

## Barrage de Villerest Gestion automatisée et gestion de secours Intégration des objectifs et des contraintes

**The Villerest dam  
Automated management and emergency operations  
Integration of objectives and constraints**

Jacques LEFEVRE,

*Ingénieur hydraulicien à l'Agence de Bassin Loire-Bretagne*

Gilles FLEURY

*Ingénieur au BCEOM FRANCE*

Jean-Luc ROY

*Ingénieur des TPE à la Délégation de Bassin Loire-Bretagne*

Bernard CAPPELAERE

*Ingénieur au BCEOM FRANCE*

### Résumé

Le barrage de Villerest sur la Loire Supérieure a pour fonctions l'écrêtement des crues, le soutien des étiages et la production d'électricité.

L'article présente dans son ensemble la gestion de cet ouvrage, la manière dont on a envisagé d'intégrer des fonctions ou contraintes apparemment contradictoires, la répartition entre les tâches humaines et automatisées et les procédures de gestion dégradée indispensables pour que le système soit d'une fiabilité quasi-absolue.

A la limite, en cas de rupture complète des communications avec l'extérieur, le barragiste dispose d'une procédure d'écrêtement simplifiée dite "modèle de secours".

### I- Description sommaire de l'aménagement

Le barrage de VILLEREST est un ouvrage poids arqué en béton, de 70 mètres de haut pour une largeur en crête de 469 mètres, établi à l'extrémité aval des gorges de la LOIRE, à 5 kilomètres à l'amont de ROANNE (figure 1). Il a été construit de 1978 à 1984, sous maîtrise d'ouvrage de l'Institution Interdépartementale pour la Protection des Vals de Loire contre les inondations dont la mission a aujourd'hui été reprise par l'E.P.A.L.A. (Etablissement Public pour l'Aménagement de la LOIRE et de ses Affluents).

Sa capacité est de 177 millions de m<sup>3</sup> d'eau à la cote d'arasement du déversoir

### Summary

The main functions of Villerest dam, on the upper Loire river, are flood control, heightening low-water flows and hydro-power production.

This paper describes the main features of management system for this reservoir, the way it has been attempted to integrate apparently conflicting functions and constraints, the distribution between human and automated operations, and the down-graded management procedures for maximum system reliability.

As a last resort, in case of total failure of outside connections, the dam operator can run a simplified flood-control procedure, called "emergency model".

de surface (320 m NGF). Il est muni de puissants évacuateurs (un pertuis de fond et cinq pertuis de demi-fond de 41 m<sup>2</sup> de section) permettant de laisser passer de gros débits de crue à une cote peu élevée au barrage, sans accumuler d'eau dans la retenue (figure 2).

La construction du barrage de VILLEREST a entraîné la suppression de la digue de PINAY, petit ouvrage écrêteur à pertuis ouvert fixe construit au début du XVIII<sup>e</sup> siècle pour protéger l'aval.

### II- Fonctions de l'ouvrage

#### 2-1- Objectifs

Le barrage de VILLEREST est un ouvrage

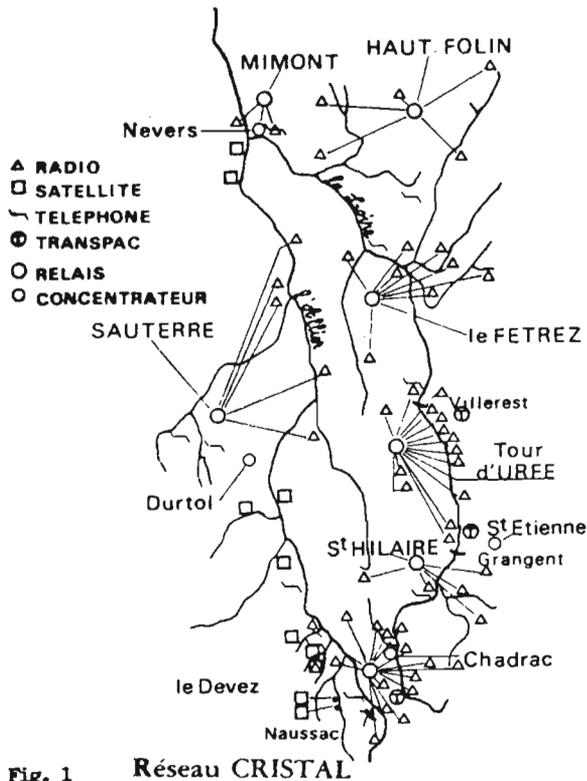


Fig. 1 Réseau CRISTAL

à buts multiples, dont les fonctions principales, par ordre de priorité, sont l'écrêtement des crues, le soutien d'étiage et la production énergétique.

