La gestion des barrages réservoirs

Reservoir operation

Compte rendu, par J. Miquel* et P.A. Roche**

d'une réunion d'un groupe de travail
de la Société hydrotechnique de France (4-5 juin 1984)

La Société hydrotechnique de France a réuni les 4 et 5 juin 1984 un groupe de travail pour faire le point sur les orientations actuelles et les efforts accomplis dans le domaine de la gestion des barrages-réservoirs : formulation des objectifs; études de cas opérationnels; méthodes de calcul; questions posées, pour le dimensionnement des ouvrages, par les différentes incertitudes.

La première partie de l'article présente des méthodes éprouvées en France, et les compare à quelques références dans d'autres pays. Dans la deuxième partie, plus prospective, quelques orientations d'études non encore utilisées de façon opérationnelle sont décrites.

On the 5th of June 1984, a working party of the Société hydrotechnique de France (French Hydrotechnic Company) met to discuss the current orientations and achievements in the field of reservoir operation : formulation of objectives, studies of related operations, calculations methods, and also the questions posed as regards the dimensioning of works by the various uncertainties.

The first part of the article describes the methods tested in France and compares them with some references in other countries. In the second part which is more prospective, some research orientations, not yet used operationally, are described.

La Société hydrotechnique de France a réuni les 4 et 5 juin 1984 un groupe de travail pour faire le point sur les orientations actuelles et les efforts accomplis dans le domaine de la gestion des barrages-réservoirs. Les réflexions ont été organisées autour de quelques thèmes particuliers : la formulation des objectifs, les études de cas opérationnels, les méthodes de calcul et les questions posées, pour le dimensionnement des ouvrages, par les différentes incertitudes.

Certains de ces sujets seront abordés lors des XIX^e Journées de l'hydraulique, qui sont consacrées à l'impact des activités humaines sur les eaux continentales.

Dans ce compte-rendu, nous ne pouvons donner une image fidèle de chaque contribution de 1984. Nous avons surtout cherché à faire un bilan, nécessairement subjectif des différentes démarches présentées, et à souligner quelques axes de recherche qui nous semblent prometteurs.

Il existe une littérature internationale très abondante dans le domaine de la gestion des barrages-réservoirs. Mais les cas décrits ne sont pas toujours des systèmes opérationnels ayant fonctionné durant une période suffisante pour avoir fait leurs preuves. Dans la première partie, nous présentons des méthodes éprouvées en France, et nous les comparons à quelques références dans d'autres pays. Dans la deuxième partie, plus prospective, nous décrivons quelques orientations d'études non encore utilisées de façon opérationnelle.

* Electricité de France. Département EAA, 6, quai Watier, 78401 Chatou Cedex.

** ENPC — CERGRENE.

Figure 1. — Objectif de remplissage-vidange du réservoir SEINE.

Cette gestion est utilisée depuis 1966 pour le barrage Seine (extrait de Bédiet *et al.*, [7]). Les incertitudes de toutes sortes pesant sur la mesure des débits et sur l'évaluation des prélèvements intermédiaires entre le barrage et la Région Parisienne sont telles qu'elles masquent les améliorations que pourraient apporter des gestions plus élaborées. En période de sécheresse importante, comme en 1976, un comité technique juge cependant des modifications à faire dans la gestion.

Figure 2. — Mise au point des règles de gestion des réservoirs de la Loire Amont.

Compte tenu de l'extrême variabilité des apports et des étiages, les reports interannuels ont été particulièrement étudiés. Un modèle alterné annuel apports-déficits, ajusté sur une chronique de 31 années a permis la simulation d'une longue série synthétique (1000 ans) d'apports et d'étiages. La gestion optimale en avenir connu des différentes configurations, pour un critère purement hydrologique localisé sur une station de la vallée appelée point objectif, fournit des séries de reports interannuels dont l'analyse statistique a permis de dégager la formulation, en début d'étiage, d'un débit objectif à long terme Q_1 , assurant un report interannuel pour un risque défaillance donné.

La répartition de la totalité de la réserve disponible sur la période probable d'étiage restant à courir définit chaque jour un débit objectif à moyen terme $Q_2(J)$, qui évite toute défaillance brusque du système. Le débit cible à maintenir au point objectif est le minimum du couple $(Q_1, Q_2(J))$.

La réalisation pratique du débit cible, à partir des délestages effectués aux différents barrages, tient compte de la propagation des débits et des prévisions d'apports des bassins intermédiaires. (cf. Bocquillon et Masson, [8]) (extrait de J. Lefèvre, [9]).

PREMIERE PARTIE : PRATIQUES ACTUELLES

Les pratiques actuelles en matière de gestion ne peuvent que surprendre au premier abord par leur diversité.

Si les gestionnaires apparaissent confiants chacun dans une démarche particulière, c'est que chaque cas semble poser des problèmes tout à fait spécifiques, interdisant toute généralisation. Par la complexité des contraintes particulières qu'ils rencontrent, de nombreux praticiens sont enclins à considérer que des idées ou des méthodes trop générales sont inapplicables, voir même pernicieuses par les simplifications injustifiées qu'elles nécessitent.

Nous allons tout d'abord chercher à comprendre cette diversité, en comparant la façon dont sont abordés des problèmes simples, dans le cas des ouvrages à but unique. Puis nous nous intéresserons aux cas les plus fréquents aujourd'hui, pour lesquels des objectifs multiples sont à concilier. Enfin, nous ferons rapidement le point des démarches adoptées dans différents autres pays.

1. Gestions à but unique

1.1. La gestion hydroélectrique : des algorithmes performants pour optimiser un critère bien défini

La gestion des réservoirs a fait l'objet d'une attention plus particulière avec le développement de l'hydroélectricité. Dans les années trente apparaissent des méthodes déjà élaborées, comme celle du « fil tendu » de Varlet [1]. Il faut attendre les années 1945-46 et les travaux de P. Massé [2], notamment avec la programmation dynamique marginaliste en avenir incertain, pour que se développent les méthodes encore employées actuellement.

La particularité de l'objectif de production hydroélectrique par rapport aux autres usages des barrages-réservoirs est d'être parfaitement défini, puisqu'il s'agit de satisfaire la demande d'électricité au moindre coût.

A chaque instant, selon l'usage qui est fait des moyens de production, cette satisfaction de la demande représente un certain coût. Le coût sur une période quelconque est la somme des coûts instantanés sur cette période. La décision recherchée à l'instant t est celle qui fournira le coût minimum sur la période à venir, *en prenant en compte tous les aléas futurs*, tels qu'on peut les évaluer à cet instant.

