

# Gestion stratégique d'un système de ressources en eau : l'exemple du système NESTE

## Strategic operation of a water resource system: application to the NESTE water resource system

E. Parent, F. Lebdi and P. Hurand

Volume 4, Number 4, 1991

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705115ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705115ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)  
1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Parent, E., Lebdi, F. & Hurand, P. (1991). Gestion stratégique d'un système de ressources en eau : l'exemple du système NESTE. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 4(4), 543–568. <https://doi.org/10.7202/705115ar>

Article abstract

This paper deals with bicriteria (irrigation & water quality) weekly operation of a water resource system during dry period. Two ways of handling the problem are assessed and compared on a real case study :

- a stochastic dynamic programming modal with a two dimensional state (reservoirs level, river level) that is numerically solved by discretization ;
- a more « synthetic » model where the state is expressed in term of a tail aera probability related to the consumption of all the present water resources in the future. A practical decision rule is based upon the associated critical value.

Numerical results are plotted on historical varies for both methods.

From the present application to the NESTE system, the conclusions are :

- 1) Both procedures allow the system manager to formulate operating strategies in a rational way :
  - An operating rule can be derived to allocate water so as to meet a combination of the various objectives. It is expressed as a feedback law linking what we know from the state of the system to how we control its evolution.
  - Both methods need a parameter to be set up by stochastic simulation.
  - They give close results on the basis of the past data and can be conveniently proposed to system managers.
- 2) The system analysis approach is based on stochastic dynamic programming. It can be efficiently used to derive optimal feedback rules of operation and can routinely deal with complex decisions such as limiting irrigation when a shortage is to occur or take the risk to keep going and decrease output targets for water quality management. At the same time, this procedure entails heavy computing time, uneasy interpretation of the weighting coefficient between irrigation and water quality objectives, and a rather artificial elicitation of the global compromise.

Such an approach is very well fit for simulation because it is composed of elementary blocks that are gathered in a transition relationship to describe the system's dynamic evolution. This approach also provides a means to get an optimal policy as long as the system manager accepts the necessity to formulate an objective function consistently with dynamic programming (i. e. stages are separable and additive). Of course this optimal allocation should be carefully examined because of modal uncertainties influencing both the system response and the hydrological behaviour.

- 3) The synthetic method may appear more attractive from the engineering point of view for the following reasons :

- the state is easily interpreted in terms of « dry year with a return period of 10, normal year, exceptionally wet year » and so on. The trade-off coefficient is the volume one wants to keep in the reservoirs at time T for a wet year. Consequently if the parameter is chosen with « good sense », no optimization scheme is needed.

- there is no computation except a mass balance equation and a normal probability law adjustment which is very easy because it deals with cumulative quantities.

- 4) Such models are designed to serve only as multicriterion decision making aids. In very dry days such as occurred in summer 1976 or 1989 in France they cannot create additional water resources... still, they can help the system manager by constant up dated multidimensional estimation of the risks that may be encountered when following different operation rates. In the case of the NESTE system, a real-scale experiment began in 1989: in real time operation, both models worked on line as decision-making supports, and the system manager made a thorough study of the hydrological conditions when the two approaches did not agree on the same strategy for the following week.

# Gestion stratégique d'un système de ressources en eau : l'exemple du système NESTE

Strategic operation of a water resource system : application to the NESTE water resource system

E. PARENT<sup>1</sup>, F. LEBDI<sup>2</sup>, P. HURAND<sup>3</sup>

---

Reçu le 30 mars 1990, accepté pour publication le 9 juillet 1991\*.

## RÉSUMÉ

L'article que nous proposons s'inscrit dans le cadre des problèmes d'optimisation dimensionnelle (irrigation & salubrité) des ressources en eau durant la période d'étiage. Sur le cas du système NESTE, la résolution est effectuée selon deux approches :

- un modèle de programmation dynamique avec état de dimension deux (niveau des réserves, niveau dans la rivière) où, dans la solution numérique, les variables sont discrétisées ;
- un modèle « synthétique » où l'on calcule une probabilité de non dépassement caractérisant l'état hydrique des ressources du système. Une règle empirique permet d'associer à cette grandeur une décision de consigne à effectuer.

Les résultats numériques sont comparés sur une série de chroniques historiques. Les avantages et les inconvénients de chacune des deux approches sont mis en lumière sur le cas réel du système NESTE.

*Mots clés : gestion de réservoir, programmation dynamique, gestion du risque, aide à la décision, modélisation, soutien d'étiage, irrigation.*

## SUMMARY

This paper deals with bicriteria (irrigation & water quality) weekly operation of a water resource system during dry period. Two ways of handling the problem are assessed and compared on a real case study :

- 
1. E. Parent, Chercheur au Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles, ENGREF-ENPC, La Courtine, 93167 Noisy-le-Grand Cedex, France.
  2. F. Lebdi, Maître-Assistant au laboratoire de Génie Rural de l'Institut Agronomique de Tunis, 43, av, Charles Nicolle, Tunis, Tunisie.
  3. P. Hurand, Chef de service Etudes Générales de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, Chemin de l'Alette, 65001 Tarbes, France.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 septembre 1992.

- a stochastic dynamic programming model with a two dimensional state (reservoirs level, river level) that is numerically solved by discretization ;
- a more « synthetic » model where the state is expressed in term of a tail area probability related to the consumption of all the present water resources in the futur. A practical decision rule is based upon the associated critical value.

Numerical results are plotted on historical series for both methods.

From the present application to the NESTE system, the conclusions are :

1) Both procedures allow the system manager to formulate operating strategies in a rational way :

- An operating rule can be derived to allocate water so as to meet a combination of the various objectives. It is expressed as a feedback law linking what we know from the state of the system to how we control its evolution.
- Both methods need a parameter to be set up by stochastic simulation.
- They give close results on the basis of the past data and can be conveniently proposed to system managers.

2) The system analysis approach is based on stochastic dynamic programming. It can be efficiently used to derive optimal feedback rules of operation and can routinely deal with complex decisions such as limiting irrigation when a shortage is to occur or take the risk to keep going and decrease output targets for water quality management. At the same time, this procedure entails heavy computing time, uneasy interpretation of the weighting coefficient between irrigation and water quality objectives, and a rather artificial elicitation of the global compromise.

Such an approach is very well fit for simulation because it is composed of elementary blocks that are gathered in a transition relationship to describe the system's dynamic evolution. This approach also provides a means to get an optimal policy as long as the system manager accepts the necessity to formulate an objective function consistently with dynamic programming (i. e. stages are separable and additive). Of course this optimal allocation should be carefully examined because of model uncertainties influencing both the system response and the hydrological behavior.

3) The synthetic method may appear more attractive from the engineering point of view for the following reasons :

- the state is easily interpreted in terms of « dry year with a return period of 10, normal year, exceptionnally wet year » and so on. The trade-off coefficient is the volume one wants to keep in the reservoirs at time T for a wet year. Consequently if the parameter is chosen with « good sense », no optimization scheme is needed.
- there is no computation except a mass balance equation and a normal probability law adjustment which is very easy because it deals with cumulative quantities.

4) Such models are designed to serve only as multicriterion decision making aids. In very dry days such as occurred in summer 1976 or 1989 in France they cannot create additional water resources... still they can help the system manager by constant up dated multidimensional estimation of the risks that may be encountered when following different operation rules. In the case of the NESTE system, a real-scale experiment began in 1989 : in real time operation, both models worked on line as decision-making supports, and the system manager made a thorough study of the hydrological conditions when the two approaches did not agree on the same strategy for the following week.

**Key-words :** Reservoir operation, dynamic programming, risk management, decision making, modeling, low flow augmentation, irrigation.

## 1 - PRÉSENTATION

Nombre de méthodes mathématiques ont été utilisées dans le domaine de l'aménagement et de la gestion des eaux et ce développement a été largement soutenu par la constante augmentation des performances des ordinateurs à laquelle nous avons assisté ces dernières années. YEH (1985) a brossé un état de l'art en la matière.

YAKOVITZ (1982) a dressé un panorama complet de la première famille de méthodes, les méthodes de programmation dynamique, activement étudiées depuis les premiers travaux de MASSÉ en 1946 et 1959.

D'autres techniques peuvent aussi être mises en œuvre. Ainsi YAZICIL *et al.* (1983) ont-ils mis en place une gestion multiobjectif multiréservoir (Green River Basin) respectant le choix des décideurs en minimisant par programmation linéaire les écarts à des courbes de vidange type. On trouve aussi des principes semblables sur ce même cas dans SIGVALDASON (1976) et sur le cas du barrage d'Assouan dans THOMAS et REVELLE (1966).

