

OPTIMISATION DES REGLES DE GESTION DES BARRAGES COLLINAIRES DANS LES PAYS SEMI-ARIDES

Lebdi F., Le Goulven P. et Pabiot F.

PRESENTATION

L'hydrologie actuelle et future proche en Tunisie est focalisée en grande partie sur la maîtrise de la demande et l'amélioration des performances du système de mobilisation des ressources. La gestion des ressources en eau devient dès lors un souci permanent des décideurs, en vue d'une meilleure satisfaction de besoins en eau de toute nature, qui ne cessent d'évoluer avec une tendance à la hausse (irrigation, alimentation en eau potable, industrie et tourisme). L'exemple suivant montre l'importance des usages en termes de volumes mobilisés :

- surface irriguée = 1000 Ha
- débit fictif continu = 0,8 l/s/ha
- durée de fonctionnement en pointe = 18h/24
- débit d'équipement = 1,06 m³/s
- volume journalier approximatif = 72 000 m³

Si l'objectif de la gestion serait l'AEP d'une ville et si la consommation journalière est de 200 l/j/hbt, un volume journalier de 72000 m³ correspondrait à l'AEP d'une ville de 500 000 hbt.

L'importance des volume alloués à l'irrigation font que les règles de gestion d'un barrage réservoir pour ce type d'usage, telles qu'on les conçoit en zones semi-arides, consistent à trouver un compromis entre la quantité d'eau à distribuer au cours de l'été et les volumes de ressources indispensables à la levée des futurs semis de l'automne. Ces règles de gestion inter-annuelle sont confirmées par la conjonction de la rareté de la ressource ainsi que de son irrégularité et la disjonction entre la période des apports et celle où les besoins en eau se déclarent. Le problème de la gestion des ressources en eau est fortement stochastique dans les zones semi-arides du fait de la méconnaissance des processus physiques (pluie-débit) et de la nature de l'information incomplète et souvent entachée d'erreurs.

Nombre de méthodes mathématiques ont été utilisés dans ce domaine de la gestion de l'eau. 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 et les méthodes de programmation dynamique ont été activement étudiées depuis les travaux de MASSÉ (1959).

D'autres techniques peuvent aussi être mises en œuvre. Ainsi YAZICIL et al (1983) ont-ils mis en place une gestion multi-objectif mult-réservoir (Green River Basin) respectant le choix des décideurs en minimisant par programmation linéaire les écarts à des courbes de vidange. Pourtant quelle que soit la technique utilisée, la modélisation se heurte à de nombreux obstacles :

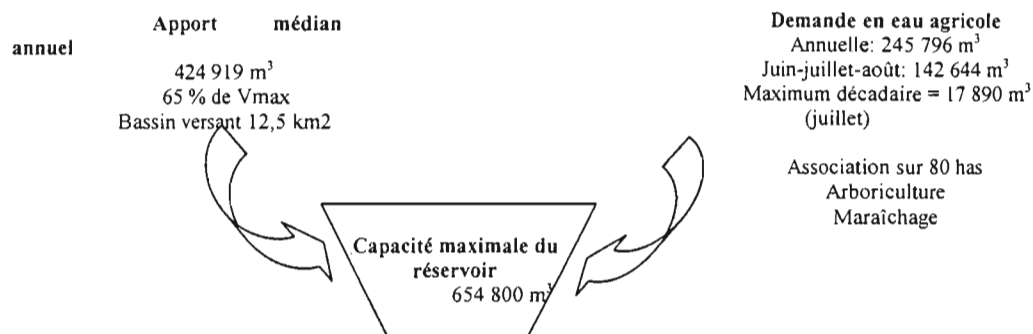
- Il est souvent difficile de quantifier l'objectif de gestion. Le problème de la gestion des systèmes hydro-agricoles a souvent été abordé dans le cadre de la programmation dynamique,
- L'aspect multi-objectif de la gestion où les usages sont multiples et ne peuvent être décrits par un seul critère,
- Le critère stochastique des aléas hydrologiques et du comportement des usagers de la ressource doit être intégré dans la modélisation de la gestion. Un choix simplificateur est alors d'utiliser la programmation dynamique sur des scénarios d'évolutions possibles (GOUSSEBAILLE ET ROCHE) ou de tester par simulations ou ajustement une classe restreinte de règles de gestion (BHASKAR ET WHITLACH). Sinon, la prise en compte explicite des aléas, en sus de la complexité des algorithmes de programmation dynamique stochastique qu'elle entraîne, doit rendre compte des notions de fiabilité et de défaillance de gestion (ASKEW, SIMONOVIC, ORLOB, RICHARD ET TURGEON).

Dans ce qui suit, on introduit un modèle de gestion du barrage collinaire EL MORRA, situé sur le bassin du Merguellil en Tunisie. Deux objectifs de gestion ont été choisis : la satisfaction de la demande agricole et la garantie d'un stock minimum dans le barrage. L'optimisation des règles de gestion devra préciser le poids optimum à donner à chaque objectif partiel, au travers de la détermination des critères de risque reliés à chaque règle optimisée.

DESCRIPTION DU SYSTEME EL MORRA :

Le barrage collinaire El Morra est situé sur le bassin versant du Merguellil (centre de la Tunisie) et l'objectif principal qui lui est affecté est l'alimentation d'un périmètre irrigué proche de la digue.

En moyenne, les apports sont suffisants pour satisfaire les besoins agricoles, mais la variabilité interannuelle des écoulements est très forte (écart-type de 342 500 m³). La demande agricole est inférieure aux apports moyens mais il y a risque de pénurie en période de estivale, au moment où les cultures spéculatives de melon et de pastèque sont en plein développement. La retenue doit donc contenir suffisamment d'eau de mars à août pour satisfaire la demande agricole tout en étant capable de laminier les crues de septembre - octobre et mars - avril.