Ce dernier point mérite attention car ces aléas économiques et hydrologiques sont loin d'être négligeables, qu'il s'agisse des fluctuations des coûts de production, de la demande ou de la ressource. L'attitude décisionnelle face aux risques liés à ces aléas n'est pas nécessairement bien représentée par l'espérance mathématique de ces coûts. Cela conduit à substituer aux coûts tels qu'ils peuvent être habituellement évalués, le concept d'utilité, et de fonction d'utilité. Et si théoriquement tout problème décisionnel peut être ramené à la recherche de l'optimum de l'espérance d'une fonction d'utilité appropriée, la constitution des fonctions d'utilités pose des difficultés pratiques

considérables. Or il se trouve que les aléas hydrologiques sont complexes, et n'ont été pris en compte que schématiquement dans les algorithmes utilisés jusqu'à présent. Ces limites théoriques n'ont cependant pas empêché les méthodes de calcul de s'étoffer considérablement à l'électricité de France, donnant naissance à de nombreux modèles [3], capables de s'intégrer dans le contexte plus général de la gestion des sources d'énergie. C'est qu'en effet la prise en compte d'un parc important de moyens de production (nucléaire, hydraulique, thermique) sur un unique réseau fortement interconnecté a permis de minimiser les impacts économiques d'un événement particulier survenant sur l'un des ouvrages. Dans ces conditions, chaque aléa peut être représenté d'une façon relativement schématique, car l'essentiel des progrès à attendre est dans la coordination de l'ensemble. La complexité de ce système où l'on dispose de 50 commandes complémentaires, fait que l'espérance des coûts, calculée sur les aléas hydrologiques, est un résumé suffisant dans un premier temps des risques encourus dans la gestion hydroélectrique.

L'amélioration de la description de chaque système, et surtout l'amélioration des prévisions de court terme dans les manœuvres des ouvrages sont les éléments fondamentaux des progrès à venir dans ce domaine [4].

L'utilisation de telles méthodes a eu des applications dans d'autres domaines et notamment en hydrogéologie, lorsque les coûts de pompage permettaient de définir un critère numérique hydroélectrique. La gestion conjointe de la nappe du calcaire carbonifère et de la Lys [5] optimise par exemple le recours à diverses sources de production d'eau potable selon leur disponibilité et leur coût de production. En hydrogéologie le caractère aléatoire des apports n'est généralement pas pris en compte, si ce n'est à travers des méthodes de simulation de scénarios [6].

1.2. Le soutien d'étiage : perfectionner une vidange jusqu'ici forfaitaire suppose une quantification des objectifs.

A l'opposé de cette démarche d'optimisation on trouve la gestion encore actuellement pratiquée pour le soutien des étiages à partir d'un ouvrage en dérivation du cours d'eau. Cette gestion consiste, entre deux dates fixées par le règlement d'eau du barrage, à déstocker un débit constant, indépendamment des débits naturels en rivière (*figure 1*).

Ce système de gestion est adapté à des cas où l'information est pauvre, voire inexistante : n'étant soumis à aucune modification en temps réel il assure, dans un large gamme de circonstances, une performance minimale vis-à-vis de tous types d'usages et de besoins qui ne nécessitent pas d'être quantifiés ou comparés.

Pour l'améliorer, il est d'abord nécessaire de cerner l'objectif de la gestion de façon plus détaillée. Mais cela pose de nombreuses difficultés. En particulier, il faudrait pouvoir associer à chaque volume d'eau utilisé, à une date donnée, une valeur comparable à la valeur du même

volume utilisé dans d'autres conditions, pour le même objectif. Ceci n'est pas toujours possible, et explique que l'on soit tenté de fixer des objectifs globaux pour le soutien des étiages. Ils permettent la programmation des ouvrages. Ces objectifs sont fondés le plus souvent sur des quantiles de certains débits caractéristiques de l'étiage : on considère comme une défaillance le passage du débit pendant un certain temps en-dessous d'un seuil particulier. Les ouvrages sont alors dimensionnés de façon à permettre la réduction de la fréquence de cette défaillance en-dessous d'une probabilité donnée.

L'objectif de remplissage-vidange correspond ainsi à une « gestion moyenne » qui assure une satisfaction acceptable de l'objectif. Elle est établie hors temps réel, au moyen d'une étude paramétrique (figure 2).

2. Gestion à buts multiples

Dès lors que l'on dispose de peu de moyens pour quantifier certains objectifs comme le soutien des étiages, comment fait-on pour décider lorsque les ouvrages doivent satisfaire différents objectifs ? Nous allons tout d'abord examiner les solutions employées dans un cas très fréquent, où il faut à la fois gérer la protection contre les crues et le soutien des étiages.

2.1. Gestion conjointe crue-étiage

Les méthodes les plus utilisées emploient le réglage par simulation de gestions paramétrées a priori.

Ainsi le CEMAGREF d'Antony développe depuis de nombreuses années, des méthodes simples de gestion des retenues de faible capacité. Après avoir mis au point une méthode directe permettant de calculer des courbes d'objectifs de remplissage prenant en compte le caractère aléatoire des apports (1978), il a été conduit à modifier sa démarche pour prendre en compte la façon dont s'opère le suivi réel des courbes d'objectifs. Finalement la méthode initiale devient itérative : La courbe est choisie de façon à maintenir une probabilité constante de défaillance.

Ce critère ne traduit pas une optimisation à proprement parler, mais un simple arbitrage entre 2 objectifs opposés. Ce peut être un inconvénient, mais aussi un avantage en raison de la difficulté de collecter les informations pertinentes pour procéder à une véritable optimisation [10].

Les plus récents travaux du CEMAGREF dans cette voie ont consisté à étudier l'utilisation des retenues d'irrigation pour la lutte contre les inondations, en supposant que l'irrigation est prioritaire, et que l'on accepte une fréquence de défaillance donnée sur cet objectif. On peut alors rechercher parmi une panoplie de gestion celle qui donne les meilleures performances pour l'écrêtement des crues [11]. (figure 3).

Dans de telles règles de décision, la date et le stock disponible suffisent à décider de l'intervention. Pour des ouvrages importants, les périodes charnières entre la phase de remplissage et le début du soutien des étiages sont tout à fait critiques (figure 4).

Même si dans de tels cas l'amélioration des possibilités de prévisions de l'abondance hydrologique à moyen terme

Figure 3. — La courbe objectif de « remplissage-vidange » est une parabole de la forme : $(t - aV)^2 + bV + ct + d = 0$.