Pourtant quelle que soit la technique utilisée, la modélisation se heurte à de nombreux obstacles déjà soulignés par DATTA *et al.* (1984).

a) Il est souvent très difficile de quantifier l'objectif de gestion. C'est pourquoi, si la gestion de barrages hydro-électriques a été largement étudiée par de nombreux auteurs à l'aide d'une multitude d'algorithmes (COLLETER *et al.*, 1978, DODU *et al.*, 1981, TURGEON, 1980), la difficile modélisation des objectifs autres que la maximisation de la production énergétique reste encore à développer. Le problème de la gestion de systèmes hydro-agricoles a pourtant été abordé dans le cadre classique de la programmation dynamique par divers auteurs (BURAS, 1972, MERGOS, 1987, HOUGHTALEN et LOFTIS, 1988, FANG *et al.*, 1989).

b) L'aspect multiobjectif de la gestion doit être envisagé d'une façon ou d'une autre, notamment pour les systèmes hydro-agricoles où les usages de l'eau sont multiples et souvent trop complexes pour être décrits par un seul critère de gestion. Des tentatives de synthèses entre les démarches de programmation dynamique et celles de l'analyse multi-objectif ont, par exemple, été tentées par SZIDAROVSKY et DUCKSTEIN (1980).

c) Le caractère stochastique des aléas hydrologiques et des comportements de l'utilisateur de la ressource en eau doit être intégré dans le modèle de gestion. Un choix simplificateur est alors d'utiliser la programmation dynamique sur des scénarios d'évolutions possibles (GOUSSEBAILLE et ROCHE, 1988) ou de tester par simulations ou ajustement une classe restreinte de règles de gestion (BHASKAR et WHITLACH, 1987). Sinon, la prise en compte explicite des aléas, en sus de la plus grande complexité des algorithmes de programmation dynamique stochastique qu'elle entraîne, doit rendre compte des notions de fiabilité et de défaillance de gestion. ASKEW (1974), SIMONOVIC et ORLOB (1984), RICHARD et TURGEON (1988) ont étudié cet aspect des performances d'un système.

d) Le comportement multi-acteurs intervient souvent en matière de gestion des ressources naturelles. Il faut décrire alors les conflits entre divers décideurs plaidant chacun pour un emploi spécifique de l'eau et imaginer comment les interactions entre les acteurs peuvent conduire à une décision générale. De telles méthodologies sont décrites par exemple dans FRASER et HIPEL (1984).

Ce papier développe, sur le cas pratique du système NESTE, les principes de construction qui sont à l'origine d'un outil d'aide à la décision pour un système de gestion de ressources en eau. Il compare les résultats d'une approche analytique (analyse de la dynamique du système avec programmation dynamique stochastique) et une démarche synthétique fondée sur les notions de probabilité de non dépassement et de courbe objectif de vidange.

Ce cas d'étude apporte une réponse issue de la pratique aux quatre points de difficulté soulignés précédemment :

a) On propose une démarche générale (§4) pour quantifier explicitement les objectifs de gestion d'un système hydro-agricole.

b) L'aspect multi-objectif est ici pris en compte dans chacune des deux méthodes par un paramètre de pondération entre deux critères. Le réglage de la valeur de ce paramètre est effectué par simulation sur des chroniques historiques.

c) Le caractère stochastique est intégré dans chacune des deux techniques d'optimisation sous un angle différent (modèle dynamique explicite ou calcul indirect de fréquence de non dépassement).

d) Une grande simplification opérationnelle est liée au fait que le comportement multiacteur n'avait pas à être intégré pour ce cas pratique : la CACG est en effet le gestionnaire unique de tout le système NESTE pour tous les objectifs. Un contact direct entre les chargés d'étude et l'ingénieur responsable du fonctionnement opérationnel a pu s'établir et a conduit à l'élaboration en commun d'un outil d'aide à la décision pour la conduite de la gestion stratégique du système NESTE.

## 2 - DESCRIPTION DU SYSTÈME NESTE

Le plateau de Lannemezan et les coteaux de Gascogne sont des formations géologiques détritiques surélevées (molasses quasi imperméables) et malheureusement isolées des richesses hydrauliques voisines : au sud, les ressources en eau de la montagne Pyrénées, à l'est, la plaine de la Garonne et son cortège d'affluents, la rivière Adour à l'ouest. A cause de cette situation, les régimes naturels estivaux de Gascogne sont ceux de véritables oueds. Le canal de la NESTE, créé en 1862 pour réparer cette « erreur de la nature », transfère une partie des ressources de la rivière NESTE des Pyrénées en tête des rivières de Gascogne, ce qui a permis, depuis les années 1970, un formidable développement en continu de 30 000 ha de périmètres irrigués où l'on cultive le maïs.

La figure 1 détaille l'évolution des débits souscrits pour l'irrigation. Une utilisation complémentaire de cette réalimentation en eau est de maintenir la pérennité des débits dans les rivières de Gascogne en garantissant un niveau minimum de salubrité afin de permettre l'adduction d'eau potable et le traitement des eaux usées de quelques villes. Pour faire face au développement de la demande, on a d'abord installé de nouveaux barrages en tête des coteaux de Gascogne ( $42 \text{ hm}^3$ ) pour compléter les retenues EDF de haute montagne qui sont utilisées jusqu'à concurrence de  $48 \text{ hm}^3$  pour soutenir les étiages de la NESTE et permettent l'alimentation du canal. Si l'on ajoute que la distribution de l'eau du canal vers les rivières de Gascogne totalisant près de 1 300 km de linéaire se fait par 90 km de rigoles, alimentées par une trentaine de prises, on a une idée de la complexité actuelle du système (voir aussi figure 2). Aujourd'hui, le conflit permanent qui subsiste entre l'objectif d'irrigation et l'objectif de salubrité, rend nécessaire l'allocation rationnelle des ressources en eau du système NESTE, contexte dans lequel s'inscrit la présente étude.

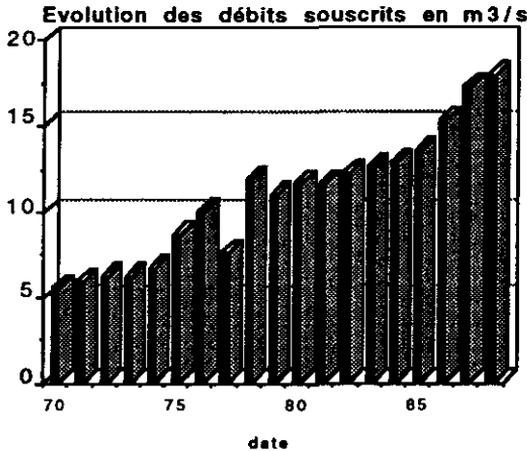


Figure 1 Evolution de la demande pour l'irrigation depuis 1970.  
*Irrigation demand development since 1970.*

### 3 - POUR LA GESTION STRATÉGIQUE : POURQUOI UTILISER UN MODÈLE DE SYSTÈME AGGLOMÉRÉ ?

#### 3.1 Gestion tactique - Gestion stratégique

Les barrages de coteaux sont équipés depuis longtemps d'un système de régulation automatique : relié au site central de la CACG à Tarbes qui lui fournit les prévisions de demandes pour l'irrigation, le dispositif interroge toutes les trois heures les limnimètres disposés tout au long des cours des rivières

réalimentées et réagit automatiquement aux écarts entre les niveaux de consigne retenus par la CACG et les niveaux mesurés à l'aval des périmètres d'irrigation. Prenant en compte les délais de propagation, il télécommande en temps réel la manœuvre des vannes des barrages et réajuste les paramètres du modèle de la demande.

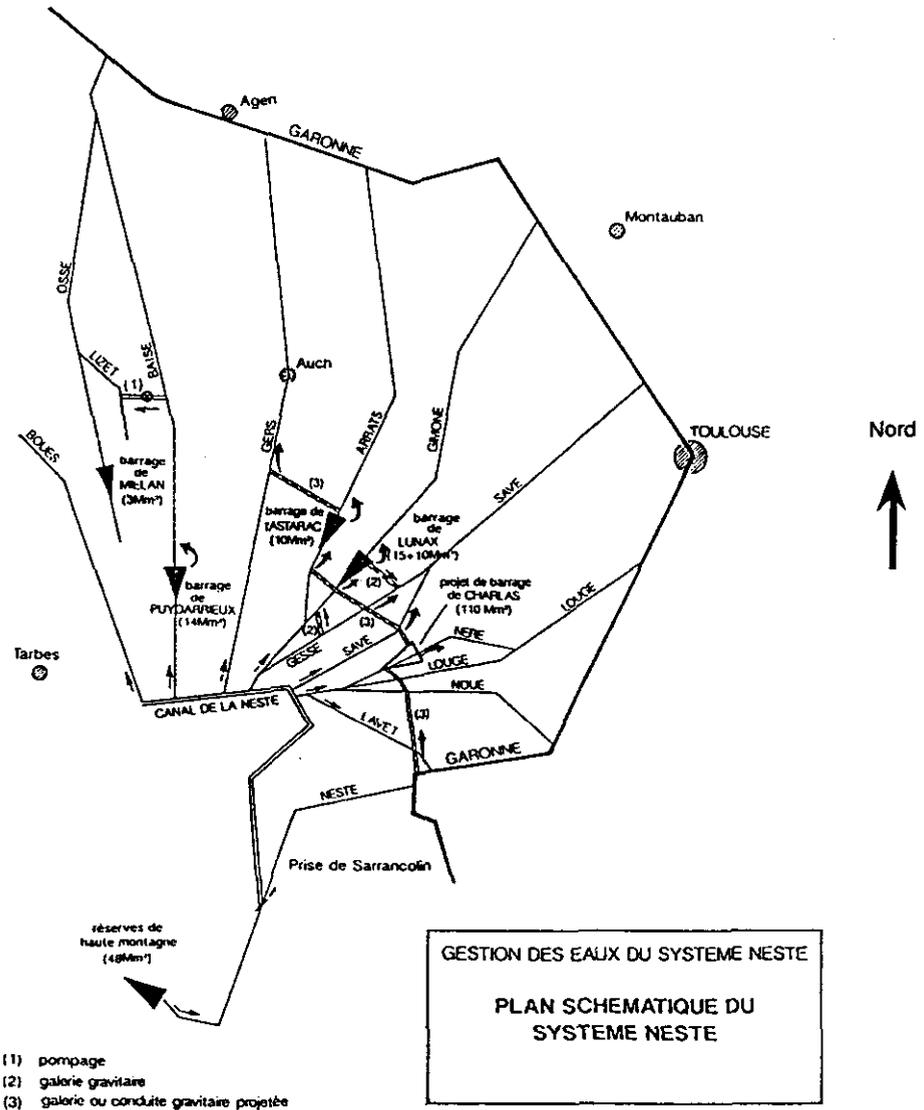


Figure 2 Le Système NESTE (extrait de Coteaux de Gascogne n° 82 Déc. 1990).  
 The NESTE system (from Coteaux de Gascogne n° 82 Dec. 1990).