PRESENTATION DES TERMES DU BILAN AU BARRAGE

Une station hydroluviométrique a été installée sur le barrage en mars 1996 (Bourges J et al, 1996), permettant de recueillir des données journalières d'évaporation, de pluie et de niveaux d'eau dans la retenue.

Relation hauteur-volume-surface (HVS)

Une seule bathymétrie a été effectuée sur le barrage lors de sa construction en 1992. LA surface de la retenue est déduite de la hauteur (h) par interpolation linéaire entre deux points de référence. La relation volume (v en m³)-hauteur (h en m) est fixée par lissage polynomial d'ordre 3 :

$$V = 87,722.H^3 + 2882,1.H^2 + 22429.H + 52000$$

Equation du bilan dans la retenue

Sur un intervalle de temps donné, l'équation générale du bilan hydrique est la suivante :

$$\Delta V = (V_r + V_{ecs} + V_p) - (V_{ev} + V_d + V_{inf} + V_u)$$

- ΔV : la variation de stock est connue d'après l'enregistrement limnigraphique
- V_p : apports dus aux précipitations sur la retenue, déduits des enregistrements pluviographiques et de la courbe hauteur-surface de la retenue
- V_{ev} : correspond à l'évaporation. Elle est estimée d'après les mesures journalières de bacs et la surface moyenne le même jour. Cette estimation reste soumise à erreur du fait du choix du coefficient de passage de l'évaporation bac à l'évaporation retenue.
- V_d : déversement (le barrage n'a pas encore déversé)
- V_u : vidange de fond, connue d'après les côtes lues avant et après manœuvre
- V_r : apports par ruissellement. C'est une première inconnue du bilan car il n'y a pas de station de jaugeage contrôlant les entrées du barrage. Son estimation a été effectuée par reconstitution des crues
- V_{inf} : volume infiltré, qui est fonction de la charge hydraulique de la retenue et donc du volume stocké. C'est la seconde inconnue du bilan.
- V_{ecs} : apports par écoulement souterrain et c'est la troisième inconnue du bilan.

Reconstitution des apports

En climat semi-aride, les crues sont violentes et courtes dans le temps. Au pas de temps journalier (le ruissellement existe encore), on peut considérer que l'infiltration ainsi que l'évaporation sont négligeables par rapport aux apports par ruissellement. L'équation du bilan est alors simplifiée. Les volumes enregistrés ont été alors lissés pour les crues suivies, du fait de l'erreur dans les enregistrements sur le limnigraphe (jour de grand vent et absence de crue) qui pose problème lors du calcul des termes du bilan journalier.

Reconstitution des flux évaporatifs

L'évaporation de la surface de la retenue est estimée à partir d'un bac colorado situé sur le site de l'étude, en prenant un coefficient de passage égal à 0,8 (zone ventée). Les flux évaporatifs sont déduits d'une série observée avec des moyennes journalières sur trois années. Ces valeurs sont corrélées au volume stocké dans la retenue, à travers une expression linéaire du type $V_{ev} = a V + b$.

Reconstitution des infiltrations

Elles peuvent être estimées par reconstitution des sécheresses, ce qui donne :

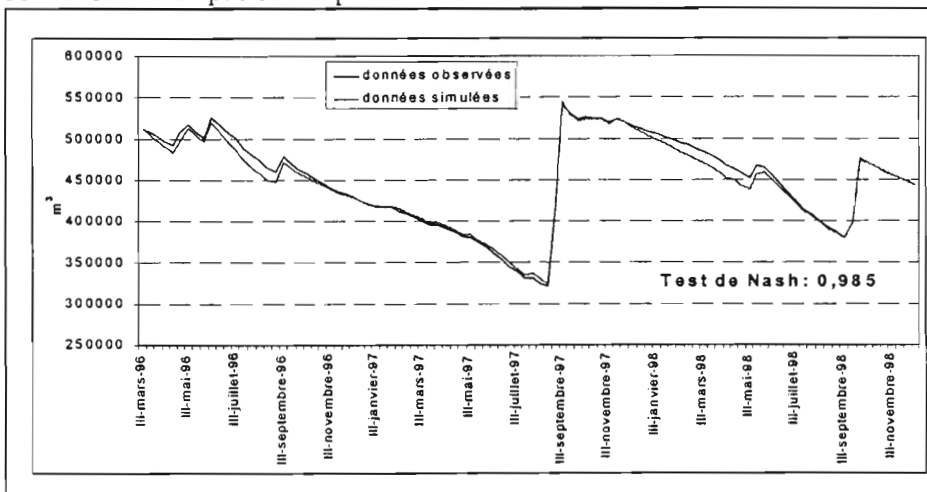
$$V_{inf} = \Delta V - V_{ev}$$

Les conditions de ce bilan sont une absence de pluie pendant la dernière quinzaine de jours et une variation négative du stock d'eau. Ce volume infiltré est corrélé au niveau de stock dans le barrage, selon une expression puissance $V_{inf} = c + V^b$ (Modèle SIMGES).

La série chronologique des apports

En vue d'une optimisation des règles de gestion, il est nécessaire de disposer d'une longue série d'apports, pour mieux appréhender l'aléa hydrologique. En considérant les pluies, les apports ont été reconstitués à l'aide du modèle pluie-débit GR3 du CEMAGREF (logiciel EMILE2, IRD). Ce modèle est calé à partir de trois années de mesures au barrage. Une génération des apports est alors effectuée pour disposer d'une longue série à partir d'une série de 24 années de pluie reconstituée des stations voisines et du modèle pluie-débit calé.