L'exploitation de la retenue doit également permettre son utilisation touristique estivale.

En raison de leur diversité, ces objectifs peuvent correspondre dans certaines situations, à des exigences partiellement contradictoires.

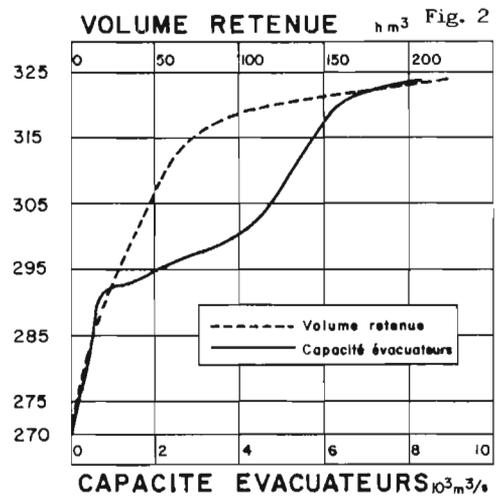
Les crues survenant essentiellement en automne et au printemps, le "creux" qu'il faut alors ménager dans la retenue peut nuire à la faculté de soutenir les débits d'étiage ultérieurs.

La production énergétique et l'exploitation touristique de la retenue nécessitent de maintenir, respectivement en hiver et en été, un niveau aussi élevé que possible dans la retenue, ce qui peut interférer avec les objectifs de soutien d'étiage et d'écrêtement des crues.

Ces intérêts contradictoires ont donc fait l'objet de compromis, en fonction de leurs priorités respectives, intégrés sous forme d'un schéma d'exploitation (voir § 2-3).

### 2-2- Contraintes d'exploitation

L'exploitation de l'ouvrage doit également prendre en compte certaines contraintes



ayant pour objet d'éviter qu'elle n'entraîne de préjudices aux intérêts pré-existants.

Les plus importantes sont les suivantes:

a) pour l'amont de la retenue :

- éviter les remontées de nappe dans les Chambons, riches terres agricoles, en limitant la cote du plan d'eau au printemps et en été,

- en cas de crues, ne pas aggraver les inondations par rapport à la situation antérieure (compte-tenu du remous qu'engendre la digue de PINAY).

b) pour l'aval :

- assurer la meilleure qualité d'eau possible

- limiter les variations brusques de débit sortant pour qu'elles restent compatibles avec le barrage de ROANNE, ouvrage vétuste, servant à l'alimentation du canal de navigation de ROANNE à DIGOIN,

- en période d'exploitation normale, faire en sorte que le débit sortant soit aussi voisin que possible du débit entrant, tout en absorbant cependant les variations de débits dues aux éclusées venant du barrage de GRANGENT en amont.

Cette condition impose que la production hydroélectrique à VILLEREST se fasse par turbinage au fil de l'eau.

### 2-3- Schéma d'exploitation

Au terme d'une longue concertation, la prise en compte des différents objectifs et contraintes a conduit au schéma d'exploitation représenté par la figure 3.



- un soutien d'étiage plus important mais un risque de rupture de stock

- un soutien modéré mais avec peu de risque. Si la question n'est bien entendu pas aussi tranchée, il n'en demeure pas moins qu'il faut essayer d'apprécier le risque que l'on veut prendre.

**IV- Dispositif de gestion**

**4-1- Structure de la gestion**

Tout le système de gestion est basé sur des prévisions qui doivent être le plus fiables possibles.

