

Stratégie empirique d'un système de ressources en eau: l'exemple d'un périmètre irrigué en zone semi-aride

Empirical strategy for water resources system management: Example of a semi arid irrigated perimeter

F. Lebdi, M. Slimani et E. Parent

Volume 10, numéro 1, 1997

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705273ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705273ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

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

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

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 / Journal of Water Science*, 10(1), 121–134.

<https://doi.org/10.7202/705273ar>

Résumé de l'article

Une règle de gestion interannuelle empirique est définie pour gérer un barrage en été d'un périmètre d'irrigation en zone semi-aride. La structure de la règle est construite à partir de l'observation de la gestion pratiquée actuellement sur le terrain. Les paramètres de cette règle sont ajustés de façon à minimiser le cumul moyen des écarts entre demandes et ressources des séries générées après une étude fréquentielle des aléas hydrauliques.

Dans le cas du périmètre lié au barrage de Ghézala, cette méthode permet de répartir au mieux les risques de défaillance sur l'année et d'adapter la stratégie d'irrigation aux phases végétatives critiques des cultures.

Les avantages et les inconvénients de cette approche empirique par rapport aux techniques de programmation dynamique sont finalement discutés et mis en relief pour les systèmes de gestion des ressources en zones semi-arides.

Stratégie empirique d'un système de ressources en eau : l'exemple d'un périmètre irrigué en zone semi-aride

Empirical strategy for water resources system management : the example of the semi arid irrigated perimeter

F. LEBDI^{1*}, M. SLIMANI¹, E. PARENT²

Reçu le 12 août 1996, accepté le 22 novembre 1996*.

SUMMARY

An empirical interannual management rule is defined to operate a reservoir for irrigation use in a semi-arid zone. Management rules for hydro-agricultural systems in semi-arid zones consist in establishing a trade off between the total quantity of water to be distributed for summer irrigation and the indispensable volumes to be held in store for the raising of future seedlings during the following autumn. In less arid countries, water is sufficiently cheap so that it is economically profitable to deliver the great quantity to sustain maximum agricultural output. Indeed, water is sufficiently abundant so that it is generally useless to spare reserves for the next year. Such an interannual compromise is not a usual behavior for water resources managers in humid climates. For instance, the two consecutive europe's dry summers of the 1989 and 1990 years would not have had the same impact on the agricultural economy in the semi-arid zones. There rules of management would have been adapted to obtain of an interannual balance.

Numerous mathematical methods have been used in the domain of water resource systems management, sustained by the constant increase of computer performances. Reservoir management issues have consequently been largely studied and solved both from the viewpoint of the art of modeling and the methods of optimization. Nevertheless it is necessary to ensure that the mathematically correct optimal solution is also implementable when ones leaves the computer screen to get back to the field: the success of this passage holds in a good adequation of the objective function to the quantification of the economical stakes encoded into the choice of a management rule. Except for hydro-power generation, the various uses of a dam are most unlikely to be curved into an aggregative utility function under the form of a separable additive criterion.

1. Institut National Agronomique de Tunis, 43, avenue Charles Nicolle, 1002 Tunis, Tunisie.
2. Laboratoire de Gestion du Risque en Sciences de l'Eau, ENGREF, 19, avenue du Maine, 75732 Paris Cedex 15, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 octobre 1997.

A way to bypass the inherent difficulties to the design of a realistic objective quantification is to restrict the search of the operation rule into the class of strategies compatible with the commonly met attitude of semi-arid water resources system managers. The structure of the rule is designed from the observation of the effective management presently in operation. Its logic fits to the following reasoning:

- when the reservoir level is low, as soon as it started to vary, the irrigation perimeter manager will behave very prudently *ie* by reducing the proportion of the allocated irrigation water to the amount in store;
- for average working conditions, the system manager will deliver a constant fraction of the available reservoir storage for irrigation;
- when the quantity stored in the dam is high, the manager tends to satisfy completely the irrigation demand.

The parameters of this piecewise linear rule are adjusted so as to minimize the probability of discrepancy between demands and resources on series obtained after a brief hydrological study.

The Ghezala perimeter in Tunisia which is situated in the watershed of lake Ichkeul has been taken as a case study. With a thousand hectares of irrigated crops to be satisfied from an upstream 12 hm^3 reservoir and 625 mm rain per year on the watershed with a strong seasonal dependance, the Ghezala perimeter is quite representative of tunisian irrigation practices. The method developed in this paper allows to balance the risk of failure all over the year and to adapt the strategy of irrigation according to vegetative critical phases of crops. A statistical analysis of possible deficits according to the improved rule reveals that the method improves the performances of irrigation and decreases its sensitivity to critical vegetative phases that mainly rule agriculture in semi-arid zones.

The model of management is unsophisticated but its objective is to provide elements of appreciation to the manager of the irrigated perimeter. Each component of the model can be improved and more finely described. Advantages and drawbacks of this empirical approach with regards to more conventional dynamic programming techniques are finally discussed and underlined for systems of water resource with a specific attention to their management in semi-arid zones.

Key words : reservoir operation, modeling, irrigation, decision making.