Les paramètres a , b , c et d sont choisis de façon à assurer les besoins d'irrigation avec une fréquence de défaillance fixée. De l'ensemble des quadruplets (a, b, c, d) qui vérifient cette condition sur un échantillon d'années réelles ou simulées, on retient ensuite celui (a_0, b_0, c_0, d_0) qui répond au mieux à l'objectif secondaire d'écrêtement des crues (extrait de C. Michel et A. Thomas, [11]).

est susceptible de modifier les performances, la question du choix entre l'objectif non directement comparables continuera à se poser.

2.2. Le traitement des objectifs multiples

Les ouvrages sont de plus en plus utilisés pour satisfaire des objectifs multiples, qui apparaissent souvent contradictoires. Lors de leur conception, cependant, le nombre des objectifs retenus est limité : crue - étiage, production hydroélectrique - loisirs, etc. Le système de réglementation joue un rôle important, et parfois difficile à analyser, dans les choix entre ces objectifs.

En effet, un gestionnaire va utiliser l'ouvrage pour ses propres objectifs. Le règlement lui sera imposé pour que, ce faisant, il ne lèse pas d'autres usagers. Le gestionnaire est donc confronté à un problème qui lui est strictement interne, sous réserve d'un certain nombre de contraintes. C'est donc le règlement qui fixe le choix d'allocation des ressources, et ceci d'une façon nécessairement simpliste. Or cette simplification est loin d'être négligeable, car elle assigne des propriétés implicites aux différents objectifs. Il n'est pas certain que le poids de ces contraintes dans la qualité de la gestion vis-à-vis de l'ensemble des partenaires soit bien connu et que les priorités de fait soient conformes aux priorités souhaitées.

Figure 4. — Dans le cas des barrages de la Seine, les crues exceptionnelles du printemps 1983 ont conduit à s'interroger sur les possibilités d'adaptation des consignes de gestion pour réduire les dommages agricoles. Les délestages après les crues de printemps ont été supprimés à titre expérimental depuis 1981 sur le barrage Seine, pour éviter que les durées de submersion soient allongées (extrait de Dubel, [7]). L'effet de cette mesure, certes bénéfique pour le soutien d'étiage, est d'augmenter les risques de seconde crue dommageable. Par ailleurs, le caractère antagoniste entre crue et étiage apparaît tant que l'on ne dispose pas d'indicateurs permettant d'adopter, suivant l'abondance hydrologique des mois passés, une démarche différente de remplissage. Une consigne modifiée du barrage Marne permettant d'éviter les crues d'avril-mai 1983, aurait fait passer le déficit de remplissage de 60 à 145 millions de m^3 si elle était appliquée à l'année 1976. Que préfère-t-on ?

Ceci est particulièrement sensible lorsqu'il y a évolution des objectifs entre la conception des ouvrages et la gestion après quelques années.

On remarquera à ce propos que les barrages-réservoirs du bassin de la Seine ont été dimensionnés d'après des évaluations de soutien d'étiages. Or, dès l'origine, ce sont les grandes crues qui en ont orienté la gestion, et finalement les courbes d'objectifs de remplissage apparaissent comme des compromis provisoires entre ces besoins antagonistes.

Un autre exemple caractéristique est celui du bassin de la Loire Amont. Outre les objectifs prioritaires (crues, étiage), il est intéressant de connaître les conditions dans lesquelles se décide en cours d'étiage de réaliser un lâcher pour satisfaire les demandes des associations de canoë-kayak : le comité de gestion cherche à estimer si un tel lâcher serait préjudiciable aux objectifs de soutien d'étiage, en prenant en compte la situation hydrologique. Selon qu'il lui semble exister ou non un risque important de compromettre ces objectifs, il accorde ou refuse l'autorisation [12].

Est-il raisonnable d'espérer constituer des procédures permettant d'aider à comparer de telles décisions alternatives entre lesquelles il faut bien trancher ? Bien évidemment, on ne jugera pas avec les mêmes critères d'évaluation l'utilité de la satisfaction des usages cités

ci-dessus. Une formulation hiérarchisée est nécessaire, mais apparaît particulièrement arbitraire lorsque, comme c'est fréquemment le cas, elle s'exprime sous la forme de fréquences de passage sous un seuil de débit. Que signifie en effet, le choix d'une fréquence particulière ?

On juge souhaitable, pour la qualité de l'eau, un ordre de grandeur de débit, et l'on fixe une valeur particulière pour pouvoir discuter. On négociera autour d'une fréquence de dépassement de cette valeur, donnée plutôt théorique, mais qui se prête bien à la discussion. la valeur de débit choisie devient progressivement valeur de référence pour l'aménagement, mais, un peu à la façon d'un tabou, on ignore quel est l'impact de sa transgression.

La constitution d'un projet à buts multiples est un problème dont les degrés de libertés sont innombrables, et il est nécessaire de procéder par étapes. Il est remarquable que la quantification des objectifs soit limitée à une phase d'étude et de travaux préliminaires, jamais remis en cause, car cela ruinerait les argumentations des différents partenaires. Or le mode de gestion n'est pas indifférent pour la satisfaction de l'un ou l'autre des objectifs, qui ne se résume pas aux barrières de sécurité que chacun établit pour protéger ses intérêts.

Mais, même lorsque les négociations entre les différents partenaires sont difficiles, le bon sens montre que chacun peut trouver intérêt à une solution concertée. L'exemple

de l'aménagement du Lot est significatif de l'intérêt commun de plusieurs gestionnaires [13] (figure 5).

3. Pratiques à l'étranger

Certains pays (Etats-Unis, Canada, Inde,...) sont confrontés à de tels phénomènes naturels de crues et/ou d'étiage, que très tôt la gestion devait prendre en compte plusieurs objectifs : hydroélectricité, écrêtement des crues, soutien des étiages, maintien de la qualité de l'eau,... D'autre part la taille parfois très importante des bassins versants, exploités par de nombreux réservoirs, imposait souvent une gestion multiréservoirs.

On a donc vu se développer des procédures très complètes, capables de gérer plusieurs réservoirs pour de nombreux objectifs. Cette complexité est responsable de certaines simplifications :

- méthodes hiérarchisées, qui découpent le problème complet en sous-problèmes, les traitent successivement, puis les réagrègent.
- prise en compte sommaire des incertitudes hydrologiques (prévisions supposées parfaites, prévisions moyennes, et dans quelques cas méthodes de simulation).

Par contre les enjeux à arbitrer entre les différents usages ont souvent exigé d'affiner l'évaluation des conséquences des décisions, et il n'est pas surprenant d'assister maintenant à un développement des méthodes d'optimisation du type programmation dynamique, y compris en avenir incertain.

