 3,266 * S1 + 10,000 * Hs \quad (r2 = 0,837)$$

$$P2 = -1012 + 0,583 * Po - 3,683 * S2 - 3,949 * S1 + 16,217 * Hs \quad (r2 = 0,708)$$

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

$$P1 = 2333 + 1,169 * Po - 12,746 * S2 - 1,520 * S1 + 6,988 * Hs \quad (r2 = 0,871)$$

$$P2 = -527 + 0,389 * Po - 3,739 * S2 - 1,133 * S1 + 11,263 * Hs \quad (r2 = 0,703)$$

Pour l'ensemble des scénarios de gestion envisagés :

$$P1 = 2198 + 0,339 * Qe + 1,335 * Po - 12,905 * S2 - 3,446 * S1 + 9,307 * Hs \quad (r2 = 0,819)$$

$$P2 = -857 + 0,500 * Qe + 0,427 * Po - 3,371 * S2 - 4,212 * S1 + 15,061 * Hs \quad (r2 = 0,701)$$

Pour les deux périodes de référence envisagées, on constate que la puissance moyenne interannuelle produite augmente avec la puissance demandée Po, le seuil de déclenchement du soutien de crue Hs et le débit objectif de basses eaux Qe. 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 productible.

Sur l'ensemble des scénarios, les valeurs obtenues pour P1 (1950-1998) se répartissent entre 768 et 987 Gwh/an, alors que celles de P2 (1970-1998) se répartissent entre 578 et 801 Gwh/an.

Enfin, sur l'ensemble des scénarios, P1 (Gwh/an) peut être relié en moyenne à Qe (m<sup>3</sup>/s) et R (%) de la façon suivante :

$$P1 = 780,2 + 6,907 * R - 0,0842 * Qe \quad (r2 = 0,720)$$

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

### 3.2.4. Identification des scénarios 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, la puissance moyenne interannuelle obtenue (P1 ou P2) 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 la puissance 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 puissance 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 puissance produite
- Parmi les scénarios restant, on élimine ceux qui pour une valeur de R, présentent une puissance produite inférieure à celle d'un scénario donnant une valeur de R inférieure.

On obtient ainsi les scénarios présentant la relation R(P1) ou R(P2) la plus basse possible, ou encore la relation P1(R) ou P2(R) la plus haute possible. Ces scénarios optimaux sont indiqués dans les tableaux 3-2-A, 3-2-B et 3-2-C. Ils sont par ailleurs représentés sur les figures 3-2-A à 3-2-C pour la relation P1(R), et 3-2-D à 3-2-F pour la relation P2(R). Sur ces figures est également représenté l'ensemble des couples (P1 ; R) ou (P2 ; 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. On peut faire les constatations suivantes :

A puissance produite P1 (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<sup>3</sup>/s , ceux qui incluent un seuil S1 de 197 m permettent globalement de produire une faible puissance et d'obtenir peu de crues faibles (pour Qe= 100 m<sup>3</sup>/s : P1<910 Gwh/an et R<25% ; pour Qe = 150 m<sup>3</sup>/s : P1<960 GWh/an et R<40%). Au contraire, un seuil S1 de 192m favorise la puissance produite au détriment du nombre de bonnes crues. Cette tendance est moins nette quand on fixe à 200 m<sup>3</sup>/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 puissance 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<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/s , et si le seuil S1 vaut 197 m. On obtient alors une faible puissance et peu de crues faibles. Cette valeur de 192 m est par contre trop faible dès lors que Qe vaut 150 ou 200 m<sup>3</sup>/s . Sur la période 1970-1998, il apparaît qu'un seuil Hs de 198 m est souhaitable si Qe vaut 150 ou 200 m<sup>3</sup>/s .

Sur les figures 3-2-G et 3-2-H sont respectivement représentées les relations optimales P1(R) et P2(R), relatives aux trois valeurs testées pour le débit Qe de soutien de basses eaux : 100, 150 et 200 m<sup>3</sup>/s . Sur la période 1950-1998, on remarque que les trois relations P1(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 puissance produite P1 constante), et fait baisser P1 (à R constant). Bien que moins évidente, cette tendance se remarque également sur les relations P2(R), pour les valeurs de R inférieures à 30%.

### 3.2.5. 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 :  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ; etc..) ont été figés, alors que les autres ont été testés sur une gamme de variation forcément restreinte :

- $Q_e$ , débit objectif de basses eaux : 100, 150 et  $200 \text{ m}^3/\text{s}$
- $P_o$ , 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  $P_o$ , S1, S2 et Hs qui pour un soutien de basses eaux  $Q_e$  donné, permettent d'obtenir la meilleure puissance interannuelle 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 P1(R) ou P2(R) optimales.

Les relations optimales P1(R) et P2(R) montrent que la puissance moyenne interannuelle qu'on peut espérer obtenir, 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 P1, P2 et R s'accroissent en fonction de  $Q_e$ ,  $P_o$  et Hs, 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 Hs, 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 Hs. Si on se réfère à une période déficitaire en eau, il apparaît même que seule une valeur de 198m peut être retenue pour Hs dans ce dernier cas.

paramètres définissant les consignes de gestion					puissance 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)	P1 (50-98)	P2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet	crues faibles	N10 10%	N25 25%	N50 50%	avec déficit	P1	P2
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		

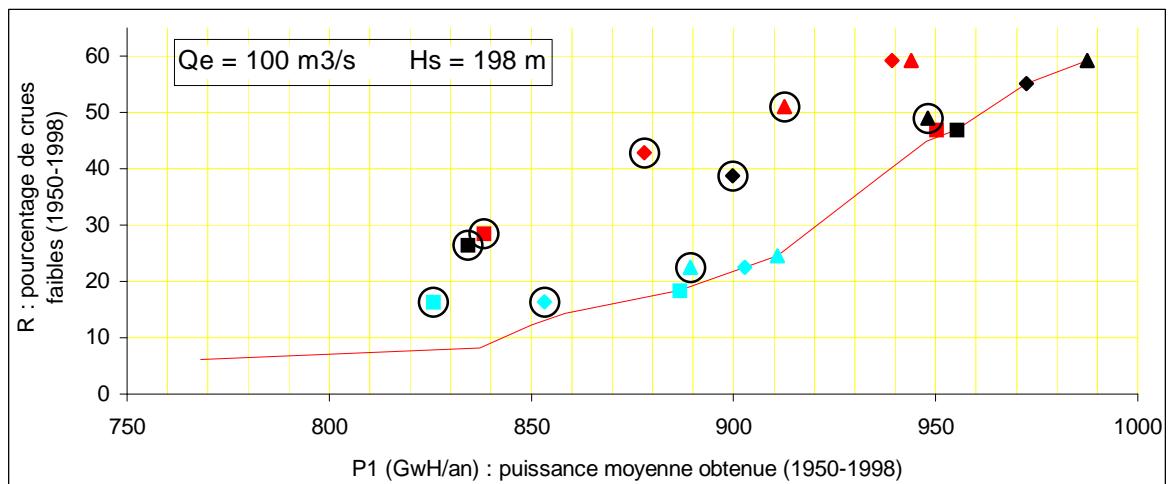
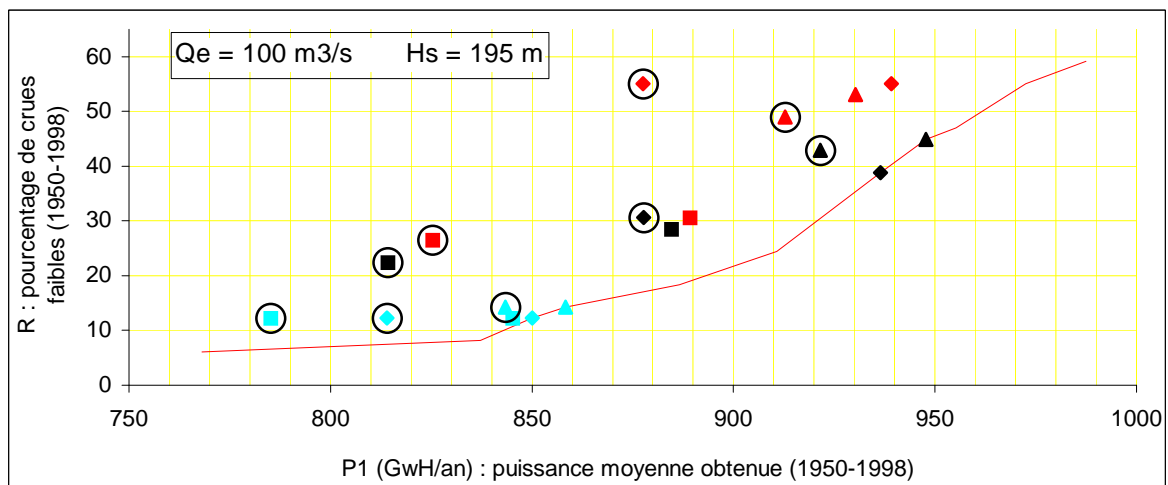
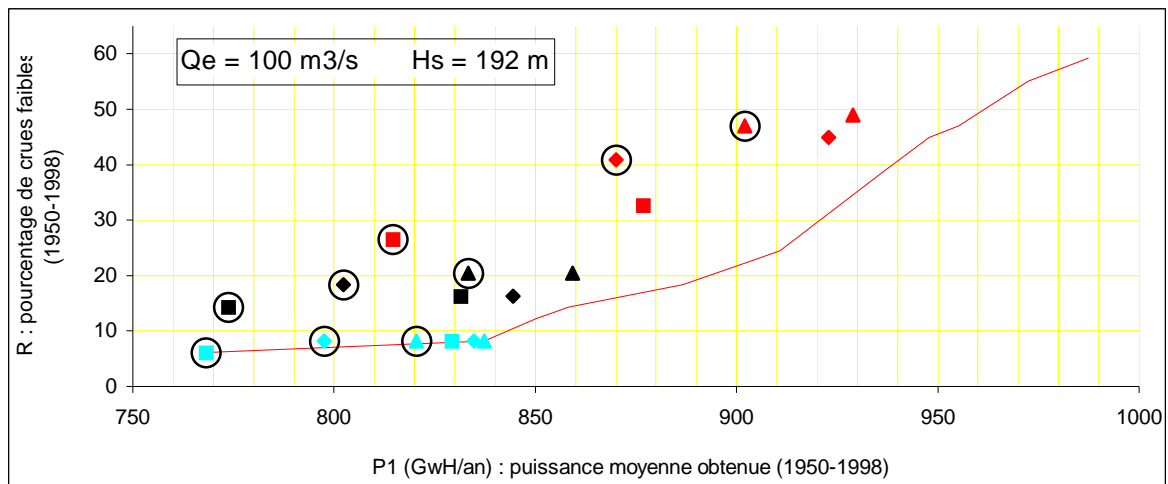
tableau 3-2-A : résultats des 54 scénarios simulés dans le cas d'un soutien de basses eaux fixé à 100 m<sup>3</sup>/s

paramètres définissant les consignes de gestion					puissance obtenue (Gwh/an)		crues			basses eaux				scénario optimal pour crue et puissance	
							nombre d'années		R (%)	nombre de jours de déficit			nombre d'années avec déficit		
Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	P1 (50-98)	P2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet	crues faibles	N10 10%	N25 25%	N50 50%		P1	P2
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					puissance obtenue (Gwh/an)		crues			basses eaux				scénario optimal pour crue et puissance	
							nombre d'années		R (%) crues faibles	nombre de jours de déficit			nombre d'années avec déficit		
Qe (m3/s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	P1 (50-98)	P2 (70-98)	Nss : sans soutien	Nsi : soutien incomplet			N10 10%	N25 25%		N50 50%	
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



■ Po = 70 Mw S1 = 187 m	■ Po = 70 Mw S1 = 192 m	■ Po = 70 Mw S1 = 197 m
◆ Po = 90 Mw S1 = 187 m	◆ Po = 90 Mw S1 = 192 m	◆ Po = 90 Mw S1 = 197 m
▲ Po = 110 Mw S1 = 187 m	▲ Po = 110 Mw S1 = 192 m	▲ Po = 110 Mw S1 = 197 m
○ S2 = 206 m (sinon : S2 = 202m)	— relation P1(R) optimale	

figure 3-2-A : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P1, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'été à 100 m<sup>3</sup>/s



