Document generated on 05/25/2025 12:13 a.m.

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Logique floue Appliquée à la gestion à long terme des ressources en eau
Fuzzy Logic Applied To Long Term Management Of Water Resource Systems

R. M. Faye, S. Sawadogo and F. Mora-Camino

Volume 15, Number 3, 2002

URI: https://id.erudit.org/iderudit/705470ar
DOI: https://doi.org/10.7202/705470ar

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

Faye, R. M., Sawadogo, S. & Mora-Camino, F. (2002). Logique floue Appliquée à la gestion à long terme des ressources en eau. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *15*(3), 579–596. https://doi.org/10.7202/705470ar

Article abstract

Since the origins of history, irrigation of agricultural lands has been reported to be an activity of great concern for many human societies. At the beginning, natural irrigation systems such as the Nile River flowing through the sands of Egypt have provided to neighbouring populations some amenities in their hard life. However irregular cycles of floods and droughts were a serious impediment to permanent settlements and to a continuous improvement of life conditions. Consequently human ingenuity has been continuously challenged by the development of new ways and means to master water resource system (WRS).

During the last century, improved civil engineering techniques and the development of digital control systems and techniques have dramatically increased the power of human societies over their water resources. However many problems, which received some attention in the past, now require new approaches, given the steady increase in water demand and the introduction of environmental conservation considerations. Today, intelligent systems techniques appear to be able to give some insight in this direction by improving the efficiency of the different decision steps involved in the management and control of such systems. This paper focuses on the problem of the long-term management of a water resource system composed of a network of dams and river reaches. This system is viewed as a hybrid dynamic system, called here a storage/transfer/distribution system. The main long-term management objective of such a system is to manage reserves and releases so as to minimise the deficit between supply and demand by taking into account predictions of demand and contributions.

Thus, in the present context of water resource scarcity, a complete approach for long-term management of a storage/transfer/distribution system is proposed. To take into account major uncertainties related to the operations of this kind of system, a sliding horizon approach (it consists of readjusting each week the release plan over the whole coming year, according to the present reserves, the most recent long-term demand estimation and the programmed release for the next week). In addition, an adaptation procedure of weighting parameters of the minimisation criterion based on fuzzy logic is implemented. The definition of an optimisation objective function is in this case a very intricate question since it involves competition, uncertainty and geographical dispersion. However, it is crucial to guarantee the quality of long-term management. This is why Fuzzy Logic is used as a particularly appropriate means to refine on-line the formulation of the objective function of the recurrent optimisation problem. Fuzzy Logic is also shown to be very useful in defining what is at stake in the long-term management. This criterion adaptation concept seems judicious, in view of the difficulty of defining the weighting parameters of such optimisation problems and their influence on the relevant solution obtained.

The long-term management problem is solved with improved heuristics using linear programming and dynamic programming in order to reduce the effects of spatial discretisation, which is so restrictive in this context. The suggested approach is applied to a case study, which highlights its relative simplicity of implementation.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2002

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, Rev. Sci. Eau 15/3(2002) 579-596

Logique floue appliquée à la gestion à long terme des ressources en eau

Fuzzy logic applied to long term management of water resource systems

R.M. FAYE [1] *, S. SAWADOGO [1], F. MORA-CAMINO [2]

Reçu le 5 janvier 2001, accepté le 16 avril 2002**.

SUMMARY

Since the origins of history, irrigation of agricultural lands has been reported to be an activity of great concern for many human societies. At the beginning, natural irrigation systems such as the Nile River flowing through the sands of Egypt have provided to neighbouring populations some amenities in their hard life. However irregular cycles of floods and droughts were a serious impediment to permanent settlements and to a continuous improvement of life conditions. Consequently human ingenuity has been continuously challenged by the development of new ways and means to master water resource system (WRS).

During the last century, improved civil engineering techniques and the development of digital control systems and techniques have dramatically increased the power of human societies over their water resources. However many problems, which received some attention in the past, now require new approaches, given the steady increase in water demand and the introduction of environmental conservation considerations. Today, intelligent systems techniques appear to be able to give some insight in this direction by improving the efficiency of the different decision steps involved in the management and control of such systems. This paper focuses on the problem of the long-term management of a water resource system composed of a network of dams and river reaches. This system is viewed as a hybrid dynamic system, called here a storage/transfer/distribution system. The main long-term management objective of such a system is to manage reserves and releases so as to minimise the deficit between supply and demand by taking into account predictions of demand and contributions.

1. Université Cheikh Anta Diop, École supérieure polytechnique, BP 5085 Dakar, Sénégal.
2. Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS), 7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse, France.

* Correspondance. E-mail : rmfaye@ucad.sn

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2003.

Thus, in the present context of water resource scarcity, a complete approach for long-term management of a storage/transfer/distribution system is proposed. To take into account major uncertainties related to the operations of this kind of system, a sliding horizon approach (it consists of readjusting each week the release plan over the whole coming year, according to the present reserves, the most recent long-term demand estimation and the programmed release for the next week), in addition to, an adaptation procedure of weighting parameters of the minimisation criterion based on fuzzy logic is implemented. The definition of an optimisation objective function is in this case a very intricate question since it involves competition, uncertainty and geographical dispersion. However, it is crucial to guarantee the quality of long-term management. This is why fuzzy logic is used as a particularly appropriate means to refine on-line the formulation of the objective function of the recurrent optimisation problem. Fuzzy logic is also shown to be very useful in defining what is at stake in the long-term management. This criterion adaptation concept seems judicious, in view of the difficulty of defining the weighting parameters of such optimisation problems and their influence on the relevant solution obtained.

The long-term management problem is solved with improved heuristics using linear programming and dynamic programming in order to reduce the effects of spatial discretisation, which is so restrictive in this context. The suggested approach is applied to a case study, which highlights its relative simplicity of implementation.

Key-words: *water resources management, modelling, optimisation, fuzzy logic.*

RÉSUMÉ

Dans le contexte de la rareté des ressources en eau, une approche globale de la gestion à long terme d'un système de stockage/transfert/distribution d'eau est proposée. L'objectif principal de la gestion d'un tel type de système est de gérer les réserves et les délestages de manière à minimiser les écarts entre offre et demande, ceci à partir d'une prédiction de la demande et des apports.

Ainsi, on propose une approche à horizon glissant et surtout une procédure d'adaptation des pondérations du critère fondée sur la logique floue. Cette notion d'adaptation du critère paraît tout à fait judicieuse quand on connaît la difficulté de définir les pondérations de tels problèmes d'optimisation et son influence sur la pertinence de la solution obtenue. On vérifie ici l'apport essentiel de la logique floue qui permet d'appréhender finement les enjeux en présence dans la gestion de long terme du système stockage/transfert/distribution d'eau.

Le problème de gestion à long terme est résolu par une heuristique améliorée utilisant la programmation linéaire et la programmation dynamique pour réduire les effets de la discrétisation spatiale qui est si limitative dans ce contexte.