Il n'est pas toujours facile à la lecture des publications de faire la part des travaux de recherche et ceux effectivement opérationnels. Nous citerons néanmoins à titre indicatif, les Actes de l'« International Symposium on Real Time Operation on Hydrosystem », tenu à Waterloo (Canada) en 1981. On y trouve notamment plusieurs papiers sur la définition des objectifs et la quantification et leur satisfaction au moyen des fonctions d'utilité additives ou multiplicatives (Braga, Konieczny, Houck). Parmi les nombreuses procédures de décision à noter, celle d'Unny (approche globale hiérarchisée), de Krzysztofiwicz (programmation en avenir incertain, puis étape de décision) et de Ayers (programmation dynamique sur scénarios et distribution des coûts des différentes décisions).

Il faut signaler également la revue assez complète des méthodes opérationnelles d'optimisation en avenir certain faite par Turgeon, tandis que leurs limites sont étudiées par divers auteurs, dont Toebe qui rappelle que la propagation des lachures impose une borne inférieure au pas de temps séparant deux décisions de lachure, pour assurer l'indépendance des caractéristiques de l'écoulement.

La lecture de ces articles fait apparaître un contraste marqué entre le foisonnement des méthodes plus ou moins théoriques, et les contraintes pratiques, telles que celles rencontrées par les expériences françaises, et que nous avons décrites précédemment. On ne peut qu'être surpris du nombre des applications où l'on avance une optimalité algorithmique pour une étude où l'on a négligé tout à la fois les incertitudes de toutes sortes, les possibilités de

prévision, et la présence d'objectifs non formulables sous forme d'une fonction d'utilité additive. On trouve là un effet pervers du formalisme mathématique sur la pratique. En effet, on a tendance à résoudre non pas le problème tel qu'il est posé concrètement, mais celui qu'il doit être posé dans un certain contexte mathématique pour être résolu.

On retrouve toujours la même alternative : appliquer des algorithmes simples mais optimaux sur des schémas (trop) simplifiés (prévisions parfaites), ou bien utiliser des procédures empiriques en essayant de prendre en compte la diversité de la réalité, sans garantie d'optimalité.

Il faut néanmoins souligner que des recherches pour remédier à ce problème commencent à donner quelques résultats, comme en témoignent certaines publications récentes [14], [15], [16] et [17]), notamment en utilisant des procédures de décentralisation-coordination.

4. Bilan des pratiques actuelles en France

Le contexte français est un peu particulier en ce sens que l'hydroélectricité a souvent primé les autres usages pendant les années 1945 à 1970. Beaucoup de réservoirs sont gérés pour ce but unique, et par des procédures bien optimisées dans la mesure, où le problème a pu être cerné quantitativement.

Il n'en va pas de même pour les autres usages, pour lesquels ni les objectifs, ni la mesure de leur satisfaction, ne peuvent être aussi facilement quantifiés.

On s'est alors tourné vers des gestions robustes, axées sur un objectif principal, et garantissant une qualité minimum de fonctionnement, au détriment d'une optimalité jugée illusoire.

Cette fiabilité a un prix que la relative abondance de l'eau en France maintenait à un niveau raisonnable.

Ce schéma risque d'être remis en cause dans la mesure où les besoins augmentent en quantité mais aussi en nature et où les sites de réservoirs potentiels, tout comme les possibilités d'investissement dans ce domaine, sont limités.

Il arrivera désormais plus fréquemment qu'un réservoir soit géré pour une panoplie d'objectifs, à traiter sur un pied d'égalité ou à hiérarchiser clairement. La comparaison des utilités relatives, avant le projet, mais aussi pendant sa gestion, deviendra de plus en plus nécessaire.

Annexe : Rappels sur la programmation dynamique

Programmation dynamique en avenir certain

Le principe des algorithmes de programmation dynamique a été développé par Bellman. On considère un système défini par un vecteur d'état $X(t)$ sur lequel on peut effectuer un contrôle $U(t)$. L'évolution du système est décrit par une loi déterministe :

$$\frac{dX}{dt} = F(X, U, t).$$

Figure 5. — Projet de soutien des étiages du Lot.

Les enquêtes et études préliminaires ont conduit à retenir un objectif de débit moyen journalier de 12 m³/s à Entraygues comme minimum admissible (DMA).
 Pour garantir 8 années sur 10 ce DMA sur la période juin-septembre, il est nécessaire de fournir un volume d'eau supplémentaire de 30 millions de m³ par rapport aux ressources actuelles.
 De nombreuses solutions alternatives ont été étudiées, parmi lesquelles des solutions mixtes consistant en une modification de la gestion des réserves hydroélectriques.
 Pour comparer ces différentes solutions, il a été calculé l'économie réalisée par chacun des partenaires en participant à une opération commune, et le projet prévoyait une partition des coûts telle que l'économie relative soit la même pour tous les participants.
 Pour le soutien d'étiage, l'économie a été calculée par référence à un ouvrage de remplacement à but unique qui assurerait le même volume de soutien d'étiage.
 (extrait de M. Sormail, [13]).

Chaque réalisation de ce processus contrôlé est une trajectoire du système. A chaque état du système et du contrôle on associe un coût $L(X, U, t)$. On recherche une stratégie de contrôle $U^*(X, t)$ optimisant le critère J défini par

$$J = \int_0^T L(X, U, T) dt$$

Le principe de Bellman montre que dans une stratégie optimale sur $[0, T]$, une stratégie qu'elle définit sur un sous-intervalle $[0, t]$ ou $[t, T]$ de $[0, T]$ est optimale pour cet intervalle. Pour un problème en temps discrétisé par pas de Δt , ce principe permet la constitution d'un algorithme récursif où l'on définit les stratégies optimales sur $[t, T]$ à partir de la connaissance des stratégies optimales sur $[t + \Delta t, T]$. Le coût attaché à la trajectoire optimale sur $[t + \Delta t, T]$ étant noté $C(X, t + \Delta t)$, on obtient le contrôle optimal à l'instant t en minimisant

$$L(X, U, t) + C(X(t + \Delta t), t + \Delta t)$$

avec

$$X(t + \Delta t) = F(X(t), U(t))$$

Avenir incertain

On étend facilement cet algorithme au cas stochastique, à condition que l'état $X(t)$ suive une évolution marko-

vienne et que l'on cherche à optimiser l'espérance du critère J calculée sur tous les aléas représentés.

$$x = \begin{bmatrix} s \\ q \end{bmatrix}$$

Problèmes numériques

L'algorithme numérique repose sur une discrétisation des variables d'état et de contrôle. Etant récurrent il est soumis à une forte diffusion des erreurs numériques, ce qui impose des discrétisations relativement fines. Les temps de calculs augmentent exponentiellement avec la dimension d'espace de la grille explorée. Les moyens informatiques actuels ne permettent guère de traiter des problèmes de dimension supérieure à 3. C'est dire que la classe des problèmes effectivement solubles est extrêmement limitée.

