

Modélisation et simulation des barrages hydro-énergétiques

Catalin DIMON, Dumitru POPESCU

Laboratoire d'Automatique, Control des Processus et Ordinateurs
Faculté d'Automatique et d'Ordinateurs, Université Polytechnique de Bucarest
Splaiul Independentei 313, 060042, Bucarest, Roumanie
Tel. +4-021-4029179, Fax. +4-021-3181014

catalin.dimon@gmail.com, dpopescu@indinf.pub.ro

Résumé – Le travail présente une stratégie de modélisation et simulation de la dynamique d'un barrage hydro-énergétique. L'information utilisée pour l'évaluation des modèles mathématiques est représentée par un ensemble de données recueillies sur une vingtaine d'années sur un des systèmes hydro-énergétiques de la Roumanie. Les résultats de notre recherche permet l'évaluation de l'état actuel du système et offre une information importante pour la conception et l'identification de systèmes similaires. Ces résultats ont été obtenus à l'aide des outils informatiques dédiés à l'acquisition de données, modélisation et identification qui existe dans la Faculté d'Automatique et d'Ordinateurs de l'UPB (SISCON et PIM software).

Mots clés- barrage hydro-énergétique, modélisation, identification, simulation

I. INTRODUCTION

Deux procédures d'évaluation des modèles mathématiques de la dynamique du barrage hydro-énergétique ont été proposées. Ces procédures ont été employées pour l'étude du système hydro-énergétique de Tarnita (Roumanie) et sont décrites comme suit :

1) Une évaluation globale d'un modèle stationnaire multivariable non-linéaire pour des variations lentes dans l'évolution sur l'ensemble de l'intervalle d'observation (mesures de 1988 à 2008). La solution pour ce problème est donnée par une identification off-line en utilisant la méthode des moindres carrés (Least-Squares LS). La structure du modèle global, qui décrit la déviation du barrage, repose sur trois éléments importants: l'évolution temporelle du phénomène (consolidation ou dégradation des parties endommagées), l'effet hydrostatique et respectivement, thermique [5], [6].

2) Une évaluation partielle par des modèles dynamiques sur cinq intervalles d'observation. Les mesures de l'entrée ($u(k)$ – la pression hydrostatique) et de la sortie ($y(k)$ - la déviation du barrage) sont divisées en cinq parties afin d'employer une méthode usuelle d'identification (Moindres Carrés Réursive - Recursive Least-Squares RLS). L'estimation des paramètres d'une partie est utilisée pour l'initialisation de l'identification de la partie suivante. La dernière estimation donne la dynamique du système sur tout l'intervalle des observations [1], [2], [3], [4], [7] et [13].

II. ANALYSE ET EVALUATION DU MODELE STATIONNAIRE

Nous considérons le modèle global du barrage comme un modèle multivariable non-linéaire. Les entrées sont spécifiées

par : le temps t associé à l'évolution du barrage, la charge hydrostatique h de l'eau, la température T de l'ouvrage et la sortie par la déviation du barrage, Y .

On procède à l'évaluation de ce modèle par la définition de la structure et l'estimation des paramètres associés.

L'expérience de la surveillance des barrages en Roumanie montre que la structure du modèle résulte dans la superposition de trois états principaux [5] :

a) un état irréversible correspondant à une évolution du phénomène dans le temps t qui peut avoir tendance à s'amortir (adaptation ou consolidation) ou s'accélérer (dégradation).

b) un état réversible correspondant à l'effet de la charge hydrostatique au niveau de retenu, h .

c) un état réversible correspondant à la répartition des températures dans le barrage, T .

On peut cependant ajouter les erreurs expérimentales ainsi que les effets de toutes les autres causes secondaires qu'on néglige pour simplification, notées e .