RÉSUMÉ

Une règle de gestion interannuelle empirique est définie pour gérer un barrage en tête d'un périmètre d'irrigation en zone semi-aride. Pour ces systèmes irrigués le but d'une règle de gestion est d'établir un compromis interannuel acceptable entre la quantité d'eau à distribuer en été pour irriguer le périmètre et les volumes à garder pour favoriser les semis d'automne. En zone tempérée, un tel comportement du gestionnaire n'est pas monnaie courante : l'eau est suffisamment abondante et peu chère pour que l'optimum économique s'obtienne en recherchant le rendement maximum des cultures sans se soucier de l'année suivante. On peut pourtant penser que les deux années de sécheresses consécutives qu'a connues l'Europe du Sud en 1989 et 1990 auraient eu moins d'effets néfastes si les pratiques de gestion actuelles en zones tempérées s'étaient inspirées plus largement de l'exercice d'un compromis interannuel tel qu'il est recherché en zones semi-arides.

La structure de la règle est construite à partir de l'observation de la gestion pratiquée actuellement sur le terrain, ce qui contourne les difficultés conceptuelles liées à la définition quantitative d'une fonction économique bien représentative des performances du système. Les paramètres de cette règle sont ajustés de façon à minimiser le cumul moyen des écarts entre demandes et ressources sur séries générées après étude fréquentielle des aléas hydrauliques.

Sur le cas du périmètre lié au barrage de Guézala (625 mm de pluie annuelle pour 12 millions de m³), cette méthode permet de répartir au mieux les risques de défaillance sur l'année et d'adapter la stratégie d'irrigation aux phases critiques végétatives des cultures.

Les avantages et les inconvénients de cette approche empirique par rapport aux techniques de programmation dynamique sont finalement discutés et mis en relief pour les systèmes de gestion de ressources en zones semi-arides.

Mots-clés : *gestion de réservoir, modélisation, irrigation, aide à la décision.*

1 – INTRODUCTION

Les règles de gestion d'un système hydro-agricole, telles qu'on les conçoit dans les zones semi-arides, consistent à établir un compromis entre la quantité totale d'eau à distribuer au cours de l'été pour l'irrigation et les volumes de ressources indispensables à la levée des futurs semis de l'automne suivant. Dans les pays moins arides, l'eau est suffisamment bon marché pour qu'il soit économiquement rentable de délivrer les quantités importantes nécessitées par un rendement agricole maximum : elle est suffisamment abondante pour qu'il soit inutile de ménager des réserves pour l'année suivante.

Un tel compromis interannuel n'entre pas dans le comportement habituel d'un gestionnaire de ressources en eau. C'est pourquoi nombre de modèles de gestion valides en climats tempérés ne sont pas transposables en zones semi-arides (BELLOSTAS, 1981). Par ailleurs, deux étés de sécheresses consécutives connus par l'Europe du Sud en 1989 et 1990 (PARENT et LEBDI, 1992) n'auraient pas eu le même impact sur l'économie agricole d'une zone semi-aride, où les règles de gestion auraient été adaptées à la recherche d'un équilibre interannuel.

Nombre de méthodes mathématiques ont été utilisées dans le domaine de la gestion des ressources en eau, soutenues par la constante augmentation des performances des ordinateurs. YEH (1985) a brossé un état de l'art en la matière et YAKOVITZ (1982) a parcouru les méthodes de programmation dynamique déjà étudiées depuis les travaux de MASSE (1946). Une multitude d'algorithmes ont été étudiés surtout pour la maximisation de la production énergétique (TURGEON, 1980).

Quelle que soit la technique utilisée, la modélisation se heurte à de nombreuses difficultés :

- quantification de l'objectif de gestion, bien que ce dernier soit abordé par plusieurs auteurs (BURAS, 1972), (MERGOS, 1987), (FANG *et al.*, 1989).
- modélisation de l'aspect multi-objectif de la gestion. En effet, les usages de l'eau sont multiples et souvent trop complexes pour être décrits par un seul critère de gestion (PARENT *et al.*, 1991, DUCKSTEIN et BERNIER, 1985).
- comportement stochastique des variables hydrologiques et de l'aléa dans le comportement de l'utilisateur, surtout quand l'usage de l'eau est l'irrigation (LEBDI, 1990) très sensible au stress hydrique induit en zone semi aride par les événements extrêmes.

La conduite optimale du système en régime de compromis annuel ou interannuel, en vue de l'irrigation, a été envisagée par plusieurs auteurs. Dans BELLOSTAS (1981), le modèle est bipériodique et n'envisage pas de reports interannuels (deux saisons : humide et sèche). Il maximise un gain rapporté à l'irrigation. Cette fonction est convexe et non linéaire. L'auteur procède à sa linéarisation par découpage en segments. Les contraintes expriment la satisfaction des besoins d'irrigation. En 1963, HALL et HOWELL génèrent une longue série de débits d'apports et établissent une règle de gestion en utilisant la programmation linéaire. HAROLD et REVELLE (1966) traitent de l'optimisation de la gestion du barrage d'ASWAN en Égypte. Il s'agit de maximiser le gain des productions agricoles et hydroélectriques.