La reconstitution du fonctionnement est réalisée sur les 3 ans d'observation de la retenue et donne de bons résultats au pas de temps décadaire.



OPTIMISATION DES REGLES DE GESTION DU BARRAGE

L'optimisation des règles de gestion s'appuie sur une équation de bilan qui reflète au mieux le comportement réel du système hydrologique. Le développement du modèle se base sur l'identification des variables d'état, de la variable de décision et sur la formulation des contraintes hydrauliques et de la fonction objectif. La formulation du modèle d'optimisation se définit par :

Les états du système

Les variables d'état concernent celles du bilan (apports, évaporation, ...) et le stock dans le barrage au début de toute période de gestion.

Les commandes

La variable de décision est la lachure effectuée à l'instant t qui est L(t).

La fonction d'évolution

Elle dépend du temps et revient à l'expression du bilan du barrage, en tenant compte de L(t). Elle exprime le caractère dynamique de la gestion.

Les contraintes

Elles s'expriment sur les valeurs minimum et maximum du stock d'eau dans le barrage et sur les capacités de transit des lachures à effectuer :

$$\begin{aligned} V_{\min} &\leq V(t) \leq V_{\max} \\ L_{\min} &\leq L(t) \leq L_{\max} \end{aligned}$$

La fonction objectif

Lors de l'optimisation des règles de gestion, il a été fait usage d'un critère formulé, avec une pondération de deux objectifs, qui consiste en une minimisation simultanée et pondérée du déficit par rapport à un stock cible et de l'écart par rapport aux demandes en eau. Autrement dit, une partie du critère consiste à garder l'eau le plus longtemps dans la retenue pour pouvoir faire face à des éventualités non prévues et l'autre partie consiste à satisfaire les demandes en eau à l'aval du barrage. La formulation mathématique s'écrit de la façon suivante :

$$\text{MIN} \sum_{t=1}^{11} \left[\alpha \left(\frac{S_{t+1} - S_{\text{consig}}}{S_{\text{max}}} \right)^2 + (1 - \alpha) \left(\frac{u_t - B_t}{B_{\text{max}}} \right)^2 \right]$$

S_{t+1} : Stock final à la fin de chaque période de gestion,

S_{max} : Volume exploitable maximum (volume utile du réservoir),

S_{consig} : Stock cible (stock souhaité à la fin de la période de gestion),

α : Coefficient de pondération compris entre 0 et 1,

u_t : lâchure à optimisée entre le temps i et (i+1),

B_t : Demande en eau affichée en début de la période de gestion,

t = 0 : correspond au début du mois de septembre.

Il ne s'agit pas dès lors de conduire une optimisation sur un bénéfice économique, pour se substituer de façon automatique à la volonté de gestionnaire. Le compromis à réaliser s'appuie simplement sur la répartition du poids relatif de chacun des objectifs (satisfaire des demandes en aval du barrage et garantir un stock de sécurité pour faire face à des événements exceptionnels). On simulera cette gestion sur des chroniques synthétiques, de façon à comparer les règles optimales pour chaque valeur de α (pondération de chaque objectif), et de choisir les valeurs admissibles selon les désirs du gestionnaire du système (explicité à travers la fonction objectif et les contraintes).

Pour ce faire, on est amené à tracer les diagrammes de paréto qui représentent les indices de performance correspondants aux événements dommageables qui peuvent survenir au cours du temps. Ceci facilitera le choix de la valeur optimale de α , qui donne un meilleur compromis entre les deux objectifs de gestion.

Le modèle de gestion est par nature stochastique et les apports ne sont pas connus pour chaque pas de temps. Ainsi, à chaque niveau de stock à l'instant (t+1) correspond un apport et une probabilité d'occurrence de cette valeur d'apport. Ainsi, pour un niveau de stock initial à l'instant t, le système évoluera vers au plus « n » états finaux, avec n le nombre de valeurs d'apports possibles. Aussi, selon MORAN, un schéma simple de discrétisation des niveaux de stock et des classes d'apports, en nombre fini de n classes égales, permet d'appliquer des algorithmes d'optimisation type programmation dynamique stochastique (PDS).

Optimisation par Programmation Dynamique Stochastique (PDS)

Le processus d'optimisation par PDS est basé sur une équation récursive permettant d'optimiser le critère objectif défini précédemment en tenant compte des probabilités d'apparition des apports sur un horizon de temps donné :

- l'horizon de temps choisi pour le calcul est l'année car le barrage collinaire n'est pas un ouvrage de régulation inter-annuelle,

- le pas de temps de calcul est la décade sachant que c'est la durée minimum pour simuler correctement le fonctionnement du barrage et que les apports d'une décade à une autre sont indépendants (test d'autocorrélation de Wald - Wolfowitz),
- les apports et les volumes stockés dans la retenue sont discrétisés en classes de 3000 m³, volume qui correspond à la demande agricole minimale par décade et qui sera pris comme unité de base dans le calcul.

A chaque itération de la procédure d'optimisation, le gain espéré optimal est calculé pour chaque état du système. Lorsque ce gain devient constant d'une période à une autre, le critère de convergence par la stabilisation d'accroissement de la fonction est rempli (Louks et al, 1981). La procédure d'optimisation dite décision/hasard, où la variable apport est à l'origine du hasard et intervient par sa probabilité d'occurrence :

* C_{ir} : coût de la transition entre S_i et S_j

* P_{rj} , C_{rj} : probabilité de la transition S_i à S_j et C_{rj} la valeur de cette transition.