On admettra donc qu'il existe trois fonctions correspondantes $f_1(t)$, $f_2(h)$, $f_3(T)$ et par l'additivité de ces trois effets indépendants, va résulter la première représentation (brute) du modèle :

$$Y = f_1(t) + f_2(h) + f_3(T) + e \quad (1)$$

Ensuite, il faut trouver pour les fonctions f_1 , f_2 , f_3 , une expression algébrique qui doit, avec un minimum de paramètres, représenter le mieux possible tous les effets susceptibles d'être rencontrés.

L'expérience obtenue lors de l'étude de très nombreux phénomènes par voie graphique ou de façon analytique, a justifié les choix suivants.

Loi $f_1(t)$: Elle comprend un terme exponentiel négatif représentant l'évolution amortie et un terme exponentiel positif représentant l'évolution accélérée, le temps étant compte à partir de la mise en eau de l'ouvrage et en prenant comme unité de temps l'année :

$$f_1(t) = b_1 \exp(-t) + b_2 \exp(t) \quad (2)$$

La loi adoptée n'est pas toujours capable de représenter certaines variations d'évolution et les discontinuités qui apparaissent parfois mais exprime cependant, dans le cas général, une bonne approximation.

Il faut, par ailleurs, remarquer que l'arbitraire du temps pour les évolutions accélérées et amorties n'a pas d'importance. Compte tenu de cette remarque pour profiter au

maximum des courbures de $\exp(-t)$ au voisinage de $t=0$, on peut utiliser une variable réduite $F_1=\exp(-(t-t_1))$, t_1 étant une date de celle de la première mesure réalisée (ceci est important quand des mesures mettent en évidence des évolutions bien après la mise en eau).

De même, pour éviter les valeurs importantes de $\exp(t)$ quand t croît, on utilisera la variable réduite $F_2=\exp(t-t_2)$, t_2 étant la valeur de t prise par exemple à la fin de l'année de la dernière mesure.

Avec ces précisions les variables réduites varient de 0 à 1 dans la période de mesures étudiées.

Loi $f_2(Z)$: La variété des formes nécessaires à la loi hydrostatique peut être obtenue par une fonction polynomiale du quatrième degré de la cote de retenue ou, de façon plus pratique, du creux relatif Z :

$$f_2(Z)=b_3Z+b_4Z^2+b_5Z^3+b_6Z^4 \quad (3)$$

avec, $Z = (RN-h)/H$, où :

- h - cote de retenue du jour de la mesure;
- RN - retenue normale;
- H - hauteur du barrage.

Le choix de la variable Z permet de conserver une valeur entre 0 et 1 quelque soient l'altitude et le dimensionnement de l'ouvrage et une bonne précision dans la résolution numérique du système d'équations. Enfin, elle impose l'état plein comme état de référence hydrostatique ($f_2(Z)=0$ pour $Z=0$, soit pour $h=RN$).

Les études de surveillance ont montré qu'un polynôme de 4-ème degré est suffisant pour représenter tous les effets actuellement connus.

Loi $f_3(T)$: Chaque année, à la même date, l'état thermique d'un barrage est pratiquement le même, il ne dépendrait donc, en première approximation que de la saison S .

Une estimation saisonnière peut substituer la loi thermique et une fonction périodique du temps sera considérée (période d'un an).

En fait, c'est devant l'absence quasi-générale de mesures de températures dans la masse des barrages roumains qu'on a été amenés à choisir la session S comme variable explicative, donc le calcul ne nécessite qu'un calendrier.

Utiliser, par exemple la température extérieure du jour de la mesure sera une simplification inadmissible.

La variable retenue est alors assimilée à un angle valant 0 degrés le 1^{er} janvier et 360 degrés le 31 décembre.

La loi saisonnière de la plupart des phénomènes est correctement représentée par une fonction sinusoidale de S , assortie d'une phase inconnue ϕ . Des dissymétries utiles peuvent être introduites en complétant la loi par un harmonique de fréquence double et de phase inconnue ϕ .

