

Exemples d'application de la gestion optimale des réservoirs à buts multiples

Yves Mechin et Dominique Normand

SOGREAH, Grenoble

La méthode de programmation dynamique du processus "Décision - Hasard", évoquée dans l'exposé de M. Bernier, constitue un outil séduisant pour aborder la recherche des consignes d'exploitation d'une retenue à but multiple. En effet, si la "simulation" reste un outil indispensable pour analyser les détails d'exploitation à l'échelle hebdomadaire, journalière ou même horaire, cette procédure mérite d'être précédée d'une phase de dégrossissage des consignes à l'échelle mensuelle dans laquelle on puisse confronter les priorités attachées à divers usages de la retenue.

Le résultat du calcul se présente sous forme de tableaux donnant le nombre F d'unités de volume que l'on décide de lâcher au cours d'un mois M , en fonction du niveau de remplissage K au début du mois et de l'apport H du mois antérieur qui peut conditionner la répartition des probabilités d'apports au cours du mois M :

$$F = \text{fonction}(M, K, H)$$

Dans un modèle de ce type, tous les avantages ou les préjudices liés à la fourniture F et au niveau de stockage K doivent être exprimés en termes monétaires. Et le processus de calcul consiste à rendre maximal l'avantage économique global résultant de la Décision de fourniture immédiate F , et du Hasard lié aux apports futurs qui pèse sur les possibilités ultérieures de fourniture d'eau. La mise en œuvre de la méthode nécessite donc une analyse préalable des fonctions économiques attachées à chacun des usages de la retenue à but multiple.

Fonctions économiques

Energie

Les notions de base nécessaires sont :

- la puissance installée,
- la puissance garantie pour chaque mois PG ,
- la place de la puissance garantie dans la courbe de charge du réseau interconnecté pour le mois considéré (fig. 1).

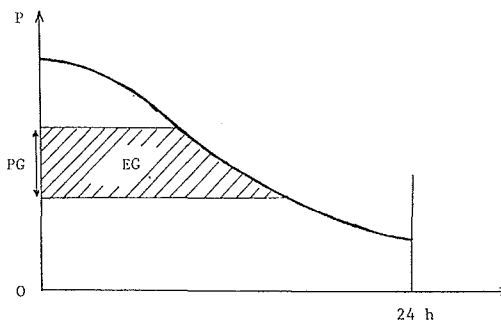


Figure 1.

Ces grandeurs conduisent au calcul d'une énergie garantie mensuelle, $EG(M)$ à laquelle est attaché un avantage économique AE .

La fourniture F sous la charge K permet de produire une quantité d'énergie E (fig. 2)

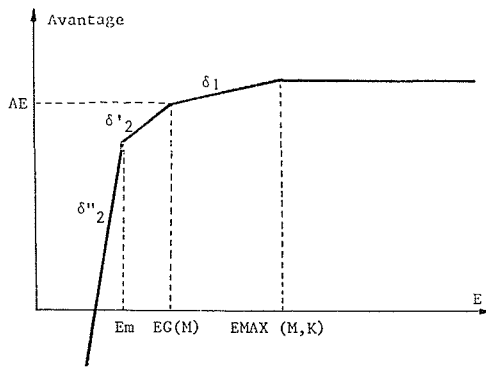


Figure 2

Si :

$$EG \leq E \leq E_{max}$$

où :

$E_{max}(K)$ est l'énergie maximale productible compte tenu de la puissance installée et de la charge K ,

l'avantage est :

$$a = AE + \delta_1 (E - EG)$$

et δ_1 F/kWh représente l'économie que l'on peut réaliser sur le fonctionnement des centrales thermiques associées.

Si :

$$E < EG$$

l'avantage est :

$$a = AE - \delta_2 (EG - E)$$

δ_2 représente la pénalité affectée à un déficit de production garantie.

Lorsque l'étude intervient dans le cadre d'un plan directeur, on peut prendre pour valeur de δ_2 le coût d'investissement et des frais de fonctionnement de l'équipement thermique de référence. Mais si l'on se situe dans la perspective d'une exploitation en temps réel, il faut faire intervenir le coût des conséquences de la défaillance ($EG - E$). Pour une première tranche de défaillance de EG à Em , on peut faire appel à des centrales thermiques obsolètes dont le coût de fonctionnement est $\delta_2 F/KWh$; au-dessous de Em , il faudrait faire intervenir les coûts résultant des ruptures de charge dans le réseau.