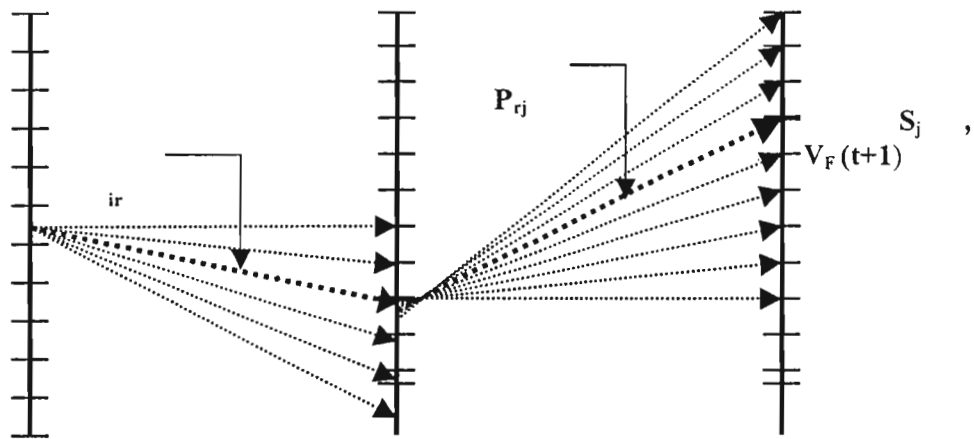


Schéma d'optimisation décision/hasard

DEFINITION ET CHOIX DES INCIDENTS ET DES INDICES DE PERFORMANCE DU SYSTEME

L'objectif de définir ce que peuvent être un événement dommageable et des indices de performance, revient à juger de l'opportunité d'une règle de gestion sur la base des mêmes paramètres. On s'intéressera ici aux incidents, liés au déficit du stock. Par incident, on entend tout événement, tel le fait pour un réservoir d'atteindre un niveau bas alarmant, qui se produit hors d'une gamme de limites pré-spécifiées ou niveaux de consignes.

Il est important de séparer un objectif pondéré d'un minimum de déficit de remplissage ou un stock cible à atteindre à chaque fin de période de gestion, de l'éventualité d'occurrence d'un événement dommageable, qui peut survenir lorsque les conditions climatiques n'arrivent pas à garantir l'objectif affiché, pour la règle de gestion choisie. Ces événements sont des incidents probables et réels qui peuvent être intégrés individuellement dans la gestion. Ils sont alors quantifiés une fois la règle de gestion optimale choisie pour α fixé et servent à mesurer les performances de cette dernière.

❶ **Défaillance du stock** : avant la fin de la période de gestion on a complètement vidé le réservoir. Cette situation dépend à la fois des aléas hydrologiques et de la politique de gestion suivie jusqu'à cette date (PARENT, 1992).

❷ **Demande non satisfaite** : à un instant donné, le stock d'eau dans le réservoir n'arrive pas à satisfaire les différents objectifs partiels.

❸ **Déversement** : ceci n'est pas à proprement parler un incident mais c'est un paramètre utile, car c'est le complément logique du premier incident.

A chacun de ces incidents, on associe, pour une règle de gestion donnée, divers indices de performance, à savoir :

- ① **Le risque** : c'est la probabilité de voir à un instant donné, l'événement en question se réaliser.
- ② **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.
- ③ **La vulnérabilité** : qui mesure l'ampleur du risque, c'est à dire l'importance moyenne d'un incident pour les usagers de la ressource.
- ④ La durée du séjour du système dans un état de défaillance.
- ⑤ La probabilité stationnaire que le système soit dans un état de défaillance.
- ⑥ Le temps du premier passage vers un état de défaillance.
- ⑦ Le temps moyen entre deux états : satisfaction totale et défaillance.

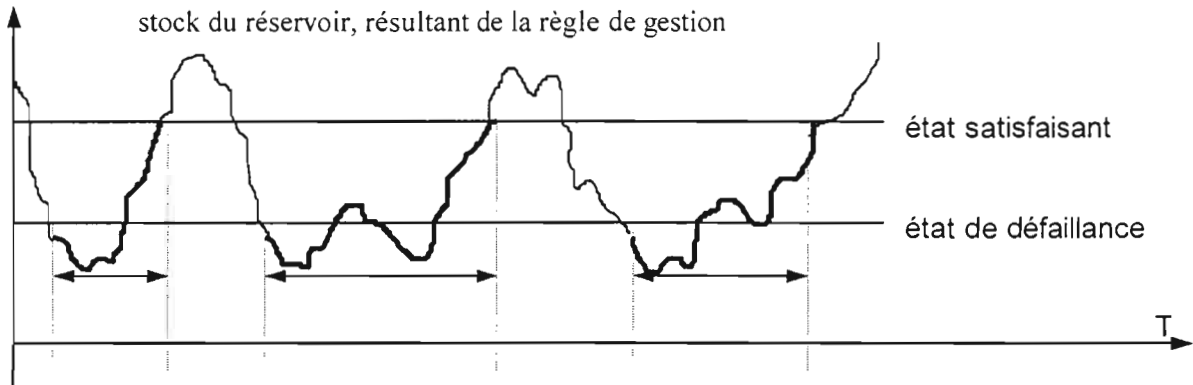


Fig. 2.3.1 : représentation de la résilience du système

d'après la définition de la résilience, on peut écrire :

$$\text{Résilience} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

La figure suivante représente l'évolution du système en fonction du temps :