Soit :

$$f_3(S)=\alpha \cos(S+\phi)+\beta \cos(2S+\phi) \quad (4)$$

qui se développe en fonction de phases et alors :

$$f_3(S)=b_7\cos(S)+b_8\sin(S)+b_9\sin^2(S)+b_{10}\sin(S)\cos(S) \quad (5)$$

Le modèle global du barrage sera :

$$Y=f_1(t)+f_2(h)+f_3(S)+e \quad (6)$$

relation qui exprime le caractère non-linéaire du modèle.

Le problème est maintenant, de déterminer les valeurs des paramètres du modèle.

A. Identification des paramètres du modèle

Ce modèle s'écrit sous une forme linéaire polynomiale plus facile pour l'évaluation des paramètres, en substituant aux variables non-linéaires t , Z , S , les variables linéaires x (x_1, x_2, \dots, x_{10}), par les notations suivantes :

$$\begin{aligned} x_1 &= e^{-\zeta_1} & x_6 &= z_2^4 \\ x_2 &= e^{\zeta_1} & x_7 &= \cos z_3 \\ x_3 &= z_2 & x_8 &= \sin z_3 \\ x_4 &= z_2^2 & x_9 &= \sin^2 z_3 \\ x_5 &= z_2^3 & x_{10} &= \sin z_3 \cos z_3 \end{aligned} \quad (7)$$

La technique de l'estimation des paramètres, basée sur un ensemble des observations, est la méthode statistique connue, des moindres carrés.

Nous avons à notre disposition, une collection des données, résultat d'une campagne des mesures habituelles mises à jour régulièrement pendant la période 1998-2008, prélevées sur le barrage de Tarnita avec une période d'échantillonnage de 7 jours [8], [9].

La méthode utilisée dans ce cas est la méthode des moindres carrés. Nous montrons le cas linéaire en utilisant les entrées du modèle. Soit un procédé avec n entrées, $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ et la sortie y . Après l'acquisition synchrone des mesures, nous avons eu à la disposition la matrice des données sous la forme :

$$X_m = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Nn} \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

où :

X_m - la matrice des entrées ;

Y - le vecteur des mesures à la sortie ;

x_{ij} - la valeur de l'élément j ($j=1, n$) pour la mesure i ($i=1, N$) ;

y_i - la valeur de la sortie pour la mesure i ($i=1, N$).

On associe à ce procédé le modèle linéaire avec les paramètres \hat{b} :

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \hat{b}_i x_i = \hat{b}^T x \quad (9)$$

Après avoir calculé l'estimation des paramètres, il est nécessaire de valider le modèle. Dans le cas où le modèle ne peut pas être validé nous avons imaginé une procédure adaptative pour ré-estimer les paramètres. Nous introduisons l'indice R^2 comme mesure du degré de précision du modèle :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [\hat{y}_i - \bar{y}]^2}{\sum_{i=1}^N [y_i - \bar{y}]^2} \quad (10)$$

Dans cette relation nous avons :

- \hat{y}_i - la valeur de la sortie calculée pour le modèle,
- y_i - la valeur de la sortie du procédé pour la mesure i ,
- \bar{y} - la valeur moyenne des sorties du procédé.

Si la valeur de R^2 se trouve dans l'intervalle (0,7, 1) alors le modèle peut être validé.

La validation des résultats donnés par les paramètres d'estimation \hat{b} est basée donc sur la valeur de l'indice R^2 .

Les résultats de l'identification (pour $n=10$ entrées et $M=1200$ mesures) ont été obtenus et validés, par simulation, avec l'outil informatique SISCON par la méthode LS pour le cas non-linéaire multivariable [6], [11], [12] et [13].