L'approche de gestion proposée est effectivement appliquée à un cas d'étude qui permet de mettre en évidence sa relative simplicité de mise en œuvre.

Mots clés : *gestion des ressources en eau, modélisation, optimisation, logique floue.*

1 - INTRODUCTION

La gestion optimale des opérations d'un système de stockage/transfert/distribution d'eau (STDE) est une tâche complexe depuis que l'agriculture irriguée est devenue une activité très importante pour les sociétés humaines. C'est pourquoi ces sociétés ont déployé des efforts et de l'ingéniosité, grâce à l'évolution des techniques du génie civil et l'avènement de l'ère informatique, pour maîtriser les ressources en eau.

Plusieurs méthodes mathématiques ont été développées dans le domaine de la gestion des ressources en eau et des systèmes de génération d'énergie hydroélectrique. YEH (1985) a présenté un état de l'art en la matière. Une approche empirique de gestion des ressources en eau est proposée par (LEBDI *et al.*, 1997). Des modèles issus des techniques de la recherche opérationnelle portant sur la gestion dans le court terme des systèmes de génération d'énergie hydroélectrique (TURGEON, 1980 ; YEH *et al.*, 1992 ; RAMESH *et al.*, 2000) sont disponibles dans la littérature. Par exemple, YAKOVITZ (1982) a appliqué la programmation dynamique à la gestion des ressources en eau. Cette technique de programmation séquentielle (BELLMAN, 1957) doit son succès dans le domaine d'application étudié ici à sa capacité à intégrer les non linéarités et les aspects stochastiques du système.

Aujourd'hui, suivant les différentes échelles de temps et d'espace considérées, la gestion des systèmes STDE distingue plusieurs niveaux :

- la gestion stratégique qui appréhende le système dans sa globalité sur le long terme. Elle concerne la gestion des réserves de la ressource en eau et consiste à définir une stratégie de répartition de l'eau sur une base annuelle en fonction de l'état des réserves initiales, des conditions climatiques passées et actuelles, des contraintes environnementales et techniques liées à l'infrastructure installée ;
- la gestion tactique qui peut distinguer plusieurs sous-systèmes et qui se place dans le court terme. Elle concerne l'affectation des ressources aux différents usagers conformément à la politique définie par la gestion stratégique (FAYE *et al.*, 1999) ;
- la gestion temps réel ou régulation qui vise à satisfaire les objectifs de distribution définis par la gestion tactique (MALATERRE *et al.*, 1998).

Une approche intégrée de gestion considérant aussi bien le long terme que le court terme a été proposée dans (FAYE, 1999).

Cependant quelles que soient les approches proposées, plusieurs problèmes subsistent :

- la quantification de l'objectif de gestion (MERGOS, 1987 ; FANG *et al.*, 1989) ;
- la modélisation de l'aspect multi-objectif de la gestion (PARENT *et al.*, 1991).

L'approche proposée ici, dans le cas de la gestion à long terme, est basée sur la génération adaptative d'un plan de délestage par la résolution en ligne d'un problème d'optimisation dont les données sont recalées chaque semaine

sur de nouvelles conditions initiales pour l'état du système, et sur de nouvelles prévisions de long terme en ce qui concerne la demande et les apports. La définition de la fonction objectif est dans ce cas une question très complexe puisqu'on est dans un contexte de compétitivité en ce qui concerne la ressource et confronté à la dispersion géographique, aux aléas de la demande et des apports. Néanmoins, il est crucial de garantir la qualité de la gestion à long terme, c'est pourquoi cet article traite de la logique floue comme un outil particulièrement adéquat pour ajuster en ligne la formulation de la fonction objectif du problème récurrent d'optimisation. Ce problème d'optimisation est résolu par une heuristique améliorée mettant en œuvre la programmation linéaire et la programmation dynamique dans le but de réduire les effets de la discrétisation spatiale qui sont si restrictifs.

L'approche proposée est appliquée à une étude de cas pour son illustration et sa structuration.

2 – MODÉLISATION D'UN SYSTÈME STDE POUR LA GESTION À LONG TERME

La structure du système STDE peut être représentée par un graphe sans circuits (*figure 1*) où les sommets sont constitués par des barrages amonts ou intermédiaires, des jonctions de canaux, des points de sortie et les arcs sont représentés par les biefs. Ainsi, le modèle mathématique utilisé pour gérer les réserves et les apports sur le long terme doit être capable de représenter leur évolution hebdomadaire. Il est composé de :

– l'évolution des réserves au niveau des barrages :

$$S_i^k(\ell+1) = \left[1-\rho_i^k(\ell)\right]S_i^k(\ell) - \sum_{j\in\Gamma_i} Q_j^k(\ell) - P_i^k(\ell) - d_i^k(\ell) + A_i^k(\ell) \qquad (1)$$

où $\quad i \in X_A \vee X_B$

et $$d_i^k(\ell) = \max\left\{0, S_i^{\max} - \left[\left[1-\rho_i^k(\ell)\right]S_i^k(\ell) - \sum_{j\in\Gamma_i} Q_j^k(\ell) - P_i^k(\ell) + A_i^k(\ell)\right]\right\}$$

– les équations de conservation en chaque sommet j du graphe :

$$\sum_{i\in\Gamma_j^{-1}} q_{ij}^k(\ell) + \sum_{i\in A_j} A_i^k(\ell) = \sum_{i\in\Gamma_j} q_{ji}^k(\ell) + \sum_{i\in P_j} P_i^k(\ell) \qquad j\in X_C \qquad (2)$$

avec : $$A_j^k(\ell) = \sum_{i\in\Gamma_j^{-1}} q_{ij}^k(\ell) + a_j^k(\ell) \text{ et } Q_j^k(\ell) = \sum_{i\in\Gamma_j} q_{ji}^k(\ell)\ j \in X_B$$

à ces équations, on rajoute les contraintes de capacité concernant les volumes, les réserves, les apports, les prélèvements et les déversements :

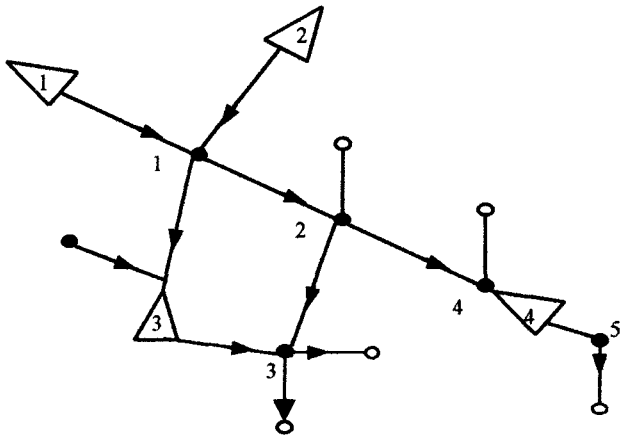

Figure 1 Représentation par un graphe orienté d'un réseau de collecte/distribution.