Or, celles-ci sont effectuées à partir des données actuelles et passées. C'est pourquoi il faut connaître à tout instant les pluies, la température de l'air et le niveau de l'eau dans les rivières en certains points soigneusement choisis. Le déroulement de la gestion est donc le suivant :

- mesures automatiques sur le terrain
- télétransmission de ces mesures au Centre de gestion
- examen des mesures pour éliminer les valeurs douteuses
- envoi des consignes aux barrages
- réalisation des manoeuvres.

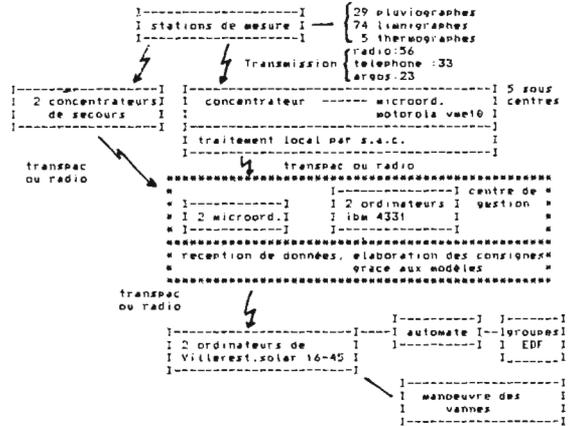
Il faut cependant insister sur deux aspects très importants qui dans certains cas peuvent sembler contradictoires mais sont en fait complémentaires:

- le système doit être fiable. Ceci a des conséquences sur deux plans : il a fallu à tous les niveaux gérer les défaillances possibles du système d'une part et d'autre part pousser au maximum l'automatisation des tâches répétitives pouvant entraîner des erreurs ou des pertes de temps
- à tous les niveaux l'appréciation des résultats et leur interprétation doit être faite par l'homme. En effet seule son intervention peut déceler des mesures erronées (sauf les erreurs flagrantes...) des phénomènes hydrologiques non totalement pris en compte par les modèles...

Examinons donc rapidement les deux systèmes qui composent la gestion :

Le système matériel et logiciel

Celui-ci peut se résumer sur le schéma suivant :



Les sous-centres, services d'annonce des crues sont situés à St Etienne, Clermont-Ferrand, Le Puy, Nevers, Orléans; le Centre de gestion étant situé à Orléans la Source.

Le système humain

Celui-ci joue un rôle important dans ce système de gestion. il intervient en fait à deux niveaux différents :

- maintenance du système (entretien des matériels et logiciels, étude de nouvelles consignes...)
- gestion des crues en temps réel.

Ce sont donc des tâches de nature très différentes. La première fait appel à du personnel permanent, la seconde à du personnel d'astreinte.

\* Maintenance du système

L'extension géographique du réseau étant importante, la maintenance 1er niveau (échange standard de blocs complets) est assurée par des personnels basés dans les services s'annonce des crues.

La maintenance 2ème niveau (réparation complète) est assurée par une équipe d'électroniciens basée au Centre de gestion.

La validation des données reçues et la maintenance des logiciels des microordinateurs est assurée par les ingénieurs du Centre tandis que les informaticiens de l'Agence de Bassin Loire-Bretagne s'occupent des logiciels des ordinateurs sur lesquels sont implantés les modèles.

\* Gestion normale et d'étiage

En période normale, l'ouvrage est géré par EDF, le calcul des débits sortants étant effectué directement sur l'ouvrage au moyen de deux SOLAR 16-45. En période d'étiage une consigne établie à l'aide du modèle de gestion étiage est donnée chaque jour aux barragistes par le personnel du Centre de gestion.

RAPPORT V.9

\* Gestion en crue

La surveillance des crues est assurée 24 h sur 24 par 16 prévisionnistes d'astreinte. Chaque semaine 4 personnes sont d'astreinte à un niveau différent. Les deux premiers doivent intervenir dans la demi-heure suivant leur appel, le troisième dans les 5 heures et le dernier dans les dix heures. Ils sont appelés par un boîtier Eurosignal, ce qui laisse une souplesse de déplacement au personnel. Lors d'une crue, ils assurent en rotation une permanence et un repos de 10 heures. A chaque instant (sauf au tout début de la crue) la gestion est réalisée par deux personnes dont une seule est responsable (la lère arrivée).