La fonction polynomiale $f_2(Z)$ a été calculée à l'aide de la formule :

$$Z = \frac{RN - h}{H}, \text{ avec } RN = 521.5, H = 97. \quad (11)$$

Les paramètres du modèle global sont :

Paramètre estimé	Valeur obtenue
b_0	-41.445
b_1	12.818
b_2	-5.142
b_3	-37.740
b_4	414.231
b_5	-1279.173
b_6	994.583
b_7	-1.395
b_8	-7.060
b_9	-1.245
b_{10}	-0.206
Indice R^2	0.916

L'évolution des sorties de la déviation y du barrage et son modèle identifié sont présentés ci-dessous, dans la figure 1.

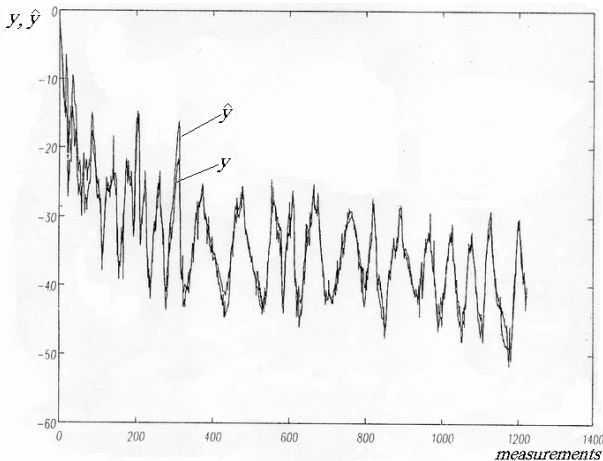


Fig. 1. Evolution de la déviation du barrage

III. EVALUATION DES MODELES DYNAMIQUES

Dans cette section nous considérons le système hydro-énergétique sous sa forme continue entrée-sortie : l'entrée $u(t)$ (le niveau d'eau à l'intérieur du barrage), la sortie $y(t)$ (la déviation du barrage) et la perturbation $p(t)$ (un processus aléatoire pour modéliser l'effet de la température extérieure et autres phénomènes saisonniers donc l'effet est thermique ou hydro-dynamique). Après une opération de discrétisation nous avons pour les 5 intervalles du temps les modèles discrets.

A. Structure des modèles à temps discret

On associe au procédé mentionné ci-dessus un modèle dynamique à temps discret :

$$B(q^{-1})y(k) = A(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})e(k), \quad (12)$$

où :

$u(k)$ - l'ensemble des valeurs discrètes de l'entrée $u(t)$,

$y(k)$ - l'ensemble des valeurs discrètes de la sortie $y(t)$,

$e(k)$ - bruit blanc générant des valeurs discrètes de la perturbation $p(t)$.

L'entrée $u(k)$ est une perturbation mesurable pour le système en boucle ouverte. Pour cette structure nous proposons une méthode efficace pour estimer les paramètres du modèle à temps discret (l'évaluation des coefficients polynomiaux de $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$), utilisant la méthode de RLS.

B. Estimation des paramètres par RLS

La stratégie d'évaluation des paramètres utilise des techniques d'estimation adaptative récursive. Si nous notons avec $\hat{\theta}(k+1)$ le vecteur de l'estimation, avec $\phi(k)$ le vecteur des données et avec $\varepsilon(k+1)$ l'erreur de prédiction, alors la relation récurrente devient :

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + F(k+1)\phi(k)\varepsilon(k+1) \quad (13)$$

$F(k+1)$ est la matrice des gains adaptatives à chaque pas que les paramètres $\hat{\theta}(k)$ sont modifiés. La relation récurrente pour $F(k)$ est :

$$F(k+1) = F(k) - \frac{F(k)\phi(k)\phi^T(k)F(k)}{1 + \phi^T(k)F(k)\phi(k)} \quad (14)$$

avec l'initialisation $F(0) = \alpha I$, $\alpha > 0$.

L'algorithme d'adaptation peut être initialisé à $\hat{\theta}(0) = 0$, quand nous n'avons aucune information sur $\hat{\theta}$.