Network representation for a water resource system by an ordered graph.

$$\left.\begin{aligned} & q_u^{\min} \le q_u^k(\ell) \le q_u^{\max} \forall u \in U \\ & 0 \le S_i^k(\ell) \le S_i^{\max} \\ & q_{ij}^k(\ell) \le 0, a_j^k(\ell) \le 0 \\ & 0 \le P_i^k(\ell) \le P_i^{\max} \\ & 0 \le d_i^k(\ell) i \in X_B \cup \{P_j, j \in I\} \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

où X_B est l'ensemble des sommets des barrages intermédiaires, X_C est l'ensemble des sommets des jonctions de canaux, U est l'ensemble des arcs ou liaisons, I est l'ensemble des points de pompages intermédiaires, $S_i^k(\ell)$ est le volume de la réserve dans le barrage *i* à l'instant *k* pour le début de la semaine ℓ, $Q_j^k(\ell)$ est le volume lâché du barrage *j* à l'instant *k* pour la semaine ℓ, $P_i^k(\ell)$ est le volume d'eau à mettre à la disposition du groupe d'utilisateurs *i* à l'instant *k* durant la semaine ℓ, $A_i^k(\ell)$ est le volume des apports au barrage *i*, prévu en début de semaine *k* pour la semaine ℓ, $d_i^k(\ell)$ est le déversement du barrage *i* à l'instant *k* pour la semaine ℓ et $\rho_i^k(\ell)$ est le coefficient de perte estimé à l'instant *k* pour la période ℓ, $q_{ji}^k(\ell)$ est le volume d'eau entrant dans le bief *i* à partir du barrage *j* à l'instant *k* pendant la période ℓ, $q_{ij}^k(\ell)$ est le volume d'eau entrant dans le barrage *j* à partir du bief *i* à l'instant *k* pendant la période ℓ, $a_j^k(\ell)$ est l'apport indépendant pour le barrage *j* à l'instant *k* pendant la période ℓ et Γ_j, Γ_j^{-1}, P_j, A_j sont définis sur la *figure 2*.

Cette approche de modélisation conduit à représenter l'ensemble du système par un modèle linéaire qui se prête à l'utilisation de techniques d'optimisation, une fois qu'a été défini un critère à optimiser. Il faut noter cependant qu'elle ne prend pas en compte de façon adéquate, lorsque l'on pense à un système de distribution satisfaisant des demandes finement localisées dans l'espace et dans le temps, deux aspects interdépendants :

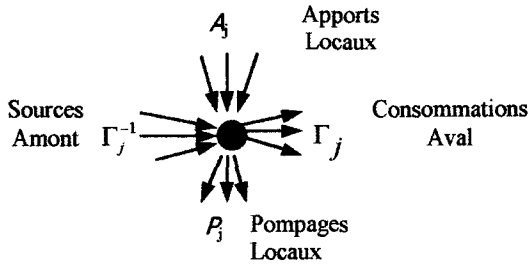

Figure 2 Organisation des flux au niveau d'un point de connexion.
Flow balance at a water resource system connection.

- la distribution de la ressource en eau tout au long des biefs et canaux ;
- les temps de transfert le long des canaux qui ne sauraient être des multiples de périodes égales à une ou plusieurs semaines.

3 - DÉFINITION DU PROBLÈME RÉCURRENT D'OPTIMISATION

Traditionnellement, l'approche utilisée pour élaborer la programmation à long terme consiste à définir une courbe dite de « délestage », en se basant sur les données statistiques concernant plusieurs années de demande en eau des usagers à l'aval et d'apports d'eau en amont. Cette approche suppose de faibles variations par rapport au comportement moyen de l'offre et des apports au cours de l'année. En fait, les activités humaines peuvent évoluer notablement d'une année à l'autre et la météorologie peut présenter de forts aléas d'une année à l'autre. Ainsi, l'approche proposée ici (*figure 3*) est basée sur la génération adaptative d'un plan de délestage, par résolution en ligne d'un problème récurrent d'optimisation (PRO), dont les données d'entrées/sorties (*figure 4*) sont recalées à chaque semaine sur de nouvelles conditions initiales pour l'état du système et, sur de nouvelles prévisions de long terme, en ce qui concerne demande et apports (FAYE, 1999). On s'attache alors à formuler un tel problème de façon à faire apparaître à la fois :

- *les contraintes opérationnelles* de long terme (équations 1 à 3) ;
- *les objectifs à atteindre* en ce qui concerne la satisfaction de la demande et la gestion des réserves. Dans ce cas il s'agira de regrouper dans un unique critère l'évaluation des excès et des déficits de demande répartis tout au long du système de distribution pendant la période de long terme considérée.

La solution d'une instance du problème PRO_k à l'instant k, donnera les valeurs de référence des volumes hebdomadaires à lâcher par les barrages pour minimiser, au niveau annuel, le déficit entre la demande et le pompage, compte tenu des informations disponibles au début de la semaine k. Celui-ci peut être mis sous une forme compatible avec l'utilisation de la programmation dynamique :

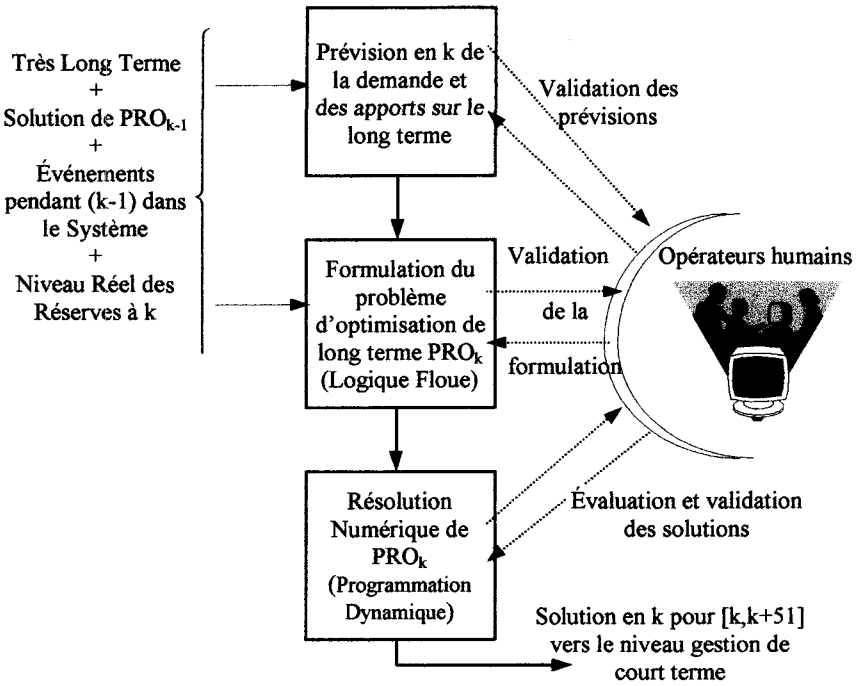

Figure 3 Organisation modulaire de la gestion de long terme.
Long-term water resource system management structure.