Par référence à cette régulation tactique par automate, l'objet de la gestion stratégique est de fixer chaque semaine les niveaux de consigne :

- choisis trop bas, le gestionnaire pourrait terminer la saison réservoirs quasi-pleins, donc en ayant fait souffrir inutilement les équilibres écologiques des rivières ;

- choisis trop hauts, on vide trop rapidement et trop précocement les barrages-réservoirs et cette situation comporte un risque de pénurie pour tous les usages de l'eau notamment en fin de saison.

Par rapport à la régulation tactique, la gestion stratégique est donc reliée à un niveau décisionnel supérieur. Elle doit permettre de visualiser l'effet des consignes sur l'avenir du système, elle intègre aussi les notions de performance et de défaillance.

### 3.2 Modèle de système aggloméré

Compte tenu de la souplesse du système NESTE, la notion de défaillance sur une rivière donnée n'a pas de signification : une défaillance ne peut être que générale, ce qui permet de représenter le fonctionnement global de la gestion stratégique du système NESTE au pas de temps de la semaine sous la forme suivante :

- un réservoir équivalent à la somme des réserves de tout le système NESTE (haute montagne et coteaux indistinctement) dont le stock sera noté  $S(t)$  au début de la semaine  $t$  ;

- un lâcher globalisé  $L(t)$  durant la semaine  $t$  que l'on adopte avant de connaître les réalisations des variables aléatoires des apports et de la demande ;

- les apports naturels  $N(t)$  de la rivière NESTE,

- une répartition des flux sur deux vallées :

- la rivière NESTE,

- les coteaux de Gascogne par le transfert via le canal NESTE ;

- sur les coteaux de Gascogne, on considérera la demande agricole  $[D(t)]$  de tous les périmètres d'irrigation et les apports naturels agglomérés des rivières de Gascogne  $[G(t)]$ . Le schéma de la figure 3 précise cette modélisation.

On appelle  $r_n(t)$  et  $r_g(t)$  les reliquats à l'exutoire de la rivière NESTE et à l'exutoire des coteaux de Gascogne pour lesquels notre modèle de gestion stratégique se doit de recommander des valeurs acceptables, à charge pour le dispositif de régulation dynamique tactique d'actionner les vannes des barrages afin de respecter ces consignes hebdomadaires (pour ce faire, les lâchers fluctueront d'ailleurs autour de la valeur hebdomadaire  $L(t)$ ).

La période d'étude porte sur l'étiage qui est en même temps la période d'irrigation. Elle se compose des 30 semaines qui suivent le premier lundi de juin, premier pas de temps où l'on suppose que les réservoirs sont pleins. L'étude de la période de 15 années sur lesquelles on dispose à la fois de données de débits et de données de prélèvements, montre que la période de lâcher est continue. Elle commence au début de la semaine 4 ou 5 pour se terminer en fin de semaine 18 ou 19 sauf une ou deux années à l'automne exceptionnellement sec où elle peut se prolonger jusqu'à la semaine 27.

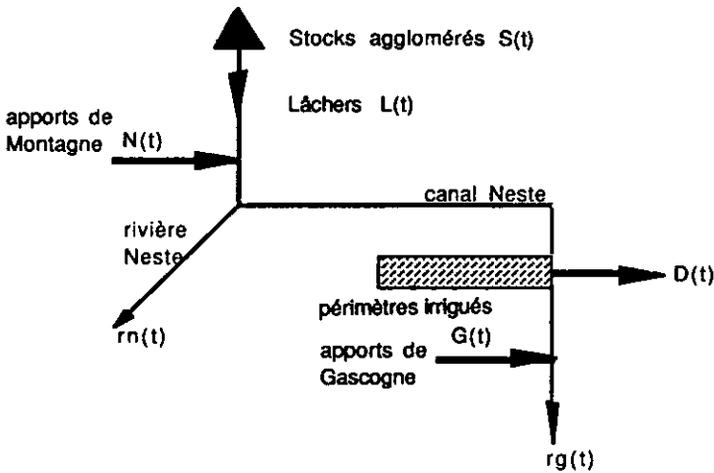


Figure 3 Le Système NESTE, modèle aggloméré pour la gestion stratégique.  
*The NESTE system as an aggregated model for strategic management.*

#### 4 - OBJECTIFS DE GESTION ET MODES OPÉRATOIRES ACTUELS DU SYSTÈME

Pour le gestionnaire, il est relativement simple de définir en termes qualitatifs les objectifs de gestion et leur hiérarchie. La quantification de ces objectifs (c'est-à-dire la traduction en valeurs de débit) notamment pour des objectifs de salubrité est, quant à elle, nettement plus délicate. Il s'agit par ordre de priorité décroissante :

1) de maintenir en tout point des rivières du système NESTE un débit minimal (dit débit seuil) permettant d'assurer en salubrité (c'est-à-dire une qualité compatible avec la production d'eau potable et l'équilibre écologique du cours d'eau) ;

2) de satisfaire la « demande » (prélèvements pour l'eau potable et l'irrigation) ;

3) d'augmenter si possible ce débit de salubrité jusqu'à une valeur dite « objectif » (c'est la valeur à partir de laquelle on n'accepte plus d'augmenter les lâchers pour augmenter la salubrité) ;

4) de toujours garder un peu d'eau dans les réservoirs pour faire face à des événements imprévisibles\*.

\* Défaut de remplissage l'année suivante, pollution accidentelle nécessitant une dilution exceptionnelle...

On montre aisément que, pour que ces deux premiers objectifs soient respectés en tout point d'une rivière, il est nécessaire et suffisant d'avoir une seule contrainte de débit reportée en un point judicieusement choisi du cours d'eau, en général le plus en aval de la rivière durant la saison sèche. L'augmentation de la salubrité se traduit alors également par l'augmentation de ce débit.

Le problème de la gestion « stratégique » peut donc se formuler de la façon suivante : quel débit global de salubrité (mesuré sur les rivières aux points critiques évoqués ci-dessus) faut-il choisir pour la NESTE et les rivières de Gascogne pour augmenter au maximum la salubrité sans prendre de risques exagérés vis-à-vis de la satisfaction de la demande à venir ou même du maintien de la salubrité minimale durant toute la saison ?

Plutôt que de s'imposer ce débit de salubrité comme une contrainte somme toute arbitraire, il est préférable de définir une valeur seuil et une valeur objectif. La valeur seuil est celle qui oblige le gestionnaire, lorsqu'il ne s'estime pas en mesure de la garantir, à alerter les services responsables de la police des eaux afin que ceux-ci puissent prendre, le cas échéant, des mesures pour limiter les prélèvements : cette valeur a été fixée entre 10 et 15 % du module. Quant à la valeur objectif, c'est celle au-delà de laquelle on estime qu'il n'est pas nécessaire d'augmenter le débit par déstockage de l'eau des retenues : elle a été fixée entre 25 et 30 % du module. Dans le cas présent, le gestionnaire a proposé pour valeurs  $q_{\min}G = 5,4 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la Gascogne et  $q_{\min}N = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la NESTE tandis que  $q_{\text{obj}}G = 12,4 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la Gascogne et  $q_{\text{obj}}N = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la NESTE, valeurs qui seront adoptées dans la suite de cette partie.

Une simulation avec ces valeurs permet d'obtenir le tableau suivant :

Horizon	Surface Irriguée en hectares	Capacité des barrages en Mm3	Prélèvements et salubrité seuils non satisfaits une année sur...	Prélèvements et salubrité objectifs satisfaits une année sur...
1990	30 000	75	1/12,5	1/5

Sur le système NESTE, on peut définir deux modes de fonctionnement qui reflètent la situation réelle et les réactions des gestionnaires face aux événements exceptionnels.

#### 4.1 Le fonctionnement normal

La réserve fonctionne de telle façon que sur la rivière NESTE après la dérivation de Sarrancolin, on laisse passer au moins  $q_{\text{obj}}N = 4 \text{ M}^3/\text{s}$  ( $r_n(t) \geq q_{\text{obj}}N$ ) : les demandes pour l'irrigation sont pleinement satisfaites, le niveau de salubrité dans les rivières de Gascogne est supérieur à un seuil minimum  $q_{\min}G$ , et aussi proche que possible d'un débit objectif  $q_{\text{obj}}G$ , variable selon la valeur du lâcher effectué ( $q_{\min}G < r_g(t) < q_{\text{obj}}G$ ).