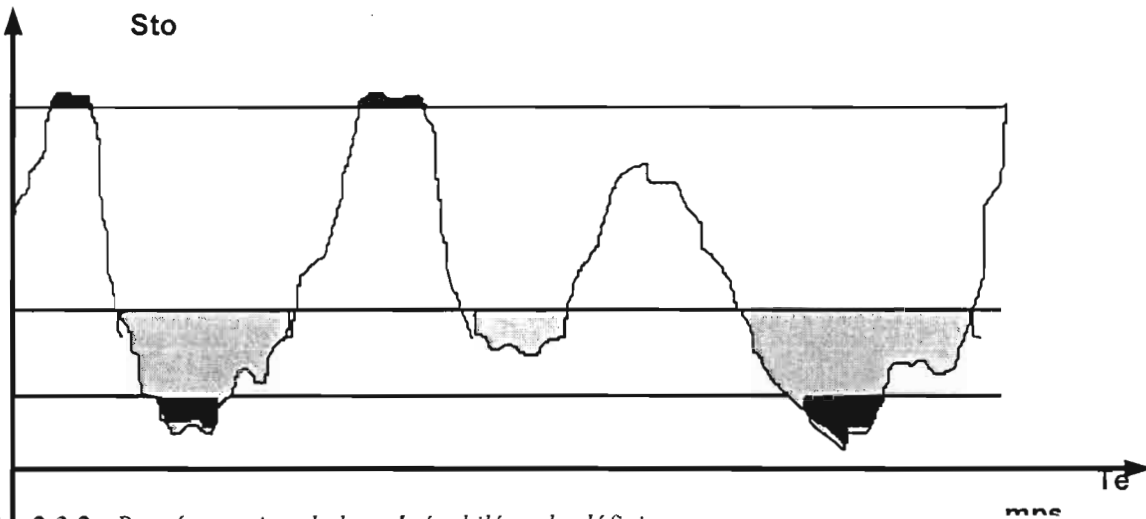


Fig. 2.3.2 : Représentation de la vulnérabilité ou le déficit

Soit donc :

$$Vdfs = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S(NC1) - S_t) \quad \text{pour } S_t \leq S(NC1)$$

$$V_{bns} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S(\text{NC2}) - S_t) \quad \text{pour } S_t \leq S(\text{NC2}), N : \text{nombre d'années de simulation}$$

et

$$V_{dev} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S_t - S(\text{NC3})) \quad \text{pour } S_t \geq S(\text{NC3})$$

La performance d'une règle de gestion par rapport à une autre est estimée à partir d'une comparaison entre les valeurs d'un même indice de performance calculé pour chaque règle, et pour deux événements dommageables