2^e PARTIE : EVOLUTIONS POSSIBLES

De nombreux barrages sont gérés quotidiennement depuis des années sans qu'il ait semblé utile de remettre en cause l'efficacité de cette gestion. En effet il est communément admis que les contraintes multiples qui s'imposent au gestionnaire et l'importance des aléas hydrologiques vis-à-vis des moyens d'action dont il dispose (on ne contrôle bien souvent qu'une faible part des volumes écoulés) rendent illusoirs les tentatives d'amélioration (figure 6).

Nul ne contesterait que des limites physiques bornent inéluctablement les possibilités d'utilisation des ouvrages, quelle qu'en soit la gestion. Cependant on est dans certains cas fort éloigné de ces limites, et l'enjeu de la gestion opérationnelle est alors beaucoup plus important qu'on ne l'imagine a priori (figure 7).

La mise en œuvre de moyens techniques modernes de transmission et de traitement des données permet des

améliorations très significatives de l'efficacité des ouvrages, comme en attestent les exemples du système de réalimentation de la Neste en Gascogne (figure 8) et du barrage de Villersrest pour les périodes de crues (figure 9).

Ce n'est pas seulement par des nouveaux moyens matériels que l'on est susceptible d'améliorer les performances de la gestion. Dans le domaine du soutien des étiages en particulier, au niveau de la définition même des objectifs à assigner à la gestion, des données nouvelles sont nécessaires.

L'efficacité de la gestion des ouvrages hydrauliques apparaît donc comme une préoccupation majeure de l'aménagement des eaux. De nouveaux moyens techniques sont disponibles, des exigences nouvelles apparaissent : cela modifiera-t-il sensiblement la conception des méthodes de gestion dans les années à venir ?

Figure 6. — A Paris, un débit de $840 \text{ m}^3/\text{s}$ environ entraîne la fermeture des premiers tronçons des voies sur berge. Le volume écoulé durant la crue du 12 décembre 1981 au 6 février 1982 au-dessus de cette limite est de 2 milliards de m^3 . En 1910, il était de 3,4 milliards de m^3 . Or l'ensemble des barrages-réservoirs existants à l'amont de l'agglomération parisienne représente une capacité totale de 740 millions de m^3 , et bien entendu cette capacité n'est pas totalement disponible en début de crue, puisque les plus grands ouvrages servent également au soutien d'étiage, et que des crues antérieures ont pu remplir l'ouvrage au-delà de l'objectif de remplissage (extrait de [18]).

Figure 7. — Relèvement des débits mensuels minima de la Loire à Montjean au moyen d'un réservoir de 140 millions de m³.
Lors d'une étude de la gestion d'un barrage à Chambonchard sur le Cher, il est apparu que pour obtenir le même soutien d'étiage à Montjean, le volume nécessaire pouvait être divisé par deux si on utilisait des prévisions, relativement sommaires d'ailleurs, plutôt que d'effectuer des lâches constantes, et le serait même par quatre si l'on pouvait prévoir parfaitement les débits.
(extrait de J. Miquel, [19]).

Figure 8. — Gestion automatique du système Neste.
Les rivières du plateau de Lannemezan sont réalimentées en étiage par le canal de la Neste à partir des ressources pyrénéennes partiellement régularisées. Le système est complété par une série de barrages réservoirs implantés sur ces rivières. Actuellement, un système de commande automatique de ces ouvrages, est en cours de mise en place. Il réduira de moitié les pertes d'eau par rapport à la gestion manuelle actuelle, qui est très lente. Cela représente une économie de l'ordre de 10 % des volumes lâchés, et entraînera une modification de l'échéancier de réalisation de nouveaux ouvrages (extrait de A. Villocel et G. Lalanne. Bertouticq, [20]).

Figure 9. — Prvision des crues de la Loire : le rseau CRISTAL.

Le barrage de Villerest sur la Loire doit remplir un double rle de soutien des tiages et d'crtement des crues. Grce au systme de prvision, il sera possible avant l'arrive de l'onde de crue de raliser un dstockage prventif qui permettra d'accrotre la capacit disponible en cas de crue exceptionnelle (extrait de J. Lefevre, [9]).

1. Quantifier les objectifs

Si l'optimalit d'un critre dtermin est peu recherche en France, c'est que les objectifs sont peu ou mal dfinis. Les objectifs multiples sont traits d'une faon rigide, car pour exploiter les complmentarits des diffrents objectifs il conviendrait que chacun des partenaires accepte de rechercher un peu plus d'information concernant ses besoins.

La conviction bien franaise qu'il n'est pas utile de chercher une formulation plus quantitative des objectifs n'est gure partage l'tranger, et notamment dans les pays o cette quantification est utilise comme un moyen

de mettre plat les enjeux rels de la gestion des ouvrages. Cela impose des efforts de clarification des objectifs, et peut contribuer rendre la gestion plus conflictuelle. Mais l'ignorance dans laquelle on se trouve trop souvent des impacts rels de la gestion conduit, elle, des malentendus et des blocages qui pourraient tre vits.

Cette clarification des objectifs peut tre dj ralise par un effort de classement de ceux-ci : leur caractre prioritaire, l'chelle de temps laquelle ils interviennent, s'ils sont permanents, intermittents ou occasionnels, sont autant de diffrences fondamentales, qui doivent conduire les traiter diffremment. Or les pratiques peu explicites conduisent parfois des priorits de fait d'objectifs dont la satisfaction serait juge par ailleurs non prioritaire.

2. Mieux connaître le milieu

Clarifier les objectifs n'est pas uniquement l'affaire de mythes décideurs qui s'interrogeraient sur de grands choix stratégiques. Il s'agit tout d'abord de recueillir les données utiles à la connaissance du milieu, en cherchant à relier les objectifs à des impacts quantifiables, et à les analyser de façon à enrichir la connaissance dans deux domaines :

- hors temps réel, quantifier les impacts des décisions à court et long terme, et, lorsque cela est possible, fournir des indications chiffrées susceptibles d'alimenter une procédure d'optimisation plus ou moins partielle.
- en temps réel, accroître les possibilités de prévisions hydrologiques, ou tout au moins déterminer leurs incertitudes.

3. Quantifier les impacts :

Certains objectifs ne se traduiront pas sous la forme numérique d'une fonction d'utilité additive : les impacts sur l'écosystème lac ou rivière ne se mesurent qu'à une échelle de temps importante, où les pas de temps de gestion ne sont guère significatifs (figure 10).