## 4.2 Les fonctionnements de pré-crise et de crise

Il peut se produire, lorsque la demande pour l'irrigation a des difficultés à être satisfaite, que l'on abaisse le débit à laisser sur la NESTE à une valeur  $q_{\min}N$  ( $= 3\text{m}^3/\text{s}$ ), de façon à augmenter le transit vers les coteaux de Gascogne via le canal NESTE, soulageant ainsi la difficulté à satisfaire l'irrigation ( $r_n$  passant à  $q_{\min}N$  permet de relever  $r_g$ ). C'est pourquoi dans la suite du raisonnement on considérera de fait en bloc la quantité ( $r_g + r_n$ ), si elle passe en deçà de ( $q_{\min}G + q_{\text{obj}}N$ ), on déclenche la pré-crise et on impose  $r_n = q_{\min}N$ .

Ce mode de fonctionnement sera appelé par la suite régime de pré-crise. Il faut noter que les débits laissés sur la NESTE passent sans transition de  $q_{\text{obj}}N$  à  $q_{\min}N$  car cette mesure a une origine réglementaire (décision préfectorale). Ce mode de fonctionnement s'est produit assez souvent dans le passé sous la pression des irrigants inquiets pour leur récolte.

Compte tenu de la loi sur l'eau en France, le gestionnaire ne commande pas la valeur du prélèvement que l'agriculteur soutire à la rivière : la mesure suivante consiste donc à décréter l'impossibilité radicale de satisfaire la totalité de l'irrigation en période de sécheresse.

L'arrêt des irrigations est définitif depuis la prise de la décision jusqu'à la fin de la saison d'irrigation (20<sup>e</sup> semaine après le 1<sup>er</sup> lundi de juin). On ne poursuit plus alors que les objectifs de soutien de la salubrité : sur la NESTE, au niveau  $q_{\min}N$  et sur la Gascogne, si possible, au-delà de  $q_{\min}G$ .

Cette mesure très impopulaire a été rarement effective dans l'histoire de la NESTE (en 1976, 1989, 1990). Elle traduit le souci de ménager des objectifs liés aux usages de l'eau prioritaires sur l'irrigation en situation de pénurie grave.

## 4.3 Les défaillances

Si le système NESTE n'est jamais soumis à une *défaillance immédiate sur la qualité* de la Gascogne puisque l'asservissement tactique assure que les lâchers maintiennent au moins le niveau de consigne, il est sujet à un autre type d'incident, la *défaillance du stock* si, avant la fin de la période de gestion (30<sup>e</sup> semaine après le 1<sup>er</sup> lundi de juin), on a complètement vidé les réserves du Système NESTE. Cette situation dépend à la fois des aléas hydrologiques et de la politique de gestion suivie jusqu'à cette date.

## 4.4 Le casse-tête du chargé d'études

Lorsqu'on interroge le gestionnaire d'un système tel que la NESTE, il souhaite une *bonne* gestion, sans vraiment pouvoir préciser ce qu'il entend par là. De plus, comme c'est bien souvent le cas lors de l'étude des systèmes de transfert d'eau dont l'objectif n'est pas la production hydro-électrique, il n'existe pas de bénéfice monétaire lié au  $\text{m}^3$  relâché :

- définir la valeur du débit nécessaire à l'équilibre écologique de chaque cours d'eau, ne serait-ce que par les coûts de substitution (manque à gagner sur les permis de pêche et plus généralement pour les activités de tourisme

local...) reste difficile tant au niveau de la méthodologie que pour la quantification ;

– calculer les effets de la valorisation sur les cultures par l'irrigation est possible par des modèles de productions (BOUZEIDI, 1985), mais cela reste très délicat à mettre en œuvre pour suivre une dynamique de croissance à pas de temps hebdomadaire.

Un autre angle pour attaquer le problème aurait été de considérer que la décision dépendra de la perception subjective des divers usages de l'eau et de s'orienter vers l'utilisation d'une fonction d'utilité multiattribut comme il en a déjà été fait usage à l'occasion de problèmes semblables d'hydraulique agricole (voir par exemple Krystofovitz, 1982).

Nous avons préféré aider le gestionnaire à mieux formuler ses objectifs en cernant les incidents de parcours qu'une bonne gestion devait éviter, suivant en cela une procédure proche de celle d'HASHIMOTO *et al.* (1982).

La démarche est simple :

- Demander au gestionnaire de raisonner en termes de contreperformances et d'incidents ; on liste ici 3 types d'événements (fonctionnement normal, passage en crise, défaillance sur le stock).

- A chacun de ces trois incidents, on peut associer, *pour une stratégie de gestion donnée*, trois indices de performance :

- le *risque*, c'est-à-dire la probabilité de voir à un instant donné l'événement en question se réaliser ;

- la *résilience*, c'est-à-dire une estimation du temps moyen au bout duquel le système retourne à un état satisfaisant lorsque s'est produit un incident ;

- la *vulnérabilité*, qui mesure l'importance moyenne d'un incident pour les usagers de la ressource. Elle peut prendre toutes sortes de formes : maximum de l'écart à la normale, moyenne de l'écart à la normale, fonction continue ou en saut de l'écart à la normale.

Issus de ces concepts développés par PLATE et DUCKSTEIN (1988), on définit sur ce cas les 9 combinaisons possibles d'indices de performance qui potentiellement pourront être utilisés par le gestionnaire pour juger des performances d'une gestion.

On a ainsi progressé d'une situation sans critère nettement conceptualisé à une situation multicritère, ce qui laisse en général le gestionnaire tout aussi démuni sur le plan pratique... parce qu'ensuite il faut *générer* des stratégies et, compte tenu que le système est dynamique, ces actions prennent ici la forme de séquences de consignes de salubrité à appliquer pour le futur.

Pour rechercher des stratégies de gestion, deux approches sont possibles :

- une démarche analytique qui procède d'une modélisation de la dynamique de chaque élément du système et recherche par programmation dynamique une stratégie optimale sur un objectif agglomérant les deux principaux critères : améliorer la salubrité et tirer le meilleur parti de la réserve ;

– une approche, de caractère plus synthétique, qui estime une probabilité de non dépassement caractérisant l'état hydrique du système et lui associe directement un débit de salubrité.

Les deux techniques seront détaillées dans les paragraphes suivants. Les neuf indices de performance construits ci-dessus permettront ici d'avoir une vision multidimensionnelle de chacune des stratégies de gestion et d'en choisir directement les paramètres après une discussion avec le gestionnaire. Le cas échéant, ayant constitué un tableau évaluant les stratégies sur les critères comme préconisé dans ROY (1985), des méthodologies d'aides à la décision auraient pu être mises en œuvre. On trouve aussi dans GOICOECHA *et al.* (1982) diverses techniques de prise de décision applicables à une telle situation.

## 5 - Gestion stratégique par synthèse d'une courbe de vidange type

### 5.1 Principes de la synthèse

Les deux idées fondamentales consistent à faire une analyse a posteriori et à travailler sur les grandeurs cumulées :

1) Une fois la campagne terminée, le gestionnaire, qui dispose alors de « toutes » les données d'apports naturels et de prélèvements, sait alors définir le débit de salubrité ( $r_g + r_n$ ), constant sur la période de lâcher, qu'il aurait pu (ou dû) s'engager à maintenir. Si un premier calcul lui donne  $r_g < q_{\min} G$ , il cherche alors la date au plus tard où il aurait dû arrêter les irrigations pour maintenir  $r_g = q_{\min} G$  sur toute la période. Il sait donc également établir les courbes de vidanges « optimales » de ses réservoirs.

2) Les barrages étant supposés pleins en début de campagne, le débit de salubrité a posteriori ( $r_g + r_n$ ) dépend de la seule variable (notée  $V_A(T)$ ) « différence entre le volume des apports naturels et volume des prélèvements cumulés sur la totalité des périodes de gestion ».

### 5.2 Comment établir une gestion du compromis

Il s'agit de traduire l'augmentation immédiate de la salubrité en fonction du risque de défaillance future, et de la diminution du stock disponible en fin de campagne.

#### 5.2.1 La statistique des $V_A(T)$

Soit  $[1, T]$  la période de gestion considérée et on note  $q_A(t)$  différence entre les apports naturels utilisables (à cause de la capacité limitée à 14 m<sup>3</sup>/s du canal de la NESTE) par le système et les prélèvements qui s'y réalisent.

$$V_A(t) = \sum_{\tau=1}^t q_A(\tau) dt \quad (1)$$

est le bilan cumulé jusqu'à la période  $t$ ,  $V_A(t)$  est le bilan global sur la saison.

L'étude statistique sur 15 années de ces différentes quantités  $V_A(t)$  montre qu'à  $t$  fixé, elles obéissent à des lois de Gauss  $N(m,s)$ . On peut adopter à un instant donné  $t$  fixé, la forme suivante où  $U$  est une variable aléatoire gaussienne  $N(0,1)$  :

$$V_A(t) = m(t) + s(t)U \quad (2)$$

La figure 4 en donne l'allure au cours du temps ainsi que celle de deux quantiles dont nous expliciterons l'intérêt ci-après.

