

Modélisation des déplacements de barrages

G. D'URSO⁽¹⁾, P. PRIEUR⁽¹⁾, C. VINCENT⁽¹⁾, F. BONNAIRE⁽²⁾, M. ROUZAUD⁽²⁾, L. LACROIX⁽²⁾

⁽¹⁾EDF, Direction des Etudes et Recherches, Département Surveillance Diagnostic Maintenance,
6 quai Watier, 78401 Chatou

email : guy.durso, pascale.prieur, claude.vincent@der.edf.gdf.fr

⁽²⁾EDF, Division Technique Générale, Auscultation d'Ouvrages
37, rue Diderot, 38000 Grenoble

RÉSUMÉ

En dépit de leur immobilité apparente, les barrages se meuvent au cours de leur exploitation. Ils sont surveillés par le biais d'une activité dite d'auscultation d'ouvrages (exploitation de mesures de débit, de contraintes, de déplacement ...) qui permet de se prononcer sur leur état de santé. On se propose de mettre en œuvre des algorithmes de soustraction de bruit - le bruit correspondant aux contributions perturbatrices de la cote et de la température - afin d'en extraire la composante utile : la composante de fatigue du barrage. Les algorithmes ont été adaptés au contexte non stationnaire des mesures (évolution des fonctions de transfert des ouvrages) ainsi qu'à l'irrégularité de la mesure de sortie et aux non-linéarités existant entre certaines entrées-sorties.

1 Surveillance des barrages

En dépit de leur immobilité apparente, les barrages se meuvent au cours de leur exploitation. L'auscultation des ouvrages consiste à se prononcer sur leur état de santé. Pour ce faire, il faut distinguer les déplacements du barrage consécutifs aux sollicitations de ceux qui sont symptomatiques d'une dégradation de l'ouvrage.

Les barrages sont équipés de capteurs de déplacement, radial et tangentiel, de capteurs de mesure de débit de fuite, de piézomètres... Les signaux de surveillance ainsi recueillis contiennent, d'une part l'information sur le vieillissement du barrage (autrement dit l'effet d'usure du temps), d'autre part la réponse du barrage à des sollicitations externes. Ces sollicitations sont de nature :

- mécanique correspondant à la force de poussée engendrée par la retenue d'eau,
- thermique associée aux contraintes provoquées par les changements de température.

Pour remonter à l'information sur le vieillissement du barrage, correspondant à une tendance à long terme, on utilise un algorithme de soustraction de bruit. On identifie les réponses du barrage aux sollicitations mécanique et thermique citées plus haut, avant de les soustraire au signal de surveillance.

Cet article propose une méthode d'identification des réponses du barrage aux diverses sollicitations.

Le barrage est modélisé comme un système non linéaire, multi-entrées/mono-sortie. Les entrées du système sont représentées par la cote de retenue et la température ; la sortie correspond aux déplacements du barrage. La

ABSTRACT

In spite of their apparent immobility, dams move in operation. They are supervised through a so called civil works monitoring process (utilization of flow measures, strains, displacement. ...) so as to allow a best estimation of their condition. One proposes to use noise cancelling algorithms - noise is corresponding to the disruptive contributions of the level of water retained in the dam and of the temperature - so as to extract the useful component : the ageing of the dam. Algorithms have been adapted to the nonstationary context of measures (evolution of the transfer functions of the civil works) as well as irregularity of output measure and nonlinearity between some inputs-outputs.

procédure d'identification du système tient compte du contexte non stationnaire, consécutif au vieillissement du barrage. Par ailleurs, l'implémentation est prévue pour supporter l'échantillonnage irrégulier de la sortie du système.

Cette méthode d'identification est appliquée sur des données de surveillance provenant d'un barrage en béton.

2 Modèle physique

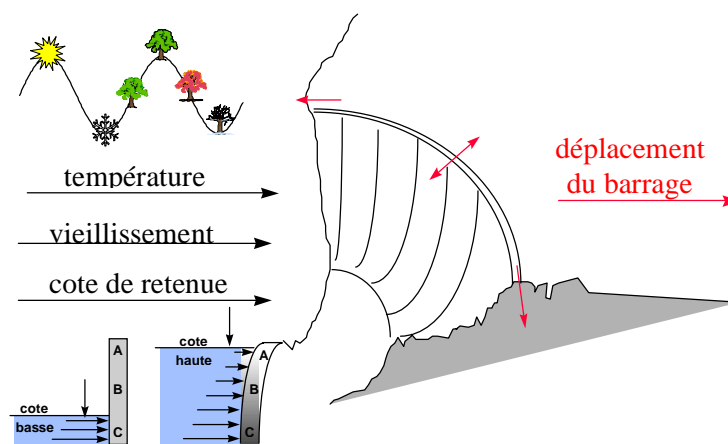


Figure 1 : Contributions au déplacement d'un barrage

Une analyse comportementale a permis d'identifier plusieurs phénomènes physiques générateurs concourant aux déplacements du barrage : la cote de retenue, la température et le vieillissement. Le déplacement du barrage est un mélange additif des réponses du barrage à ces trois phénomènes.