Il ne s'agit pas à toute force de rechercher une quantification pratique pour les algorithmes numériques. Dès lors que l'on dispose de modèles permettant de simuler le système concerné et que l'on peut fournir une échelle de valeur entre les scénarios obtenus pour les différentes décisions possibles, la question est réglée dans son principe, et les algorithmes ne manquent pas pour utiliser cette précieuse information. Les informations utiles à l'établissement d'une gestion sont multiples : informa-

Figure 11. — Gestion des prises d'eau du barrage de Villereest.

Dans le cas de la gestion de la retenue de Villereest en période d'étiage, une étude préliminaire des différents modes de gestion de ces prises d'eau a été conduite (cf. P. Crouzet et al., [24]), à partir des résultats obtenus sur une retenue analogue, celles de Grangent (cf. J. Gaillard, [25]). Si la modélisation des échanges thermiques dans un tel système est maintenant bien maîtrisée, la représentation du système écologique reste difficile à valider, les données disponibles étant encore peu nombreuses. Il a néanmoins été possible de réaliser un diagnostic a priori sur la retenue de Villereest, montrant que des effets significatifs étaient à attendre dans la retenue et à l'aval de celle-ci, si l'on adoptait une gestion adaptée de ces prises d'eau.

tion hydrologique (essentiellement prévision des débits, impact quantitatif et qualitatif des lachures) et information « économique » (mesure de la satisfaction des objectifs). La pauvreté de cette information, notamment des termes aléatoires, réduit parfois considérablement la marge de manœuvre, comme en témoignent les gestions à vidange constante, et celles, déjà plus riches, des gestions paramétrées a priori.

Cependant l'acquis des études hydrologiques et économiques réalisées pour le dimensionnement de l'ouvrage permet déjà dans bien des cas de disposer d'une information suffisante pour la mise au point de procédures plus complètes, et cette tendance ne peut que s'accroître, grâce notamment aux études d'impact obligatoires, et même pour certains réservoirs existants aux études de bilan (figure 11).

On sent bien que certaines de ces études renferment des éléments qui, en orientant le dépouillement, pourrait fournir la première silhouette d'une fonction d'utilité. Ainsi pour fixer un objectif de qualité par le biais d'un débit de référence, a-t-il fallu évaluer, peut être sommairement certes, le gain ou la détérioration qu'entraînerait un débit différent (figure 12).

Accroître les possibilités de prévision :

Améliorer la connaissance du milieu permet souvent aussi d'en améliorer la prédictibilité. Les quelques exemples que nous avons cités touchent les prévisions de court terme, susceptibles d'améliorer l'efficacité des manœuvres d'ouvrage (4, 9 et 20) et à moyen terme (8, 21, 25). Les nombreux systèmes de télétransmissions qui sont en cours d'implantation en France permettront un acheminement efficace des informations nécessaires pour les prévisions de court terme.

Un développement important en France des mécanismes de simulation par tirages de scénarios permet une intégration aisée de toute amélioration de prévision. La démarche généralement adoptée, qui préfère à la recherche d'une stratégie optimale la description la plus complète des systèmes traduit bien une certaine confiance dans les possibilités futures d'améliorer les méthodes de prévision à partir de nombreux indicateurs de l'état du système. Le fait que soient exploitées déjà des possibilités de prévision même très incertaines, à moyen terme, est un caractère original des travaux français, et ces prédéterminations sont susceptibles d'avoir des possibilités réellement nouvelles pour la gestion conjointe d'objectifs tels que la protection contre les crues et le soutien des étiages.

4. Décider en temps réel

La démarche réglementaire, tout comme la mauvaise connaissance des impacts réels des décisions, sont des facteurs importants pour rigidifier les systèmes de gestion dans des choix déterminés une fois pour toutes, ou qui ne sont remis en cause qu'à travers des procédures lourdes. Les gestions paramétrées ont introduit la possibilité de lier la décision à prendre à des mesures de l'état du système. Dans la pratique cependant, il est apparu illusoire de confier la gestion à un simple automate, et le choix relève d'une concertation des usagers. Somme toute, c'est le fonctionnement de cette concertation qui devrait être réglementé, et non pas son résultat.

Pour qu'un tel système fonctionne, il lui faut un expert réalisant le bilan de la situation et des implications des choix possibles capable de tirer parti des enseignements des gestions effectuées pour contrôler la validité des modèles utilisés, proposer de nouvelles stratégies, etc.

Dans l'immédiat il faut souligner les nombreux efforts qui prennent déjà en compte les aléas hydrologiques en temps réel, ce qui, soit par le biais de simulation (figure 13), soit par l'utilisation de la programmation dynamique soit par une méthode mixte, redéfinissent à chaque pas de temps les conditions de choix de la décision.

Ces approches peuvent fort bien s'adapter aux contraintes pratiques à condition de les introduire dans un

Figure 12. — Définition de l'objectif de soutien des étiages du Lot.

Le Lot, canalisé dès le XVII^e siècle, a vu sa vocation évoluer et se diversifier au cours du temps. Aujourd'hui, les chaussées et les plans d'eau associés favorisent l'irrigation, la fréquentation touristique, l'installation de centrales hydroélectriques, mais génèrent des conditions peu favorables à la qualité des eaux.

L'objectif de débit minimum du Lot, soit 12 m³/s à Entraygues, résulte d'études qui ont pris en compte :

- les consommations d'irrigation sur le Lot Aval;
- les objectifs de qualité des eaux de la rivière;
- la limitation des variations de débits générées par les usines hydroélectriques;
- l'impact des faibles vitesses d'écoulement sur le développement des algues dans les biefs.

Faites par référence à l'état actuel, de telles études peuvent fournir quelques indications sur la satisfaction partielle de cet objectif. Cela devrait permettre de juger non seulement des conséquences de la fréquence de défaillance choisie, mais des écarts tolérables en cas de défaillance (extrait de M. Sormail, [13]).

Figure 13 — Amélioration de la gestion du barrage réservoir Seine en période soutien d'étiage (extrait de G. Bédiet et al., [22]).

Principe de l'algorithme de décision fondé sur la simulation de N scénarios d'étiage à chaque décade.

Apport possible pendant la décade 4 :	22.	26.	31.	37.	43.	51.	61.	72.	85.	100.
Coût pour la lachure 0 :	358	329	301	274	248	223	198	180	163	148
Coût pour la lachure 5 :	346	322	298	274	250	226	204	187	178	155
Coût pour la lachure 10 :	342	321	299	277	254	230	212	194	177	161
Coût pour la lachure 15 :	342	323	302	287	258	238	220	202	184	168
Coût pour la lachure 20 :	345	327	307	288	265	247	228	210	192	175
Coût pour la lachure 25 :	351	333	314	293	275	257	237	216	200	183
Coût pour la lachure 30 :	358	341	322	304	286	267	247	227	208	196
Probabilité que l'apport soit inférieur	0.00	0.10	0.36	0.59	0.75	0.85	0.92	0.95	0.97	0.99

Lachure :	0.	5.	10.	15.	20.	25.	30.
Espérance du coût :	277.	276.	278.	282.	287.	295.	304.