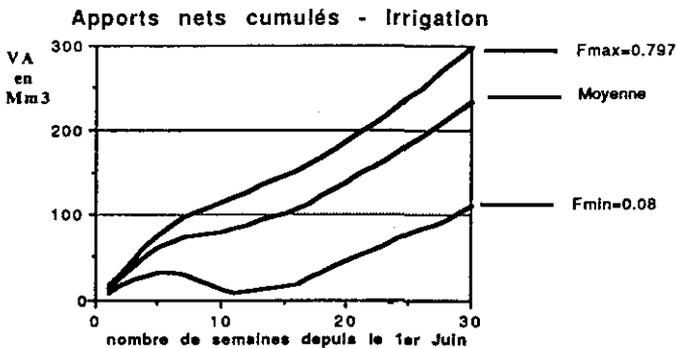


Figure 4 Loi des ressources utilisables pour la salubrité en fonction du temps.

*Empirical distribution of resources available for water quality ; the abscissa is the time in weeks.*

### 5.2.2 Fréquence des défaillances par rapport au débit seuil

Plaçons nous en  $T$ , fin de la période de gestion. En appelant :

$(q_{\min}G + q_{\min}N)$  : le débit de salubrité seuil,

$VL_0$  : la capacité des réservoirs,

on voit que dans le cas extrême où on utilise toutes les capacités des réservoirs pour garantir le débit seuil de salubrité  $(q_{\min}G + q_{\min}N)$ , on ne peut à la fois satisfaire les prélèvements et la salubrité minimale si l'état hydraulique est tel que :

$$V_A(t) \leq (q_{\min}G + q_{\min}N) \times T - VL_0 \quad (3)$$

La fréquence de défaillance  $F_{\min}$  est donc la probabilité de non dépassement associé à la valeur  $U_{\min}$  de la gaussienne associée avec :

$$U_{\min} = \frac{[(q_{\min}G + q_{\min}N) \times T - VL_0 - m(T)]}{s(T)} \quad (4)$$

En deçà de cette fréquence, on ne peut assurer un débit minimum de salubrité à moins de suspendre les irrigations.

### 5.2.3 Fréquence de défaillance par rapport au débit objectif

De la même façon qui définit une probabilité de défaillance par rapport au débit seuil, on peut définir une probabilité de défaillance par rapport au débit objectif. Toutefois, s'il est évident que l'on accepte de vider entièrement les réservoirs pour maintenir le débit seuil, il n'en va pas de même pour le débit objectif. Notons  $VL_1$  la valeur que l'on accepte de déstocker pour maintenir ce débit de salubrité objectif.

Dans ces conditions la probabilité de défaillance par rapport au débit objectif  $F_{\max}$  est la probabilité de non dépassement associé à la valeur  $U_{\max}$  de la gaussienne estimée pour  $V_A(T)$  :

$$U_{\max} = \frac{[(q_{obj}G + q_{obj}N) \times T - VL_1 - m(T)]}{s(T)} \quad (5)$$

Le compromis entre augmentation de la salubrité, qui nous inciterait à prendre  $VL_1 = VL_0$ , et la prudence extrême qui voudrait que la retenue  $VL_1 = 0$ , s'effectue bien par le choix de  $VL_1$ , qui est donc la variable de compromis de notre modèle. Dans le cadre de l'étude NESTE, nous avons retenu pour  $VL_1$  la valeur  $VL_0/2$ .

### 5.3 Choix d'une loi pour les débits de salubrité

Plaçons-nous en fin de période de gestion à  $T$ . On cherche à trouver une loi :  $F \rightarrow Q_S(F)$ ,  $F$  étant la probabilité de non dépassement associée à la variable  $V_A$  et  $Q_S(F)$  le niveau à fixer pour la salubrité.

Dans ce modèle,  $F$  caractérise l'état hydrique du système.

Nous avons vu que nous pouvons associer :

- à  $F_{\min}$ , un débit de salubrité  $Q_{\min}$  et une valeur du lâcher  $VL_0$
- à  $F_{\max}$ , un débit de salubrité  $Q_{\max}$  et une valeur du lâcher  $VL_1 = \frac{VL_0}{2}$

Nous avons donc recherché une loi  $F \rightarrow Q_S(F) = (r_g + r_n)(F)$  telle que quand  $F$  croît de  $F_{\min}$  à  $F_{\max}$ ,  $(r_g + r_n)$  croît de  $(q_{\min}G + q_{\min}N)$  à  $(q_{obj}G + q_{obj}N)$

$$VL \text{ décroît de } VL_0 = \frac{VL_0}{2}.$$

Notons  $u(F)$  la valeur critique de la Gaussienne  $N(0,1)$  reliée à  $F$ .

La loi  $F \rightarrow a + bu(F)$  avec  $(a, b)$  tels que :

$$a + b U_{\min} = (q_{\min}G + q_{\min}N) \quad (6)$$

$$a + b U_{\max} = (q_{obj}G + q_{obj}N) \quad (7)$$

répond aux conditions ci-dessus. C'est cette loi que nous avons retenue.

### 5.4 Courbes vidanges-type : $t \rightarrow V_L(F, t)$

Pour un instant  $t$  futur fixé dans  $[1, T]$ , supposons que l'on connaisse l'état hydrologique par la fréquence  $F$ . On peut alors déterminer  $Q_S(t, F)$ . Pour trouver  $V_A(t)$  correspondant à  $F$  on utilise la formule (2) :

Le cumul des quantités lâchées des barrages jusqu'à l'instant  $t$ ,  $V_L(t)$ , sera obtenu par l'équation de bilan :

$$V_L(t) = -V_A(t) + \sum_{\tau=1}^t Q_S(\tau, F) \quad (8)$$

On peut ainsi tracer des courbes de vidange type pour une fréquence donnée de  $V_A(t)$ .

### 5.5 Prévision et calcul d'une stratégie

On a vu comment déterminer le débit de salubrité  $r_g + r_n$ , connaissant  $V_A(t)$  à l'horizon de gestion, dernière période de la saison  $T$  ou plus exactement la probabilité de non dépassement associée. Comment estimer  $V_A(t)$  et plus généralement l'état hydrique  $F$  du système ?

Soient  $t$  l'instant présent et  $t' = t + 3$  semaines. On peut écrire :

$$V_A(T) = \sum_{\tau=1}^t q_A(\tau) + \sum_{\tau=t}^{t'} [q_{nat}(\tau) - D(\tau)] + \sum_{\tau=t'}^T [q_{nat}(\tau) - D(\tau)] \quad (9)$$

$$V_A(T) = \sum_{\tau=1}^t q_A(\tau) + \sum_{\tau=t}^{t'} q_{nat}(\tau) + \sum_{\tau=t'}^T q_{nat}(\tau) - \sum_{\tau=1}^T D(\tau) \quad (6)$$

Dans ces équations,  $q_{nat}(t)$  représente les apports naturels durant la semaine  $t$  exploitables pour l'irrigation et la salubrité, c'est-à-dire éventuellement tronqués à la capacité de transfert du canal NESTE. Le premier terme représente le passé. Ce terme peut donc être calculé. Cependant le poids du passé n'intervient que par l'état du stock d'eau dans les barrages, on préférera estimer ce terme par la valeur théorique  $V_A(t)$  correspondant au volume  $V_L(t)$  effectivement lâché, permettant ainsi de tenir compte de toutes les perturbations qui ont pu se produire et en particulier de l'efficacité du système. Le second terme représente le futur prévisible : lié à l'hydrologie des cours d'eau connaissant la chronique des débits au cours des semaines passées, on peut, par calage de modèles de tarissement, prévoir les débits sur une période de 3 semaines environ.

Les deux derniers termes représentent le futur imprévisible, car lié à la pluviométrie : il concerne le débit naturel au-delà des trois semaines à venir et les prélèvements. Imprévisible au sens strict, ce terme ne peut être estimé que statistiquement, ce qui, de plus, pose le problème du choix d'une fréquence à utiliser pour cette extrapolation. Dans la pratique, cette fréquence est obtenue en cherchant à minimiser sur la quinzaine d'années d'observations dont on dispose la somme des carrés des écarts entre les débit idéaux «  $(r_g + r_n)$  » calculés a posteriori et les  $(r_g + r_n)$  hebdomadaires donnés par le modèle.

## 6 - LE COMPROMIS GLOBAL PAR ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU SYSTÈME

La seconde méthode procède d'une démarche analytique du système : on rend compte de la dynamique interne d'évolution des variables décrivant l'état du système et on cherche à optimiser un critère de gestion. Reste à essayer de définir la valeur du débit nécessaire à l'équilibre écologique de chaque cours d'eau. Malgré quelques travaux sur cette question, notamment de la part d'organismes tels que le CEMAGREF en France, cette quantification s'avère délicate. Aussi convient-il de rester modeste et de se contenter d'essayer de traduire la volonté d'augmenter le débit de consigne le plus possible de la valeur seuil  $q_{min}$  à la valeur objectif.

### 6.1 Les objectifs d'augmentation de la qualité

D'un point de vue mathématique, on peut créer artificiellement un indice de vulnérabilité, mesurant sur ces principes l'effort d'augmentation de la salubrité sur la Gascogne. Pour cela, on a défini avec le gestionnaire l'objectif instantané  $f_g(r_g)$  de la façon suivante : quel que soit le mode de fonctionnement, on admettra que l'on obtient une performance hebdomadaire comprise entre 0 et 1,  $f_g(r_g)$  telle que :

$$f_g(r_g) = 0 \text{ si } r_g < q_{min}G \text{ et } f_g(r_g) = 1 \text{ si } r_g > q_{obj}G$$

$$f_g(r_g) = \left[ -\left( \frac{r_g - q_{min}G}{q_{obj}G - q_{min}G} \right)^2 + 2 \left( \frac{r_g - q_{min}G}{q_{obj}G - q_{min}G} \right) \right] \quad (11)$$

lorsque  $r_g$  est entre  $q_{min}G$  et  $q_{obj}G$  ; le choix d'une fonction quadratique permet de décrire une augmentation marginale rapide au voisinage de la valeur seuil et, au voisinage de la valeur objectif une augmentation marginale nulle pour l'amélioration de la salubrité.