Pour conclure, l'identification des paramètres du modèle dynamique par la méthode RLS utilise les équations suivantes :

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + F(k+1)\phi(k)\varepsilon(k+1)$$

$$F(k+1) = F(k) - \frac{F(k)\phi(k)\phi^T(k)F(k)}{1 + \phi^T(k)F(k)\phi(k)} \quad (15)$$

$$F(0) = \alpha I, \alpha > 0$$

C. Validation des modèles à temps discret

La perturbation aléatoire est considérée comme un bruit blanc. Nous pouvons faire un test de validation, basé sur le blanchissement de l'erreur de prédiction, en contrôlant les valeurs de la fonction d'auto-corrélation donnée par :

$$R(i) = M[e(k)e(k-i)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [e(k)e(k-i)] \quad (16)$$

où $R(i)$ est la fonction de covariance (auto-corrélation) pour une séquence de déviation $e(k)$ à i pas. La covariance est :

$$RN(i) = \frac{R(i)}{R(0)} \quad (17)$$

Pour un bruit blanc gaussien, la séquence de ces variables est indépendante et grâce au caractère ergodique du procédé aléatoire, le test de validation est : $RN(0)=1$ et $RN(i)=0$, $i=1, k$. En pratique, les conditions de test sont :

$$RN(0)=1 \text{ et } RN(i) \leq \gamma_i \text{ avec } \gamma_i \leq 0.1. \quad (18)$$

Dans le cas du barrage roumain de Tarnita nous avons proposé un modèle à temps discret de deuxième ordre :

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \\ B(q^{-1}) &= b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} \\ C(q^{-1}) &= c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} \end{aligned} \quad (19)$$

$\hat{\theta}(0)$ a été initialisé à l'origine de l'espace des paramètres, avec $F(0) = \alpha I$ ($\alpha = 1000$). Les résultats de simulation ont été obtenus par le software PIM pour une identification récursive expérimentale [1], [2], [10], [11] et sont présentés ci-dessous.

L'intervalle d'évolution des données mesurées est 11/11/1988-29/12/2008. Pour modéliser l'évolution irréversible du barrage dans la forme réduite (la fonction $f_i(t)$) nous utilisons :

- t_1 – les données du premier enregistrement (12/11/1988);
- t_2 – les données du dernier enregistrement (29/12/2008).

Pour les cinq intervalles de temps, nous avons calculé les coefficients des polynômes $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, les valeurs moyennes et les valeurs normalisées pour les fonctions d'autocorrélation associées à ces modèles.

- Intervalle 1: 11/12/1988 - 07/04/1993

$A(q^{-1})$	$B(q^{-1})$	$C(q^{-1})$
$a_1=-3.68$	$b_1=-106.74$	$c_1=-0.324$
$a_2=2.688$	$b_2=107.81$	$c_2=0.088$

$RN(0)$	$RN(1)$	$RN(2)$	$RN(3)$	$RN(4)$
1.000	0.033	-0.026	0.068	-0.002

- Intervalle 2: 07/13/1993 - 12/24/1997

$A(q^{-1})$	$B(q^{-1})$	$C(q^{-1})$
$a_1=-1.39$	$b_1=-0.128$	$c_1=-0.47$
$a_2=0.40$	$b_2=-7.588$	$c_2=0.05$

$RN(0)$	$RN(1)$	$RN(2)$	$RN(3)$	$RN(4)$
1.000	0.0155	-0.007	0.02	-0.07

- Intervalle 3: 12/27/1997 - 08/31/2001

$A(q^{-1})$	$B(q^{-1})$	$C(q^{-1})$
$a_1=-0.98$	$b_1=1.31$	$c_1=-0.03$
$a_2=-0.006$	$b_2=-11.44$	$c_2=0.02$

$RN(0)$	$RN(1)$	$RN(2)$	$RN(3)$	$RN(4)$
1.000	-0.004	0.0002	0.06	0.027

- Intervalle 4: 09/01/2001 - 05/02/2005

$A(q^{-1})$	$B(q^{-1})$	$C(q^{-1})$
$a_1=-0.819$	$b_1=3.593$	$c_1=0.172$
$a_2=-0.169$	$b_2=-12.659$	$c_2=-0.002$