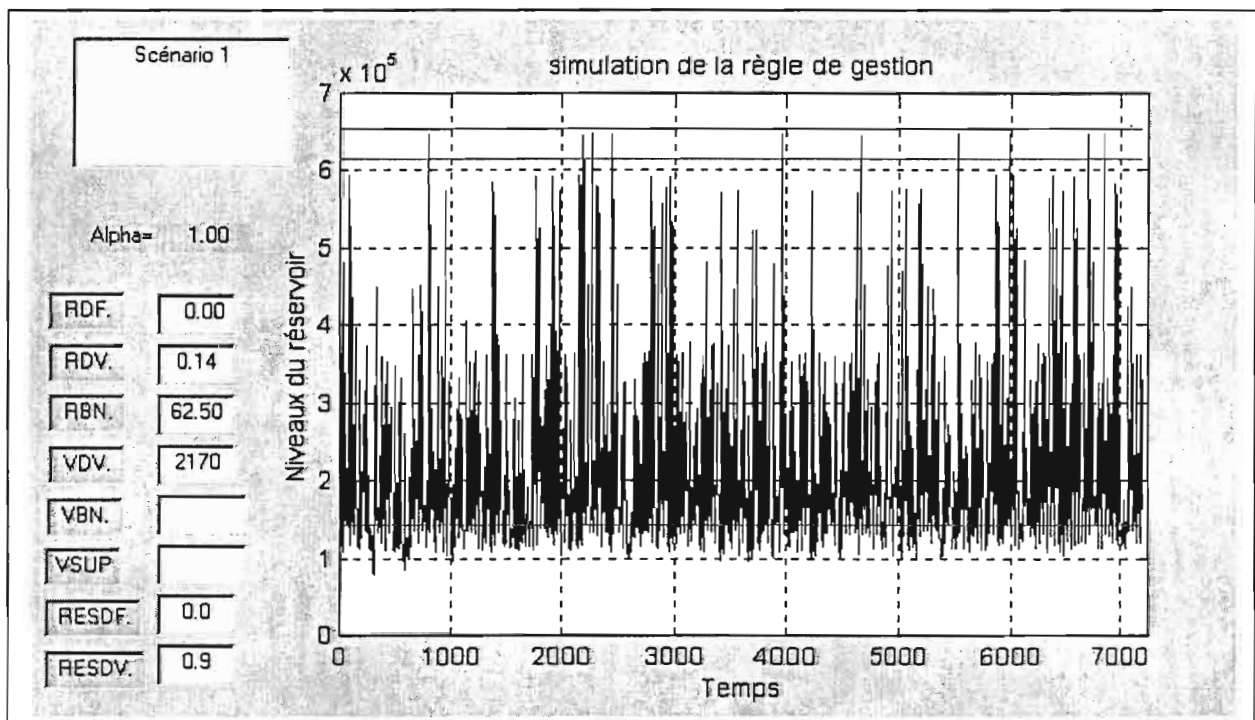
SIMULATION PAR ANALYSE DE CRITERES

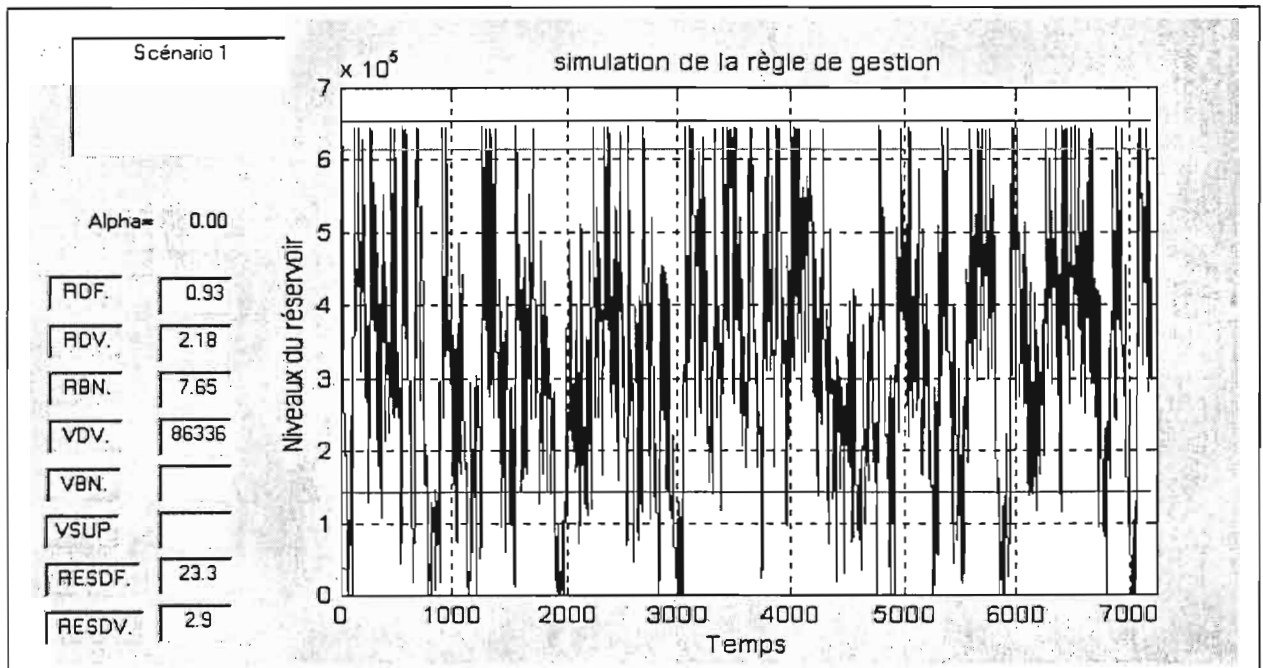
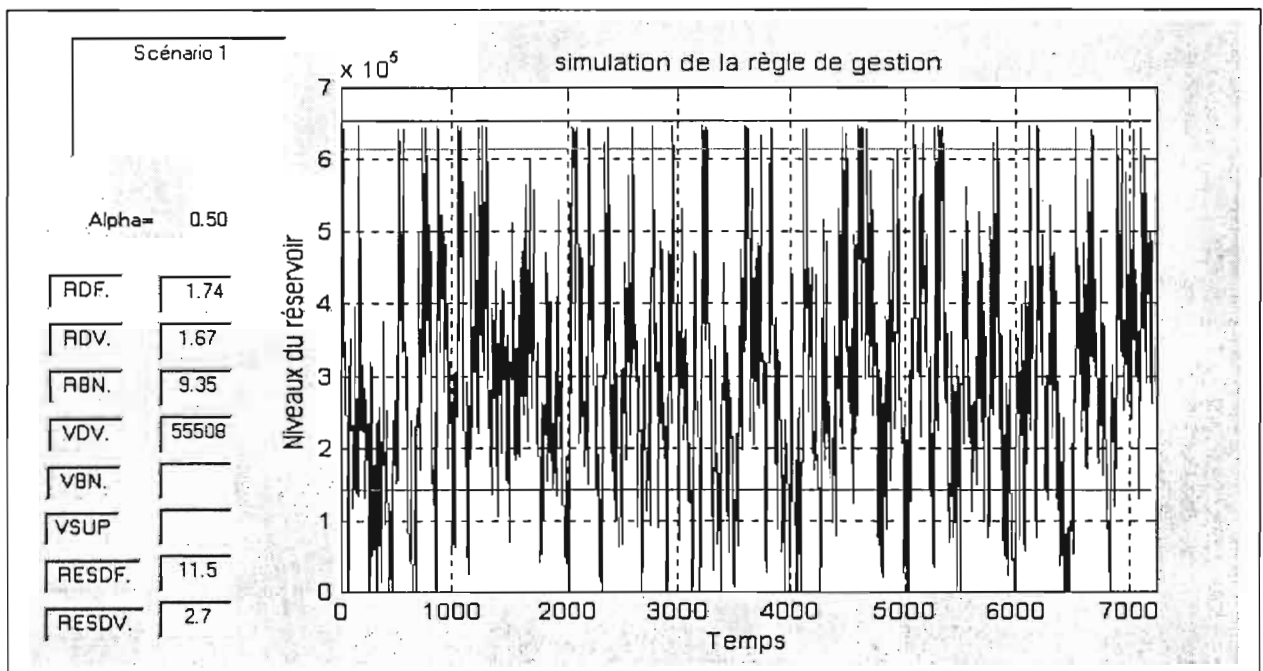
Dans le cas d'El Morra, nous avons choisi les indices suivants par simulation des règles optimales sur les 24 années de données hydrologiques générées ::

- risque de défaillance (RDF), de déverse (RDV) et de non satisfaction de la demande (RBN),
- vulnérabilité de défaillance (VDF), de déverse (VDV) et de non satisfaction de la demande (VBN),
- résilience de défaillance (RESDF) et de déverse (RESDV),
- lâchers de l'eau en plus de la demande (eau non utilisée et en surplus) : VSUP