L'analyse comportementale se fonde sur les résultats obtenus par des techniques relevant de la séparation de sources. Pour plus de détails, on pourra se référer à [4].

2.1 Réponse du barrage à la sollicitation thermique

La réponse du barrage à la sollicitation thermique est représentée par un filtrage linéaire (MA) de la température de mémoire m_t :

$$e_t(k) = \sum_{i=0}^{m_t-1} h_t(i) t(k-i) \quad (2.1)$$

$t(k)$: la température à l'instant k ,

$e_t(k)$: l'estimée de l'effet thermique,

$$H_t = [h_t(0), \dots, h_t(m_t - 1)]$$

2.2 Réponse du barrage à la sollicitation mécanique

La réponse du barrage à la sollicitation mécanique est représentée par un filtrage de Volterra transverse d'ordre p de mémoire m_c , sans termes croisés [1], appliqué à la cote de retenue :

$$e_c(k) = h_{c0} + \sum_{m=1}^p \sum_{i=0}^{m_c-1} h_{cm}(k) c^m(k-i) \quad (2.2)$$

$c(k)$: la cote de retenue à l'instant k ,

$e_c(k)$: l'estimée de l'effet hydrostatique,

$H_{cm} = [h_{cm}(0), \dots, h_{cm}(m_c - 1)]$: les coefficients du filtre pour la puissance $m^{\text{ième}}$ de la cote.

h_{c0} est un terme constant. Il peut être choisi égal à zéro, sans perte de généralité, puisqu'il correspond à la composante continue de $e_c(k)$.

2.3 Forme vectorielle du système à identifier

Ce filtrage multi-entrées, mono-sortie s'exprime sous une forme vectorielle :

$$y(k) = e(k) + td(k) \quad (2.3)$$

$$e(k) = \underline{X}(k) H \quad (2.4)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} H = [H_t, H_{c1}, \dots, H_{cp}]^T = [H_1, \dots, H_{p+1}]^T \\ \underline{X} = [\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_{p+1}] \end{cases}$$

Le vecteur $y(k)$ correspond au déplacement mesuré.

Le vecteur $e(k)$ représente l'effet global généré par la cote de retenue et la température.

Le vecteur $td(k)$ correspond à la tendance à long terme représentative du vieillissement.

Le vecteur H est obtenu par la concaténation des différents filtres dans un vecteur colonne.

La matrice \underline{X} rassemble les différentes entrées.

Le bloc \underline{X}_j , constitué à partir du signal d'entrée noté $x_j(k)$, de taille n , filtré par un filtre MA de mémoire m_j , est de la forme :

$$\underline{X}_j = \begin{bmatrix} x_j(0) & \cdots & x_j(-m_j + 1) \\ x_j(1) & \ddots & x_j(1 - m_j + 1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_j(n) & \cdots & x_j(n - m_j + 1) \end{bmatrix}$$

Il est aisé de fournir une estimation du filtre H qui minimise l'erreur quadratique moyenne entre l'estimée des effets et la sortie $y(k)$ [2] :

$$\hat{H} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T y(k) \quad (2.5)$$

Notons que la mesure $y(k)$ étant non régulière, il faut sélectionner les lignes de \underline{X} qui correspondent à une valeur mesurée de la sortie. Il en est de même lors de l'estimation des contributions.

Il est possible d'avoir une estimation des différentes contributions par les expressions :

$$\hat{e}_t(k) = \underline{X}_1(k) \hat{H}_1^T \quad (2.6)$$

et

$$\hat{e}_c(k) = [\underline{X}_2(k), \dots, \underline{X}_{p+1}(k)] + [\hat{H}_2, \dots, \hat{H}_{p+1}]^T \quad (2.7)$$

Il reste à soustraire les effets estimés de la mesure brute pour extraire la tendance à long terme :

$$\hat{td}(k) = y(k) - \hat{e}(k) \quad (2.7)$$

Par nature, notre problématique est non stationnaire : évolution de la réponse du barrage aux sollicitations et recherche de tendances à long terme. Nous proposons d'effectuer l'estimation du filtre H sur une fenêtre glissante.