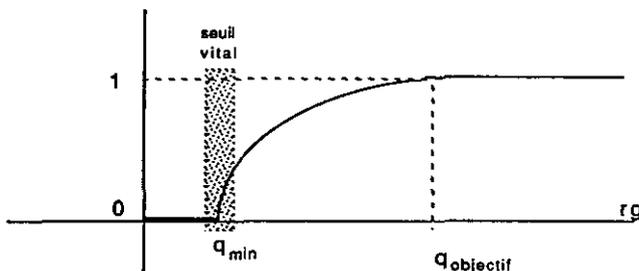


Figure 5 Indice quadratique de salubrité.  
Quadratic index for water quality.

L'objectif général relatif à l'augmentation de qualité sur la période  $t_0$  à  $T$  s'écrira sous la forme d'une fonctionnelle additive par pas de temps. Il s'agit de trouver la suite des contrats de salubrité  $(r_g^* + r_n^*)(t)$ ,  $t \geq t_0$  tels que :

$$\text{Max } E \left\{ \sum_{t=t_0}^T f_g [r_g^*(t)] \right\} \quad (12)$$

où  $E$  désigne l'opérateur espérance portant sur les apports à venir de la NESTE  $N(t)$  et des rivières de Gascogne  $G(t)$  ainsi que sur la demande en irrigation  $D(t)$ . Pour la NESTE on a  $r_n(t) > r_n^*(t) = q_{\min} N$  ou  $q_{\text{obj}} N$  ; tandis que pour la Gascogne le débit réel  $r_g(t)$  est tel que :

sous le contrat de salubrité, c'est-à-dire si :

$$r_g(t) \leq r_g^*(t) \text{ alors } f_g [r_g^*(t)] = f_g [r_g(t)]$$

au-delà du contrat, c'est-à-dire si :

$$r_g(t) > r_g^*(t) \text{ alors } f_g [r_g^*(t)] \leq f_g [r_g(t)]$$

## 6.2 Les objectifs d'anticipation de défaillance du réservoir

Pour anticiper les effets à long terme autre que la régularisation des débits de salubrité, on s'intéresse au niveau des réservoirs. En effet, compte-tenu du fonctionnement de la gestion stratégique :

- le gestionnaire continue à fournir de l'eau aux irrigants ( $\gamma(t) = 1$ ) ou décrète la crise et décide l'arrêt des irrigations ( $\gamma(t) = 0$ )
- le gestionnaire fixe  $r_g^*(t)$  au début de la semaine  $t$  (contrat de salubrité) ;
- les aléas se produisent : les débits de la NESTE, des rivières de Gascogne et la valeur de la demande pour l'irrigation sont connus au fur et à mesure des jours de la semaine  $t$  et le système d'asservissement en temps réel réalise un lâcher  $L(t)$  tel que le débit réel de sortie  $r_g(t)$  des rivières de Gascogne soit maintenu tant que possible à la valeur  $r_g^*(t)$  fixée pour cette semaine  $t$ .

Une mauvaise allocation des ressources se traduit donc par une vidange trop précoce des réserves et on risque alors de traverser une crise de gestion.

On introduit alors un niveau minimum requis à la date  $t$  pour le réservoir  $SMIN(t)$  et une pénalisation sur la fonction objectif de la forme - PENALTY ( $SMIN(t) - S(t)$ ) quand  $SMIN(t) \geq S(t)$ .

PENALTY est le paramètre de pondération à régler pour cette méthode.

## 6.3 L'objectif général de compromis

L'objectif global est, quant à lui, pris sous la forme, en supposant que  $t_0$  désigne la période de départ :

$$E \left\{ \sum_{t=t_0}^T f_g [r_g(t)] \right\} - \text{PENALTY } E \left\{ \sum_{t=t_0}^T [SMIN(t) - S(t)]^+ \right\} \quad (13)$$

Comme on le voit, il ne s'agit en aucun cas de conduire une optimisation sur un bénéfice économique pour se substituer de façon automatique à la volonté du gestionnaire des réserves de montagne et des coteaux de Gascogne. Le compromis à réaliser s'appuie simplement sur la répartition des poids relatifs de chacun des deux objectifs irrigation et qualité. On simulera cette gestion sur des chroniques historiques, de façon à ajuster les coefficients et traduire les habitudes du gestionnaire du système NESTE. Ceci permettra de réaliser une aide à la décision en calculant tous les risques associés à une décision.

## 6.4 Analyse du système

### 6.4.1 Les équations d'évolution du système

$$S(t+1) = S(t) - L(t), L_{\max} \geq L(t) \geq 0 \quad (14)$$

$$\text{LOG } N(t) = a(t) + b(t) \text{LOG } N(t-1) + \sigma(t) \epsilon(t) \quad (15)$$

$$r_n(t) = r_n^*(t) + \text{Sup}[0, N(t) - 14 - r_n^*(t)] \quad (16)$$

$$r_n^*(t) = q_{\min} N \text{ ou } r_n^*(t) = q_{\text{obj}} N \quad (17)$$

$$L^*(t) = -r_g^*(t) + N(t) - r_n(t) - \gamma(t) D(t) + F(t) \quad (18)$$

$$\text{si } L_{\max} \geq L^*(t) \geq 0 \text{ alors } L(t) = L^*(t) \text{ et } r_g(t) = r_g^*(t) \quad (19)$$

$$\text{si } L_{\max} < L^*(t) \text{ alors } L(t) = L_{\max} \text{ et } r_g(t) = r_g^*(t) - L^*(t) + L_{\max}$$

$$\text{si } L^*(t) < 0 \text{ alors } L(t) = \text{INF}(0, [L^*(t) + q_{\text{obj}} G - r_g^*(t)]) \text{ et } r_g(t) = \text{INF}(r_g^*(t) - L^*(t), q_{\text{obj}} G)$$

Commentons ces équations :

### 6.4.2. L'état du système, commande et transitions

Appelons  $X(t) : \{S(t), N(t-1)\}$  l'état du système à la date  $t$ .

L'état  $X(t)$  caractérise l'ensemble des informations dont on dispose au début de la semaine  $t$  :

- on connaît le niveau des réserves  $S(t)$ , et l'équation (14) en donne l'évolution ;

- durant la semaine précédente, on a enregistré des apports de la NESTE à la valeur  $N(t-1)$ . Une étude hydrologique portant sur 15 années de données hebdomadaires a montré que le Log standardisé de ces apports suit un processus autorégressif d'ordre 1, ce que décrit l'équation (15) où  $\epsilon(t)$  est un bruit blanc à temps discret.

L'équation (16) est une équation de bilan à travers le canal de la NESTE dont la capacité de transfert est limitée à  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'équation (17) traduit que le débit réservé de la NESTE est de 3 ou  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'équation (18) écrit le bilan sur les rivières de Gascogne prenant en compte l'arrêt éventuel des irrigations si  $\gamma(t) = 0$  ; la répartition statistique de la demande  $D(t)$  a été étudiée sur treize années de mesures hebdomadaires obtenues à partir des mesures sur les périmètres d'irrigation que la CACG

conduit en régie, ainsi que celles des apports naturels agglomérés des rivières de Gascogne [G(t)]. On fait l'hypothèse que ces variables aléatoires sont indépendantes entre elles, et d'un pas de temps au suivant.

L'équation (19) indique que lorsque le lâcher possible  $L^*(t)$  est nul ou négatif on utilise les excès pour produire un  $r_g$  supérieur à la consigne jusqu'à  $q_{ob}G$  puis pour remplir les réservoirs, s'il excède la valeur  $L_{max}$  capacité maximale des vannes des barrages alors  $r_g$  est diminué de l'écart correspondant.

La commande  $[r_g^*(t), \gamma^*(t)]$  traduit l'action à entreprendre durant la semaine  $t$ . La règle de gestion stratégique définit donc une application telle qu'à chaque instant on fasse correspondre à un état  $X(t)$  une commande  $[r_g^*(t), \gamma^*(t)] = [r_g^*(X(t)), \gamma^*(X(t))]$  qui fournisse une solution optimale à l'équation (13) compte tenu du fonctionnement du système qui obéit aux équations (14) à (19). Le processus des états forme alors une chaîne Markovienne d'ordre 1 lorsque la commande par ce retour d'état est appliquée.

## 6.5 Résolution du problème par programmation dynamique stochastique

Posons :  $u(t) = [r_g(t), \gamma(t)]$

$$V[X(t_0)] = \text{Max } E \left\{ \sum_{t=t_0}^T [f_g(r_g^*(t)) - \text{PENALTY}(S_{\text{MIN}}(t) - S(t))^+] \right\} \quad (20)$$

Le maximum étant calculé sur  $u^*(t_0), u^*(t_0 + 1) \dots$

En remarquant que les fonctions sont en fait des fonctions de  $u^*(t)$ , le principe de Bellman permet de mettre cette équation sous la forme :

$$V[X(t_0)] = \text{Max} [E \{f_g(r_g^*(t)) - \text{PENALTY}(S_{\text{MIN}}(t) - S(t))^+ + V(X(t_0 + 1))\}] \quad (21)$$

Le maximum porte cette fois-ci sur  $u^*(t_0)$  que l'on exprime comme une fonction de  $X(t_0)$ . Par la suite, le calcul a été mené effectivement par la programmation dynamique stochastique complète avec discrétisation (24 heures de temps calcul sur micro-ordinateur type AT).