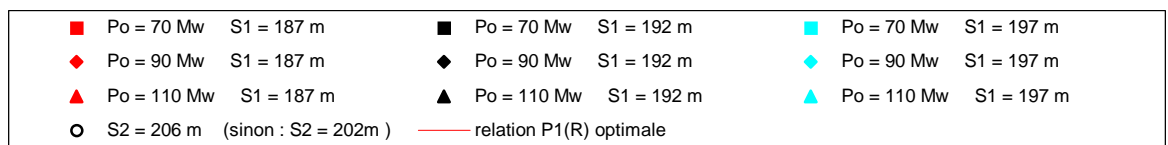
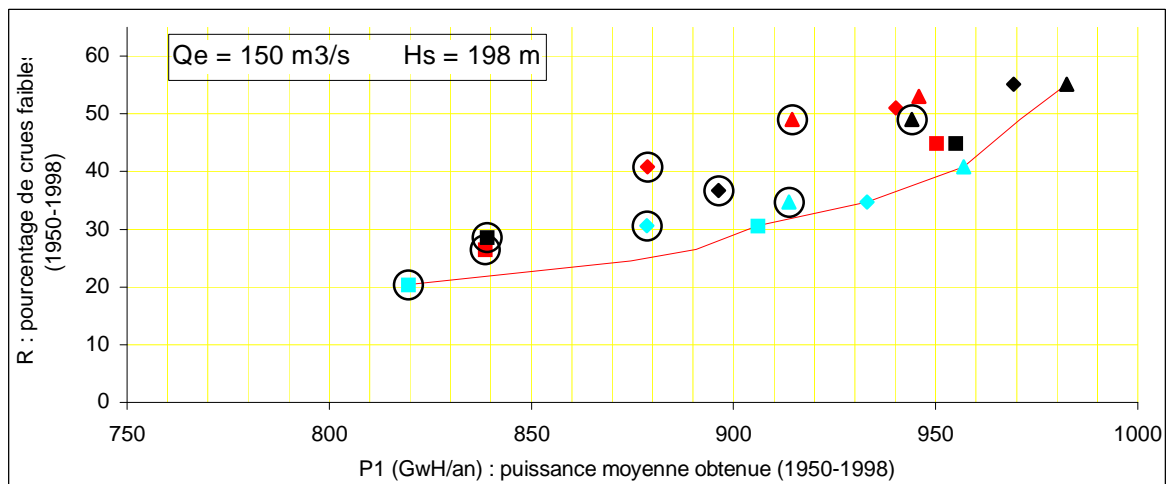
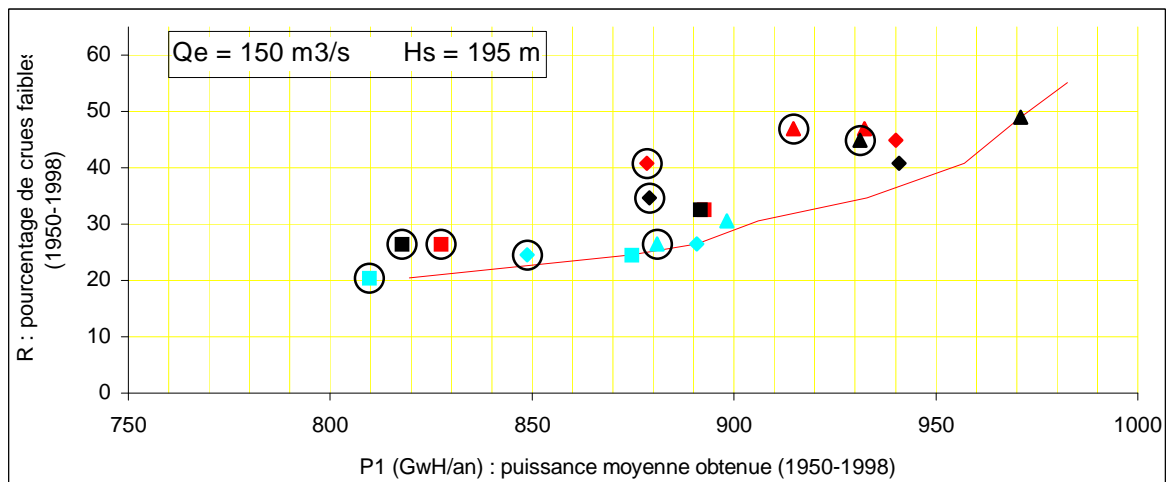
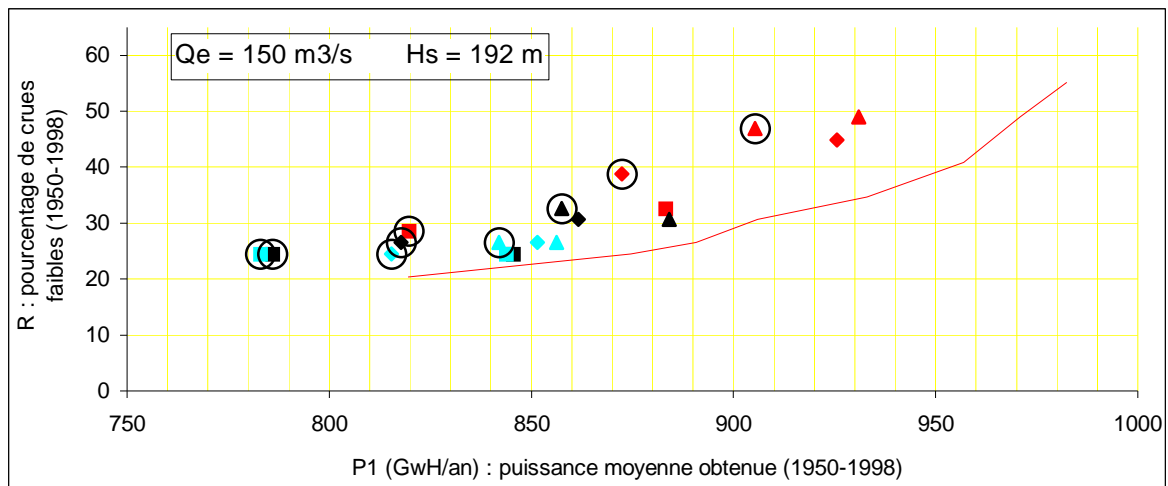
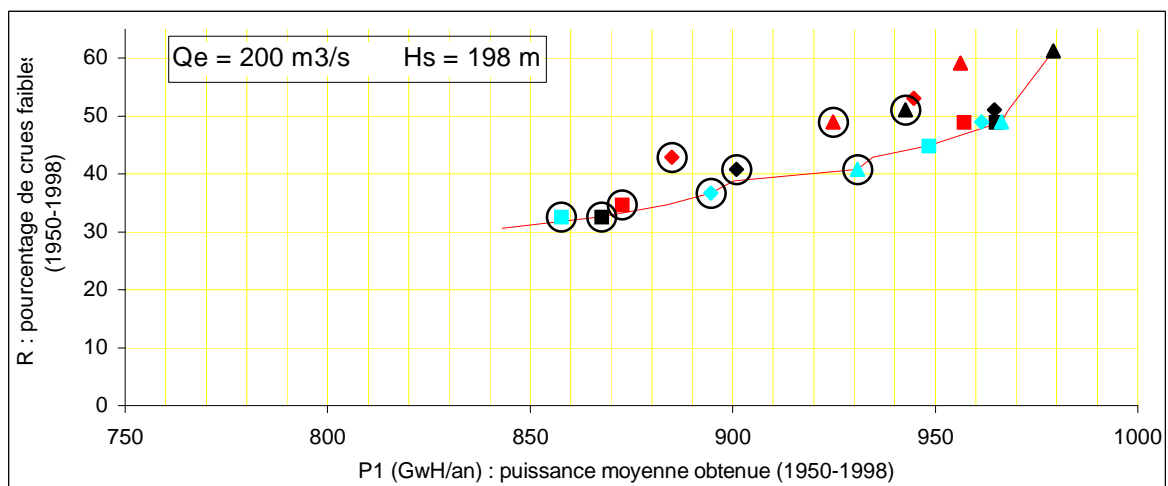
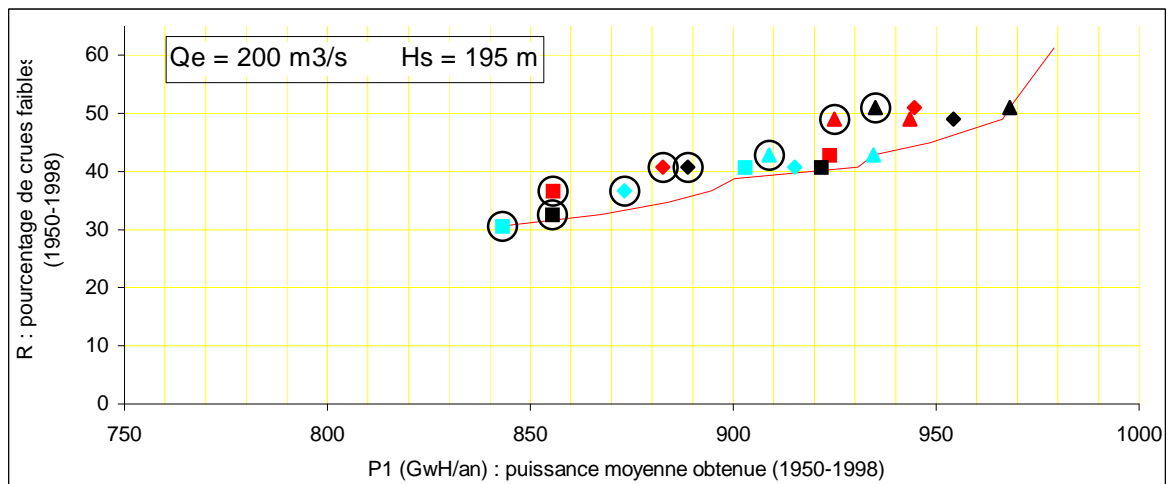
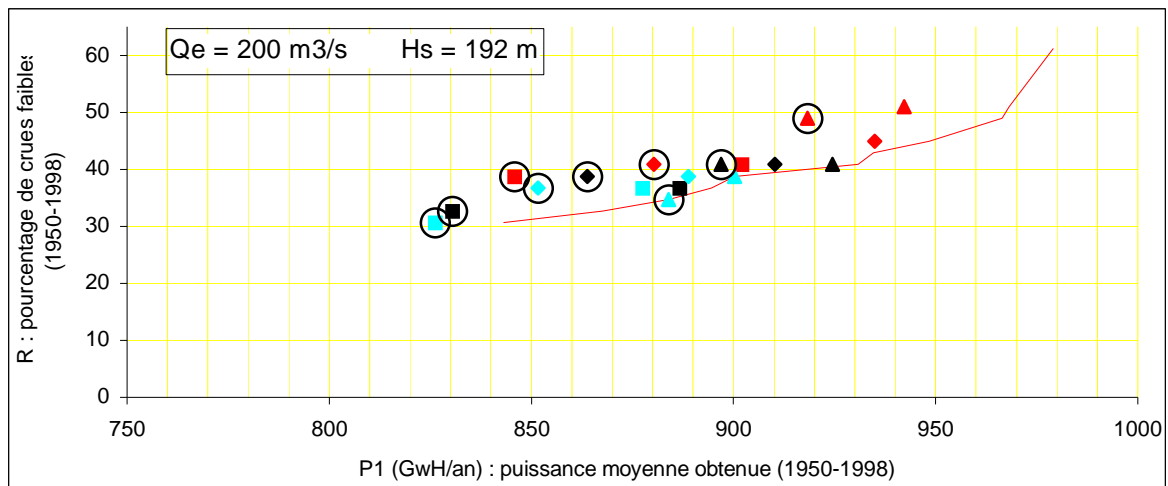


figure 3-2-B : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P1, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'été à 150 m<sup>3</sup>/s



■ Po = 70 Mw S1 = 187 m	■ Po = 70 Mw S1 = 192 m	■ Po = 70 Mw S1 = 197 m
◆ Po = 90 Mw S1 = 187 m	◆ Po = 90 Mw S1 = 192 m	◆ Po = 90 Mw S1 = 197 m
▲ Po = 110 Mw S1 = 187 m	▲ Po = 110 Mw S1 = 192 m	▲ Po = 110 Mw S1 = 197 m
○ S2 = 206 m (sinon : S2 = 202m)	— relation P1(R) optimale	

figure 3-2-C : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P1, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1950-1998, dans le cas d'un soutien d'été à 200 m<sup>3</sup>/s

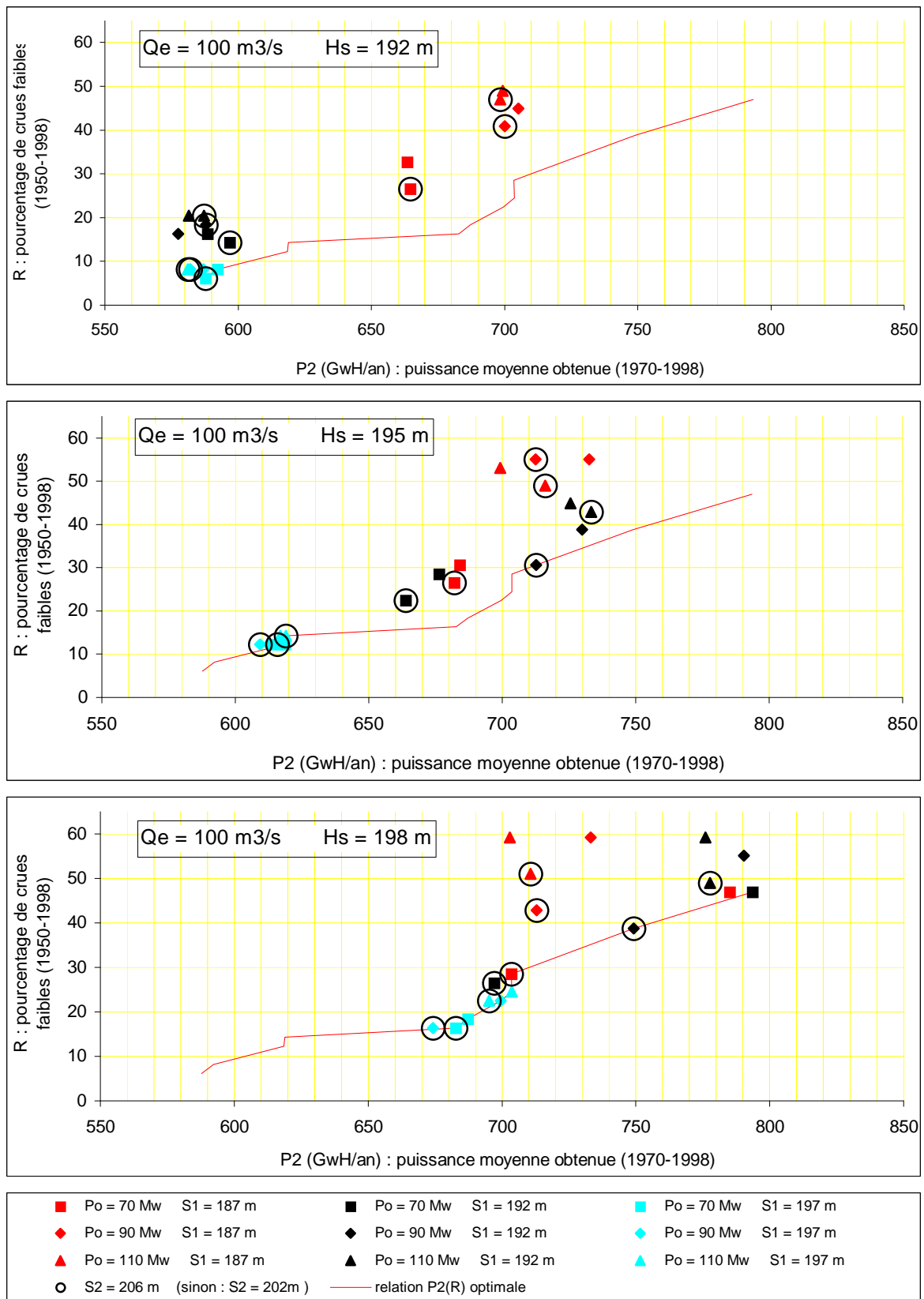


figure 3-2-D : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P2, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1970-1998, dans le cas d'un soutien d'été à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$