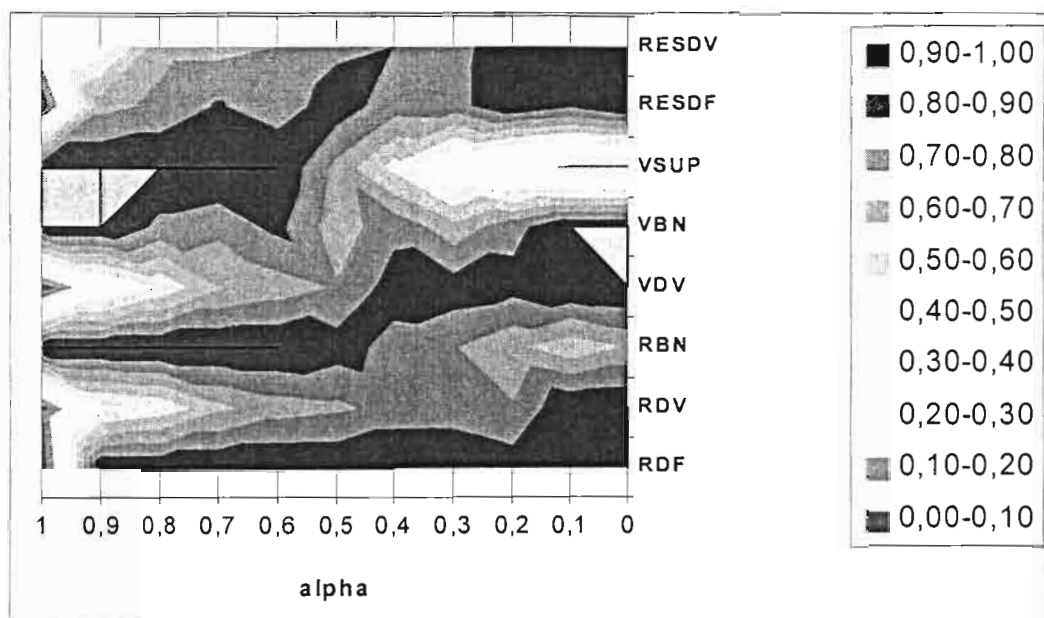
Ces indices sont tous normalisés entre 0 (très bonne performance) et 1 (très mauvaise performance) par un seuil de d'acceptabilité et sont regroupés ci-après en fonction de alpha :

$$\text{Indice normalisé} = (\text{indice} - \text{seuil acceptable}) / (\text{seuil inacceptable} + \text{seuil acceptable})$$



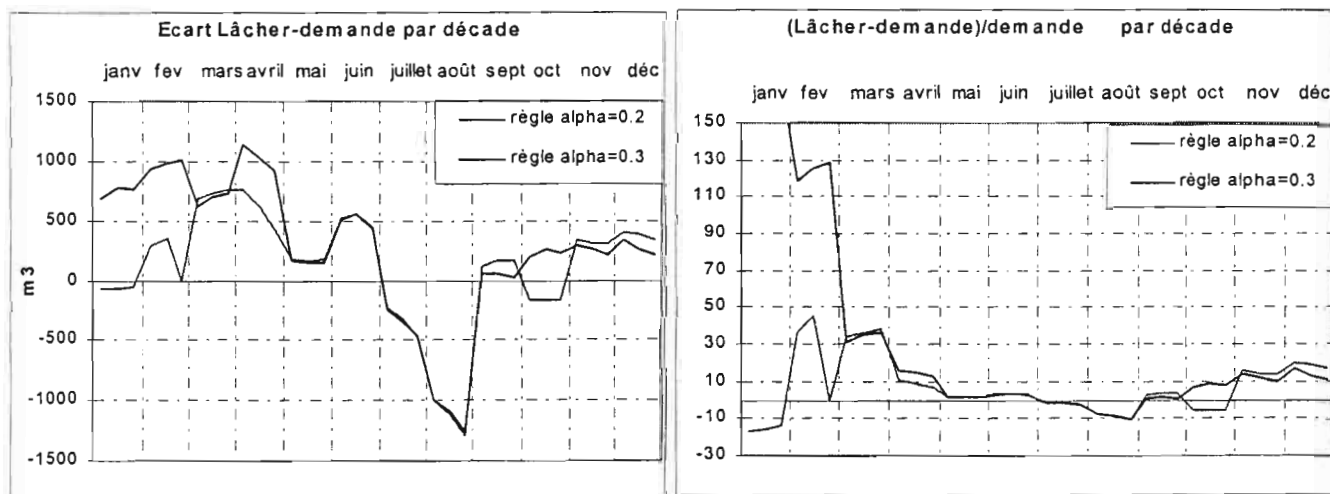


Pour simplifier l'interprétation des résultats, le graphique ci-après illustre les composantes : alpha, les indices et leurs valeurs. Lorsque la règle a un indice normalisé au delà de 1, elle est rejetée. Deux règles optimisées sont donc acceptables par rapport aux seuils des indices fixés (alpha = 0,2 et 0,3).



Résultats et perspectives

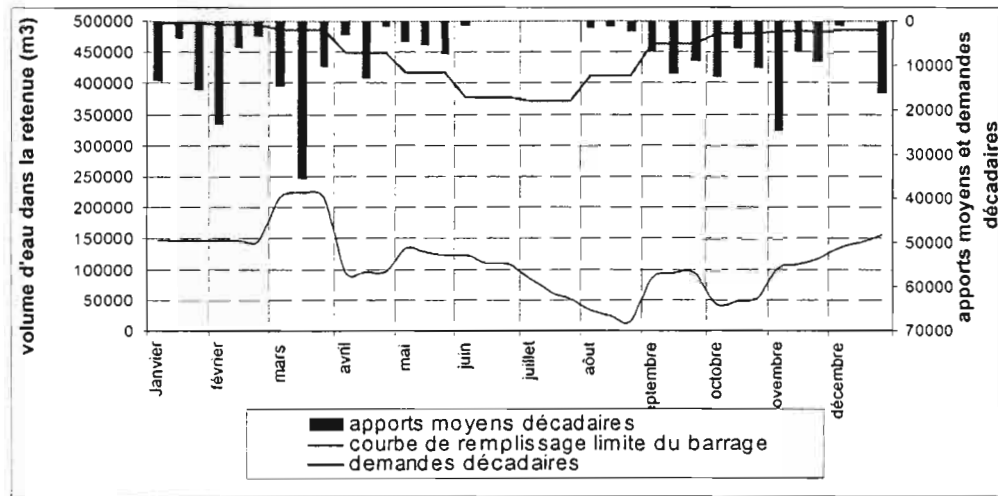
Au de ces résultats, il reste finalement peu de possibilités au gestionnaire pour éviter des incidents qu'il juge inacceptable ($\alpha = 0,2$ ou $0,3$).