HALL et HOWELL (1970) introduisent le concept de ressource en eau contraignante et maximisent un revenu provenant de chaque type de culture. MATOUSSI (1980) présente un schéma directeur de la gestion des ressources en eau dans le nord de la Tunisie. Les besoins en eau étant fixés, l'auteur a déterminé des surfaces optimales de périmètres d'irrigation, en maximisant l'espérance mathématique du revenu par m^3 d'eau d'irrigation.

LEBDI (1990) introduit la notion de stress hydrique et de fonctions de production dans l'optimisation des règles de gestion de barrages en vue de l'irrigation. La conduite optimale du système de compromis interannuel a été envisagée dans le cadre de la théorie des chaînes de Markov appliquée à la gestion des réservoirs. On trouve dans PARENT (1990) un tableau de l'intérêt et des limites de l'optimisation par rapport aux méthodes de simulation, PARENT (1990) traite également de la gestion de compromis entre irrigation et qualité.

Le présent travail a été développé sur le cas du barrage et périmètre irrigué de Ghézala (en amont du lac Ichkeul, dans le Nord de la Tunisie). Un modèle de gestion séquentielle interannuelle pour une zone semi-aride est établi. Dans le modèle sont décrites les relations fonctionnelles entre trois systèmes interconnectés :

- le barrage réservoir,
- le réservoir sol,
- le périmètre d'irrigation avec son réseau hydraulique et ses cultures.

Le bref extrait de la littérature ci-dessus montre, si besoin était, que les problèmes de gestion d'un réservoir ont été largement étudiés et résolus du point de vue de la modélisation ou de la méthode de solution. Encore faut-il s'assurer que la solution optimale, mathématiquement correcte reste valable lorsqu'on quitte les programmes d'ordinateur pour retourner sur le terrain : la condition de réussite de ce passage tient à la bonne adéquation de la fonction objectif à la quantification des enjeux économiques engendrés par le choix d'une règle de gestion. Or, sauf pour la production hydroélectrique, il est bien rare que les différents usages d'un barrage puissent être agrégés et évalués en termes d'unités monétaires réalistes « *d'utilité sociale* » sous forme d'un critère additif séparable par période, pour se prêter commodément aux techniques classiques d'optimisation.

C'est pourquoi dans le cas de la gestion du périmètre de Ghézala, on se limite, de prime abord, à une solution faisant partie d'une famille de stratégies de gestion compatible avec l'attitude couramment adoptée par un gestionnaire de ressources en zone semi-aride. On cherche ensuite à améliorer la règle de gestion actuellement en pratique, sans modifier sa structure générale, par calcul selon une approche dite « synthétique ». Il s'agit ici de calculer une probabilité de non-dépassement caractérisant l'état hydraulique des ressources du système. La règle empirique, dont les paramètres sont à optimiser, permet d'associer à cette grandeur une décision de consigne à effectuer.

2 – PRÉSENTATION DU SYSTÈME

2.1 Caractéristiques du site

Le système de Ghézala se situe au nord de la Tunisie, autour de l'oued Ghézala, affluent ouest du lac Ichkeul. La pluviométrie de la région se caractérise par une irrégularité interannuelle et saisonnière. La moyenne des pluies sur 50 ans est de 625 mm. Elles sont à dominance hivernale. En décembre et janvier, les pluies moyennes mensuelles peuvent dépasser 100 mm, tandis qu'en été, le maximum des pluies ne dépasse pas les 20 mm. La discordance entre périodes d'apports et périodes où les besoins en eau se manifestent le plus est une caractéristique intrinsèque de la région.

Le périmètre irrigué a été installé à 2 km du barrage, avec une superficie de 1 031 ha. Pour les besoins de la distribution, le périmètre a été découpé en 4 secteurs. Les cultures présentes dans le périmètre sont essentiellement l'arboriculture, les cultures maraîchères, les céréales irriguées et les fourrages. Le barrage réservoir permet le stockage de 12 millions de m³ d'eau, sa capacité utile est de 8,9 millions de m³. L'objectif d'utilisation de l'eau est uniquement l'irrigation. Le maintien de la salubrité du lac Ichkeul est un objectif secondaire. L'irrigation s'effectue par aspersion et l'efficacité du réseau de transport est évaluée à 70 %.

2.2 Analyse hydrologique sommaire

On dispose de données sur plus de cinquante années d'apports mensuels, pratiquement sans lacune. L'analyse statistique descriptive a été effectuée sur les données mensuelles dans un premier temps. Dans un deuxième temps, celles-ci sont regroupées et analysées selon les saisons. Ces dernières sont choisies de la façon suivante :

- Automne : septembre, octobre, novembre.
- Hiver : décembre, janvier, février.
- Printemps : mars, avril, mai.

Les mois d'été (juin, juillet, août) ont souvent des apports négligeables par rapport au reste de l'année. Pour les autres saisons, le tableau 1 fournit les valeurs relatives aux périodes de retour T données en années, des apports d'eau mensuels au barrage (en millions de m³), en s'appuyant sur des hypothèses d'indépendance des apports saisonniers et une distribution lognormale pour ces débits.