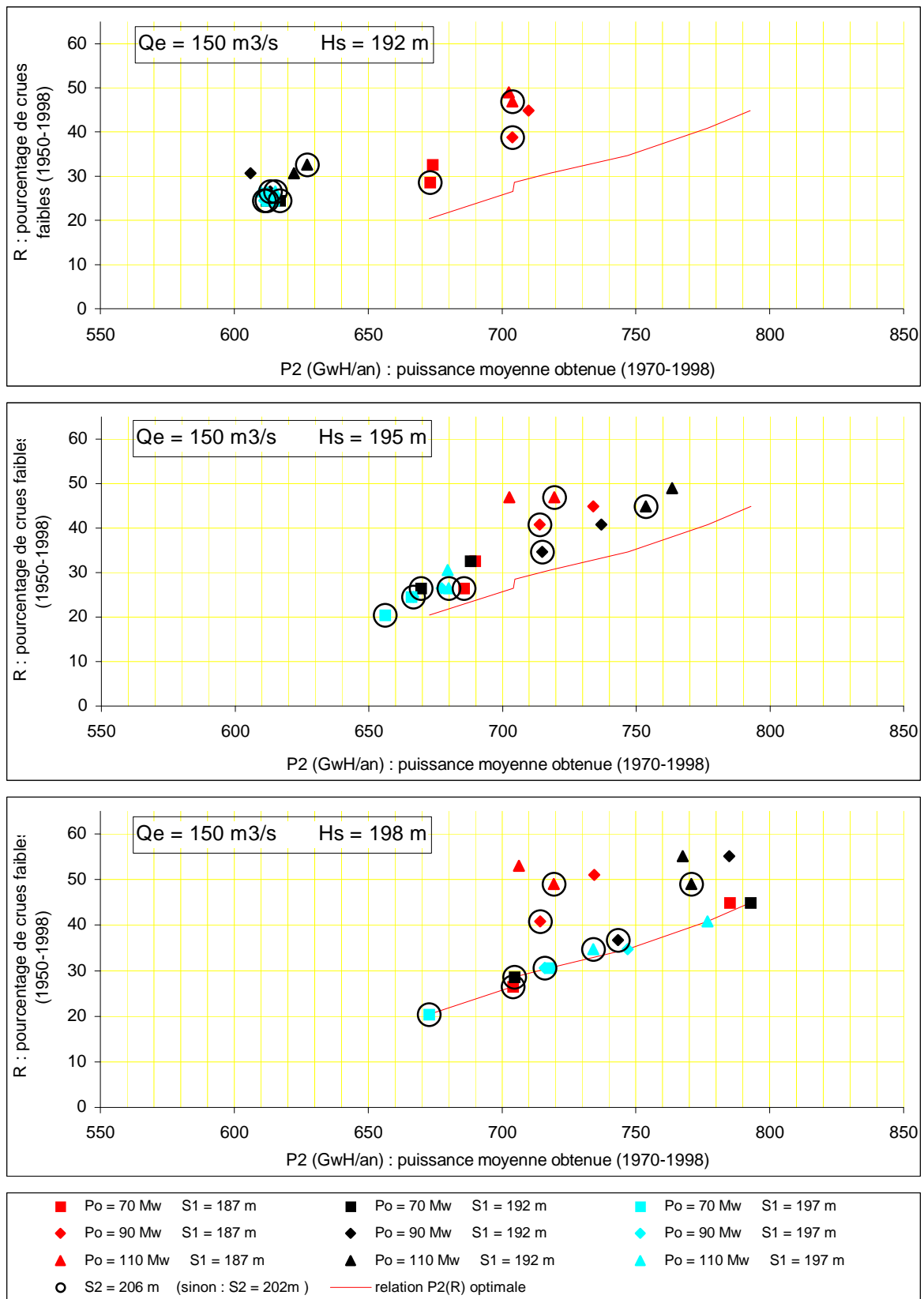


figure 3-2-E : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P2, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1970-1998, dans le cas d'un soutien d'été à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$

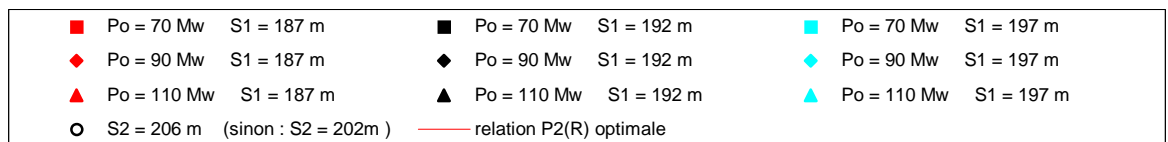
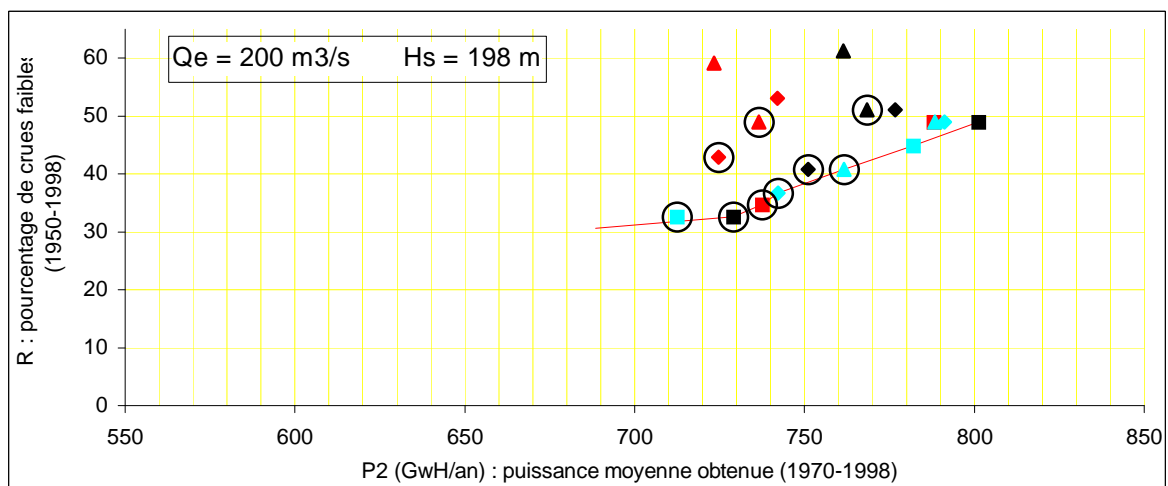
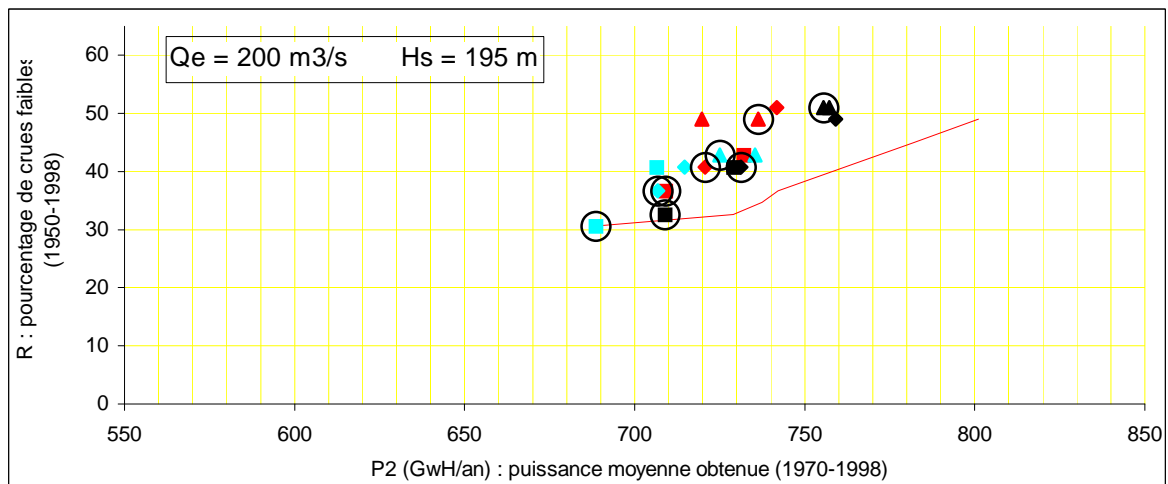
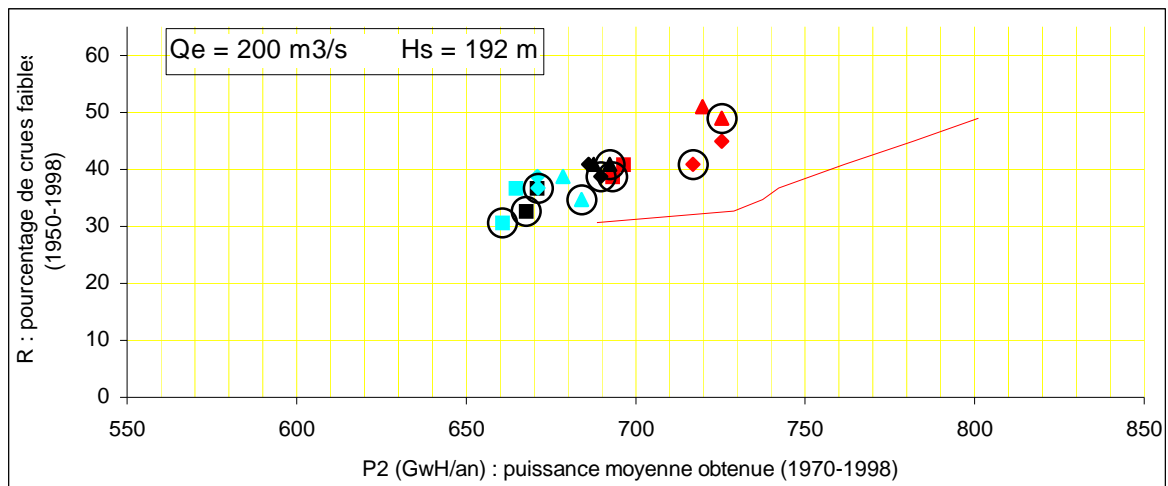


figure 3-2-F : relation entre R, pourcentage de crues trop faibles, et P2, puissance moyenne interannuelle produite sur la période 1970-1998, dans le cas d'un soutien d'été à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$

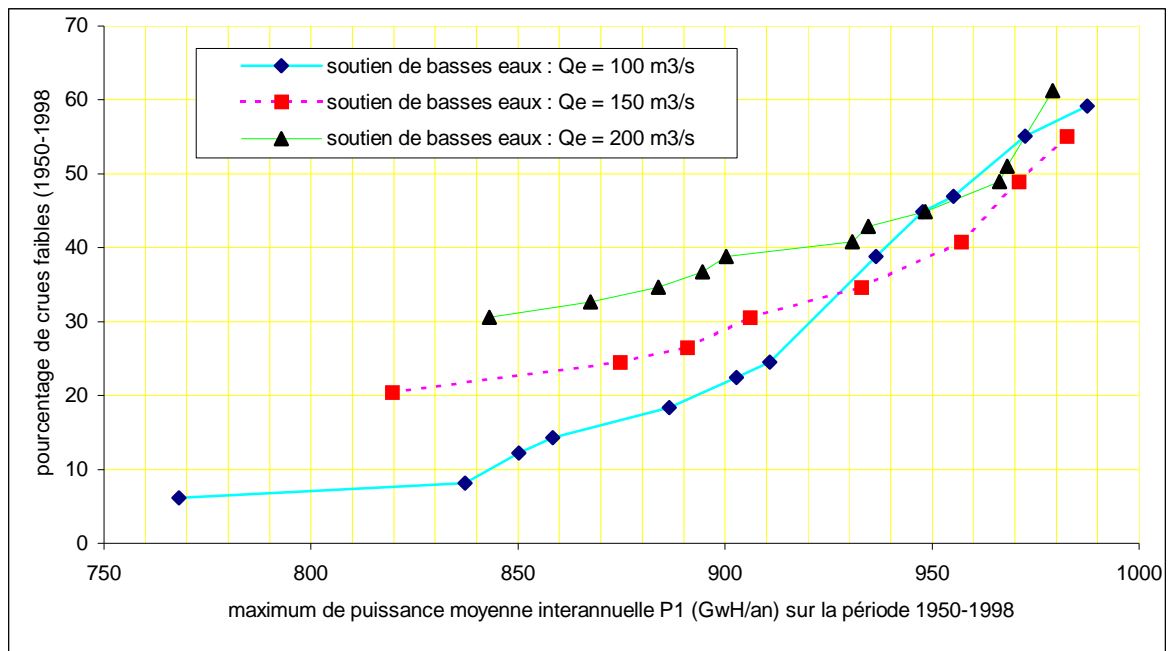


figure 3-2-G : relation R(P1) optimale, donnant la meilleure puissance interannuelle produite sur la période 1950-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la même période.