Dans les 2 cas, les défaillances de fourniture sont faibles et le choix de ces coefficients montre que le gestionnaire a tout intérêt à donner un poids préférentiel aux demandes agricoles pour satisfaire le double objectif qu'il s'est fixé. De mai à août, les deux règles de gestion ($\alpha=0,2$ et $\alpha=0,3$) satisfont la demande de la même manière. En revanche, elles diffèrent de janvier à avril. La règle ($\alpha=0,3$) donne toujours un surplus d'eau, sauf durant les mois secs (juillet-août). La règle ($\alpha=0,2$) est plus proche d'un déficit moyen nul (moins de surplus d'eau) et présente un léger déficit en octobre (semis). Cependant ce déficit a une valeur absolue faible ($\leq 300m^3$ par décade), soit $12,5 m^3$ par hectare et par jour, ce qui représente $0,125 mm$ par jour (\leq limite de précision des valeurs de la demande en eau). Le choix n'étant pas évident entre les deux règles, on s'oriente vers celle qui est la moins pénalisante globalement (moins de déficit par décade, somme des indices normalisés minimal), soit la règle ($\alpha=0,3$).

RESULTATS DE LA GESTION OPTIMISEE DU BARRAGE COLLINAIRE EL MORRA

Détermination de la courbe de remplissage



CONCLUSION

Cette règle de gestion sélectionnée est basée sur une fonction objectif donnant un poids de 0,3 à la garantie d'un stock minimal dans le barrage (213000m^3) et un poids de 0,7 à la satisfaction de la demande. La discrétisation des apports et du stock font que les lâchers se font selon cette unité de la classe (3000m^3). Lorsque la lâchure est nulle et que le niveau de stock est supérieur au niveau objectif fixé égal à 50% de la médiane des apports (213000m^3), une correction devra être apportée pour rapporter la lâchure aux valeurs faibles de volumes d'eau éventuellement demandées. Cette correction est annulée si le niveau de stock est inférieur au niveau minimum correspondant au volume de la demande de la période de pointe (142600m^3). A partir de là, la matrice faisant correspondre pour chaque décennie, le niveau de stock à une valeur de la décision de lâchure fait ressortir une ligne objectif (dite de remplissage) qui délimite les niveaux de stock par décennie où la demande est totalement satisfaite.

Le risque maximum de défaillance est de 1,41%, le risque de déverse est de 2,12% et le risque de demande non satisfaite à hauteur de 60% de sa valeur est de 11,1%. La vulnérabilité maximum de déverse est de 70000m^3 , de demande non satisfaite est de 6000m^3 et de lâchures non utilisés est de 42000m^3 .

Ces résultats restent tributaires des erreurs des incertitudes des données qui sont à leur origine : apports reconstitués avec une tolérance d'erreurs, demande en eau estimée et fixe par décennie, lors de l'optimisation et de la simulation des règles de gestion

Toutes ces approches sont concentrées sur la production et la constitution de la ressource en eau ainsi que sa variabilité, en revanche les demandes sont considérées comme des données déterminées par des scénarios pré-établis toujours à peu près satisfaites.

Lorsque le déficit offre/demande est structurel, la gestion de la ressource devient une gestion de la pénurie et dans ce cas, les solutions proposées par les calculs précédents ne sont plus valables notamment dans le domaine de la demande en eau agricole.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

PARENT.E, LEBDI.F et HURAND.P, 1992. Strategic operation of a water resource system : application to the NESTE water resource system. Revue des Sciences de l'EAU, 4(1992) 543-568

- 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., Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Economica*
- SIGVALDSON O.T., 1976. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research*, 12 (2) : 263-278
- SNIEDOVITCH, M., 1979. Reability constrained reservoir control problems: 1. Methodological issues. *Water Ressources Research*, 15 (6): 1574-1582.
- SNIEDOVITCH M., 1980. A variance constrained problem. *Water Ressources Research*, 16 (2): 271-274.
- SZIDAROVSKI F., DUCKSTEIN L., 1986. Dynamic multiobjective optimisation: 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 hight Aswan dam for hydropower and irrigation. *Management Science*, 8 (4).
- TURGEON A., 1980) Optimal operation of multireservoir power systems with stochastic inflows. *Water Ressources Research*, 16 (2): 275-283.
- WASIMI S.A., KITANIDIS P.K., Real time forecasting and dauly operation of a system of reservoir under flood conditions using linear quadratic gaussian stochastic control. *Water Ressources Research*, 19 (6): 1511-1522.
- YAKOITZ S., 1982. Dynamic programming applications in water ressources. *Water ressources Research*, 18 (4): 673-696.
- YACIZIL H., HOUCKS M., TOEBES G.H., 1983. Daily operation of amultipurpose reservoir system. *Water Ressources Research*, 19 (1): 1-13.
- YEH W.W.G., 1985. Reservoir management and operations models: a state of art review. *Water Ressources Research*, 21 (12): 1797-1818.