Ces prévisionnistes ont été recrutés parmi les ingénieurs du Service Hydrologique Centralisateur, de l'Agence de Bassin, de la Délégation de Bassin et de la Direction Départementale de l'Équipement. Leur formation de base et sa mise à niveau constitue une des tâches prioritaires du centre de gestion.

4-2- Le logiciel d'aide à la gestion

4-2-1- Présentation fonctionnelle et organique

Le logiciel d'aide à la gestion en cours de réalisation par le groupement BCEOM-LHM-CNUSC a pour vocation :

- d'élaborer sous la conduite du prévisionniste les consignes de lâchures en période de crue ou d'étiage
- de prévoir les débits résultant à l'aval
- de permettre, en temps différé, la reconstitution et la simulation d'événements afin de pouvoir vérifier les modèles hydrauliques, les procédures de gestion et leurs utilisations par les prévisionnistes.

Pour répondre à ces objectifs, le logiciel doit donc comprendre de nombreuses fonctions dont nous présentons sommairement le contenu des principales dans l'ordre logique d'utilisation lors d'un cycle "normal" en période de crue, ou d'étiage tout en sachant que certaines sont réalisées systématiquement quelle que soit la période.

\* En crue

Réception et traitement des données du réseau CRISTAL. A chaque cycle d'interrogation du réseau CRISTAL (variant entre 1h et 4h), le logiciel reçoit les données des stations de mesure. Il complète les fichiers, analyse les données de chaque station par rapport aux valeurs antérieures et à celles des autres stations pour leur affecter un code de validité.

Visualisation et validation des données par le prévisionniste

Le prévisionniste peut visualiser, modifier

et compléter les données. Il dispose d'outils lui permettant d'analyser simultanément les données de plusieurs stations sur plusieurs cycles avec une représentation visuelle des codes de validité.

Prévision des débits à l'entrée de la retenue (Feurs)

Un modèle de prévision établi par le LHM (Laboratoire d'Hydrologie Mathématique) permet à l'aide d'équations de régressions d'émettre des prévisions jusqu'à 20 heures à partir de stations limnimétriques (1) et pluviométriques.

L'existence de plusieurs équations pour chaque échéance et de procédures de substitution permet de pallier la défaillance de stations.

Une procédure de correction par "filtrage de Kallmann" est associée aux équations pour les faibles échéances afin de corriger en temps réel une erreur persistance.

Simulation de la retenue

A partir de sept cotes mesurées dans la retenue, des hydrogrammes d'entrée et de sortie prévus, un modèle "simplifié" (élaboré par le LNH à partir de la simulation en régime transitoire) permet la simulation de la ligne d'eau dans la retenue et via un processus itératif, la recherche d'un débit d'écrêtement optimal pour ne pas dépasser une cote donnée. L'utilisation de la ligne d'eau en cas de défaillance de capteurs est possible par interpolation des débits dans la retenue ou utilisation d'un calcul antérieur.

Elaboration de la gestion

L'élaboration en temps réel d'une consigne optimale de lâchure, respectueuse du règlement d'eau et des consignes d'exploitation a fait l'objet d'analyses à partir des crues types ou observées. Les différents cas particuliers envisagés (crue à plusieurs pointes, risque de concomitance à l'aval...) sont intégrés dans l'algorithme de détermination des consignes pour les quatre prochaines heures.

Propagation des lâchures

Un modèle de prévision des affluents aval et de propagation des débits de la Loire établi (EDF/DTG Grenoble) par la méthode DPFT permet l'émission de prévision à DIGOIN, GILLY et NEVERS à partir des lâchures effectuées à VILLEREST et des pluies et débits mesurés sur les affluents à l'aval (principalement l'ARNOUX, l'ARON, la BESBRE, l'ARCONCE).

(1) (FEURS, Grangent, Andrézieux, Bas en Basset, Vaubarlet, Chadrac, Chambon).