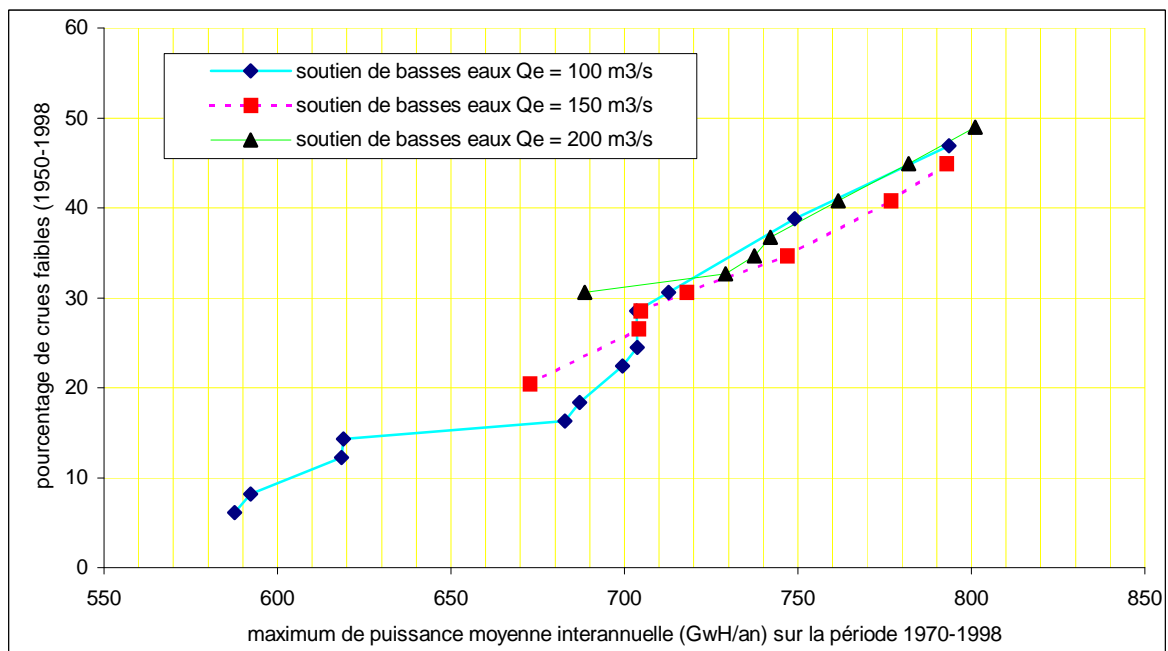


figure 3-2-H : relation R(P2) optimale, donnant la meilleure puissance interannuelle produite sur la période 1970-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la période 1950-1998

## Annexe A : Liste des paramètres de gestion et des variables utilisés

### Variables

Corr	:	correction à appliquer au débit $Q_{tp}$ pour trouver $Q_{tc}$
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 ( $m^3/s$ )	:	débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes
Int2 ( $m^3/s$ )	:	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
P1 (w)	:	puissance obtenue sur la période 1950-1998
P2 (w)	:	puissance obtenue sur la période 1970-1998
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 $Q_t$ donnés
Qb ( $m^3/s$ )	:	débit observé dans le Sénégal à Bakel
Qe ( $m^3/s$ )	:	débit turbiné
Qe1 ( $m^3/s$ )	:	débit turbiné permettant de produire la puissance Pt
Qk ( $m^3/s$ )	:	débit observé à Kayes
Qlâché ( $m^3/s$ )	:	débit effectivement lâché du barrage de Manantali
Qmaxo ( $m^3/s$ )	:	débit total lâché de l'ouvrage lorsque tous ses organes d'évacuation sont ouverts au maximum
Qmax ( $m^3/s$ )	:	valeur maximale imposée par le respect d'une contrainte ou d'une consigne de gestion, sur le débit total lâché du barrage
Qmin ( $m^3/s$ )	:	valeur minimale imposée par le respect d'une contrainte ou d'une consigne de gestion, sur le débit total lâché du barrage
Qmino ( $m^3/s$ )	:	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 ( $m^3/s$ )	:	débit objectif défini pour le Sénégal à Bakel
Qsou ( $m^3/s$ )	:	débit naturel du Bafing à la station fictive de Soukoutali
Qt ( $m^3/s$ )	:	débit total à lâcher du barrage, par l'ensemble de ses organes d'évacuation
Qt1 ( $m^3/s$ )	:	valeur minimale de débit total lâché du barrage, permettant de respecter les consignes de gestion
Qt2 ( $m^3/s$ )	:	valeur maximale de débit total lâché du barrage, permettant de respecter les consignes de gestion
Qtp ( $m^3/s$ )	:	débit total à lâcher du barrage, calculé à partir des modèles de propagation pour faire coïncider le débit du Sénégal avec un hydrogramme objectif prédéfini.
Qtc ( $m^3/s$ )	:	débit total à lâcher du barrage, souhaitable pour faire coïncider le débit du Sénégal avec un hydrogramme objectif prédéfini, obtenu à partir de Qtp corrigé par boucle fermée
R	:	pourcentage d'années présentant une crue trop faible
V ( $m^3$ )	:	volume d'eau emmagasiné dans la retenue
S ( $m^2$ )	:	superficie de la retenue

## **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  $T_e$ , pour que le soutien d'étiage souhaité soit réalisable.
- Hl (m) : cote limite à respecter dans le lac
- Hlam : limite en dessous de laquelle le niveau du lac doit se situer avec une fréquence  $T_l$ , 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  $T_c$ , permettant d'engager le soutien de crue annuel.
- Po (w) : puissance électrique demandée
- Pr (w) : puissance électrique maximale que le réseau peut absorber
- Qc (m<sup>3</sup>/s) : débit objectif de crue, défini pour le Sénégal à Bakel
- Qe (m<sup>3</sup>/s) : débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel
- Ql1 (m<sup>3</sup>/s) : débit limite maximal qu'on souhaite ne pas voir dépassé à la sortie du barrage
- Ql2 (m<sup>3</sup>/s) : débit limite maximal qu'on souhaite ne pas voir dépassé à Bakel
- Qr (m<sup>3</sup>/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 à respecter dans le lac, pour permettre de laminier 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 maximaux calculés 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	aout	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	208,87	210,29	210,50	210,50

tableau 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 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	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 laminier 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 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	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 laminier 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 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	210,50	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 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 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.

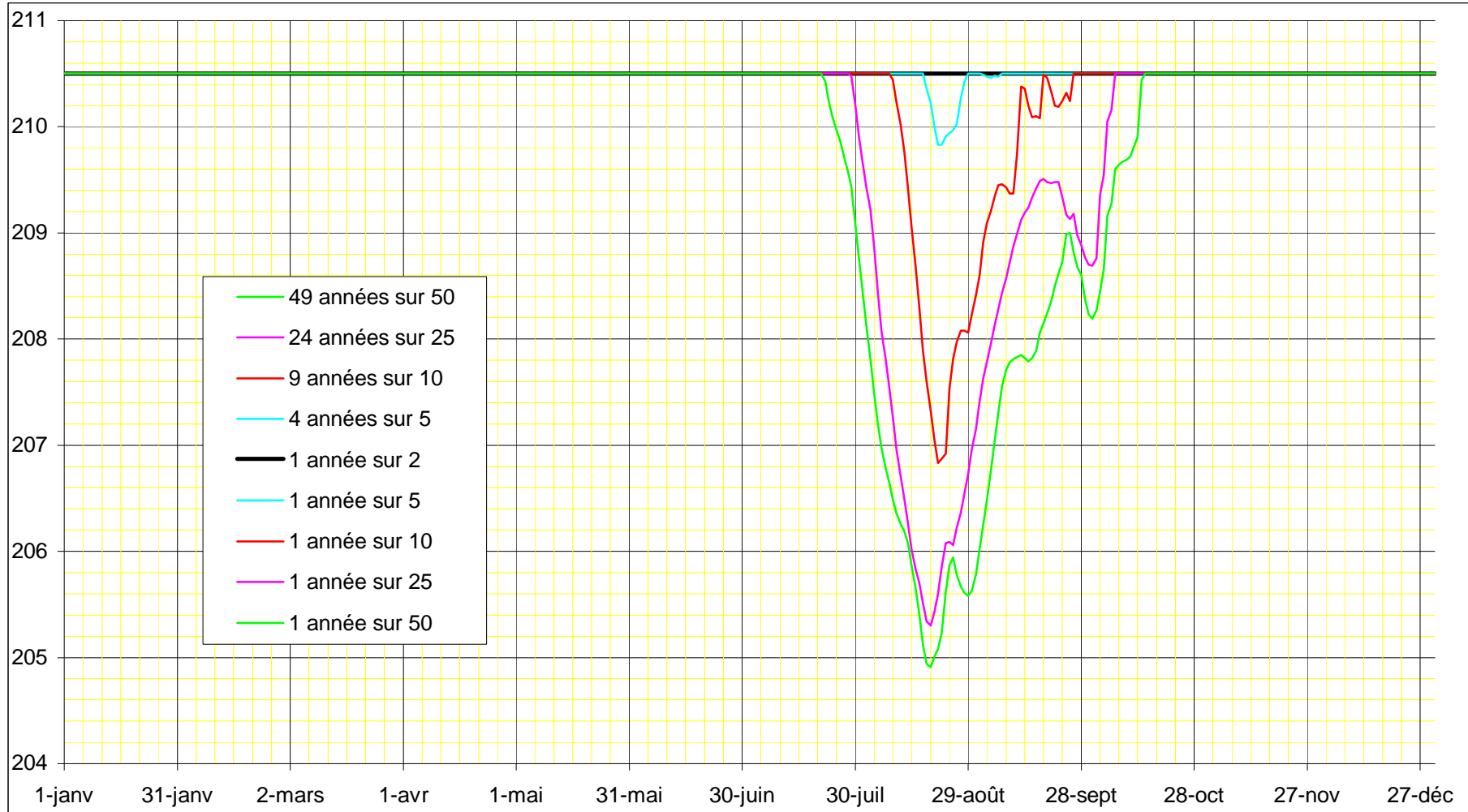


figure B-1 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Sénégal à Bakel à 4500 m<sup>3</sup>/s. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait pu l'être si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



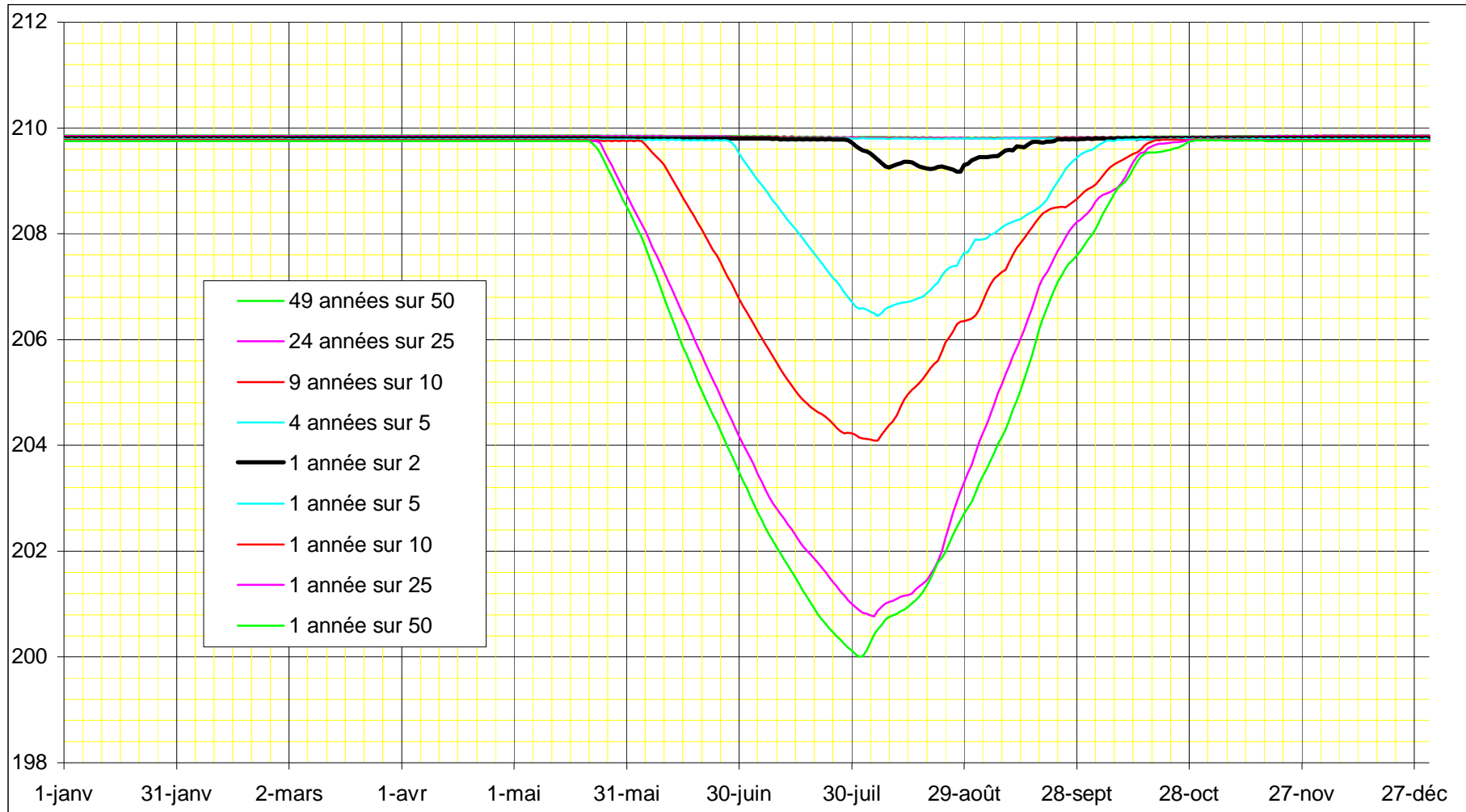


figure B-2 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Bafing à 1000 m<sup>3</sup>/s à la sortie du barrage. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue qui aurait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