Pour éviter ces calculs délicats, des coûts de défaillance, on préfère souvent prendre en compte une "probabilité de défaillance". Il faut alors ajuster la valeur de δ_2 qui permette de respecter cette contrainte. En France, la "puissance garantie" est calculée sur la base de l'étiage exceptionnel de 1949 dont la probabilité d'occurrence est d'environ 1/100.

Irrigation - Adduction d'eau

Lorsque la surface du périmètre irrigué et le plan de culture sont fixés, on connaît les besoins mensuels $B(M)$ en eau d'irrigation. Ces besoins peuvent être aléatoires s'il s'agit d'une irrigation de complément mais leur loi de distribution est connue.

- A la fourniture $F = B(M)$ est attaché un avantage économique $AI(M)$ que l'on peut prendre égal à :

$$AI(M) = \frac{B(M)}{\Sigma B(M)} \times \text{Avantage net annuel de l'irrigation}$$

$$\Sigma = \Sigma \text{ année}$$

- Lorsque $F > B(M)$, on peut considérer que la valeur marginale d_1 de l'eau fournie est nulle car les caractéristiques du périmètre étant fixées, la distribution de 1 m^3 d'eau en supplément de $B(M)$ n'entraîne aucun avantage supplémentaire.
- Lorsque $F < B(M)$, il apparaît une baisse de production agricole que l'on devrait pouvoir introduire dans la fonction économique.

Le problème est simple si le pas de temps choisi correspond à un cycle végétatif. Mais il est beaucoup plus complexe si l'on raisonne à l'échelle du mois, car l'effet du déficit $B(M) - F$ sur le rendement des cultures dépend aussi du degré de satisfaction des besoins au cours des mois antérieurs et postérieurs au mois considéré.

Dans la pratique, on peut considérer qu'un déficit de 10 % est peu préjudiciable au rendement des cultures et affecter à un tel déficit une valeur marginale de la pénalité, d_2 , équivalente à la valeur marginale moyenne du gain résultant de la production d'énergie au-dessus de l'énergie garantie. On peut, en outre, se fixer une probabilité de défaillance pour les déficits mensuels supérieurs à 10 % des besoins et ajuster la pénalité d_3 de façon à respecter cette contrainte (fig. 3).

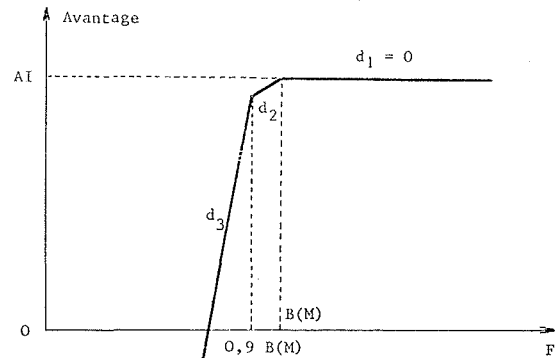


Figure 3

Protection contre les crues

Le degré de protection contre les inondations dépend du creux disponible dans la retenue au moment où survient une crue. Lorsque l'on a pu évaluer directement la fonction :

$$\text{Valeur des dommages} = f(Q \text{ maximum à l'aval du barrage})$$

il est possible d'introduire une espérance mathématique des dommages liés au niveau de stock K atteint au début du mois M .

On préfère parfois aborder ce problème d'une manière indirecte, en examinant dans un premier temps l'effet écréteur de la retenue résultant d'une politique d'exploitation basée uniquement sur les utilisations de l'eau et dont l'avantage économique actualisé serait E_0 . Compte tenu de la répartition statistique des volumes de stock $K(M)$ au début de chaque mois M et des

risques mensuels de crues, on peut calculer une fréquence d'inondation ($1/T_0$).

Dans un second calcul, on limite le volume de la retenue à un volume V inférieur au volume utile maximal V_{\max} . Cette contrainte conduit à de nouvelles règles de gestion, à une valeur de production actualisée $E(V) < E_0$, plus faible que précédemment, mais à une fréquence d'inondation plus faible également $1/T(V) < 1/T_0$.