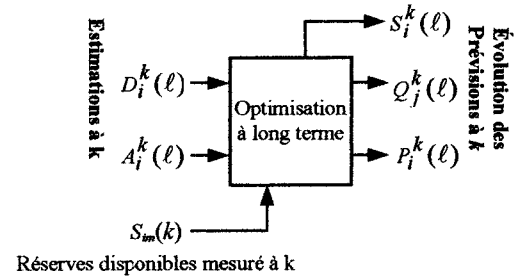

Figure 4 Entrées/Sorties du problème d'optimisation.
Input/Output of the optimisation problem.

Problème PRO$_k$:

$$\min_{Q_i^k(\ell)P_i^k(\ell)} \sum_{\ell=k}^{k+51} \sum_{i \in U} \varphi_{k\ell}^i \left(D_i^k(\ell), P_i^k(\ell) \right) \tag{4}$$

sous les contraintes :

$$S_i^k(\ell+1) = \left[1 - \rho_i^k(\ell)\right] S_i^k(\ell) - \sum_{j \in \Gamma_i} Q_j^k(\ell) - P_i^k(\ell) - A_i^k(\ell) \quad k \le \ell \le k+51, i \in B \tag{5}$$

$$S_i^k(\ell) = S_{im}^k \; i \in B \tag{6}$$

$$\sum_{i\in\Gamma_j^{-1}} q_{ij}^k(\ell) + \sum_{i\in A_j} A_i^k(\ell) = \sum_{i\in\Gamma_j} q_{ji}^k(\ell) + \sum_{i\in P_j} P_i^k(\ell) \quad k \le \ell \le k+51 \tag{7}$$

$$0 \le Q_j^k(\ell) \le Q_j^{max} \qquad j\in\Gamma_i,\ k \le \ell \le k+51 \tag{8}$$

$$S_i^{min} \le S_i^k(\ell) \le S_i^{max} \qquad i\in B,\ k \le \ell \le k+51 \tag{9}$$

$$0 \le d_i^k(\ell) \qquad i\in B,\ k \le \ell \le k+51 \tag{10}$$

$$0 \le P^k{}_i(\ell), \le P^{max}{}_i \qquad i\in \bigcup_{j\in I\cup B} P_j,\ k \le \ell \le k+51 \tag{11}$$

$$S^k{}_i(k+51) \ge S^k{}_{i\,min} \qquad i\in B \tag{12}$$

où P_j est l'ensemble des pompages associés au point j, i est un indice représentant un groupe d'utilisateurs $i\in U$ avec $U = \bigcup_{j\in I\cup B} P_j$, A_j est l'ensemble des sources d'apports directs au point i, B est l'ensemble des indices associés aux barrages présents dans le système, $S^k_{i\,min}(\ell)$ est le volume minimum admis pour la réserve du barrage i en fin de période finale courante à $\ell = (k + 51)$. L'équation (6) impose les conditions initiales des réserves, où S^k_{im} est la réserve mesurée en début de semaine k. La contrainte (12) permet de prendre en compte le volume minimal admis dans le barrage en fin de période finale.

3.1 Spécification de la fonction objectif

L'écriture de l'expression (4) présuppose que l'on a adopté l'hypothèse de séparabilité dans l'espace (indice i) et dans le temps (indice ℓ) des effets des pénuries et des excès d'eau. On suppose ici que tout déficit est pénalisant pour l'usager tandis que l'excès, dans un contexte de pénurie, est caractéristique du gaspillage. Ainsi, la fonction $\varphi^i_{k\ell}(D^k_i(\ell), P^k_i(\ell)$ devra satisfaire aux propriétés suivantes pour pénaliser progressivement, à la fois les déficits et les excédents d'eau, à mesure que ceux-ci augmentent :

Propriété 1 : $\varphi^i_{k\ell}(D^k_i(\ell), p)$ admet un minimum nul $p = \min\{D^k_i(\ell), P^i_{max}\}$;

Propriété 2 : $\varphi^i_{k\ell}(D^k_i(\ell), p)$ est décroissante pour $0 \le p \le \min\{D^k_i(\ell), P^i_{max}\}$;

Propriété 3 : $\varphi^i_{k\ell}(D^k_i(\ell), p)$ est croissante pour $\min\{D^k_i(\ell), P^i_{max}\} \le p \le P^i_{max}$.

En fait, le segment $[0, D^k_i(\ell)]$ représente le côté des usagers puisqu'ils sont concernés directement par le déficit d'eau, tandis que le segment $[D^k_i(\ell), P^i_{max}]$ représente le côté gestionnaire puisqu'il doit économiser les réserves en situation de pénurie (*figure 5*). Pourtant, excès et déficits n'ont pas des effets symétriques sur les performances du système (aussi bien côté usager que côté gestionnaire). On s'attendra plutôt à mettre en œuvre des fonctions unimodales dissymétriques telles que :

$$\varphi^i_{k\ell}\left(D^k_i(\ell),p\right)=\gamma^k_{i\ell}D^k_i(\ell)\left[1-\left(p/D^k_i(\ell)\right)^{\gamma^k_{i\ell}}\right],\ \text{si } 0\le p\le D^k_i(\ell)\ \ \gamma^k_{i\ell}\ge 1 \qquad (13)$$

et

$$\varphi^i_{k\ell}\left(D^k_i(\ell),p\right)=\beta^k_{i\ell}D^k_i(\ell)\left[\left(p/D^k_i(\ell)\right)^{\beta^k_{i\ell}}-1\right],\ \text{si } D^k_i(\ell)\le p\le P^i_{\max}\ \ \beta^k_{i\ell}\ge 1 \qquad (14)$$

qui ne dépendent que d'un seul paramètre ($\gamma^k_{i\ell}$ ou $\beta^k_{i\ell}$) restant à être déterminé. Ces fonctions semblent être de bons candidats pour exprimer les objectifs de gestion.

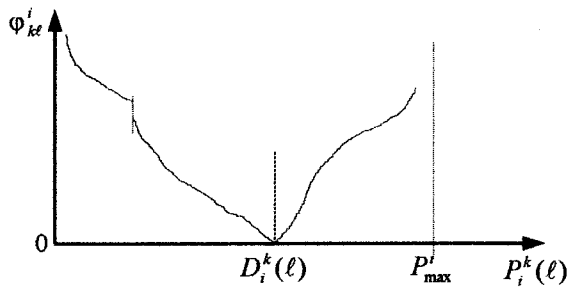

Figure 5 Exemple d'évolution de la fonction.
Example of evolution of the function.

3.2 Détermination des paramètres de pondération

Dans cette section, on montre comment la modélisation floue peut être utilisée pour définir les pondérations appropriées pour la fonction objectif du problème de gestion à long terme (FAYE, 1999). Ici l'approche proposée est illustrée dans le cas de la pénalisation des excès (i.e. paramètre β).