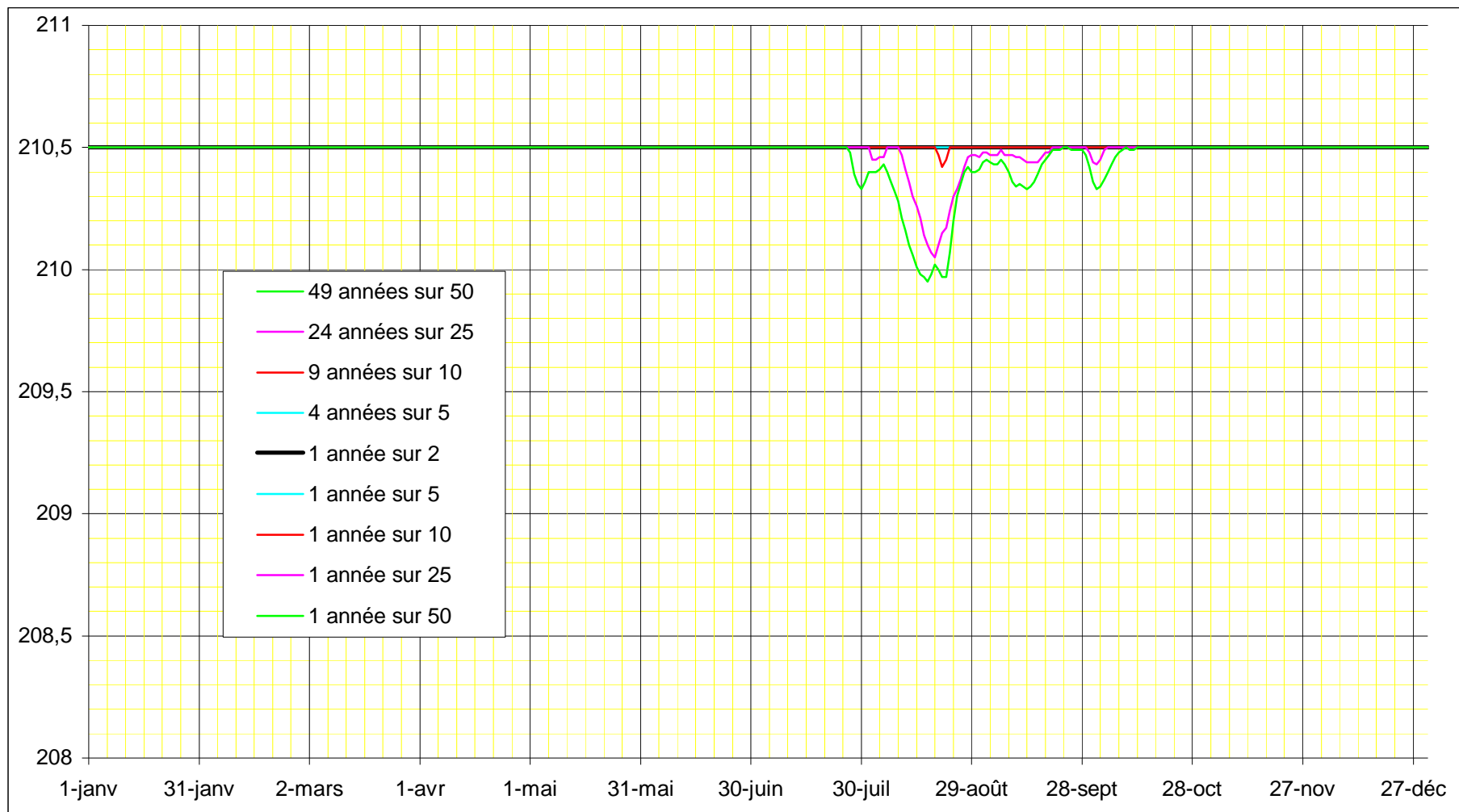


figure B-3 : Cote limite maximale (m) à ne pas dépasser dans le lac, pour pouvoir laminier les crues du Bafing à  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  à la sortie du barrage. Le fait de dépasser cette cote risque d'entraîner avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de laminier au seuil souhaité, une crue 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 à 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	aout	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	190,05	189,00	187,96	187,10	187,11	187,33	190,63	193,33	193,42
3	192,88	192,03	191,10	190,01	188,96	187,93	187,08	187,12	187,39	190,77	193,36	193,41
4	192,86	191,99	191,06	189,98	188,93	187,90	187,07	187,14	187,45	190,92	193,38	193,40
5	192,83	191,96	191,03	189,94	188,90	187,87	187,06	187,12	187,51	191,06	193,39	193,39
6	192,81	191,93	190,99	189,91	188,86	187,84	187,06	187,14	187,58	191,21	193,41	193,38
7	192,78	191,90	190,96	189,87	188,83	187,81	187,06	187,13	187,64	191,37	193,42	193,37
8	192,76	191,87	190,92	189,84	188,79	187,78	187,06	187,14	187,70	191,52	193,43	193,35
9	192,73	191,83	190,89	189,80	188,76	187,75	187,06	187,13	187,75	191,67	193,45	193,34
10	192,71	191,80	190,85	189,77	188,73	187,72	187,07	187,15	187,81	191,80	193,45	193,33
11	192,68	191,77	190,82	189,73	188,69	187,69	187,08	187,13	187,86	191,94	193,46	193,31
12	192,66	191,74	190,78	189,70	188,66	187,66	187,07	187,15	187,92	192,07	193,47	193,30
13	192,63	191,70	190,75	189,66	188,62	187,63	187,08	187,13	187,97	192,19	193,47	193,28
14	192,60	191,67	190,71	189,63	188,59	187,60	187,07	187,15	188,03	192,31	193,48	193,27
15	192,58	191,64	190,68	189,59	188,56	187,58	187,08	187,13	188,12	192,41	193,48	193,25
16	192,55	191,60	190,64	189,55	188,52	187,55	187,07	187,15	188,34	192,50	193,48	193,23
17	192,52	191,57	190,61	189,52	188,49	187,52	187,09	187,13	188,50	192,59	193,48	193,22
18	192,50	191,54	190,57	189,48	188,46	187,49	187,12	187,15	188,66	192,68	193,48	193,20
19	192,47	191,50	190,54	189,45	188,42	187,45	187,10	187,13	188,82	192,76	193,48	193,18
20	192,44	191,47	190,50	189,41	188,39	187,41	187,12	187,15	188,97	192,83	193,48	193,16
21	192,41	191,44	190,47	189,38	188,35	187,37	187,10	187,13	189,12	192,90	193,48	193,15
22	192,38	191,40	190,43	189,34	188,32	187,33	187,12	187,16	189,27	192,96	193,48	193,13
23	192,36	191,37	190,40	189,31	188,29	187,29	187,10	187,13	189,42	193,01	193,47	193,11
24	192,33	191,34	190,36	189,27	188,25	187,26	187,12	187,16	189,57	193,06	193,47	193,09
25	192,30	191,30	190,33	189,24	188,22	187,23	187,10	187,13	189,72	193,10	193,47	193,07
26	192,27	191,27	190,29	189,20	188,19	187,21	187,12	187,16	189,86	193,14	193,47	193,05
27	192,24	191,24	190,26	189,17	188,15	187,19	187,11	187,13	189,99	193,18	193,46	193,03
28	192,21	191,20	190,22	189,13	188,12	187,16	187,12	187,16	190,12	193,21	193,46	193,01
29	192,18		190,19	189,10	188,09	187,14	187,11	187,13	190,24	193,23	193,45	192,99
30	192,15		190,15	189,06	188,05	187,12	187,12	187,16	190,36	193,26	193,44	192,97
31	192,12		190,12		188,02		187,11	187,21		193,29		192,95
moy	192,54	191,65	190,64	189,57	188,52	187,55	187,09	187,14	188,54	192,26	193,44	193,22

tableau C-2 : 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 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	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

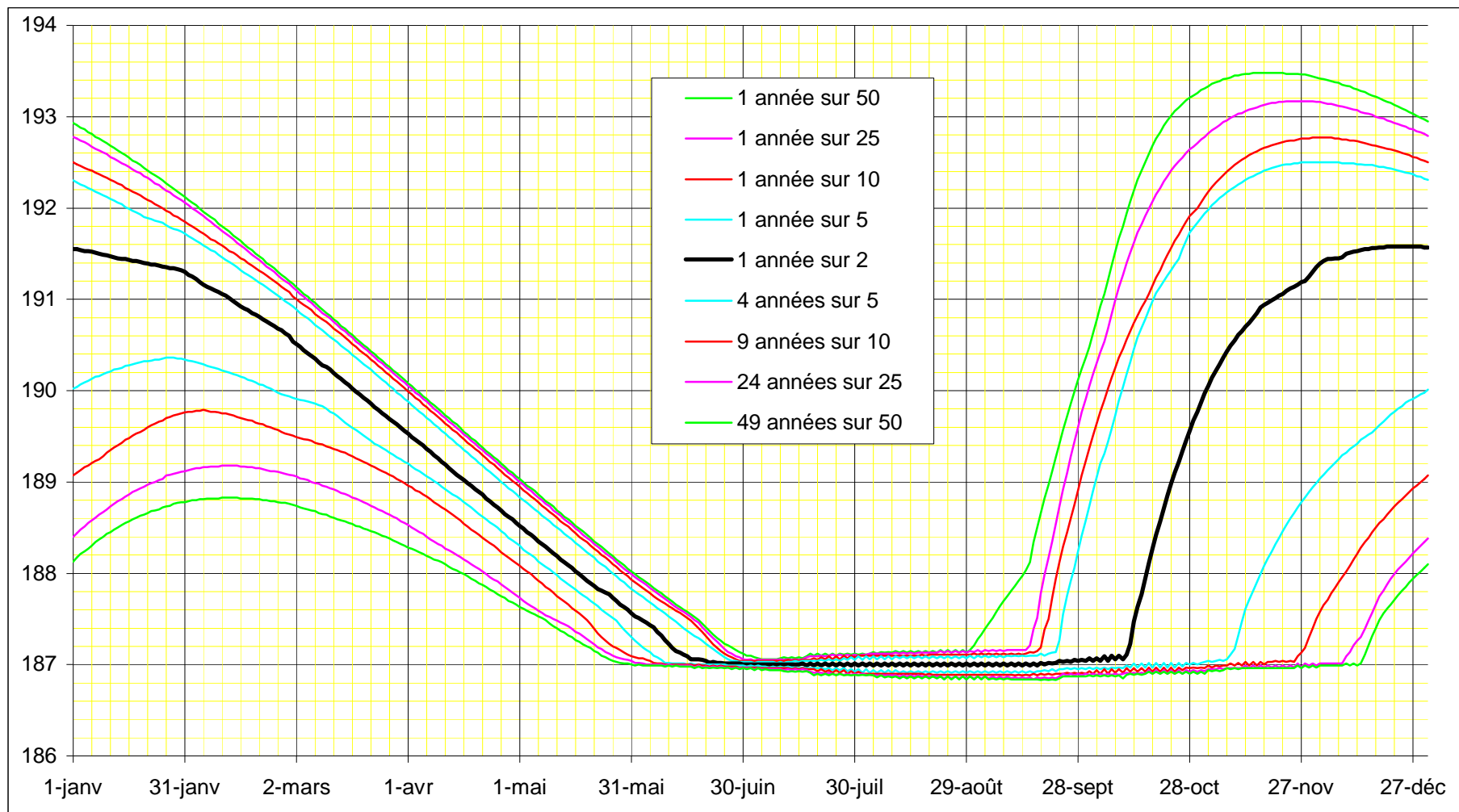


figure C-1 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 100 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir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

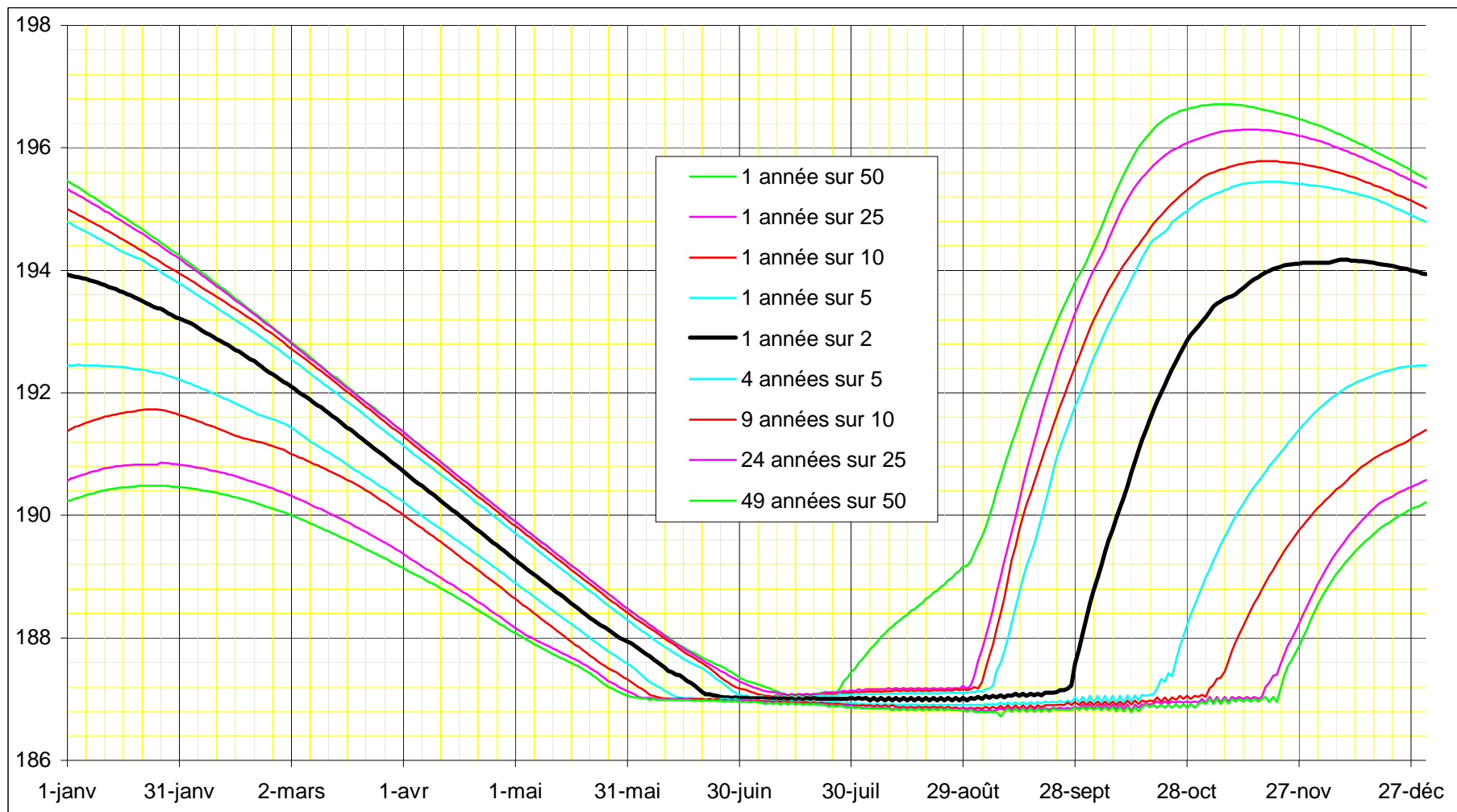


figure C-2 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 150 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir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