On peut de cette façon évaluer par la différence $E_0 - E(V)$ le coût d'une "assurance" $T(V)$ supérieure à T_0 . La collectivité pourra alors décider si elle accepte de payer ce prix pour assurer un plus fort degré de protection. Elle pourra aussi comparer le coût de ce moyen de protection à ceux qui font appel à d'autres procédés tels que : endiguement, approfondissement, rescindement, dérivation, etc.

Choix d'une politique d'exploitation par essais successifs

L'outil complet de recherche des consignes d'exploitations et des performances d'une retenue à but multiple comporte deux étapes de calcul enchaînées :

- Optimisation des consignes d'exploitation pour des objectifs et des valeurs économiques données.
- Simulation stochastique (ou chronologique) de l'exploitation fournissant un bilan économique et des probabilités de satisfaction des objectifs fixes.

Pour résoudre un problème donné, il est possible d'établir un plan d'essais qui permette d'enchaîner une série de calculs.

Exemple du barrage de Jatiluhur en Indonésie

Pour le problème que nous avons eu à résoudre à Jatiluhur, la surface irriguée et le plan de culture étaient fixés, l'équipement de la centrale et la localisation de sa production sur la courbe de charge du réseau interconnecté étaient aussi définis. Le problème consistait alors à déterminer la puissance garantie neuf années sur dix, PG , et les règles d'exploitation de sorte que le déficit des irrigations d'un mois n'excède 10 % des besoins qu'une année sur dix.

Comme il s'agissait aussi de préciser quel devait être l'équipement thermique complémentaire, on a pris en compte une pénalité de non satisfaction de l'énergie garantie, δ_2 , égale au coût du thermique de référence.

Le problème étant posé en termes de probabilités de défaillance, il a fallu ajuster par approximations successives la pénalité d_3 à affecter à un déficit d'irrigation supérieur à 10 % des besoins.

Partant d'une valeur initiale arbitraire $d_3^{(0)}$, nous pouvons faire trois calculs correspondant à trois valeurs de la puissance garantie, nous permettant de construire les courbes (fig. 4).

$$P_E^{(0)} = \text{Prob}(P \geq PG, d_3^{(0)})$$

$$P_I^{(0)} = \text{Prob}(\text{Déficit Irrigation} \leq 10\% \text{ des besoins}, d_3^{(0)}).$$

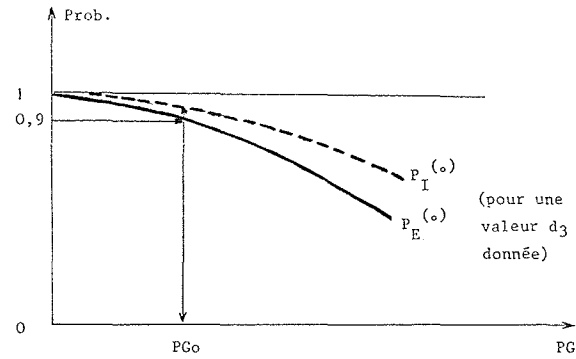


Figure 4

A la valeur $P_E^{(0)} = 0,9$ sont associés :

- une valeur de la puissance de garantie PG_0
- et une probabilité d'avoir un déficit d'irrigation supérieur à 10 % $P_I^{(0)}$
- Si $P_I^{(0)} > 0,9$, on a été trop sévère dans le choix de $d_3^{(0)}$ et il faut effectuer une nouvelle série de calculs avec $d_3^{(1)} < d_3^{(0)}$
- Si $P_I^{(0)} < 0,9$, on a été trop indulgent dans le choix de $d_3^{(0)}$ et la nouvelle série de calcul utilisera une valeur $d_3^{(1)} > d_3^{(0)}$. On peut ainsi, par essais successifs enchaînés déterminer la valeur convenable $d_3 = d_c$, qui conduit à $PI = 0,9$ et pour laquelle on obtient la valeur de puissance garantie PG cherchée.