Mais les délais de propagation des lâchures dépassant les délais de prévision des apports la prise en compte de l'aval "éloigné" dans la gestion doit s'effectuer à partir de résultats statistiques.

#### Envoi des consignes

Après validation par le prévisionniste les consignes sont renvoyées par le réseau CRISTAL sur le calculateur du barrage de VILLEREST qui, après nouvelle vérification du respect du règlement détermine l'ouverture des vannes.

#### Archivage

Les données des résultats concernant la gestion réalisée au cours de ce cycle sont archivées ainsi qu'un fichier "mouchard" retraçant les opérations réalisées.

#### Consultation

A tout moment le prévisionniste peut consulter des données ou des résultats concernant l'évènement qu'il gère.

Notamment il dispose d'un "tableau de bord" visualisant les principaux paramètres de la gestion.

#### Fonctions diverses

Le prévisionniste dispose en plus de fonctions "utilitaires" comme "l'aide documentaire" pour l'aider à répondre à une question, un "journal de bord" pour laisser un message..

En étiage :

- La gestion concerne aussi le barrage de Naussac sur l'Allier (1)
- Réception et traitement des données (rappel)
- Visualisation et validation des données (rappel)
- Prévision des apports sur les bassins intermédiaires : réalisée à partir d'équations de régression utilisant des données débit-métriques journalières.
- Elaboration des lâchures pour satisfaire les contraintes sur l'Allier et sur la Loire (par propagation "inverse").
- Gestion de l'étiage, c'est à dire en fonction de l'état des réserves et de la date, détermination de l'objectif à partir d'une règle de gestion "optimale" et détermination des lâchures à effectuer à chaque barrage pour satisfaire cet objectif. Une procédure d'auto-corrrection permet de compenser les erreurs systématiques.

#### 4-2-2- Principes de réalisation

La réalisation du logiciel sur le matériel de l'Agence de bassin (IBM 4331 sous système VM/CMS) nécessite des compromis entre des objectifs antagonistes. Les principaux principes qui ont guidé la réalisation sont :

#### La souplesse d'utilisation

Bien que toujours conseillé par le logiciel le prévisionniste ayant accès à des sources supplémentaires de renseignements (météo, image radar, observateur...) doit pouvoir conserver son libre arbitre. Il s'agit de gestion "assistée par ordinateur" plutôt que de gestion automatisée.

#### L'efficacité et la fiabilité

La gestion s'effectuant en "temps réel" il est important que le logiciel réponde avec fiabilité et efficacité à ses objectifs. Cela concerne aussi bien les modèles hydrologiques et hydrauliques que l'architecture informatique.

#### La possibilité d'utilisation en temps différé

Aussi bien en diagnostic de gestion réalisée qu'en "simulateur" de gestion pour les nouveaux prévisionnistes.

#### La facilité de maintenance et d'adaptation

L'évolution de ce logiciel semble inexorable du fait d'une amélioration de la connaissance des phénomènes hydrologiques et hydrauliques et de l'évolution de la réglementation et du matériel utilisé.

Sans entrer dans le détail, il est possible de présenter les principales règles de construction du logiciel utilisées pour satisfaire aux principes exposés précédemment.

#### Structuration modulaire

L'ensemble de l'application est décomposée en tâches élémentaires regroupées en modules techniques. Ces tâches peuvent être à caractère :

- hydrologique ou hydraulique (élaboration d'une prévision, extrapolation d'un hydrogramme, simulation de la ligne d'eau dans la retenue...)
- de gestion : (détermination des objectifs de lâchure, des débits "réglementaires" des consignes de lâchures, envoi de consigne ...)
- utilitaires (aide documentaire, journal de bord ...)

Ces tâches communiquent entre elles par des fichiers "spécialisés" où les données sont regroupées en sous ensembles cohérents.

La réalisation d'une tâche comporte toujours :

- une vérification de l'admissibilité de l'appel
- la réalisation de la tâche qui communique par panneaux interactifs avec le prévisionniste

(1) Les modèles hydrologiques et hydrauliques utilisés ont été élaborés par le LHM.