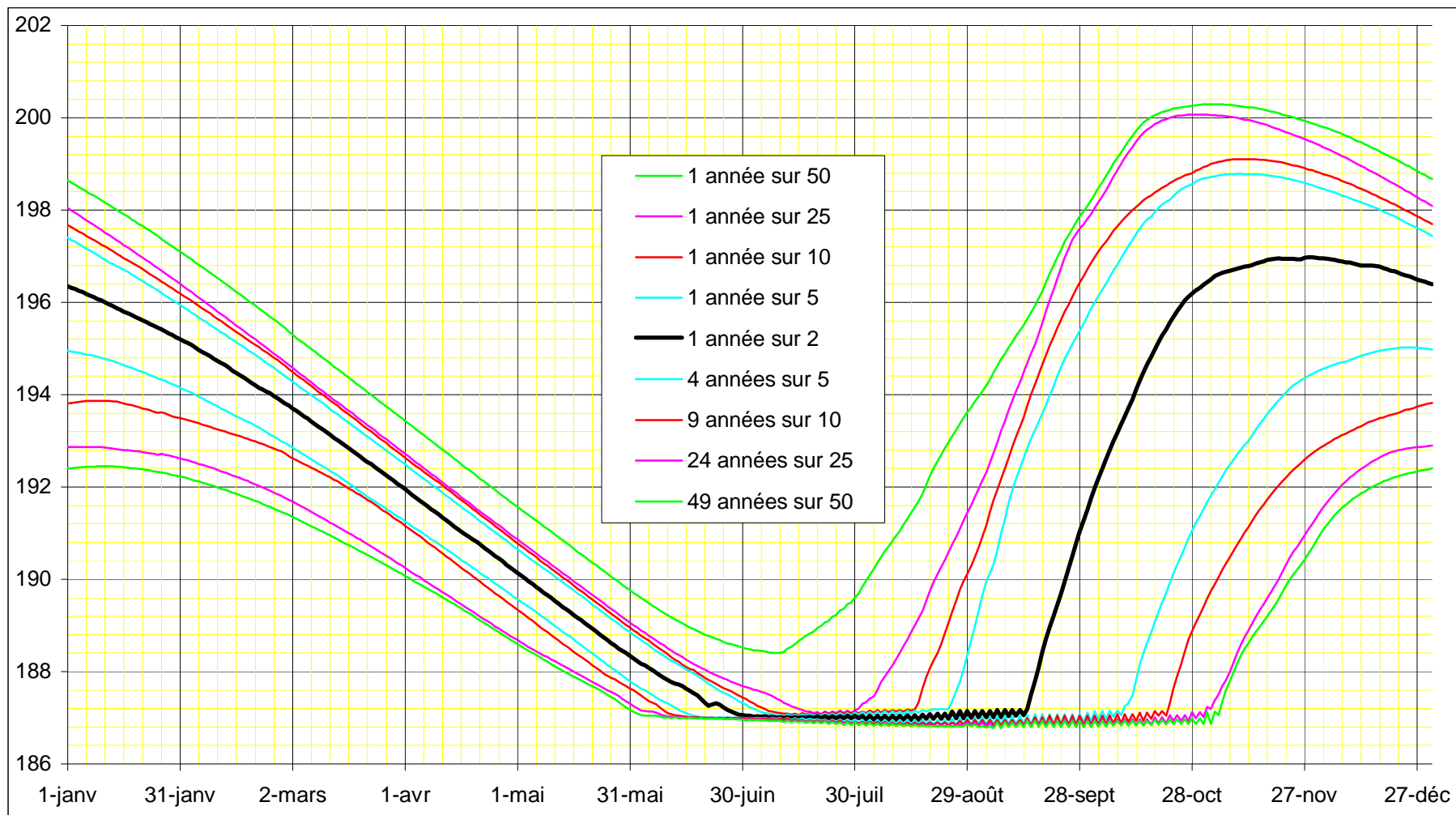


figure C-3 : Cote limite minimale (m) à respecter dans le lac, pour pouvoir assurer le soutien des basses eaux du Sénégal à Bakel à 200 m<sup>3</sup>/s. Le fait de faire baisser le niveau sous cette limite risque d'entraîner à court ou moyen terme, avec la fréquence indiquée, l'impossibilité de maintenir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

# **ANNEXE D - Note sur la consigne de gestion du barrage de Manantali, relative au laminage des crues exceptionnelles de la rivière Bafing**

## ***Résumé et conclusion***

### **Objectif**

Le laminage des crues exceptionnelles du Bafing par le barrage de Manantali fait l'objet d'une consigne d'exploitation (définie par le constructeur de l'ouvrage ?) qui impose d'abaisser le niveau du lac en dessous de la cote 199 m en début de crue. On tente ici d'évaluer d'une part si une telle consigne n'est pas superflue par rapport à la production d'électricité, et d'autre part à définir le mode de vidange de la réserve qui pourrait lui être associé pour permettre la meilleure production d'énergie possible.

### **Méthode**

On cherche tout d'abord à estimer dans quelle mesure, la production d'électricité pendant l'étiage pourrait assurer à elle seule la vidange souhaitée. Pour cela, la consigne présentée dans le manuel provisoire de gestion de l'ouvrage pour la production d'énergie est testée pour différents cas d'apports de débit et de stock initial dans la retenue pendant l'étiage.

On analyse ensuite l'influence de l'histogramme des débits turbinés pour obtenir la vidange souhaitée, sur la puissance moyenne produite. Les cas théoriques d'apports nuls puis constants pendant l'étiage sont d'abord testés. Le cas d'apports décroissant suivant un modèle exponentiel de tarissement est ensuite étudié.

### **Résultats**

La consigne d'exploitation présentée dans le manuel provisoire de gestion, relative à la production d'électricité, peut permettre à elle seule d'abaisser la surface libre du lac en dessous de la cote 199 au 30 juin, lorsque le tarissement se prolonge jusqu'à cette date. Même avec un fort débit naturel de tarissement arrivant dans une retenue pleine au 1<sup>er</sup> décembre, ce résultat peut être garanti si la consigne est définie par une puissance de base  $P_0$  à produire suffisamment forte, et un seuil  $S_2$  suffisamment faible pour la cote du lac, au delà duquel on produit la puissance maximale productible. A l'inverse, une production électrique trop faible peut être insuffisante pour abaisser le niveau du lac jusqu'à la cote 199 pendant un étiage bénéficiant de forts apports et d'une réserve d'eau initiale importante.

S'il est jugé nécessaire, le respect d'une cote limite maximale de 199 m dans le lac "en début de crue" doit donc être garanti par une consigne d'exploitation spécifique, provoquant une vidange suffisante de la réserve pendant l'étiage précédent. Afin de valoriser au mieux cette vidange, il est nécessaire que celle-ci soit étalée pendant toute la durée de l'étiage, de façon que les débits lâchés puissent tous être turbinés. A partir du moment où cette condition est vérifiée, on constate que l'énergie produite par la vidange ne dépend quasiment que de l'état initial et de l'état final de la retenue, et pratiquement pas de l'histogramme des débits turbinés, qu'on peut donc envisager de différentes manières.

De façon pratique, on peut proposer une consigne permettant d'abaisser la cote du lac à la cote 199 en fin d'étiage, soit par débit turbiné constant, soit par puissance produite constante. Cette consigne à appliquer pendant toute la durée de l'étiage en plus des autres consignes d'exploitation, utilisera les

prévisions de débit des apports dans la retenue faites par un modèle de tarissement, dont le calage tiendra compte en permanence des derniers débits observés. Sa mise en œuvre devra bénéficier d'une procédure de calcul automatique, intégrée au logiciel de gestion en temps réel de l'ouvrage.

## **Objet de la note**

Lors de la réunion de la CPE tenue à Bamako en août 1998, il avait été signalé à l'ORSTOM l'existence d'une consigne relative à l'écrêtement des crues exceptionnelles par le barrage de Manantali. Compte tenu des précisions insuffisantes obtenues depuis lors sur cette consigne, il n'a pas été possible de l'inclure dans le manuel de gestion provisoire remis en mars 1999, qui prévoit cependant l'écrêtement des crues courantes, observées depuis un demi siècle.

La seule information disponible à l'heure actuelle sur cette consigne concerne un "niveau maximal de 199 m que le lac ne devrait pas dépasser en début de crue". Qu'entend-on par début de crue ? Quel écrêtement désire-t-on garantir avec une cote aussi basse ? Un limnigramme de cote limite maximale a-t-il déjà été défini pour permettre d'abaisser le niveau jusqu'à cette cote ? En attendant de pouvoir éclaircir ces différents points, on tente dans cette note de répondre aux deux questions suivantes :

- Une cote inférieure à 199 m peut elle être garantie au 30 juin de chaque année, du simple fait de la production d'énergie envisagée ?
- Si une consigne spécifique s'avère nécessaire pour garantir une cote inférieure à 199 m au 30 juin, comment doit-elle planifier les lâchers du barrage pendant toute la durée de l'étiage ?

## **Cote atteinte le 30 juin en fonction de la production d'énergie en étiage**

La fin de l'étiage, marquée par la reprise des écoulements dus au ruissellement, se situe habituellement entre début mai et fin juin sur le Bafing. Les débits naturels observés à Soukoutali le 30 juin restent faibles la plupart du temps, et nous situerons arbitrairement la fin de l'étiage à cette date.

Le régime de tarissement peut être assez bien décrit par une décroissance exponentielle du débit, avec un coefficient de tarissement évalué à 0,025/jour pour Soukoutali (baisse de 2,5% du débit chaque jour). A partir de sa valeur du 1<sup>er</sup> décembre, le débit entrant dans la retenue peut donc être estimé jusqu'au 30 juin suivant. Si l'on suppose que les débits lâchés du barrage pendant l'étiage sont uniquement déterminés par une consigne relative à la production d'électricité, telle que définie dans la version provisoire du manuel de gestion, il suffit alors de connaître les valeurs des paramètres  $P_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  définissant la consigne pour pouvoir estimer la cote obtenue dans le lac au 30 juin, à partir de la cote au 1<sup>er</sup> décembre. Rappelons la signification des trois paramètres :

- $P_0$  (w) : puissance électrique demandée
- $S_1$  (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.
- $S_2$  (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

Pour deux valeurs de débit entrant dans la retenue au 1<sup>er</sup> décembre (400 et 200 m<sup>3</sup>/s), et pour une cote du lac située entre 204 et 208,05 m à cette même date, on a déterminé les valeurs du paramètre  $S_2$  permettant d'abaisser le lac à la cote 199 au 30 juin. Le calcul est fait pour trois valeurs de  $P_0$  (70, 90 et 110 MW) et pour une valeur de  $S_1$  inférieure à 199 m, en négligeant l'évaporation sur le lac et en supposant un rendement constant de 0,9 au niveau des turbines. On notera que la combinaison au 1<sup>er</sup> décembre, d'une cote de 208,05 m dans le lac (limite de débordement) avec un débit de 400 m<sup>3</sup>/s entrant dans la retenue (dépassé moins de 1 année sur 15 sur la période 1950-1998), correspond à une situation assez extrême d'abondance en eau.

Les résultats présentés dans le tableau 1 et sur la figure 1 montrent que le seuil  $S_2$  diminue avec la cote et le débit entrant du 1<sup>er</sup> décembre, et augmente avec  $P_0$ . Ceci signifie naturellement que :

- plus la ressource en eau est abondante, plus il est nécessaire de turbiner longtemps à la puissance maximale pour vider suffisamment le lac
- la vidange nécessaire dans le lac peut être obtenue en turbinant moins longtemps à la puissance maximale, à condition d'augmenter la puissance de base

Ceci est illustré par les figures 2 et 3, qui représentent pour les différents cas, l'évolution du niveau dans le lac entre la cote du 1<sup>er</sup> décembre, et la cote 199 obtenue au 30 juin suivant.

cote dans la retenue au 31 décembre	débit entrant dans la retenue le 31 décembre: 400 m3/s			débit entrant dans la retenue le 31 décembre: 200 m3/s		
	Po=70 Mw	Po=90 Mw	Po=110 Mw	Po=70 Mw	Po=90 Mw	Po=110 Mw
208,05	202,98	204,68	206,71	203,89	205,86	208,00
207,00	203,42	205,16	206,85	204,20	206,24	
206,00	203,66	205,28		204,48		
205,00	203,75	205,29		204,56		
204,00	203,70					

tableau 1 : valeurs maximales du paramètre S2 permettant d'amener la cote du lac en dessous de 199 m au 30 juin, en fonction de la cote et du débit entrant dans la retenue au 31 décembre précédent, et de la puissance Po demandée.

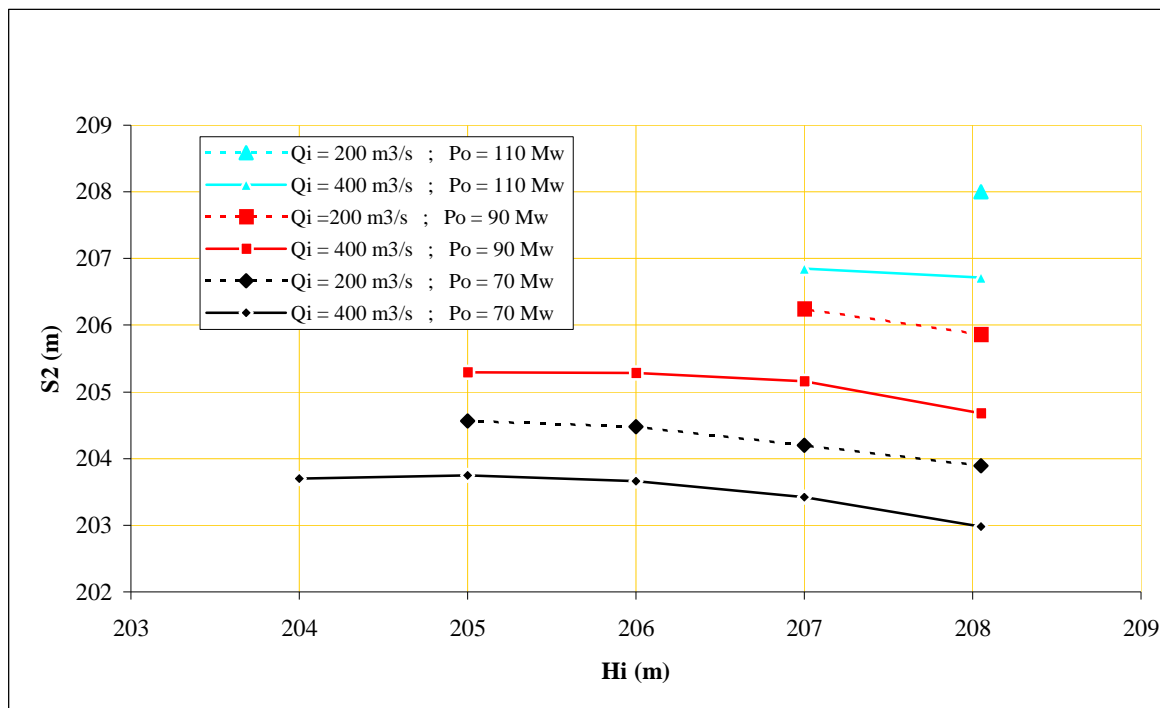


figure 1 : valeur limite  $S_2$  de la cote du lac, au dessus de laquelle il faut produire la puissance maximale produisible pour pouvoir amener le lac à la cote 199 au 30 juin.  $S_2$  est déterminé à partir de la cote  $H_i$  du lac au 1<sup>er</sup> décembre, du débit  $Q_i$  entrant dans la retenue à la même date, et de la puissance de base  $P_o$ .