Une première approche consisterait, à comparer à l'instant k, la somme des offres d'eau déterminées à l'instant (k – 1) pour la période (k, k – 1 + 51), à la somme des demandes estimées à l'instant k pour la même période. L'inconvénient de cette approche consiste en ce que l'on ramène l'excès global en eau, au niveau de la sortie des barrages amont et donc que l'on fait abstraction, à la fois de la structure du système de canaux et de son système de gestion. En fait les excédents ne seront critiques que parce qu'il y a ailleurs ou à d'autres périodes, des déficits. Il apparaît donc, que le degré de criticité des excédents est lié à ceux-ci. Une mesure de ces déficits, qui tient compte de la structure du système de distribution et de la façon d'opérer le système est donnée par le « déficit opérationnel relatif » :

$$df^k=\left(\sum_{\ell=k}^{k+50}\sum_{i\in B}df^k_i(\ell)\right)\Big/\left(\sum_{\ell=k}^{k+50}\sum_{i\in B}D^k_i(\ell)\right) \qquad (15)$$

Par ailleurs, il semble intéressant de tenir compte de la tendance constatée entre les instants successifs pour ce même déficit : si celui-ci a tendance à augmenter d'une période à l'autre il faudra anticiper son effet futur sur la

demande en augmentant la pondération correspondante. On réagira en sens inverse, si cette tendance décroît. Cette tendance doit être calculée sur une fenêtre de temps qui permette de la déceler dans le cadre d'effets saisonniers ou de cycles végétatifs associés aux cultures, une période de quatre semaines semble donc convenir. La tendance du déficit pourra donc être évaluée ici à l'aide de l'expression :

$$ddf^k = \left[\sum_{\ell=k-p}^{k} df^\ell \ell - \sum_{\ell=k-p}^{k} df^\ell \sum_{\ell=k-p}^{k} \ell \right] \Big/ \left[\sum_{\ell=k-p}^{k} \ell^2 - (p+1) \sum_{\ell=k-p}^{k} \ell \right] \quad (16)$$

qui correspond à une estimation de la pente du « déficit opérationnel relatif » sur les (p + 1) dernières périodes de temps par la méthode des moindres carrés simples.

On peut alors évaluer à l'aide de variables linguistiques associées à des sous-ensembles flous les niveaux atteints par le « déficit opérationnel relatif » et sa tendance avec les valeurs linguistiques suivantes (*figures 6* et *7*) :

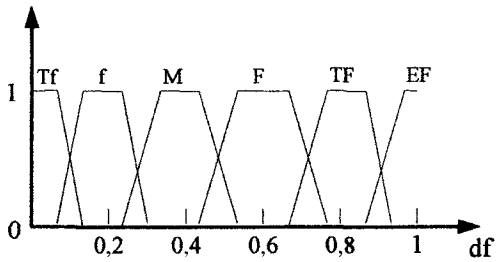

Figure 6 Fonction d'appartenance de déficit.

Linguistic evaluation of the deficit.

Tf : Très faible ; **f** : faible ; **M** : Moyen ; **F** : Fort ; **TF** : Très Fort ; **EF** : Excessivement Fort.

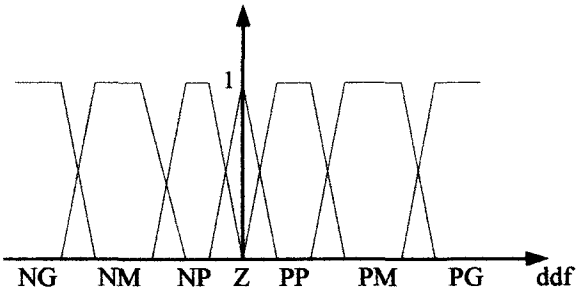

Figure 7 Fonction d'appartenance de la tendance du déficit.

Linguistic evaluation of the tendency of the deficit.

Z : Zéro ; **NG** : Négatif Grand ; **NM** : Négatif Moyen ; **NP** : Négatif Petit ; **PP** : Positif Petit ; **PM** : Positif Moyen ; **PG** : Positif Grand.

On peut élaborer une base de règles floues (*tableau 1*) à partir de connaissances expertes à laquelle on associera à la sortie une partition floue du paramètre de pondération β (*figure 8*).

Tableau 1 Base de règles associées à la pondération des excédents.

Table 1 *Base of rules associated with the weighting parameters of supply excess.*

ddf\df	Tf	f	M	F	TF	EF
NG	TP	TP	P	M	M	M
NM	TP	TP	P	M	M	M
NP	P	P	P	M	M	G
Z	P	P	M	M	G	G
PP	M	M	M	M	G	G
PM	M	M	M	G	TG	TG
PG	G	G	G	TG	TG	TG

Les règles sont de la forme : « SI *ddf* est **NP** *ET df* est **F** *alors* β est **M** ». Par exemple, pour un déficit opérationnel relatif de 30 % et une tendance de + 0,4 on aura, en utilisant la méthode d'inférence de Mamdani et la défuzzification (TONG-TONG, 1995) par la méthode du centre de gravité, $\beta = 6$.

4 – RÉSOLUTION DU PROBLÈME RÉCURRENT D'OPTIMISATION

La structure séquentielle des contraintes, la séparabilité et la non convexité du critère conduit à l'utilisation de la programmation dynamique comme méthode potentielle de résolution du problème PRO_k (YEH, 1985 ; HAJILAL *et al.*, 1998). Pourtant, la nécessaire discrétisation des domaines de variation des variables d'état et de commande conduit à des difficultés numériques au niveau de la satisfaction des équations d'état et des contraintes de continuité. Il est clair qu'une application directe de la programmation dynamique dans ces conditions, conduira à un volume de calculs conséquent. Ainsi, une approche numérique en deux étapes a été développée, tout d'abord on considère une solution approchée qui permet de limiter l'espace de recherche de la solution, puis on résout le problème réduit (*figure 9*).

1. Au début de la période initiale de gestion, on résoudra d'abord le problème linéaire suivant :

$$\max \sum_{\ell=1}^{52} \sum_{i \in U} P_i^1(\ell) \tag{17}$$

sous les contraintes (5), (6), (8), (9), (10), (12). Les contraintes (5), (6), (9), (12) sont étendues aux biefs ($i \in B \cup I$) et la contrainte (11) est remplacée par :

$$0 \leq P_i^1(\ell) \leq \min\{P_i^{max}, D_i^1(\ell)\} \qquad i \in U,\ 1 \leq \ell \leq 52 \tag{18}$$

Ce problème n'est qu'une approximation du problème initial, il permet pourtant d'obtenir une solution admissible qui, tout en cherchant à satisfaire la

demande, économise le volume des délestages. Il produit donc une solution qui va dans la direction recherchée et qui peut être un point de départ acceptable pour la résolution du problème PRO_k.