RAPPORT V.9

- la remise à jour de la cohérence du système après vérification du bon déroulement.

Convivialité

Le déroulement de la gestion ou l'appel d'une tâche peuvent être effectués à l'aide de menus arborescents (ou directement grâce à un code renseigné).

L'utilisation des touches de fonctions, d'attributs d'écran (couleurs, clignotement), de graphiques permettent une utilisation aisée du logiciel avec un minimum de compétence.

En particulier une touche "suite" permet de laisser le logiciel proposer l'étape suivante et des valeurs par défaut sont proposées autant que possible.

Introduction de sécurité

Ce point est développé dans § 4-3-2-

Possibilité de maximiser l'efficacité

Le déroulement "normal" de la gestion n'est effectuée que les tâches nécessaires. La possibilité est laissée aux utilisateurs compétents de court-circuiter les menus pour atteindre une tâche et d'utiliser certains outils plus "efficaces" mais moins facile d'emploi.

Homogénéité du logiciel

Les programmes techniques sont écrits en Fortran 77 et assemblés par un langage procédural de haut niveau (REXX).

Les applications utilisent les logiciels spécialisés les mieux adaptés dans l'environnement IBM/VM (GDDM, XEDIT, DMS).

La maintenance des logiciels sera facilitée par une écriture limpide et homogène des programmes avec paramétrage des valeurs non immuables.

4-3- La gestion des défaillances

4-3-1- Vis à vis des données

Le réseau CRISTAL est un maillon important de la chaîne de gestion. Faute d'existence de système d'acquisition de données très fiable en période de crue, la solution a consisté à diversifier les moyens de recevoir les données notamment en dédoublant les micro-ordinateurs, les vecteurs de transmission et les capteurs importants (Feurs, Bas en Basset).

Les données sont critiquées automatiquement et validées par le prévisionniste qui peut toujours les modifier.

Les modules gèrent les données disponibles pour déclencher les procédures de substitution les plus légitimes.

Les calculs sont recommencés tous les cycles en période de crue (en général toutes les deux heures).

4-3-2- Défaillances du logiciel

Le logiciel et les fichiers importants ne peuvent être altérés par le prévisionniste. Celui-ci peut sans conséquence dommageable réinitialiser sa machine.

Un contrôle de cohérence permet de vérifier le bien fondé de l'exécution d'une tâche et des réponses effectuées. Par exemple il faut valider les données du haut bassin avant d'émettre une prévision. Les codes retour des opérations sont testés pour s'assurer de leur réussite et prévenir le prévisionniste en cas d'anomalie.

Chaque modèle hydrologique ou hydraulique ne peut être utilisé que dans son domaine de validité. De plus les résultats sont assortis de critères de qualité en fonction de la qualité des équations et des données utilisées. Ces codes de qualité permettent de moduler l'utilisation d'une valeur dans la suite de la gestion.

Les résultats principaux doivent être validés par le prévisionniste ainsi que toutes modifications effectuées manuellement.

Tous les schémas de résolution numérique fragiles sont assortis de sécurités émettant des messages explicites (processus itératif...).

4-3-3- Risques humains ou matériels

Comme indiqué précédemment deux prévisionnistes sont présents au Centre de gestion en période de crue et le logiciel peut fonctionner sur deux ordinateurs. Il existe de plus une méthodologie de gestion manuelle utilisant de faibles moyens de calcul (micro-ordinateur, calculatrice...).

4-3-4- Risque de défaillance dans la mise en oeuvre des consignes

Les vecteurs de transmission reliant le centre de gestion au barrage sont multiples et les procédures de codage de l'information fiables.

Le calculateur du barrage (ou le barragiste) vérifie le respect des documents réglementaires.

De plus, en cas de rupture de toute liaison avec Orléans, le barragiste peut mettre en oeuvre une procédure de secours dite modèle de secours.

Objet du modèle

Le modèle de secours permet de réaliser un écrêtement non négligeable des crues avec le barrage de Villerest, sans dépassement de la cote maximale lorsque les seules informations disponibles sont la cote au barrage et le débit sortant.