Pour ce barrage de Jatiluhur, les résultats étaient les suivants :

$$\delta_2 = 30 \text{ Rp/KWh}$$

• Situation 1973

- Surface irriguée : 200 000 ha
- Puissance installée : 92 MW
- Valeurs économiques pour la production d'énergie :
 $\delta_1 = 2 \text{ Rp/KWh}$ (Rp = Roupie indonésienne = 1,2 centime en 1972)
 $\delta_2 = 30 \text{ Rp/KWh}$
- Valeurs économiques pour l'irrigation :
 $d_1 = 0$
 $d_2 = 0,3 \text{ Rp/m}^3$
 $d_3 \text{ ajusté} = 8 \text{ Rp/m}^3$
- Puissance garantie 9 années/10 : 80 MW (en pointe).

• Situation 1980

- Surface irriguée : 244 000 ha
- Puissance garantie : 76 MW (en énergie de pointe)
45 MW (en énergie de base)

Ces éléments ont permis d'étudier par la suite un plan directeur des équipements énergétiques complémentaires.

Exemple du barrage de Selingue au Mali

Les objectifs assignés au barrage de Selingué sur le Sankarani, affluent du Niger, sont :

- une production d'énergie électrique,
- la satisfaction des besoins d'irrigation,
- l'amélioration de la navigation sur le Niger.

Le but de l'étude consistait à optimiser la programmation de l'équipement hydro-électrique nécessaire à la satisfaction des besoins jusqu'en 1990, tout en respectant les contraintes de fourniture d'eau pour l'irrigation et la navigation.

Les données consistaient en :

- les valeurs de consommation annuelles d'électricité prévisibles jusqu'en 1990,
- la modulation mensuelle de ces consommations,
- les courbes de charges journalières types pour chaque mois,
- la puissance thermique disponible,
- les contraintes liées à des impératifs de niveaux d'eau pour la navigation et de débits nécessaires aux irrigations,
- le volume utile de la retenue et ses caractéristiques topographiques,
- les débits naturels sur une période de 64 années.

Les grandeurs économiques prises en compte dans la recherche des règles d'exploitation et des performances de cette exploitation sont les suivantes :

- toute fourniture d'énergie par des groupes thermiques pour compléter l'énergie garantie par Sélingué se trouve pénalisée par son coût :
 - coût marginal du KWh (fonctionnement + combustible) si l'on n'a pas besoin de faire appel à d'autres sources d'énergie que celles qui ont été programmées;
 - coût de remplacement du KWh (investissement + fonctionnement + combustible) si on se trouve en situation d'impossibilité à un moment donné de fournir la puissance avec les moyens programmés pour l'année étudiée;
- toute énergie hydraulique produite à Sélingué en sus de l'énergie à garantir pour assurer la puissance au mois M de l'année N , se traduit par un gain égal au coût marginal thermique.
- la défaillance de Sélingué pour assurer les besoins de l'irrigation et de la navigation entraîne une pénalité forte qui incite le modèle à toujours satisfaire ces contraintes qui, n'étant pas très lourdes sont considérées comme impératives.

La mise en œuvre du programme combinant la recherche des règles d'exploitation et la simulation stochastique de cette exploitation a permis de préciser, par approximations successives, l'échéance des mises en service opérationnelles des quatre groupes de 11,7 MW à Sélingué.

Hypothèse 1	Hypothèse 2
Evolution normale de la demande	Evolution accélérée par l'implantation d'industries nouvelles grosses consommatrices en énergie
2 groupes en janvier 1980 3 ^e groupe en janvier 1985 4 ^e groupe en juin 1987	2 groupes en janvier 1980 3 ^e groupe en janvier 1984 4 ^e groupe en janvier 1986

Ces échéances et la prise en compte d'une solution de référence basée essentiellement sur l'équipement thermique de substitution, ont permis de calculer la rentabilité économique du projet dans les deux hypothèses de croissance des besoins.

Conclusion

Le modèle qui combine la recherche des règles optimales d'exploitation suivant le processus "Décision – Hasard", et la simulation des consignes obtenues ne constitue qu'un outil à l'intérieur d'une étude de planification. Cet outil est essentiellement destiné à préciser les performances d'un ouvrage à but multiple pour des caractéristiques et des objectifs donnés. Dans la mesure où la réponse du calcul est très rapide et où les résultats sont présentés sous une forme très complète (répartition statistique des niveaux de remplissage au cours de l'année, probabilité de défaillances relatives à chaque objectif, espérance mathématique de l'avantage global...), un tel outil joue un rôle de synthèse très précieux dans les études pluridisciplinaires.