On remarque que l'hiver a une très grande importance, avec plus de 70 % de l'apport total annuel pour toutes les périodes de retour. Le printemps intervient avec une part très inférieure et les besoins en eau peuvent être soutenus par l'irrigation. L'automne est la saison des apports importants pour la levée des jeunes plants issus des semis d'automne.

Tableau 1 Apports saisonniers fréquents au barrage Ghézala.

Table 1 Frequency of seasonal inflows at Ghézala dam.

T(années)	5	10	20	25	50	100
Automne	2,48	5,11	9,28	11,04	18,16	28,40
Hiver	14,07	24,65	39,15	44,80	65,90	93,24
Printemps	3,33	4,90	6,75	7,42	9,73	12,38

3 – LE MODÈLE DE SYSTÈME IRRIGUÉ

La théorie des réservoirs remonte à SAVARENSKY (1940), qui avait déjà formulé le problème sous la forme de files d'attente. La théorie des processus markoviens permet alors de calculer les probabilités stationnaires d'états limites de la réserve.

3.1 Équilibrage du barrage réservoir

Dans cet article, on considère le cas d'un réservoir avec apports indépendants. L'équation qui gouverne son évolution est :

$$Z(t+1) = Z(t) - \gamma_t U_t^* + Q_t - E(t) \quad (1)$$

$Z(t)$: est le stock au début de la période t .

$\gamma_t U_t^*$: est le lâcher durant la période Δt ($(t+1) - t$).

γ_t : coefficient de majoration dû au transfert d'eau du barrage réservoir au périmètre d'irrigation. Ce coefficient tient compte des pertes d'eau et de l'efficacité du réseau de transport.

U_t^* : est la quantité effectivement fournie aux cultures.

$Q(t)$: est l'apport (aléatoire) durant la période Δt que l'on supposera indépendant d'une période à l'autre.

$E(t)$: est l'évaporation du plan d'eau durant la période Δt .

Supposons que l'on prenne une décision de lâcher l'eau avant de connaître l'apport $Q(t)$ à venir durant la période Δt (processus décision – hasard). On définit par U_t la quantité $\gamma_t U_t^*$, une règle de gestion établit en fait une liaison par « retour d'état » :

$$U_t = U(t, Z(t)) \quad (2)$$

Elle fait dépendre la décision de lâcher du gestionnaire uniquement à partir des informations dont on dispose réellement à l'instant t , c'est à dire le niveau du stock. En supposant la décision de lâcher U_t toujours réalisable, on a :

$$Z(t+1) = Z(t) - U(t, Z(t)) + Q(t) - E(t) \quad (3)$$

Si la connaissance de l'apport est antérieure à la décision, les informations qui caractérisent l'état du système sont alors $Z(t)$ et $Q(t)$. La règle de gestion est encore « enrichie » en informations :

$$U_t = U(t, Z(t), Q(t)) \quad (4)$$

$$Z(t+1) = Z(t) - U(t, Z(t), Q(t)) + Q(t) - E(t)$$

Dans le système d'équations (4), $Q(t)$ est la variable aléatoire du système dont on connaît les probabilités de réalisation. Lorsqu'on applique en chaîne la règle de gestion, $Z(t)$ devient aussi une variable aléatoire, de même que U_t comme fonction de variables aléatoires. Ainsi, la répartition des valeurs de $Z(t)$ donne :

$$\text{Prob}(Z(t+1)/Z(t), Z(t-1), Z(t-2), \dots) = \text{Prob}(Z(t+1)/Z(t)) \quad (5)$$

Autrement dit, seule la dernière valeur du stock conditionne en probabilités l'évolution future du stock d'eau. Ceci définit pour le pas de temps discret, une chaîne de MARKOV d'ordre 2, pour le système constitué d'un barrage et d'apports indépendants au cours du temps.

Dans la présente contribution, il n'est pas mis en jeu les processus de Markov tels que c'est présenté ci-dessus, puisqu'on se servira des données historiques pour les simulations. La procédure est celle du cas « décision-hasard » et non du cas « règle enrichie ».

Pour le cas du barrage de Ghézala (Tunisie), l'écriture de l'équilibrage du réservoir barrage a été établie comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_t Z_t + \alpha_t Q_t - U_t + Y_t - z_t = V \\ Z_{t+1} = V - Y_t \\ z_t \cdot Y_t = 0 \\ Z_t \geq 0 \\ Y_t \geq 0 \\ z_t \geq 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

avec :

V = la capacité de la réserve.

α_t = coefficient de réduction dû aux pertes par évaporation dans la réserve.

Y_t et z_t = variables auxiliaires d'écart.