Principes (figures 5 et 6)

\*D'une part on construit un hydrogramme

entrant supposé sur la base d'une hypothèse raisonnablement pessimiste. Les crues à Villereest étant caractérisées par un seul paramètre : le débit maximal, on suppose que l'hydrogramme entrant est celui d'une crue type dont le maximum est fonction du débit entrant réel calculé au barrage.

\*D'autre part on établit un hydrogramme sortant calé de la manière suivante: s'il apparaît que le débit entrant réel est croissant le débit sortant croît mais moins vite que le débit entrant supposé, en étant inférieur à ce dernier, puis reste constant quand le débit entrant supposé décroît. L'hydrogramme sortant est calé de sorte que tout le volume disponible soit utilisé.

S'il apparaît que le débit sortant réel est décroissant le débit sortant reste constant pourvu qu'il soit compris entre deux valeurs :

- un maximum qui permettrait d'évacuer en 100 000 secondes le volume retenu
- un minimum qui permettrait de poursuivre l'écrêtement.

\*Enfin s'agissant d'un modèle destiné à faire face aux événements graves, celui-ci n'écrête pas les crues inférieures à 1500 m<sup>3</sup>/s.

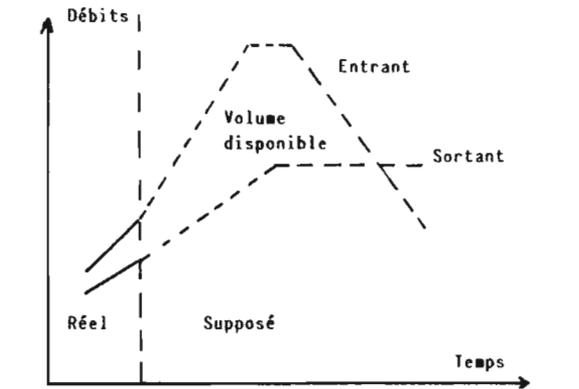


Fig. 5 Modèle de secours croissance

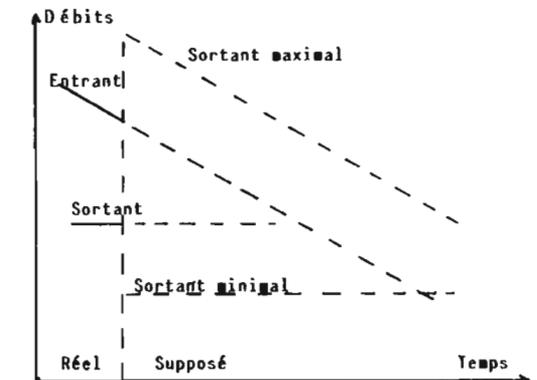


Fig. 6 Modèle de secours décroissance

### Processus

Toutes les heures le calcul est refait à partir des nouvelles données.

La cote donne les variations de volume. Celles-ci ajoutées au débit sortant donnent le débit entrant.

Le volume maximal est fonction de la cote maximale elle-même fonction du maximum des débits entrants réels.

La variation du débit sortant réel est modulée pour tenir compte des limites imposées par les consignes d'exploitation. De plus pour éviter des oscillations du débit sortant ce dernier est maintenu constant lorsque le calcul conduit à une inversion de son sens de variation.

Le calcul peut être fait sur calculette ou à l'aide d'abaque ou avec un micro-ordinateur.

### Résultats

La réduction du débit maximal obtenu varie de 500 m<sup>3</sup>/s pour les crues de 2000 m<sup>3</sup>/s à 1000 m<sup>3</sup>/s pour les crues supérieures à 3000 m<sup>3</sup>/s.

Une vérification en a été faite, non sur une crue réelle, faute d'évènement, mais sur une crue dont l'écoulement était simulé par le modèle de gestion utilisé normalement.

Il s'agissait d'une crue type de 4000 m<sup>3</sup>/s, pour une cote initiale 304 (niveau d'automne). La gestion optimale permet d'écrêter cette crue à 2000 m<sup>3</sup>/s.

Le modèle de secours donne un débit d'écrêtement de 3000 m<sup>3</sup>/s.