Figure 14. — Exemple de « Tableau de bord ».

Ce tableau permet de connaître la probabilité des coûts associés à une lachure donnée, et de juger à la fois l'impact de l'incertitude concernant le débit, et les conséquences entre deux lachures possibles concurrentes. (extrait de J. Miquel et P.A. Roche, [26]).

Figure 15. — Effets des incertitudes sur les performances d'une gestion (d'après Datta et al. [15]).

REGLES DE GESTION OPTIMALES FONDÉES SUR :

- Un modèle de débits précis
- - - un modèle de débits imprécis
- - - prévisions égales aux apports moyens

Figure 16. — Effet de l'échantillonnage sur les résultats de gestion.

(d'après Klemes [27]). On remarquera qu'un modèle de débit imprécis donne des résultats significativement meilleurs qu'une gestion sans prévisions (basée sur les apports moyens observés dans le passé). Dans ce cas particulier le modèle précis n'apporte pas une diminution significative des coûts par rapport au modèle imprécis.

cadre décisionnel suffisamment souple. On peut résumer cette démarche par une procédure qui se décompose en trois étapes dont l'importance relative variera avec le type d'objectifs (satisfaction instantanée ou bilan global sur une période), et avec les degrés de liberté des décisions possibles :

— une *étape d'actualisation* réalise en fonction de l'ensemble des données disponibles une évaluation de l'état du système : ce sont les conditions de calcul qui seront imposées à l'étape d'aide à la décision. Toutes ces données ne peuvent être intégrées dans une procédure d'optimisation, qui porte nécessairement sur un schéma hydrologique simplifié;

— une *étape d'aide à la décision* estime les impacts quantifiables des différentes décisions possibles. Cette procédure consiste généralement à estimer l'utilité d'une famille de lâchures possibles du barrage : les tableaux de ces calculs constitue « les tableaux de bord » de la gestion c'est-à-dire l'évaluation des conséquences quantifiables probables des différentes décisions envisageables;

— une *étape de décision* traite les données contenues dans ce tableau de bord, ainsi que toutes les informations non quantifiables qui peuvent intervenir dans le choix, et choisit la lâchure à effectuer.

L'important pour la décision, qui prendra en compte différents critères, est que l'on dispose non pas seulement des résultats pour un choix particulier, mais d'informations permettant, pour chaque décision possible, de juger de son impact sur chacun des critères de jugement.

C'est précisément l'objet de ces « tableaux de bord » : regrouper, sous une forme facilement exploitable, les alternatives possibles, et les conséquences « probables » qui peuvent être attendues (figure 14).

5. Prendre en compte les incertitudes

En temps réel d'abord : il suffit d'effectuer quelques programmations dynamiques en avenir incertain pour sentir à quel point incertitudes et décisions sont liées. Dans bien des cas pratiques les incertitudes sont trop grandes, de sorte que les décisions de qualité équivalente se situent dans une plage trop large, et que l'utilisation d'une procédure optimisée est inutile. Bien évidemment la connaissance améliorée du milieu, en réduisant certaines incertitudes, rendra indispensable l'utilisation de procédures plus optimisées. Ce traitement indispensable de l'incertitude est justement l'objet des travaux les plus récents ([15]), dont la figure 15, nous fournit un exemple.

Hors temps réel ensuite : bien entendu il est souhaitable d'intégrer autant que possible ces incertitudes dans la procédure de décision comme il a été indiqué précédemment. Mais leur existence provoquera, même avec la meilleure des procédures de gestion, une perte de performance par rapport à la gestion parfaite en avenir connu, ou, ce qui revient au même, un surdimensionnement du réservoir à satisfaction égale des objectifs.

Lors de l'élaboration d'une gestion, un contrôle sur un échantillon test semble une évidence. Pourtant il paraît important de rappeler les points suivants :

— les procédures basées sur une optimisation en temps réel (type Programmation Dynamique) ne sont pas dispen-

sées de ce contrôle car celui-ci valide l'étape de décision mentionnée précédemment;

— les procédures basées sur une gestion paramétrée a priori devraient être testées sur un échantillon *différent* de celui de leur calage, pour s'assurer de leur robustesse (vis-à-vis des aléas notamment).

Les techniques de simulation permettent en général de réaliser ce contrôle, en intégrant une description de plus en plus fine du milieu. On décrira ainsi de mieux en mieux l'impact des décisions.

L'analyse de l'effet des différents types d'incertitudes a été entreprise par Klemes [27] : si l'effet de l'échantillonnage est mis en évidence aussi bien en figure 16 (résultats de gestions) qu'en figure 17 (dimensionnement), la prise en compte des aléas dans la procédure de décision paraît moins capitale pour les résultats de gestion en moyenne. Un résultat analogue a été cité par Bernier [28] concernant les effets des « mémoires longues », ou non-stationarité de longues périodes, qui n'auraient pas d'impact trop important sur les coûts moyens, ou sur le volume d'un réservoir satisfaisant un objectif donné. Il n'est pas impossible cependant que ce résultat dépende de la fonction d'utilité particulière à chaque cas : la figure 12 incite à la prudence, et dans tous les cas le contrôle par simulation sur des périodes observées aussi longues que possible paraît souhaitable.

Figure 17. — Effet de l'échantillonnage sur le dimensionnement.

Variabilité de la valeur de capacité de stockage S estimée pour un risque R de 3 % de défaillance du soutien d'un débit $D = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette capacité dépend de la moyenne et de la dispersion des débits naturels (μ et σ). Les 4 rectangles représentent, pour 4 échantillons de 25 années tirés d'un échantillon historique de 100 ans, les domaines de confiance à 95 % des valeurs μ et σ estimées à partir de ces échantillons (d'après V. Klemes, [27]).

6. Tirer les conséquences des performances réelles des systèmes de gestion sur le choix des aménagements

Gestion des ouvrages et programmation des aménagements sont intimement liés. Les performances à attendre des projets sont cependant plus incertaines encore que les objectifs à fixer à la gestion, et ceci d'autant plus que l'on assouplira les règles d'usage de ces ouvrages. Qui en effet pourra prévoir l'évolution de besoins qu'on a déjà tant de difficultés à quantifier dans le présent ?