L'écriture de cet équilibrage est conforme à la réalité. En effet, deux cas sont à considérer : il est facile de vérifier selon les cas :

$$\text{Cas de non débordement } \alpha_t Z_t + \alpha_t Q_t - U_t \leq V \quad (7)$$

Ce qui entraîne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_t Z_t + \alpha_t Q_t - U_t + Y_t = V \\ Y_t \geq 0 \\ z_t \geq 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

Ceci se traduit par : $Z_{t+1} = V - Y_t$

$$\text{Cas de débordement } \alpha_t Z_t + \alpha_t Q_t - U_t \geq V \quad (9)$$

Ce qui entraîne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_t Z_t + \alpha_t Q_t - U_t - z_t = V \\ z_t > 0 \\ Y_t = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

et

$$Z_{t+1} = V$$

3.2 Équilibrage du réservoir sol

Si l'on désigne par :

RFU = la réserve facilement utilisable par la plante dans le sol.

RS_t = le stock d'eau utilisable par la plante et restant dans le sol à la fin de la période t , ou au début de la période $\Delta(t + 1)$.

P_t = la pluviométrie au cours de la période Δt .

X_t = la quantité d'eau déjà stockée dans le sol au début de la période et que la plante prélèvera dans le sol au cours de la période t .

ET_t = le besoin potentiel de la plante à la période Δt .

Toutes les quantités citées ci-dessus dépendent de la nature du sol, de la plante et de la période considérée. Le sol est susceptible d'offrir à la plante, pendant la période t , la quantité $(RS_{t-1} + P_t)$ avec toutefois une impossibilité de dépasser RFU. Ainsi, on aura les cas suivants :

3.2.1 Cas de besoin en eau complètement satisfait

$$\text{Si} \quad \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t) - ET_t \geq 0 \quad (11)$$

la plante prend au sol $X_t = ET_t$ et on aura :

$$RS_t = \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t) - ET_t \quad (12)$$

3.2.2 Cas de stress hydrique

$$\text{Si} \quad \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t) - ET_t < 0 \quad (13)$$

la plante prend au sol toute la quantité disponible, soit :

$$X_t = \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t)$$

et : $RS_t = 0$

Ce qui établit la relation suivante :

$$\begin{cases} X_t = \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t, ET_t) \\ RS_t = \text{SUP}(0, \text{Inf}(\text{RFU}, RS_{t-1} + P_t) - ET_t) \end{cases} \quad (14)$$

Par suite, si l'on connaît la pluie P_t , l'évapotranspiration ET_t et la demande en eau X_t , les variations de niveau du réservoir sol RS_t sont complètement déterminées. Pendant la période t , la demande en eau du périmètre irrigué à satisfaire par l'irrigation sera égale à $(ET_t - X_t)$. La demande en eau d'irrigation B_t exprimée au niveau du barrage est égale à $\gamma_t (ET_t - X_t)$, tenant compte ainsi des pertes d'eau et de l'efficacité du réseau de transport.

4 – DÉFINITION DES RÈGLES DE GESTION

La règle de gestion proposée est empirique, traduisant le comportement du gestionnaire de la ressource. La logique de ce dernier face aux demandes exprimées lorsque le stock d'eau au barrage est à un certain niveau est la suivante :

- Quand le niveau du stock est faible, le gestionnaire se comportera de façon prudente pour augmenter ou diminuer l'allocation de l'eau, selon un schéma supposé ici linéaire.

- Pour un stock d'eau variant dans des limites moyennes, le gestionnaire restera encore prudent en apportant un pourcentage de la satisfaction totale en eau, espérant des apports futurs.

- Pour des stocks d'eau approchant la capacité maximale du barrage, le gestionnaire essaye de tendre vers une satisfaction totale de la demande avec un souci d'écrêtement de la crue qui risque de survenir. Le schéma est supposé ici linéaire.

On définit par :

- Z_{\min} : niveau de stock de sécurité dans le réservoir ;
- Z_{lt} : niveau de stock correspondant à une limite inférieure ;
- Z_{Mt} : niveau de stock correspondant à une limite moyenne ;
- Z_{St} : niveau de stock correspondant à une limite supérieure ;
- Z_{\max} : niveau de stock maximum.

La règle de gestion est récapitulée par la figure 1 :

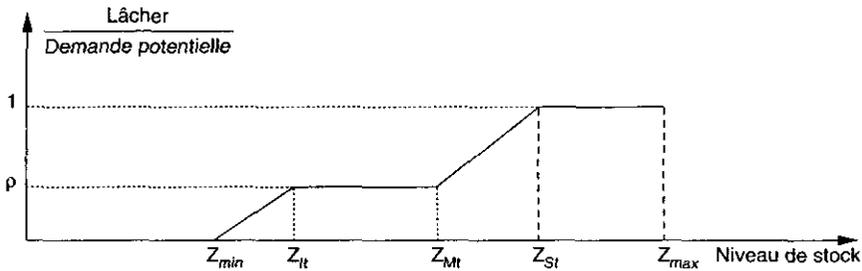


Figure 1 Règle de gestion.
Management rule.

Si l'on désigne par :

L_t = volume lâché à partir du barrage, à la période t .

B_t = demande en eau exprimée au barrage, à la période t .