Conclusion : quand le régime de tarissement se prolonge jusque fin juin, les lâchers d'eau entraînés par la production d'électricité peuvent suffire pour amener le lac en dessous de la cote 199 au 30 juin. A condition de turbiner suffisamment (assez longtemps à la puissance maximale ou avec une puissance de base assez forte), ce résultat peut être obtenu même avec un fort débit naturel de tarissement arrivant dans une retenue pleine au 1<sup>er</sup> décembre.

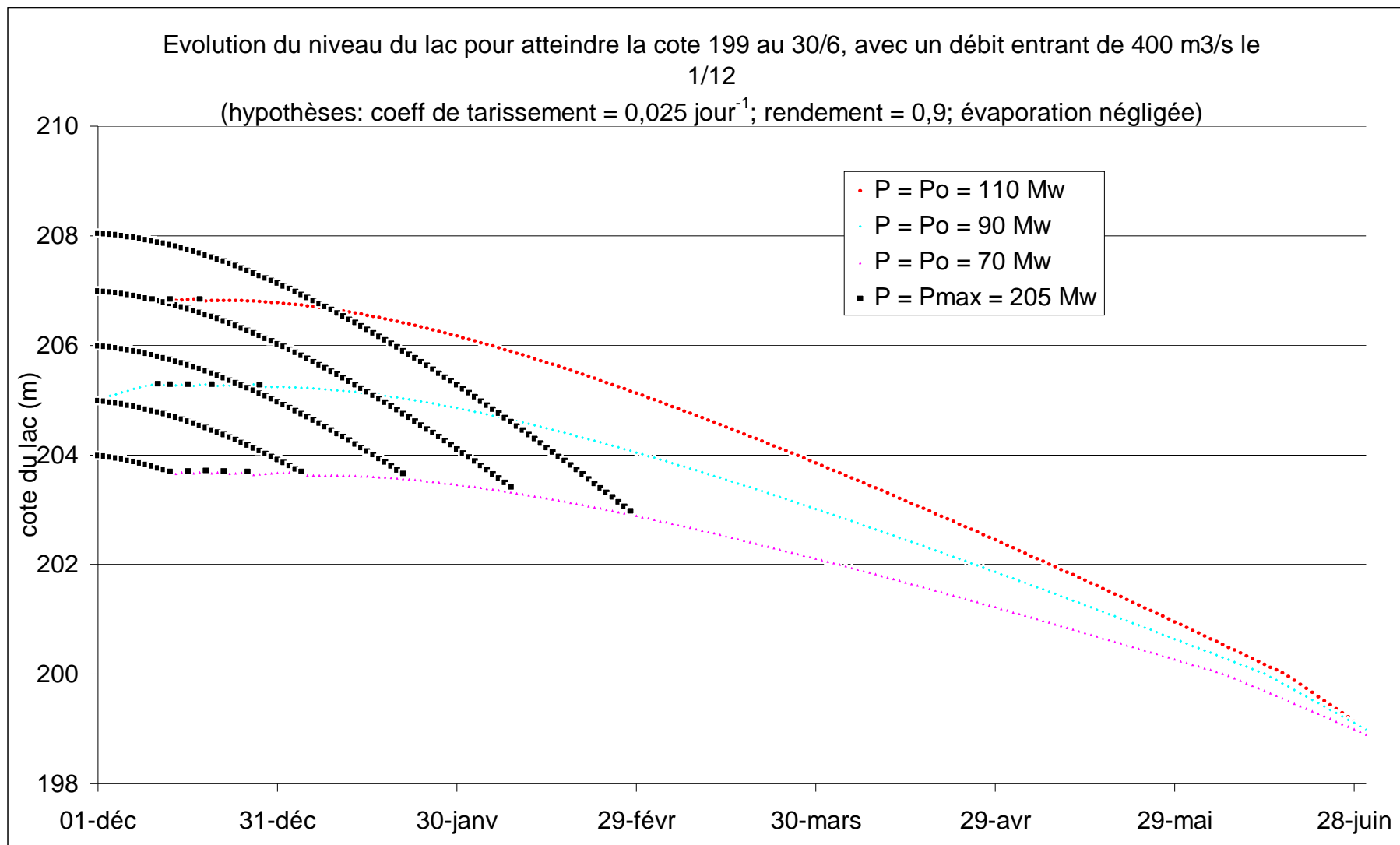


figure 2 : évolution du niveau du lac entre la cote du 1<sup>er</sup> décembre et la cote 199 du 30 juin suivant, pour différentes hypothèses de puissance électrique P produite, dans le cas d'un débit de 400 m<sup>3</sup>/s entrant dans la retenue le 1<sup>er</sup> décembre



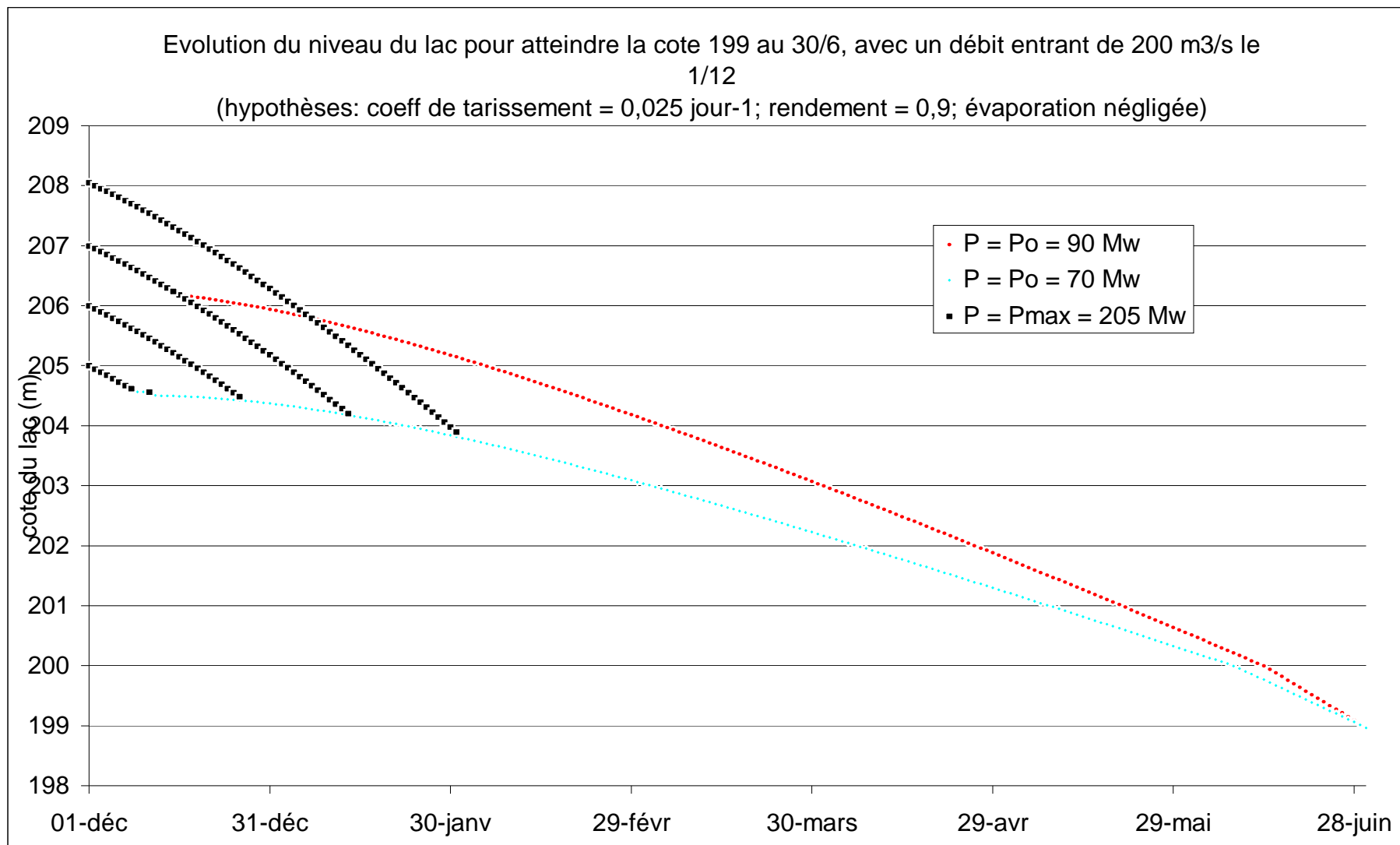


figure 3 : évolution du niveau du lac entre la cote du 1<sup>er</sup> décembre et la cote 199 du 30 juin suivant, pour différentes hypothèses de puissance électrique P produite, dans le cas d'un débit de 200 m<sup>3</sup>/s entrant dans la retenue le 1<sup>er</sup> décembre

## **Programme optimal de lâchés permettant d'abaisser le lac à la cote 199 en fin d'étiage**

Le problème posé est le suivant : Etant donné la cote du lac et le débit entrant dans la retenue au 1<sup>er</sup> décembre, on cherche à déterminer comment effectuer les lâchers pendant toute la durée de l'étiage de façon à abaisser la surface libre du lac à la cote 199 au 30 juin suivant, tout en produisant le maximum d'énergie.

Ici encore, on suppose un rendement constant de 0,9 au niveau des turbines, et on néglige les pertes par évaporation à la surface du lac. On suppose également que tout le débit lâché du barrage est turbiné, et que le régime de tarissement subsiste jusqu'au 30 juin.

### **Cas théorique : absence de débit entrant dans la retenue pendant l'étiage**

En l'absence de débit entrant dans la retenue, quelle que soit la succession de débits lâchés entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin, la puissance moyenne produite sur la période peut être estimée par l'expression suivante :

$$P_m = R * \rho * g * (V_0 - V_1) * (H_g - H_a) / T$$

Avec :

R	:	rendement des turbines
P <sub>m</sub>	:	puissance moyenne (w)
ρ	:	masse volumique de l'eau (kg/m <sup>3</sup> )
g	:	accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> )
V <sub>0</sub>	:	volume (m <sup>3</sup> ) emmagasiné dans la retenue le 1 <sup>er</sup> décembre
V <sub>1</sub>	:	volume (m <sup>3</sup> ) emmagasiné dans la retenue le 30 juin (pour la cote 199 m)
H <sub>g</sub>	:	altitude (m) du centre de gravité de la tranche d'eau emmagasinée dans la retenue, entre les volumes V <sub>0</sub> et V <sub>1</sub>
H <sub>a</sub>	:	altitude (m) moyenne de la surface libre dans le canal de fuite, à la sortie de l'usine
T	:	temps écoulé (s) entre le 1 <sup>er</sup> décembre et le 30 juin

On constate donc qu'en l'absence d'apport dans la retenue, la puissance obtenue ne dépend que de l'état initial et de l'état final de la réserve sur la période considérée. Ce résultat théorique est obtenu en négligeant les variations de la cote en fonction du débit dans le canal de fuite, et avec les hypothèses énoncées plus haut (évaporation négligée, et rendement constant des turbines). Il peut être vérifié numériquement en comparant les puissances moyennes obtenues avec une vidange à débit constant ou à puissance constante, qui abaisse la cote du lac de 208,05 m au 1<sup>er</sup> décembre, à 199 m au 30 juin. Le calcul effectué au pas de temps journalier donne les résultats suivants :

- Avec un débit turbiné constant de 212,59 m<sup>3</sup>/s (qui entraîne une cote de 154,39 m dans le canal de fuite), on obtient une puissance moyenne de 92,508 MW.
- La même vidange peut être obtenue en produisant une puissance constante de 92,503 MW, avec un débit turbiné croissant de 196,39 à 234,90 m<sup>3</sup>/s.
- Avec la formule donnée plus haut (et H<sub>g</sub> = 203,65 m), on obtient une puissance moyenne de 92,469 MW en adoptant une valeur de 154,39 m pour la cote moyenne H<sub>a</sub> de la surface libre dans le canal de fuite.

Les différences insignifiantes constatées entre les trois valeurs de puissance obtenues sont dues à l'imprécision du calcul discrétisé.

## Cas théorique : apport de débit constant dans la retenue pendant l'étiage

Dès lors que le débit entrant dans la retenue n'est pas nul, l'énergie qu'on va pouvoir récupérer avec les turbines correspond aux deux parts suivantes :

- La différence entre l'énergie potentielle du stock d'eau présent dans la retenue au début de la période, et celle du stock d'eau présent à la fin de la période. Ce terme correspond à l'énergie récupérée en absence de débit entrant, et ne dépend donc que de l'état initial et de l'état final de la retenue.
- L'énergie potentielle accumulée pendant la période dans la retenue, à partir des débits entrant. L'énergie cinétique de ces apports étant dissipée par turbulence, c'est leur énergie potentielle de hauteur qui se retrouve stockée derrière le barrage. Cette dernière dépend naturellement de la cote de la surface libre au moment de leur arrivée dans le lac.

On voit donc que dans le cas d'apports non nuls, la quantité d'énergie récupérée ne dépend pas seulement de l'état initial et de l'état final du réservoir, mais aussi de la façon dont sont faites les lâchers. Ceci peut être illustré par le cas d'école suivant :

On suppose qu'un débit constant de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  rentre dans la retenue entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin. On envisage les deux scénarios suivants permettant d'abaisser la cote du lac de 208,05 à 199 m entre ces deux dates :

Scénario A : on turbine  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 50 jours, puis  $427,8 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 163 jours

Scénario B : on turbine  $427,8 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 163 jours, puis  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 50 jours

La puissance moyenne obtenue vaut respectivement 157,2 et 154,4 MW pour les scénarios A et B. La différence s'explique aisément à partir des figures 4 et 5, qui montrent l'évolution de la cote, de la puissance produite et du débit turbiné dans les deux cas. Alors que le turbinage à  $427,8 \text{ m}^3/\text{s}$  s'effectue dans les mêmes conditions pour les deux scénarios, le turbinage à  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  effectué avec une cote de 208,05 m donne une puissance de 71,3 MW dans le scénario A, alors qu'effectué avec une cote de 199 m il donne une puissance de 59,3 MW dans le scénario B. La part de puissance manquante dans le scénario B correspond en fait à l'énergie dissipée par frottement à l'amont de la retenue entre les cotes 208,05 et 199 m, par les apports de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Si l'on change les deux valeurs de débit turbiné utilisées pour abaisser le lac à la cote 199, on obtient des résultats comparables, qui peuvent donc être considérés comme généraux.