Discussion

Président : M. R. CLEMENT

M. le Président remercie M. BERNIER et M. MECHIN de leurs exposés, tout à fait complémentaires, et ouvre la discussion.

M. G. LEVY pose la question ci-après :

L'application des formules ne devient-elle pas trop compliquée lorsque la valeur de certains paramètres – coût d'une défaillance, prix du fuel, etc – varie au cours de la période étudiée ?

Les calculs sont effectués, répond M. MECHIN, pour une situation donnée de l'économie ; ensuite, on étudie la sensibilité, à la variation du coût du fuel par exemple, de la consigne d'exploitation de la retenue ou de l'usine hydroélectrique. Si l'on s'impose par exemple de n'avoir jamais de défaillance sur

la distribution d'eau urbaine, le modèle mathématique "décision-hasard" indique quelle est la valeur qu'on attache au prix de l'eau distribuée à des abonnés industriels ou domestiques. Si on accepte une défaillance de 10 %, le modèle donne une autre valeur pour l'eau urbaine, ce genre de test éclaire le Maître d'Œuvre sur certains choix qui lui incombent.

Sur le plan théorique, est-ce que cela ne complique pas beaucoup les fonctions de probabilité, demande M. G. LEVY ?

Non, répond M. BERNIER, car on peut toujours formaliser ce genre de problème. La difficulté se trouve dans l'estimation des divers paramètres et de l'erreur sur le résultat.

L'évaluation des paramètres est généralement affectée d'une grande incertitude. Les erreurs cumulées du calcul font que le résultat obtenu peut être très influencé et l'on n'obtient alors aucun résultat valable. Peut-être, vaut-il mieux envisager des hypothèses plus simples, mais plus solides quant à la prévision de l'avenir.

M. PICARD intervient, ensuite, en ces termes :

Les applications présentées de l'analyse des critères de gestion des barrages à buts multiples illustrent bien les possibilités d'évaluation indirecte de la valeur attribuée à l'eau en fixant les objectifs à respecter pour satisfaire les différents besoins, en se référant à la valeur d'un usage de référence, qui est habituellement la production d'énergie.

Les applications exposées se réfèrent à des exemples étrangers. En dehors des études opérationnelles, faites dans le domaine de la production d'électricité, existe-il des applications françaises de ces méthodes d'analyse ?

L'Electricité de France a poursuivi de tels calculs pour la gestion de ses réservoirs, répond M. MECHIN. La S.O.G.R.E.A.H. n'a pas eu à appliquer ce genre d'études pour des retenues à buts multiples en France ; par contre, elle l'a fait plusieurs fois à l'étranger et récemment en Corée.

En ce qui concerne Electricité de France, précise M. BERNIER, le problème était facilité par le fait que l'on disposait – du point de vue énergétique – d'une valeur de l'eau diversifiée selon les lieux, la période, la saison, etc... On était là dans des conditions où le calcul a un sens économique. Malheureusement, pour les autres utilisations, il n'en est pas toujours ainsi.

Est-ce que l'appréciation de ceux qui auront à décider sera la même suivant que l'on se trouvera en période de pénurie ou en période d'abondance ? interroge M. le Président. Après la sécheresse de 1976, est-ce que les Français auraient eu, au printemps dernier, la même appréciation qu'ils peuvent avoir maintenant sur la valeur de l'eau. Quand l'eau est rare on est prêt à payer n'importe quel prix pour que les besoins soient satisfaits ; mais, à partir du moment où ils le sont, l'attitude psychologique change. Fixer des seuils de probabilité de défaillance de 1/10 paraît, a priori, raisonnable. Mais, en période de pénurie, ce seuil serait sans doute mal accepté.