On a donc postulé que le feedback $L_t = U(t, Z(t))$ devait appartenir à une classe de fonctions linéaires par morceaux, définie pour chaque pas de temps t :

$$\frac{L_t}{B_t} = a_t Z_t + b_t \quad \text{Si} \quad Z_{\min} \leq Z_t < Z_{lt}$$

$$a_t Z_{\min} + b_t = 0 \quad \text{condition de continuité de la règle de gestion}$$

$$\frac{L_t}{B_t} = p_t \quad \text{Si} \quad Z_{lt} \leq Z_t < Z_{Mt}$$

$$\frac{L_t}{B_t} = c_t Z_t + d_t \quad \text{Si} \quad Z_{Mt} \leq Z_t < Z_{St}$$

$$\frac{L_t}{B_t} = 1 \quad \text{Si} \quad Z_{St} \leq Z_t < Z_{\max}$$

On restreint encore cette classe en imposant une stationnarité des coefficients pour la saison humide d'une part, et durant la saison sèche d'autre part. L'optimisation de cette règle empirique revient à un choix optimal de deux jeux de coefficients (un pour chaque saison) composés des seuils (Z_{lt} , Z_{Mt} , Z_{St}) et des pentes des segments de droite (a , b , p , c , et d). On reste ainsi dans les règlements habituels des périmètres irrigués que l'on cherche à améliorer, sachant qu'un choix réglementaire malhabile de ces seuils risque, en général, en menant à terme prioritairement la récolte de l'année en cours, de compromettre les semis de l'année suivante. La recherche de paramètres optimaux de cette règle se fera par simulation ou reconstitution d'un historique de conditions agro-climatiques,

effectuée au pas de temps mensuel. Ce pas de temps se justifie par la prise en compte d'un éventuel dépérissement au cas où l'alimentation hydrique pendant les stades végétatifs essentiels de la plante ne seraient pas respectés.

A chaque pas de temps et selon la règle de gestion établie, une comparaison est effectuée entre la demande en eau et le lâcher réalisé. Une analyse statistique des déficits éventuels renseigne sur les taux correspondant à des fréquences de dépassement fixées.

Le critère de sélection des règles empiriques est un critère physique reposant, après des simulations sur N années, sur un indice interannuel de déficit minimum :

$$\text{Min} \frac{1}{N} \sum_t^N (L_t - B_t) \quad (15)$$

5 – RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Les données hydrologiques ayant servi aux simulations (pluies, apports) et les besoins en irrigation correspondent ici à des séries chronologiques de valeurs mensuelles observées allant de 1946 à 1990 dans la zone d'étude.

Les règles de gestion sont « bipériodiques ». Pour la période humide allant des mois de décembre à février, la règle sélectionnée est représentée sur la figure 2. Elle est obtenue par une simple recherche de la valeur optimale du critère (15) sur les séries historiques.

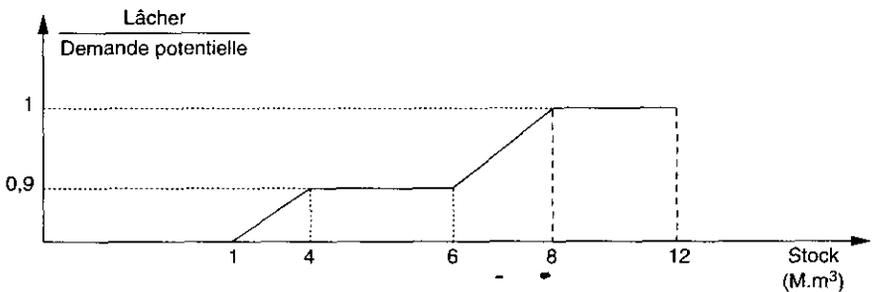


Fig. 2 Règle de gestion de Décembre à Février.
Management rule for the period December-February.

Les paramètres caractérisant cette règle sont les suivants :

($Z_{\min} = 1 \text{ Mm}^3$, $Z_{It} = 4 \text{ Mm}^3$, $Z_{Mt} = 6 \text{ Mm}^3$, $Z_{St} = 8 \text{ Mm}^3$, $Z_{\max} = 12 \text{ Mm}^3$) et
($a = 0,3$, $b = -0,3$, $p = 0,9$, $c = 0,05$, et $d = 0,6$).

Pour la période moins humide s'étalant sur le reste de l'année, la règle sélectionnée est du même type, avec pour paramètres :

($Z_{\min} = 1 \text{ Mm}^3$, $Z_{It} = 2 \text{ Mm}^3$, $Z_{Mt} = 3 \text{ Mm}^3$, $Z_{St} = 5 \text{ Mm}^3$, $Z_{\max} = 12 \text{ Mm}^3$) et
($a = 0,9$, $b = -0,9$, $p = 0,9$, $c = 0,05$, et $d = 0,75$).

Les lâchers d'eau trouvés, les déficits en eau (fig. 3a à 3c) et les volumes déversés vers le lac Ichkeul ainsi que les stocks disponibles en fin de mois, indiquent qu'en hiver, la demande est fréquemment satisfaite, sauf exception (exemple de l'année 1988, la plus sèche de la série).

Le stock disponible au réservoir pendant cette période ne descend pas en dessous de 4 millions de m³. En moyenne, le barrage déborde et restitue son eau au lac situé à l'aval.