2.4 Deux remarques sur l'implémentation

L'irrégularité de la mesure de sortie :

Les sorties étant non régulières, la prise en compte d'une taille de bloc constante entraîne une période temporelle d'analyse plus ou moins grande. En général, les blocs comportent 250 points. La période temporelle correspondante peut varier de 3 à 8 ans. On comprend aisément que le centrage de la sortie sur le bloc courant puisse alors être biaisé. Pour réduire ce biais, on peut adopter la procédure suivante :

- centrage du bloc courant de la sortie,
- estimation du filtre selon 2.4,
- estimation des sorties régulières ($\hat{e}_t(k)$ et $\hat{e}_c(k)$),
- nouvelle estimation de la moyenne sur une même période de temps mais sur une sortie échantillonnée régulièrement,
- recentrage du bloc courant de la sortie,

- estimation finale du filtre.

Différence de dynamique temporelle entre les deux contributions :

Si la contribution mécanique évolue très rapidement (évolution quotidienne), l'évolution de la contribution thermique est plus lente : hebdomadaire voire mensuelle. Comme nous le verrons au § 3.2, la mémoire de la contribution thermique peut être très importante (de l'ordre de 80 à 100 échantillons). Pour réduire le nombre de paramètres à estimer sans perte d'information, nous avons décidé de permettre un sous-échantillonnage de l'entrée température. Les performances d'estimation vont décroître inversement au facteur de sous-échantillonnage (f_s). Mais nous montrons au § 3.3 que, pour un facteur de sous-échantillonnage de 4, voire de 6, l'erreur induite reste acceptable et le nombre de paramètres à estimer diminue significativement.

3 Déplacement d'un barrage en béton

3.1 Les mesures de déplacement

La mesure de déplacement étudiée est celle d'un barrage voûte (figure 2). On dispose de 24 pendules placés sur 5 verticales, fournissant chacun une mesure du déplacement radial et du déplacement tangentiel, avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.

Les données enregistrées s'étendent sur une vingtaine d'années. Pour de nombreux barrages, les mesures sont manuelles. Elles sont relativement fréquentes lors de la mise en eau car, durant cette période, les mouvements sont exceptionnels (le barrage, soumis à la pression de l'eau, met un certain temps avant de trouver son équilibre). Ensuite, les dates d'enregistrement des déplacements sont plus ou moins régulières et plus ou moins synchronisées (de l'ordre de 3, 7 ou 15 jours). Toutefois, la fréquence de 15 jours prédomine. Nous illustrons nos résultats sur le capteur en clef de voûte du barrage (cf. figure 2 en haut du plot OP) où les contributions mécaniques et thermiques sont les plus importantes.

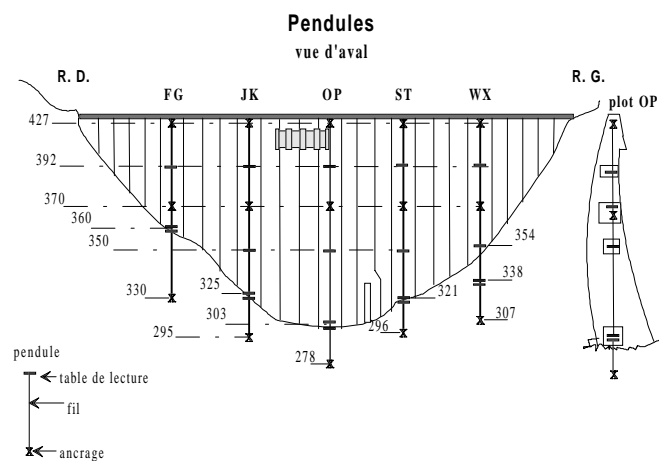


Figure 2 : Surveillance des mouvements horizontaux d'un barrage

3.2 Choix des paramètres

Les principaux paramètres à définir pour cette modélisation sont l'ordre et la mémoire des filtres.

L'ordre du filtre de Volterra est déterminé en fonction des valeurs propres significatives de la matrice de covariance construites à partir des premières puissances normalisées de la cote (centrées et de variance unité).

Valeurs propres de la matrice de covariance en dB

0	-32	-68	-108	-145	-148	-150
---	-----	-----	------	------	------	------

Les trois premières puissances de la cote paraissent être un choix judicieux.

La mémoire des filtres minimise l'erreur quadratique moyenne en sortie de l'identification. Notre critère de choix est l'écart-type de la fluctuation de la tendance autour de sa valeur moyenne, celle-ci, $\hat{t}d_m(k)$, étant calculée par l'intermédiaire d'un filtrage médian de longueur l impaire. Pour traiter les effets de bord, les deux "bords" du signal sont étendus de $\frac{l-1}{2}$ échantillons.

$$\hat{t}d_m(k) = \text{médiane} \left(k \in \left\{ k - \frac{l-1}{2}; k + \frac{l-1}{2} \right\} \right) \quad (3.1)$$

La figure 3 montre qu'il est indispensable de posséder une mémoire assez longue, au minimum de 80 coefficients, sur la température pour obtenir un écart type correct (de l'ordre d'un millimètre). Nous fixons $m_c = 100$.