Conclusion : Dans le cas d'apports non nuls pendant l'étiage, la puissance moyenne produite dépend à la fois de l'état initial et de l'état final de la retenue, et de la façon dont sont faites les lâchers. Si le débit des apports est constant et si l'on envisage deux valeurs de débit turbiné pour abaisser le niveau du lac à la cote 199 au 30 juin, on a nettement intérêt pour produire plus d'énergie, à turbiner d'abord le débit faible et le fort ensuite, plutôt que l'inverse.

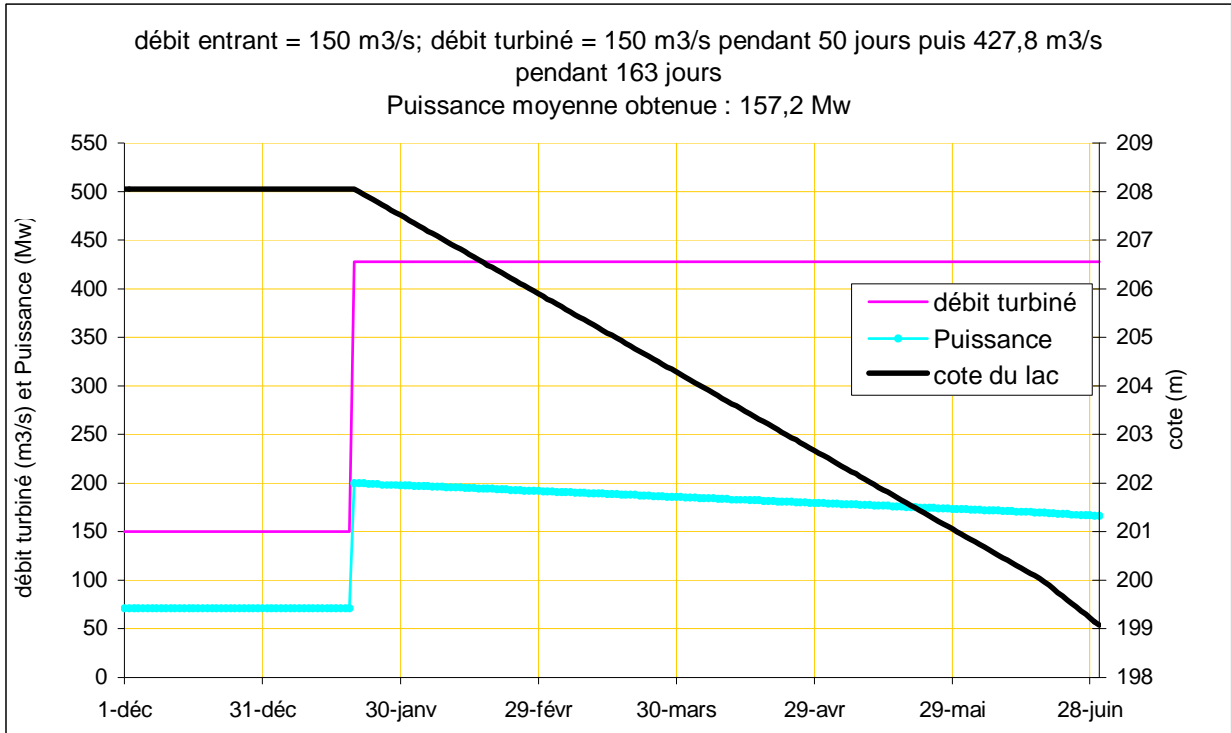


figure 4 : évolution de la cote du lac, du débit turbiné et de la puissance produite avec le scénario A

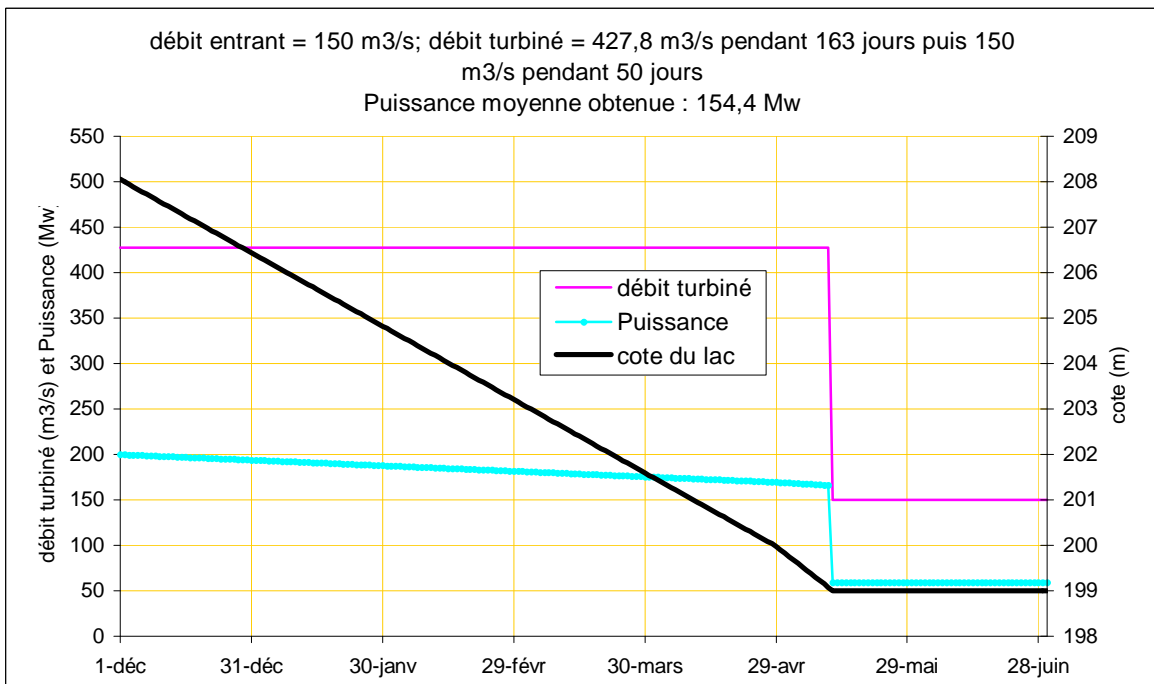


figure 5 : évolution de la cote du lac, du débit turbiné et de la puissance produite avec le scénario B

## Cas réel : apport de débit décroissant dans la retenue pendant l'étiage

Comme dans la première partie de cette note, on suppose que le débit arrivant dans la retenue décroît de façon exponentielle ( $k = 0,025/\text{jour}$ ) pendant tout l'étiage, du 1<sup>er</sup> décembre au 30 juin. On envisage par ailleurs une cote de 208,05 m dans le lac au 1<sup>er</sup> décembre, et un débit entrant de 400 m<sup>3</sup>/s à la même date (conditions de très forte abondance en eau).

A partir de ce qui précède on voit de quelle façon, purement théorique, il conviendrait d'effectuer les lâchers pour abaisser le lac jusqu'à la cote 199 m au 30 juin tout en produisant le maximum d'énergie possible : il suffirait de stocker la totalité des apports pendant toute la période, et de turbiner de façon instantanée au 30 juin, l'ensemble du volume à vidanger. Ceci suppose bien entendu que le barrage puisse resté fermé bien au delà de la cote 208,05 m, et surtout que les turbines installées aient une capacité infinie de turbinage. Bien qu'absolument irréaliste, ce scénario va nous permettre d'estimer la valeur maximale théorique de l'énergie (ou de la puissance) qu'on ne peut en aucun cas espérer dépasser.

La puissance moyenne maximale théorique peut donc être estimée à partir de la valeur donnée plus haut dans le cas d'apports nuls (92,469 MW), à laquelle on va ajouter le terme suivant de 36,902 MW, relatif à l'énergie potentielle de la tranche d'eau issue des apports arrivant entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin, stockée au dessus de la cote 208,05 m :

$$R * \rho * g * V2 * (Hg2 - Ha) / T$$

Avec :

V2 : Volume de la tranche d'eau emmagasinée dans la retenue au dessus de la cote 208,05 m, relative aux apports de débit arrivant entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin.  $V2 = 1,393 \text{ km}^3$   
Hg2 : altitude (m) du centre de gravité du volume V2.  $Hg2 = 209,61 \text{ m}$

On peut donc affirmer que dans les hypothèses retenues, aucun scénario de vidange ne peut permettre à la fois d'abaisser la cote du lac de 208,05 à 199 m entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin, et de fournir une puissance moyenne supérieure à 129,371 MW entre ces deux dates. Il reste maintenant à comparer à cette valeur les puissances produites par quelques scénarios réalistes.

On envisage pour effectuer la vidange souhaitée, les trois scénarios de turbinage suivants, en supposant que le barrage peut rester fermé au delà de la cote 208,05 m :

Scénario C : turbinage d'un débit constant de 288 m<sup>3</sup>/s

Scénario D : production d'une puissance constante de 127,422 MW

Scénario E : turbinage d'un débit croissant linéairement de 88 à 488 m<sup>3</sup>/s

Malgré des débits turbinés et des puissances bien différents d'un scénario à l'autre (voir figure 6), on obtient des puissances moyennes très proches dans les trois cas : scénario C : 127,347 MW ; scénario D : 127,422 MW ; scénario E : 127,642 MW. Par rapport à la puissance maximale théorique évaluée plus haut, on constate un déficit très faible, de l'ordre de 1,5%.

Conclusion : dans le cas réel du régime de tarissement, caractérisé par une décroissance assez rapide des apports dans la retenue, on constate que l'énergie produite pendant la vidange du lac par les turbines dépend essentiellement de l'état initial et de l'état final de la retenue, et très peu de l'histogramme des débits turbinés. En outre, il semble possible de récupérer la quasi totalité de l'énergie maximale théoriquement productible.

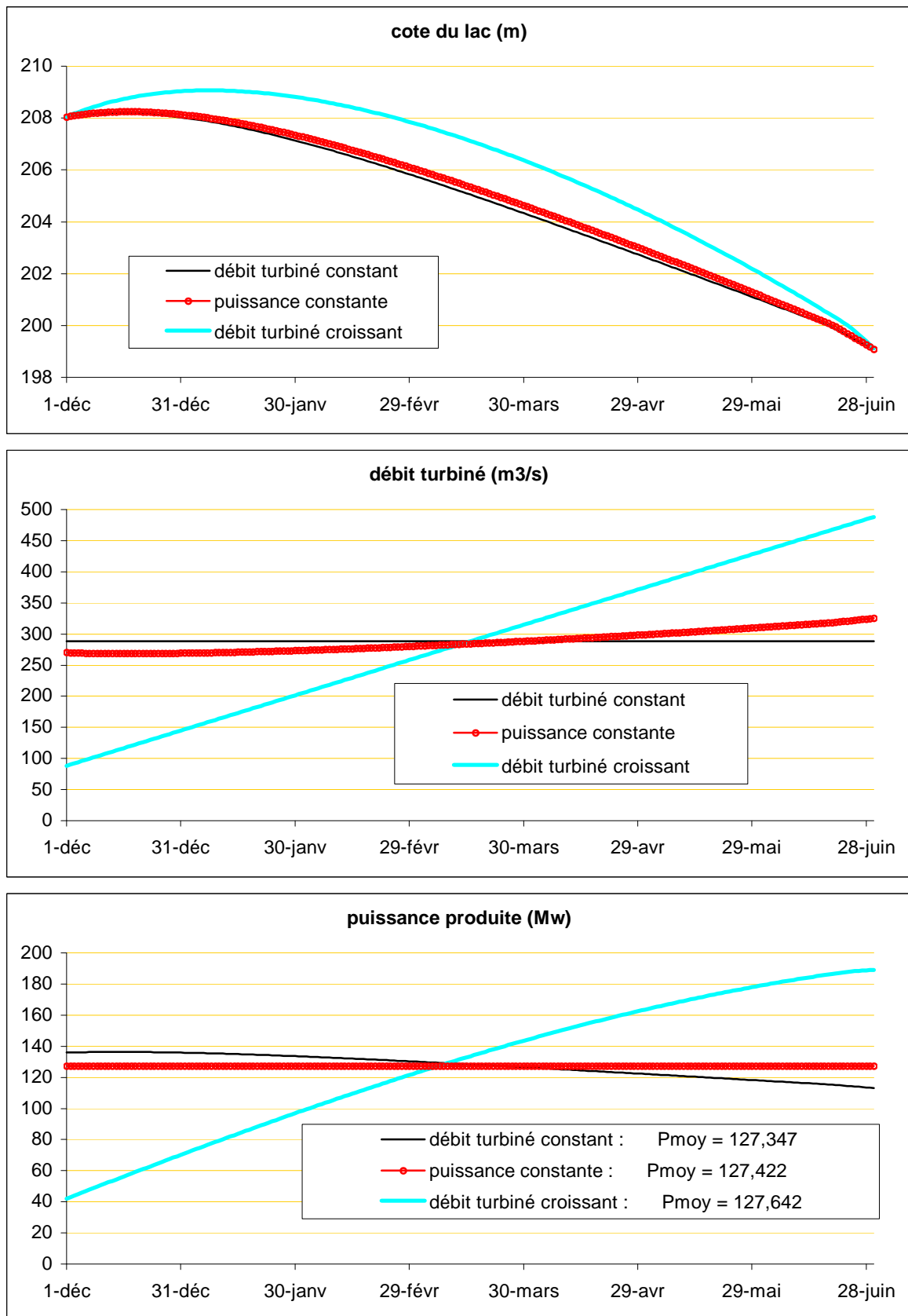


figure 6 : évolution de la cote du lac, du débit turbiné et de la puissance produite pour trois scénarios permettant d'abaisser la cote du lac de 208,05 à 199 m entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 juin, dans le cas d'apports de débit en décroissance exponentielle dans la retenue, fixés à 400 m<sup>3</sup>/s au 1<sup>er</sup> décembre.