Cette optimisation par le processus "décision-hasard", répond M. MECHIN, utilise la programmation dynamique dont M. MASSE a été le premier à parler et qui a été développée par BELMANN aux Etats-Unis : elle correspond à une optimisation

de l'espérance mathématique d'un gain. Mais, quand vous tombez justement sur cette année sur 10 pour laquelle on a bien prévu qu'il y aurait des déficits (et pour laquelle on a chiffré les pénalités dues à ces déficits), la réaction de l'opinion n'est pas toujours raisonnée, même si on lui rappelle que cette éventualité était prévue. Si l'on dit au décideur : je vous préviens que vous allez tomber dans un trou une fois sur 10 ou une fois sur 20, ce trou correspondra à telle perte de production, à tel inconvénient (par exemple : vous serez obligé d'arrêter tel type d'industrie), les choix sont déjà relativement clairs. Mais si on peut en outre préciser qu'il faudrait accepter tel supplément d'investissements pour ne tomber dans ce trou qu'une année sur 20 au lieu d'une année sur 10, alors on sait où l'on va. Pour être concret, on devrait ajouter que ce supplément d'investissements correspond à tant de lits d'hôpitaux, à tant de kilomètres d'autoroutes, etc... auxquels il faudra renoncer dans les années à venir ; c'est alors à la collectivité de faire son choix par l'intermédiaire de ses représentants compétents.

A propos des conséquences sur le prix attaché par les utilisateurs à certaines fournitures auxquelles ils sont habitués lorsque se produit une pénurie, y-a-t-il eu des études sociologiques ? demande M. le Président CAZENAVE.

Pas à ma connaissance, répond M. MECHIN, qui poursuit : Dans une démocratie très ouverte, composée de citoyens très avertis – hypothèse bien sûr tout à fait utopique – nous autres techniciens, n'aurions qu'à livrer les résultats des modèles comparant les diverses solutions possibles. Encore faut-il que ces résultats soient mesurés avec la même unité et jusqu'à présent, l'unité la plus pratique est l'unité monétaire. Or, comment évaluer par exemple le prix d'une vie humaine en matière de calcul du débit optimum d'un évacuateur de crue de barrage ou de la sûreté d'une centrale nucléaire ?

S'agissant de la sécurité en matière de barrage, observe M. le Président, les évacuateurs de crue sont calculés pour des débits d'une probabilité si faible qu'on peut les considérer comme ne devant jamais être atteints. Pour des seuils de probabilité de l'ordre de 1/10, comme ceux qui interviennent dans les exposés de cet après-midi, on n'évolue plus dans le même domaine.

Un bref débat sur l'estimation de la valeur à attribuer à la vie humaine dans ce genre de calcul s'engage entre MM. MECHIN, BERNIER et PICARD, tandis que M. RODIER rappelle qu'en zone aride, le calcul statistique de la crue millénaire n'a aucun sens en raison de la trop "faible taille de l'échantillon" des crues observées ; on est alors ramené à estimer un peu au jugé la "crue improbable" ou la "crue impossible".

Abstract

Use of models in determining optimum management of multi-purpose storage reservoirs

The "Decision-Risk" dynamic programming method is a mathematical tool designed to complement the simulation method in order to compare the relative priorities involved in the various uses made of a reservoir.

The use of "money" as a common unit for measuring all the advantages and disadvantages related to reservoir exploitation requires that economic functions be established in relation to each of the various uses made of the reservoir (fig. 1 and 2). These functions make allowance not only for the advantages gained by programmed exploitation but also for the cost of failing to meet requirements. Since it is difficult to estimate these costs directly, it is often preferable to take a "permissible probability of failure" into consideration and to adjust the failure penalty introduced into the calculation in such a manner that the exploitation results respect this probability.

In the case of the Jatiluhur Dam, in Indonesia, it was necessary to determine the power output guaranteed nine years out of ten and the reservoir operating procedure, so that the monthly deficit of irrigation water, did not exceed 10 % of the requirements except during one year in ten. The failure penalties were

determined by successive approximation, complementing the operating procedure optimisation model with an operation simulation model based on this procedure. The same method was used to specify the program for equipping the hydroelectric plant of the Selingue dam in Mali, so that the power house can meet the country's electricity requirements up to 1990 whilst at the same time keeping within the limitations imposed by controlled discharge release related to irrigation and shipping needs.

The model which combines the determination of optimum exploitation procedure according to the "Decision-Risk" process and the simulation of the procedures obtained, is just one necessary part of an overall planning study. The model is designed mainly to specify the performance of a multi-purpose dam for a given set of characteristics and targets. Due to the fact that the calculation response is very rapid and that the results are presented in a very comprehensive form (statistical distribution of reservoir levels throughout the year, failure probabilities with respect to each target, expectation of the overall benefit) a model of this type plays a very important synthesising role in multi-disciplinary studies.