Soit alors $(\tilde{S}_i^1(\ell), \tilde{Q}_j^1(\ell), \tilde{d}_i^1(\ell), \tilde{P}_i^1(\ell))$ la solution de ce problème, définissons autour de cette solution un intervalle tel que :

$$\max\{S_i^{min}, (1-\eta)\tilde{S}_i^1(\ell)\} \le S_i^1(\ell) \le \min\{S_i^{max}, (1+\eta)\tilde{S}_i^1(\ell)\} \quad i\in B\cup I,\ 2\le\ell\le 53 \quad (19)$$

$$0 \le Q_j^1(\ell) \le \min\{Q_j^{max}, (1+\eta)\tilde{Q}_j^1(\ell)\} \quad j\in\Gamma_i,\ i\in I,\ 1\le\ell\le 52 \quad (20)$$

$$\max\{0, (1-\eta)\tilde{d}_i^1(\ell)\} \le d_i^1(\ell) \le (1+\eta)\tilde{d}_i^1(\ell)\} \quad i\in B,\ 1\le\ell\le 52 \quad (21)$$

$$(1-\eta)\tilde{P}_i^1(\ell) \le P_i^1(\ell) \le \min\{P_i^{max}, (1+\eta)\tilde{P}_i^1(\ell)\} \quad i\in U,\ 1\le\ell\le 52 \quad (22)$$

où $\eta \in]0,1[$, ce paramètre doit être choisi aussi petit que possible afin de réduire au maximum l'espace des solutions. Une valeur acceptable pour η qui a été retenue pour notre application est $\eta = 0{,}15$. La programmation dynamique peut alors être mise en œuvre pour résoudre le problème PRO_1 réduit à l'espace admissible (*figure 9*).

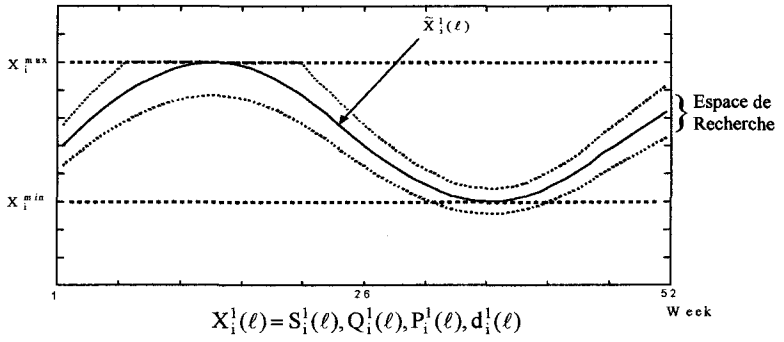

Figure 9 Réduction de l'espace de recherche des trajectoires solution.
Search space of the solution.

2. Au début d'une période intermédiaire k, se replaçant dans le contexte adaptatif retenu pour gérer à long terme les réserves d'eau, on restreindra à nouveau l'espace de recherche des solutions pour la programmation dynamique en partant cette fois de la solution du problème PRO_{k-1}, la valeur de η pourra être ici moindre que dans le cas initial.

L'approche de résolution proposée a été implémentée sur micro-ordinateur de type pentium, elle a présenté au cours des applications numériques réalisées une vitesse de convergence acceptable.

5 – APPLICATION

L'approche proposée a été appliquée à différent système STDE. Ici, pour illustrer sa faisabilité elle est appliquée à un système STDE dual inspiré d'un

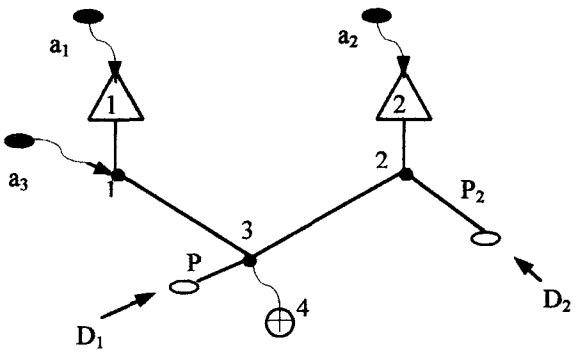

Figure 10 Structure du système considéré.
The water resource system considered.

réseau d'irrigation existant au Sri Lanka (MIZYED *et al.*, 1991). Les données caractéristiques du système (*figure 10*) considéré sont :

- les capacités maximales des barrages ($10^6 m^3$) : $S_1^{max} = 10$, $S_2^{max} = 5$, $S_1^{min} = 2$, $S_2^{min} = 0,5$;
- l'état initial des réserves ($10^6 m^3$) : $S_{1m} = 2,5$; $S_{2m} = 0,7$;
- les capacités des canaux ($10^6 m^3$/semaine) : $q_{11}^{max} = q_{13}^{max} = q_{22}^{max} = q_{34}^{max} = 0,7$; $q_{23}^{max} = 0,3$; $q_{34}^{max} = 0,286$;
- les capacités de pompages ($10^6 m^3$/semaine) : $P_1^{max} = 1,34$, $P_2^{max} = 0,672$;
- les capacités maximales des biefs ($10^6 m^3$) : $\varepsilon_1 = 0,175$; $\varepsilon_2 = 0,165$; $\varepsilon_3 = 0,125$;
- les coefficients de pertes des barrages : $\rho_1 = \rho_2 = 0,003$.

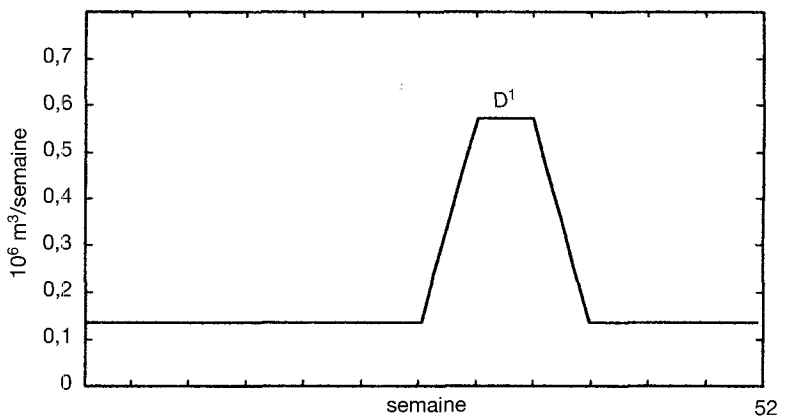

Figure 11 Prévision annuelle de la demande D_1.
Long-term demand at station 1.