### 6.5.1 Le calcul numérique

#### 6.5.1.1 Discrétisation du vecteur d'état

KLEMES (1977a) a attiré l'attention sur les conséquences fâcheuses d'une discrétisation inappropriée du vecteur d'état pour les problèmes de gestion interannuelle (création parasite d'états absorbants sur la chaîne Markovienne des stocks).

Pour chaque pas de temps, les stocks ont ici été discrétisés en 21 niveaux depuis 0 jusqu'à 75 millions de  $m^3$ . Les apports de la NESTE ont été discrétisés en 7 niveaux correspondants aux valeurs  $-2, -0.98, -0.54, 0.00, 0.54, 0.98, 2$ , de la variable standardisée associée à la loi lognormale des apports de la NESTE au pas de temps considéré, c'est-à-dire correspondant aux probabilités 0.025, 0.16, 0.29, 0.5, 0.71, 0.84, 0.975. Le calcul des fonctions de

Bellman a été mené par interpolations linéaires à partir de cette grille de 147 points.

N'ont pas été mises en œuvre des méthodes plus raffinées et plus rapides de calcul qui utilisent des propriétés de dérivabilité de la fonction de Bellman (WASIMI et KITANIDIS, 1984 ; KITANIDIS, 1987 ; FOUFOULA-GEORGIU et KITANIDIS, 1988).

#### 6.5.1.2 Recherche de la commande optimale et calculs d'espérance

Pour le calcul de l'espérance mathématique, on a utilisé 5 niveaux de discrétisation pour la demande ainsi que pour la partie inconditionnelle des apports de la NESTE.

Pour la demande, on a choisi cinq valeurs équiprobables correspondant aux quartiles 18 %, 36 %, 50 %, 68 % et 86 %. Pour la Gaussienne servant à calculer l'innovation des apports de la NESTE, on a pris les valeurs  $-1.83$ ,  $-0.89$ ,  $0.00$ ,  $0.89$ ,  $1.83$ , avec les probabilités respectives  $0.0668$ ,  $0.2477$ ,  $0.3710$ ,  $0.2477$ ,  $0.0668$ .

La recherche de la commande optimale s'effectue pour chaque pas de temps par une recherche itérative par essais et erreurs qui permet de trouver le soutirage optimal. On choisit la consigne qui donne l'optimum de la fonction de Bellman. La figure 6 indique la règle de gestion stratégique obtenue à  $t = 9$  (mi-août) avec la valeur de PENALTY fixée à 1 et  $SMIN(t)$  linéaire par morceaux. Celle-ci se présente comme une surface paramétrée par les valeurs du stock encore présent dans les réserves et du niveau de la NESTE.

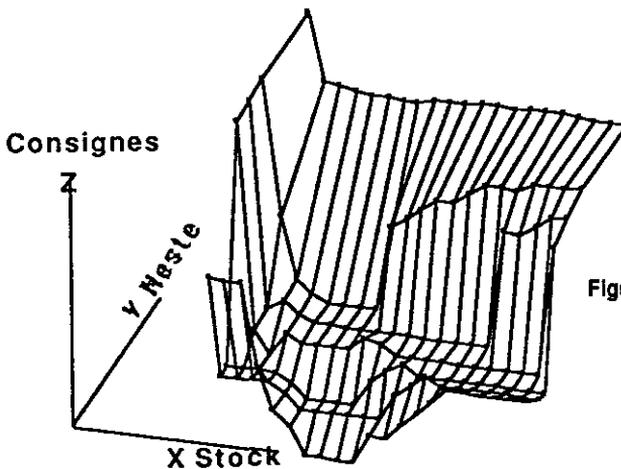


Figure 6 Règle de Gestion pour  $t=9$  (Mi-Août).

Operation rule for  $t=9$  (Middle of August).

## 10 - ETUDE DE LA GESTION SUR LES CHRONIQUES PASSÉES

L'étude de la gestion sur les données réelles des années de 75 à 85 peut être entreprise pour les deux gestions proposées.

### 10.1 Année humide du type 1977

L'étiage de la NESTE se produit tard dans la saison et la demande en irrigation est extrêmement faible. Le débit  $r_g$  à l'exutoire (en pointillé sur le graphe de la figure 7) des coteaux de Gascogne suit une évolution généralement très supérieure à la consigne (en trait plein) pour les deux méthodes auxquelles cette année d'abondance hydraulique ne pose aucun problème (ni en terme de stock comme on le voit sur la figure 8).

### 10.2 Année normale du type 1980

L'étiage de la NESTE se produit plus tôt dans la saison et, pour le modèle analytique le débit  $r_g$  à l'exutoire de Gascogne en subit le contre-coup, quittant alors sa trajectoire, jusque-là parallèle au lâcher, pour tendre vers son minimum tandis que se produit le maximum de demande pour l'irrigation et que le lâcher fournit le maximum de ressources (voir figures 9 et 10). Il restera néanmoins suffisamment d'eau dans les réserves pour permettre de relever les valeurs de  $r_g$  en fin d'étiage lorsque s'atténue la demande en irrigation. Le modèle synthétique n'accuse pas ce type de comportement à la période 10.

### 10.3 Année sèche du type 1985

En 1985, alors que les précipitations sont normales jusqu'en Juin, elles sont de plus en plus déficitaires à partir de Juillet et exceptionnellement faibles en Septembre. En conséquence, on observe une chute brutale des débits en fin d'été (fig. 12) tandis que les records de consommation pour l'irrigation dans les vallées du Lannemezan sont battus. Le modèle analytique réagit plus violemment à ces conditions que le modèle synthétique. Les modèles de gestion que nous proposons auraient donc, comme le montre la figure 11, en premier lieu abaissé le débit  $r_g$  de salubrité sur la sortie des rivières de Gascogne à sa valeur plancher, puis, en fin d'été, transgressé cette valeur et finalement limité les irrigations sur la fin de l'étiage pour améliorer la satisfaction des demandes de salubrité sur les coteaux de Gascogne.

## 11 - CONCLUSIONS

Le problème de la stratégie de gestion d'un système de transfert d'eau en vue de l'irrigation et du maintien de la salubrité en avenir incertain peut être résolu par un modèle classique de décision séquentielle par programmation dynamique dont un certain nombre de paramètres sont à caler. Il peut faire l'objet d'une gestion par courbe objectif de vidange.

Ayant appliqué ces modèles au cas concret de la gestion du système NESTE, on constate les faits suivants.

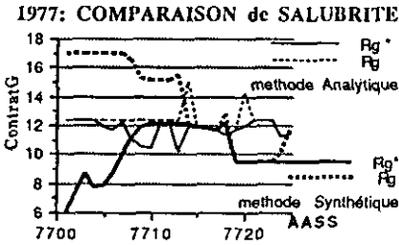


Figure 7  $R_g(t)$  en année humide.  
 $R_g(t)$  for a wet year.

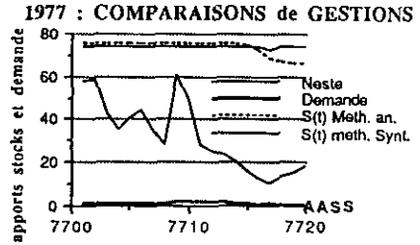


Figure 8  $S(t)$  en année humide.  
 $S(t)$  for a wet year.

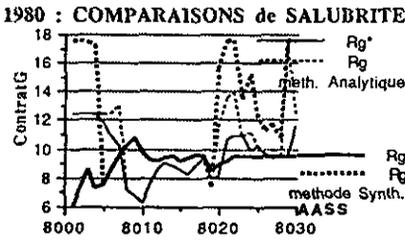


Figure 9  $R_g(t)$  en année normale.  
 $R_g(t)$  for a normal year.

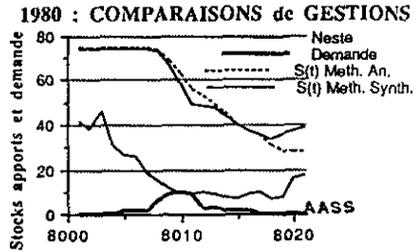


Figure 10  $S(t)$  en année normale.  
 $S(t)$  for a normal year.

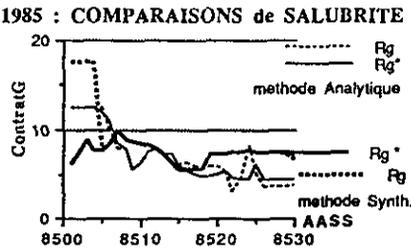


Figure 11  $R_g(t)$  en année sèche.  
 $R_g(t)$  for a dry year.

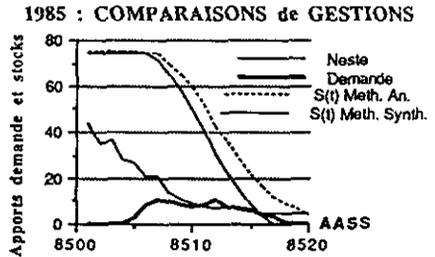


Figure 12  $S(t)$  en année sèche.  
 $S(t)$  for a dry year.