Enfin, le volume disponible dans le réservoir à la fin de la période sèche se situe en moyenne autour de 2,5 Mm³ mais les lâchers demeurent malgré tout inférieurs à la demande en eau. Ce volume relâché est insuffisant, ce qui entraîne des déficits considérables au niveau des cultures.

Les taux de déficit moyens d'irrigation sont de 40 % et atteignent leur maximum pendant la période de juillet à novembre. Ceci est confirmé par les taux d'occupation du sol (semis) et les apports qui sont quasi-nuls. Si l'on définit la probabilité de défaillance mensuelle interannuelle, par le rapport de cas défaillants où la demande en eau n'a pas été satisfaite, au nombre total d'années de simulations on a les résultats suivants :

Tableau 2 Probabilités de défaillance dans la satisfaction de la demande potentielle.

Table 2 *Probability of failure to meet the water potential demand satisfaction.*

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Probabilité	0,6	0,6	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,6	0,6

L'analyse du tableau 2 montre que les probabilités d'apparition de déficits sont faibles pendant la période humide et que cette situation se prolonge encore jusqu'au mois de mai. Ceci est intéressant car les phases végétatives les plus critiques des cultures nécessitant une satisfaction totale, se situent pendant ces trois mois, de mars à mai. C'est la période où quelque soit la valeur du déficit, elle est jugée sévère pour les chutes de rendement qu'elle cause.

A partir du mois de juin, début de la saison sèche et jusqu'aux mois d'automne où la demande en eau est importante et les apports faibles, la probabilité de déficit mensuel augmente et est la même de juillet à octobre (60 %).

L'égalité des probabilités entre la période sèche où les apports sont négligeables et la période de septembre à novembre où les apports sont faibles, s'explique par une occupation du sol certes plus importante en automne (semis) mais avec des besoins en eau unitaires plus faibles (par unité de surface occupée) car l'évapotranspiration des cultures est plus faible.

Les figures 3a à 3c illustrent l'intérêt de cette règle validée sur la période 1980-1990. Sauf pour les deux années exceptionnellement sèches 1988 et 1989, la figure 3a montre que la règle permet de satisfaire pleinement la phase sensible pour les céréales d'hiver (la maturation se produit généralement vers mars) et le présent modèle souligne l'importance de l'irrigation de complément. Sur la figure 3b, on peut mesurer de bonnes performances pour le passage difficile de juillet dans le maraîchage d'été (des réductions de la superficie en culture sont néanmoins parfois nécessaires). La figure 3c souligne qu'en novembre, où relativement la probabilité d'apport d'eau de fin d'année est faible, il y a une prise de risque nécessaire au niveau des semis.

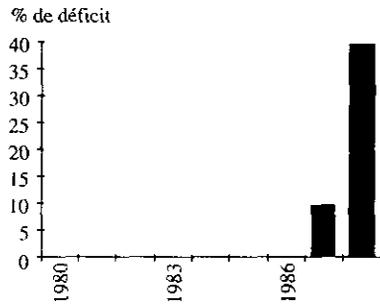
Déficits mars

Figure 3a Pourcentage de déficit en mars (calcul sur la période de 1980 à 1990).
Deficit ratio during March (computed for years 1980-1990).

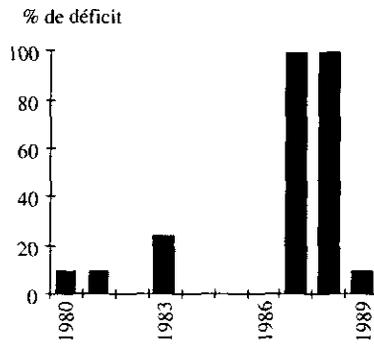
Déficits juillet

Figure 3b Pourcentage de déficit en juillet (calcul sur la période de 1980 à 1990).
Deficit ratio during July (computed for years 1980-1990).

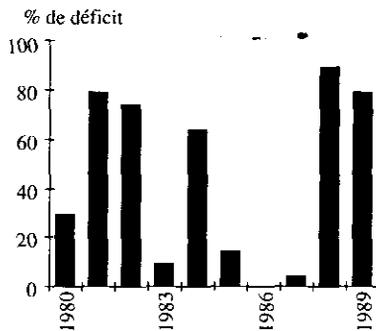
Déficits novembre

Figure 3c Pourcentage de déficit en novembre (calcul sur la période de 1980 à 1990).
Deficit ratio during November (computed for years 1980-1990).

6 – CONCLUSIONS

Dans cet article, on a souligné la spécificité des zones semi-arides en matière d'irrigation : il faut chercher à établir un compromis entre la quantité d'eau délivrée nécessaire pour l'irrigation et la levée des semis de l'automne suivant. Le modèle proposé, dont les paramètres des règles de gestion ont fait l'objet de calage, a été appliqué au cas concret du périmètre Ghézala (Tunisie).