$RN(0)$	$RN(1)$	$RN(2)$	$RN(3)$	$RN(4)$
1.000	-0.001	-0.007	0.02	0.045

- Intervalle 5: 05/16/2005 - 12/29/2008

$A(q^{-1})$	$B(q^{-1})$	$C(q^{-1})$
$a_1=-1.124$	$b_1=3.342$	$c_1=-0.108$
$a_2=0.126$	$b_2=-4.203$	$c_2=0.021$

$RN(0)$	$RN(1)$	$RN(2)$	$RN(3)$	$RN(4)$
1.000	0.0005	-0.0009	-0.0052	0.0062

IV. CONCLUSIONS

Un modèle global qui décrit l'évolution de la déviation du barrage hydro-énergétique a été évalué selon des données recueillies de 1988 à 2008.

L'analyse des résultats obtenus avec le modèle global montre que le système a une évolution lente avec une tendance vers une position stationnaire (évolution à tendance de stabilisation).

Un modèle dynamique pour chacun des cinq intervalles d'intérêt a été obtenu par l'emploi des techniques récursives expérimentales (RLS).

L'évaluation du comportement du barrage utilisant les modèles dynamiques sur l'intervalle des observations divisé, montre des évolutions non périodiques caractérisés par une inertie et un effet de réponse inverse. L'effet du modèle à

réponse inverse montre qu'un bon système de consolidation peut être réalisé non pas au fond, mais sur les cotés du barrage.

Cette information a été utilisée pour l'évaluation des phénomènes dynamiques liés aux barrages existants et pour la conception, l'exploitation et surveillance des systèmes hydro-énergétiques en Roumanie.

REFERENCES

- [1] Soderstrom T. et Stoica P. *System Identification*. Prentice Hall, 1989.
- [2] Astrom K. et Nilsson J. *Scheme of Iterated Identification and Control*. Proceedings of the 10th IFAC Symposium on System Identification (SYSID), vol. 2, pp. 171-176, 1994.
- [3] Landau I. D. *Identification et Commande des Systèmes*. Hermes Press, Paris, France, 1995.
- [4] Popescu D., Jora B. et Popea C. *Identification for Control*. Preprints of IFAC Conference on System Structure and Control (SSC), pp. 138-142, Bucharest, Romania, 1997.
- [5] Kazenot P. *Rapport du Service de la Production Hydraulique – Electricité de France*, 1996.
- [6] Ene C. et Bordea D. Modelling of the hydro-energetics dams, The 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL), Sibiu, Romania, 2007.
- [7] Dauphin-Tanguy G., Foulloy L. et Popescu D. *Modelisation, Identification et Commande des Systemes*. Romanian Academy Press, Bucharest, Romania, 2004.
- [8] Dion J.M. et Popescu D. *Optimisation des Systèmes – Commande Optimale*. Diderot Press, Paris, France, 1997.
- [9] Gentil S. et Popescu D. *Commande Numerique et intelligence Artificielle en Automatique*. Tehnica Press, Bucharest, romania, 1998.
- [10] Goodwin G.C. et Payene R.L. *Dynamic System Identification: Experimental Design and Data Analysis*. Academic Press. New-York, 1977.
- [11] Hof P. van der et Schrama R. *Identification and Control*. Automatica – Closed Loop Issues, vol. 31, no. 12, pp. 1751-1770, 1995.
- [12] Popescu D. et Serbanescu M. Software Package for Optimal Decisions in Large Scale Systems, Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Large Scale Systems (LSS), Bucharest, Romania, 2001.
- [13] Popescu D., Stefanoiu D., Lupu C., Petrescu C., Ciubotaru B. et Dimon C. *Industrial Process Control*. AGIR Press, Bucharest, Romania, 2007.