Les demandes à long terme sont représentées sur les *figures 11* et *12*. On suppose que dans le passé récent on n'a pas constaté d'excédent opération-

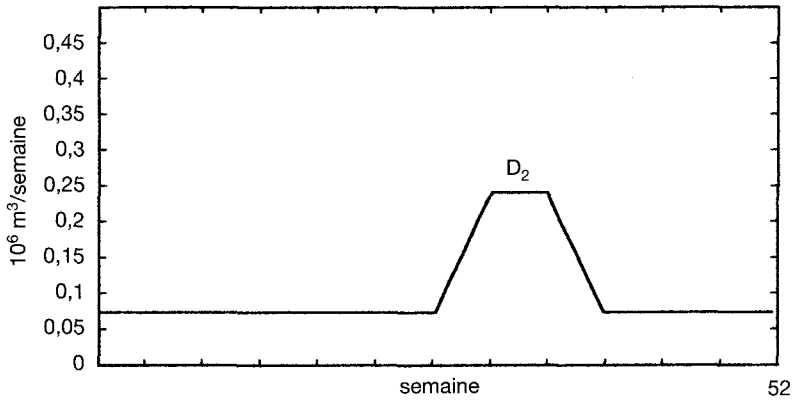

Figure 12 Prévision annuelle de la demande D_2.
Long-term demand at station 2.

nel, donc un éventuel excédent doit être très fortement pénalisé. Comme la semaine 1 se trouve dans une période inter-saisonnière (entre la fin de la période d'irrigation et le début de la nouvelle saison des pluies), on choisit ici $ddf^1 = 0$ et df^1 est approximativement égal à 0,3. En utilisant le *tableau 1* et la méthode d'inférence de Mamdani avec la défuzzification par la méthode du centre de gravité, on obtient une valeur de β^1 approximativement égale à 4. Un exemple de l'évolution du paramètre de pondération résultant β pour l'année suivante est illustré par la *figure 13*. La résolution du problème PRO_k par la programmation dynamique fournit le plan de gestion à long terme (*figures 14* à *19*).

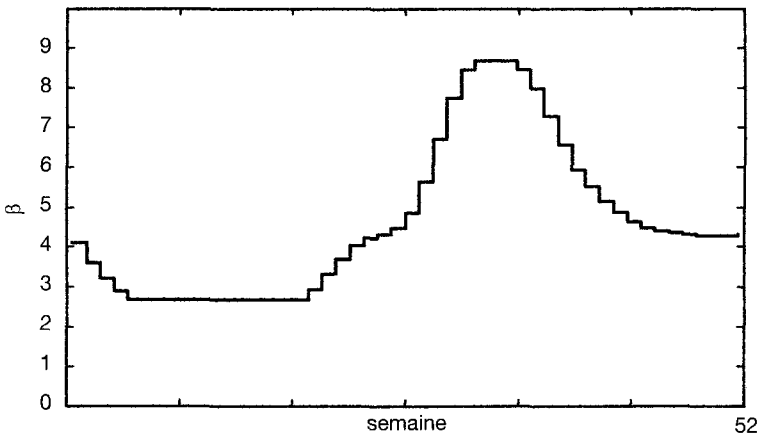

Figure 13 Estimation de β^k sur l'année à venir.
Estimation of β^k *over the next year at week 1.*

L'analyse des résultats obtenus montre que le système se présente dans une situation de légère pénurie en ce qui concerne le versant 1, qui pendant la saison d'irrigation, fait appel à un débit d'appoint provenant de l'autre versant.

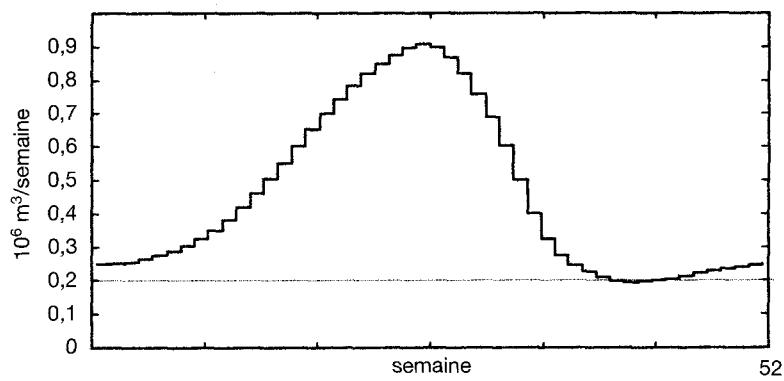

Figure 14 Évolution annuelle de la réserve du barrage 1.
Long-term evolution of the reserves of dam 1.

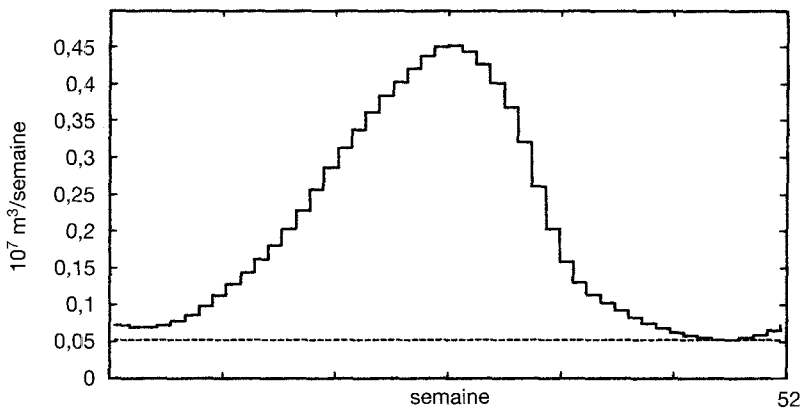

Figure 15 Évolution annuelle de la réserve du barrage 2.
Long-term evolution of the reserves of dam 2.

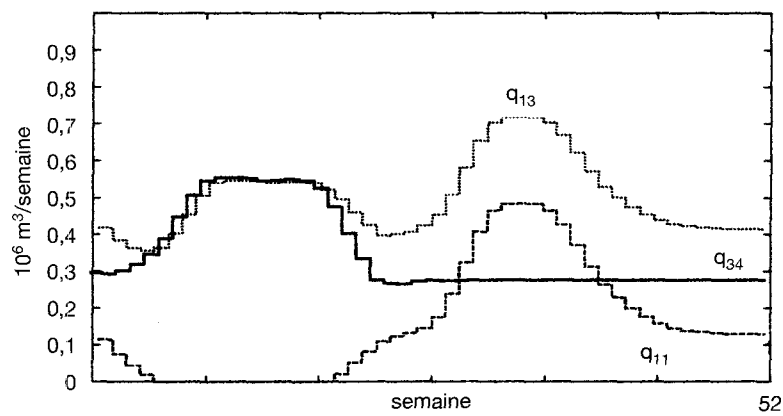

Figure 16 Évolution annuelle des débits associés au versant 1.
Long-term evolution of the discharge associated with catchment 1.

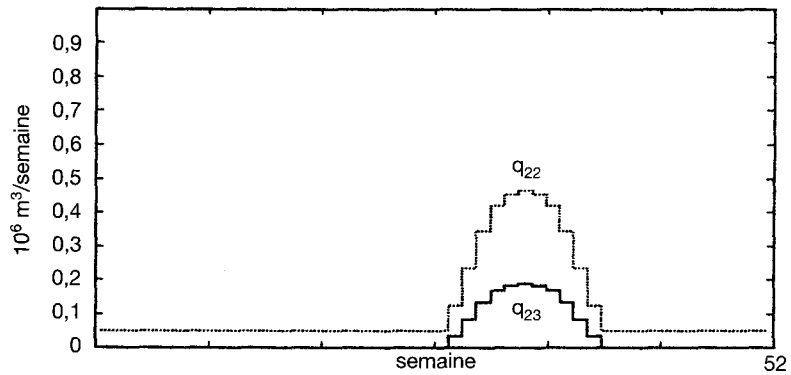

Figure 17 Évolution annuelle des débits associés au versant 2.
Long-term evolution of the discharge associated to catchment 2.