1) L'apport quantitatif majeur est de permettre au gestionnaire d'exposer ses objectifs et de définir les défaillances de façon rationnelle, puis de rechercher une règle d'opération optimale réalisant l'adéquation de la gestion aux objectifs ainsi définis. Il faut bien sûr nuancer cette conclusion car les hypothèses de modélisation adoptées et les incertitudes portant sur le modèle hydrologique lui-même influent directement sur les résultats obtenus. KLEMES (1978) a d'ailleurs parfaitement illustré que l'importance des distorsions engendrées pouvait atteindre l'ordre de grandeur des résultats calculés. En plus de l'étude détaillée des simulations sur données historiques, le gestion-

naire du système NESTE a donc démarré une phase de validation sur le terrain des consignes d'opérations obtenues par le modèle d'optimisation.

2) Les deux modèles fournissent des résultats analogues sur le cas de la NESTE. On voit ainsi que, sous des abords théoriques très différents, se dissimulent des modes de raisonnements voisins ; fondamentalement les 2 méthodes procèdent en effet de la même manière :

- détermination de la commande optimale sur un certain nombre de semaines générée dans le cadre de la programmation dynamique ou en suivant une courbe de vidange type ;

- nécessité de déterminer un paramètre de compromis (PENALTY,  $VL_1$ ) pour chacune des méthodes par simulation sur des scénarios d'apports et calculs de critères multiples de performance de la gestion obtenue.

3) Les techniques de programmation dynamique en avenir incertain, outre leur intérêt opérationnel classique de procurer une règle en boucle fermée fonction des informations du gestionnaire sur l'état du système, peuvent aussi être utilisées pour calculer directement un faisceau d'indices de gestion, véritable tableau de bord conditionnel à la trajectoire optimale future. Si on utilise la méthode avec courbe objectif de vidange de tels indices doivent être obtenus par simulation. Sur les 15 années d'historique le premier type de gestion fournit des résultats un peu plus lisses (selon la somme des carrés des écarts à la consigne optimale constante calculée a posteriori sur la saison) que la seconde méthode. Du point de vue opérationnel, les deux méthodes proposent une aide à la décision en parallèle et un examen détaillé des conditions de fonctionnement du système est effectué lorsque les résultats qu'elles fournissent divergent trop.

4) De tels modèles procurent certes un outil d'aide à la décision mais ne réalisent pas le miracle de surmonter les difficultés rencontrées à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle telle celle de 1976 ou 1985. En d'autres termes, le meilleur modèle de gestion stratégique ne peut pas créer de ressources additionnelles en eau... par contre les modèles exposés dans cet article permettent d'allouer de façon plus rationnelle les richesses en eau au cours de la saison et de rendre plus clairs les arbitrages décisionnels du gestionnaire d'un système de gestion de ressources en eau.

## 11 - REMERCIEMENTS

La recherche exposée dans cet article a été financée par le Ministère de l'Agriculture, le Secrétariat d'Etat à l'Environnement et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Elle a donné lieu à un rapport de synthèse (CACG, 1989), qui a fait l'objet d'une large concertation ; le système de gestion stratégique a été implanté sur le terrain et validé au cours des campagnes d'irrigation 1989-1990. Nous sommes heureux d'avoir bénéficié des conseils de A. TURGEON pour la modélisation de système en vue de la gestion stratégique. Nous remercions aussi les deux réviseurs anonymes pour leurs commentaires de fond et les modifications de forme qu'ils nous ont suggérées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASKEW J.A., 1974. Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability constraint. *Water Resources Research*, 10 (1) : 51-56.
- BURAS N., 1972. Scientific allocation of water resources. Elsevier, N. Y.
- BHASKAR N., WHITLATCH R., 1987. Comparison of reservoir linear operation rules using linear and dynamic programming. *Water Resources Research*, 23 (6) : 1027-1036.
- BOUZEIDI A., 1985. Réponse des rendements à l'eau. *Résumé du bulletin FAO (33). Cahier du CRGR*. Paris.
- CACG, sept 1989. Gestion des eaux du système NESTE, *Rapport technique*, Tarbes.
- COLLETER P., DELEBECQUE F., FALGARONE F., QUADRAT J.P., 1978. E.D.F., application du contrôle stochastique à la gestion des moyens de production d'énergie en Nouvelle Calédonie. « *E.D.F. bulletin de la direction des études et recherche* », Série C. Mathématiques Informatique : 1-28.
- DATTA B., BURGESS S.J., 1984. Short term, single, multiple-purpose reservoir operation : importance of loss functions and forecast errors. *Water Resources Research* : 20 (9) : 1167-1176.
- DODU J.C., GOURSAT M., HERTZ A., QUADRAT J.P., VIOT M., 1981. Méthodes de gradient stochastique pour l'optimisation des investissements dans un réseau électrique. *Bulletin E.D.F.*, 2 : 133-164.
- FANG Z.X., VORON B., BOCQUILLON C., 1989. Programmation dynamique : application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation, *Hydrolo. Sci. J.*, 34 (4) : 415-424.
- FRASER N.M., HIPEL K.W., 1984. *Conflict analysis : models and resolutions*, Elsevier, N.Y.
- FOUFOULA-GEORGIU E., KITANIDIS P.K., 1988. Gradient dynamic programming for stochastic optimal control of multidimensional water resources systems, *Water Resources Research*, 24 (8) : 1345-1359.
- GOICOECHEA A., HANSEN D.R., DUCKSTEIN L., 1982. *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*, Wiley, J.
- GOUSSEBAILLE J., ROCHE P.A., 1988. Monte-Carlo simulation for stochastic dynamic programming. A case study : the Seine reservoir daily operation. *Document technique CERGRENE* : 1-8.
- HASHIMOTO T., STEDINGER J.R. and LOUCKS D.P., 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18 (1) : 14-20.
- HOUGHTALEN R.J., LOFTIS J.C., 1988. Irrigation water delivery system operation via aggregate state dynamic programming. *Water resources bulletin*, 24 (2) : 427-434.
- KITANIDIS P.K., 1987. A first order approximation to stochastic optimal control of reservoir. *Stochastic hydraulics & hydrology*, 1 : 169 : 194.
- KLEMES V., 1977. Discrete representation of storage for stochastic reservoir optimization. *Water Resources Research*, 13 (1) : 149-158.
- KLEMES V., 1977. Value of information in reservoir optimization. *Water Resources Research*, 13 (5) : 837-850.
- KRZYSZTOFOWITCZ R., 1982. Utility criterion for water supply : Quantifying value of water an risk attitude. *Decision making for hydrosystems : Forecasting and operation*, (Ed T. Unny and E. Mc. Bean, Water resources Publications) : 43-62.
- MASSE P., 1946. Les réserves et la régulation de l'avenir, *Herrman*.
- MASSE P., 1959. Le choix des investissements, *Dunod*.
- MERGOS G.J., 1987. Evaluation of irrigation project under uncertainty : a symmetric quadratic programming approach. *Water Resources Management*, (1) : 45-56.
- PLATE E., DUCKSTEIN L., 1988. Reliability-based design concepts in hydraulic engineering. *Engineering reliability and risk in water resources*, Ed L. Duckstein and E. J. Plate, M. Nijhoff Publishers, NATO-ASI series) : 27-60.

- RICHARD D., TURGEON A., 1988. Analyse de contraintes probabilistes dans la gestion d'un système hydroélectrique. *Revue des sciences de l'eau*, 3 : 171-178.
- ROY B., 1985. Methodologie multicritère d'aide à la décision. *Economica*.
- SIGVALDASON O. T., 1976. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research*, 12 (2) : 263-278.
- SIMONOVIC S. P., ORLOB T. G., 1984. Risk-reliability programming for optimal water quality control. *Water Resources Research*, 20 (6) : 639-646.
- SNIEDOVITCH, M., 1979. Reliability constrained reservoir control problems : 1. Methodological issues. *Water Resources Research*, 15 (6) : 1574-1582.
- SNIEDOVITCH M., 1980. A variance constrained problem. *Water Resources Research*, 16 (2) : 271-274.
- SZIDAROVSKI F., Duckstein L., 1986. Dynamic multiobjective optimization : A framework with application to regional water and mining management. *E. J. O. R.*, 24: 305-317.
- THOMAS A., REVELLE R., 1966. On the efficient use of high Aswan dam for hydropower and irrigation. *Management Science*, 8 (4).
- TURGEON A., 1980) Optimal operation of multireservoir power systems with stochastic inflows. *Water Resources Research*, 16 (2) : 275-283.
- WASIMI S. A., KITANIDIS P. K., 1983. Real time forecasting and daily operation of a system of reservoir under flood conditions using linear quadratic gaussian stochastic control. *Water Resources Research*, 19 (6) : 1511-1522.
- YAKOWITZ S., 1982. Dynamic programming applications in water resources. *Water Resources Research*, 18 (4) : 673-696.
- YACIZIL H., HOUCKS M., TOEBES G. H., 1983. Daily operation of a multipurpose reservoir system. *Water Resources Research*, 19 (1) : 1-13.
- YEH W.W.G., 1985. Reservoir management and operations models : a state of art review. *Water Resources Research*, 21 (12) : 1797-1818.