Le cas qui apparaît le plus simple à quantifier pour la gestion, est celui de la production hydroélectrique au

moindre coût moyen. V. Klemeš [27] a montré que l'incertitude économique, paramétrée par un taux d'actualisation appliqué à la fonction d'objectif d'une gestion avait un effet tout à fait analogue sur le dimensionnement des ouvrages à celui des erreurs d'estimations liées à l'échantillonnage historique disponible. Informations hydrologiques et économiques prennent ici pour l'aménageur une valeur opérationnelle, puisque leur qualité conditionne le dimensionnement de l'ouvrage.

Finalement la meilleure façon de départager deux gestions, n'est-elle pas, dans certains cas, de comparer le volume de la ressource qu'elles nécessitent pour satisfaire le même objectif ?

Conclusion

Pour arriver à un partage plus économe de la ressource, il sera nécessaire de disposer d'une mesure plus précise des conséquences des futures gestions. Le bilan des exploitations existantes est un préalable à une véritable amélioration de la connaissance du milieu.

Dans certains cas le problème de l'optimisation en cours de gestion risque de se poser : il ne s'agira pas de ligoter les gestionnaires avec des procédures automatisées encore plus rigides que les règlements d'eau, mais tout au contraire de leur fournir des aides à la décision sous forme d'optimisations partielles d'objectifs. Ces éléments, qui ne pourront jamais se substituer à la décision, permettront néanmoins d'en quantifier certaines implications.

Plusieurs éléments montrent que de telles évolutions sont d'ores et déjà engagées : le progrès des moyens de communication qui multiplie le volume de l'information disponible pour la prise de décision, l'automatisation qui allège et améliore le fonctionnement des ouvrages ou des systèmes, l'informatique qui accroît considérablement les possibilités de calcul, notamment en temps réel. Un autre élément est le développement de logiciels pouvant faciliter la gestion, et notamment les algorithmes d'optimisation, dont on a vu qu'ils sont capables de fournir des aides efficaces et sûres lorsque leurs conditions d'emplois sont bien définies (exemple de la gestion hydroélectrique).

Reste le plus important : le choix des objectifs, la définition de critères de satisfaction, l'évaluation des conséquences économiques et physiques des décisions. Quelques éléments existent déjà, ou pourraient être dégagés d'études réalisées pour des aménagements existants ou prochains. Il semble cependant que beaucoup soit encore à attendre dans ce domaine qui conditionne pourtant toute la démarche des aménageurs s'ils se soucient de l'impact réel des activités humaines sur le milieu.

Références bibliographiques

- [1] VARLET H. — *Barrages-réservoirs*, tome 1, Eyrolles, 1966.
- [2] MASSÉ P. — *Les réserves et la régulation de l'avenir. La vie économique*, Herman et Cie — Paris 1946.
- [3] COLLETER M. — Gestion optimale d'un système hydroélectrique, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [4] DUBAND D. — Utilisation des prévisions hydrométéorologiques pour la gestion des aménagements hydroélectriques, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [5] HUBERT P., COMBES P. — Applications de la programmation dynamique à la gestion conjointe de la Lys et de la nappe du calcaire carbonifère, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [6] ROCHE P.A. — *Étude des possibilités de recourir aux eaux souterraines en zone de socle pour les réseaux d'alimentation en eau potable*, BRGM, rapport 84 SGN 010 EAU.
- [7] DUBEL. — Gestion du réservoir Seine, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [8] BOCQUILLON C., MASSON J.M. — Recherche d'une politique de gestion des stocks d'eau en vue de soutenir les étiages, *Journal of Hydrology*, 60 (1983).
- [9] LEFEVRE J. — La gestion des barrages de la Loire, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [10] CEMAGREF. — Un exemple de courbes de remplissage de barrages-réservoirs, *Cahier 34*, juin 1978, n° 3, *Cahier 42*, juin 1981, n° 2.
- [11] MICHEL C., THOMAS A.M. — Gestion des petites retenues pour l'irrigation et l'atténuation des crues, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [12] LEFEVRE J. — Communication verbale sur la gestion des barrages de la Loire, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [13] SORMAIL M. — Conception et gestion de réservoirs à buts multiples : interférence entre le soutien d'étiage et l'hydroélectricité. Cas du Lot, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [14] SIMONOVIC S.P., ORLOB G.T. — Risk reliability programming for optimal water quality control, *Water Res. Res.*, vol. 20, (6), pp. 639-646, juin 1984.
- [15] DATTA B., BURGESS S.J. — « Short-term, single, multipurpose reservoir operation : importance of loss functions and forecasts errors, *Water Res. Res.*, vol. 20, (9), pp. 1167-1176, Sept. 1984.
- [16] FINDEISEN W., BAILEY F.N., BRDYS M., MALINOWSKI K., TATJEWSKI P., WOZNIAK A. — *Control and coordination in hierarchical systems*, John Wiley, New York, 1980.
- [17] ADIGUZEL R.I., COSKUNOGLU O. — A descriptive decision process model for hierarchical management of interconnected reservoir systems, *Wat. Res. Res.*, vol. 20, (7), pp. 803-811, juillet 1984.
- [18] Mission Déléguée de Bassin Seine Normandie, Réunion du 7 avril 1982 : *Les crues de l'hiver 1981-82*.
- [19] MIQUEL J. — *Gestion d'un barrage de soutien d'étiage. Application à Chambonchard sur le Cher*, Rapport EDF E43/80-04.
- [20] VILLOCEL A., LALANNE-BERDOUCQ G. — Gestion des eaux du système Neste sur l'ensemble des rivières de Gascogne, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [21] CHAMPAGNAT D. — *Une gestion qualitative, en période d'étiage, des barrages du bassin de la Seine est-elle possible*, Agence de Bassin Seine-Normandie, 1983.
- [22], [23] BEDIOT G., ROCHE P.A., MASSON J.M., CRES F.N., RIZZOLI J.L. — *Amélioration de la gestion du barrage Seine*, parties I et II, documents Agence financière de bassin Seine-Normandie.
- [24] CROUZET P., QUETIN B., ROULT D., RATHOUIS P. — Gestion qualitative de la retenue de Villerest, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [25] GAILLARD J. — Multilevel withdrawal and water quality, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 110, n° 1, feb. 198.
- [26] MIQUEL J., ROCHE P.A. — *Gestion des réservoirs de soutien d'étiage : étude de quelques méthodes d'optimisation* Rapport EDF HE/43/84.02, janvier 1984.
- [27] KLEMEŠ V. — Effects of uncertainty on reservoir operation and design, *SHF*, 4-5 juin 1984.
- [28] BERNIER J. — Fluctuations climatiques et dimensionnement des ouvrages, *SHF*, 4-5 juin 1984.