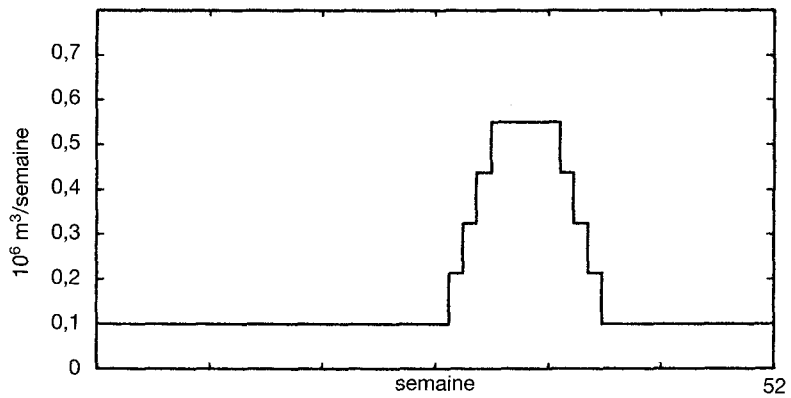

Figure 18 Évolution annuelle des pompages P_1.
Long-term evolution of pumping P_1.

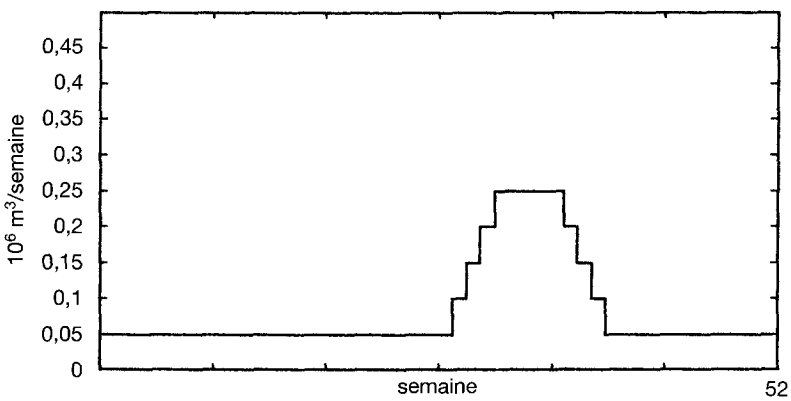

Figure 19 Évolution annuelle des pompages P_2.
Long-term evolution of pumping P_2.

La solution optimale trouvée conduit à utiliser au mieux les apports transformés en réserves, on remarque d'ailleurs que les deux réserves atteignent bien leurs côtes minimales à des époques voisines.

6 - CONCLUSION

L'approche proposée ici pour la gestion sur le long terme d'un système STDE s'appuie sur la formulation récurrente d'un problème d'optimisation dont le critère doit pondérer les écarts entre offre et demande en ressource en eau. Cette approche innovatrice diffère des travaux précédents sur la gestion à long terme des systèmes STDE. Elle conduit à la définition en ligne des paramètres de pondérations de la fonction objectif. L'article a montré comment réalisé cette tâche en faisant appel à la logique floue. Cette technique aboutit à une solution pratique adaptative pour la modélisation du problème récurrent d'optimisation lié à la gestion à long terme, du fait qu'elle tient compte des contraintes opérationnelles du système, des objectifs à atteindre en ce qui concerne la satisfaction de la demande et la gestion de la réserve.

Bien que l'approche proposée soit appliquée à un système de complexité moyenne, elle permet néanmoins de vérifier que sa mise en œuvre n'est pas trop lourde et peut constituer un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire. Sur le plan de la résolution numérique, compte tenu de la dimension temporelle et de la structure du problème PRO, différents aménagements de la méthode classique de la programmation dynamique ont été rendus nécessaires de façon à viabiliser le processus de résolution sans toutefois en réduire le domaine d'application.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELLMAN R.E., 1957. Dynamic Programming. Princeton University Press.

FANG Z.X., VORON B., BOCQUILLON C., 1989. Programmation dynamique : Application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation. *Journal of Hydrology Science*, 34 (4), 415-424.

FAYE R.M., 1999. Une Approche Intégrée pour la Gestion des Ressources en Eau faisant appel aux Techniques Floues et Neuronales. Th. Doct, Univ. Paul Sabatier Toulouse, n° 3399, 168 p.

FAYE R.M., MORA-CAMINO F., SAWADOGO S., GONZALEZ-ROJO S., 1999. Flexible Management of Water Resource Systems. IEE 15th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, August 7-12, Aguas de Lindoia, SP Brazil, 1, 7-12.

HAJILAL M.S., RAO N.H., SARMA P.B.S., 1998. Real time operation of reservoir based canal irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 38, 103-122.

LEBDI F., SLIMANI M., PARENT E., 1997. Stratégie empirique d'un système de ressources en eau : l'exemple d'un périmètre irrigué en zone semi-aride. *Revue des sciences de l'eau*, 1, 121-134.

MALATERRE P.O., ROGERS D.C., SHUURMANS J., 1998. Classification of Canal Control Algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124 (1), 3-10.

MERGOS G.J., 1987. Evaluation of Irrigation Projects under Uncertainty: a symmetric quadratic programming approach. *Water Resources Management,* 1, 45-56.

MIZYED N., LOFTIS J., OAD R., EARLY A., 1991. Importance of Demand Estimation in Irrigation System Management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 117 (3), 336-349.

PARENT E., LEBDI F., HURAND P., 1991. Stochastic modeling of a water resource system: analytical techniques versus synthetic approaches. *Water Resources Engineering Risk Assessment.* Notasi Series, vol. G29, 115-136, Ed. Springer Verlag.

RAMESH S.V.T., SLOBODAN P.S., 2000. Short-term operation model for coupled hydropower reservoirs. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 126 (2), 98-106.

TURGEON A., 1980. Optimal operation of multi-reservoir power systems with stochastic inflows. *Water Resources Research,* 16 (2), 275-283.

TONG-TONG J.R., 1995. Commande Floue. *In* : Hermès (ed.), *La logique Floue,* 119-146.

WHITE D.A., SOFGE D.A., 1992. Handbook of intelligent control: Neural, Fuzzy and Adaptive approaches. Van Nostrand Rein Hold, Ed.

YAKOWITZ S., 1982. Dynamic programming applications in water resources. *Water Resources Research,* 18 (4), 673-696.

YEH W.G., 1985. Reservoir Management and operation models: a state of art review. *Water Resources Research,* 21 (12), 1797-1818.

YEH W.G., BECKER L., HAU S.Q., WEN D.P., LIU J.M., 1992. Optimization of real-time hydro-thermal system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 118 (6), 636-653.

ZADEH L.A., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex Systems and Decision Processes. IEEE Trans. on Systems Management and Cybernetics, vol. SMC-3, 28-44.