Le modèle de gestion est rustique et nécessite d'étudier sa sensibilité par rapport aux paramètres mieux connus sur un intervalle donné, mais ne doit pas être considéré comme une provocation vis à vis des raffinements récents des méthodes d'optimisation. Son objectif est de fournir des éléments d'appréciation au gestionnaire du barrage, sans réellement bouleverser la structure de ses habitudes de délivrance de l'eau d'irrigation, mais bien plutôt en modifiant leur répartition. Cette modification s'effectue en faveur d'une meilleure intégration des besoins futurs des semis vis à vis de la traditionnelle priorité donnée à l'irrigation de milieu d'année, l'irrigation de complément dès le printemps étant également renforcée.

Cette méthode peut également être utilisée pour des avants-projets :

- elle ne nécessite qu'une étude hydrologique peu poussée ;
- elle n'oblige pas à veiller avec attention aux écueils rencontrés par la méthodologie classique d'optimisation séquentielle des systèmes dynamiques, tels que création artificielle d'états absorbants sur la chaîne Markovienne des stocks (KLEMES, 1977a) ou la sensibilité extrême du modèle à la loi de probabilité utilisée pour modèle des apports et les diverses hypothèses de modélisation (KLEMES, 1977b).

La description de chaque composante (barrage réservoir, réservoir sol et périmètre d'irrigation) peut être enrichie et plus finement décrite. La prise en compte de l'aspect aléatoire peut également être introduite de façon plus détaillée et le problème de la stratégie de gestion du système barrage et périmètre irrigué en avenir incertain doit être résolu, si possible, par un modèle classique de décision séquentielle par programmation dynamique. Une comparaison entre les règles optimales trouvées à partir des techniques de programmation dynamique en avenir incertain et les règles empiriques, opérationnelles, bien perçues par le gestionnaire qui traduisent au mieux son comportement, permet de situer l'écart et la sensibilité de telles règles empiriques par rapport à l'optimum théorique dans les hypothèses du modèle.

Toujours est-il que, si ces règles de gestion empiriques et ces méthodes de simulation peuvent se prêter à nombre de critiques théoriques, elles trouvent néanmoins une justification dans la finalité pratique des études d'avant-projet ou d'amélioration de gestion, sans de lourds investissements théoriques et humains. A ce titre, elles occupent une place raisonnable, malgré leur impertinence conceptuelle, dans la panoplie des outils de l'ingénieur aménageur.

REMERCIEMENTS

La recherche exposée dans cette article a donné lieu à une communication orale à la conférence internationale en l'honneur de Jacques Bernier, « Méthodes

statistiques et bayésiennes en hydrologie », organisée par l'UNESCO du 11 au 13 Septembre 1995. Nous sommes heureux qu'à cette occasion, A. Musy, A. Turgeon et J. Bogardi aient bien voulu contribuer activement aux mises au point du fond et de la forme de ce papier. Nos plus vifs remerciements pour les réviseurs avisés de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELLOSTAS, J.M. (1981). Cinquante modèles de recherche opérationnelle appliqués à la planification et à la gestion des ressources en eau. Document interne du laboratoire d'hydrologie mathématique. Montpellier.
- BURAS, N. (1972). Scientific allocation of water resources development. *Advances in Hydrosience*, 94.
- DUCKSTEIN, L., BERNIER, J. (1985). Critères associés aux risques en ressources hydriques : un modèle mathématique de système avec application : Atelier sur l'analyse du risque de la gestion des systèmes hydriques. École Polytechnique de Montréal.
- 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.
- HALL, W. A., HOWELL, D.T. (1963). The optimisation of signal purpose reservoir design with the application of dynamic programming to synthetic hydrology samples. *Journal of Hydrology*, 1.
- HAROLD, A.T., REVELLE, R. (1966). On the efficient use of high Aswan dam for hydro-power and irrigation. *Management science*, 12.
- 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.
- LEBDI, F. (1990). Modèle de gestion optimale d'un barrage en vue de l'irrigation. Thèse de Doctorat ès-sciences, Université de TUNIS.
- MASSE, P. (1946). Les réserves et la régulation de l'avenir. Éditions Hermann.
- MATOUSSI, M.S. (1980). Planification des ressources aléatoires : application à la gestion d'un bassin fluvial tunisien. Thèse de Doctorat. IME. Suisse.
- MERGOS, G.J. (1987). Evaluation of irrigation projects under uncertainty : a symmetric quadratic programming approach. *Water resources management*, 1 : 45-56.
- PARENT, E. (1990). Elaboration de consignes de gestion de barrages réservoirs. Thèse de Doctorat., Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées.
- PARENT, E, LEBDI F., HURAND, P. (1991). Stochastic modeling of a water resource system : analytical techniques versus synthetic approaches. *Water Resources Engineering Risk Assessment. NATO-ASI Series Vol G29* : 115-136, Ed Springer Verlag.
- PARENT, E., LEBDI, F. (1992). Gestion stratégique d'un système de ressources en eau : exemple du système Neste. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4, 103-127.
- SAVARENSKIY, O.T. (1940). Metod rascheta regulirovaniya stoka. *Gidrotekh. Stroit.* 2 : 24-28.
- TURGEON, A. (1980). Optimal operation of multireservoir power systems with stochastic inflows. *Water resources research.*, 16 (2) : 275-283.
- 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.