Le choix de m_c est plus délicat. La figure 3 fait apparaître deux bassins d'attraction :

- un premier autour de $m_c = 1$ ($m_c \cong 100$), qui est très étroit : pour $m_c = 2$ l'écart type a quasiment doublé ;
- un second à partir de $m_c = 45$ qui est très étendu mais de pente assez douce : entre $m_c = 50$ et $m_c = 100$ l'écart-type a décri d'environ 0.8 à 0.5 mm.

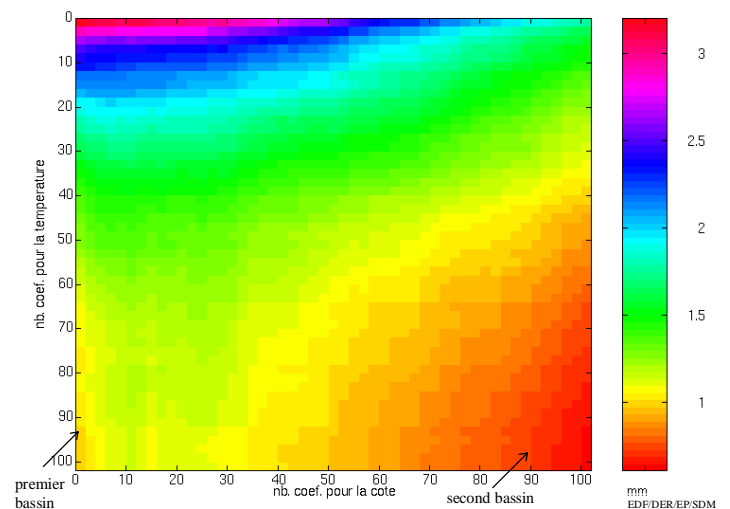


Figure 3 : Ecart-type en millimètres par rapport à la tendance moyenne $\hat{t}d_m(k)$ en fonction des mémoires des filtres

Nous avons donc choisi un ordre $mc = 1$ pour deux raisons :

- l'écart-type est tout à fait acceptable (inférieur au millimètre) ;
- le modèle choisi doit avoir un bon caractère prédictif. Concrètement, la cote étant journalière, ce modèle doit permettre d'estimer quotidiennement la contribution mécanique. La figure 4 nous montre que le choix $mc = 45$ n'est pas satisfaisant. En effet, l'ordre étant surestimé, le filtre intègre le modèle du bruit, d'où un blanchiment des données. Ce phénomène se traduit par des valeurs aberrantes lors de la prédiction (cf. figure 4).

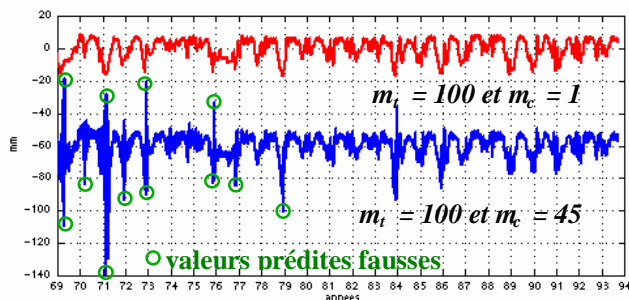
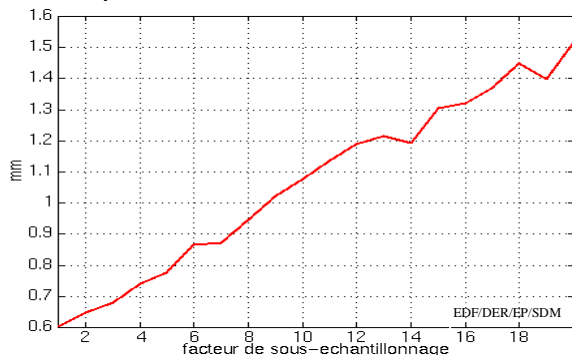


Figure 4 : Comparaison entre deux estimées de la contribution mécanique pour différents mémoires.

En outre, ce choix permettra ultérieurement de comparer nos résultats relatifs à la contribution mécanique (déplacement dû à la cote de retenue) à ceux obtenus par la DTG. En effet, la DTG impose à son modèle un mélange instantané ($m_c = 1$) pour la cote.

3.3 Décomposition de la réponse du barrage

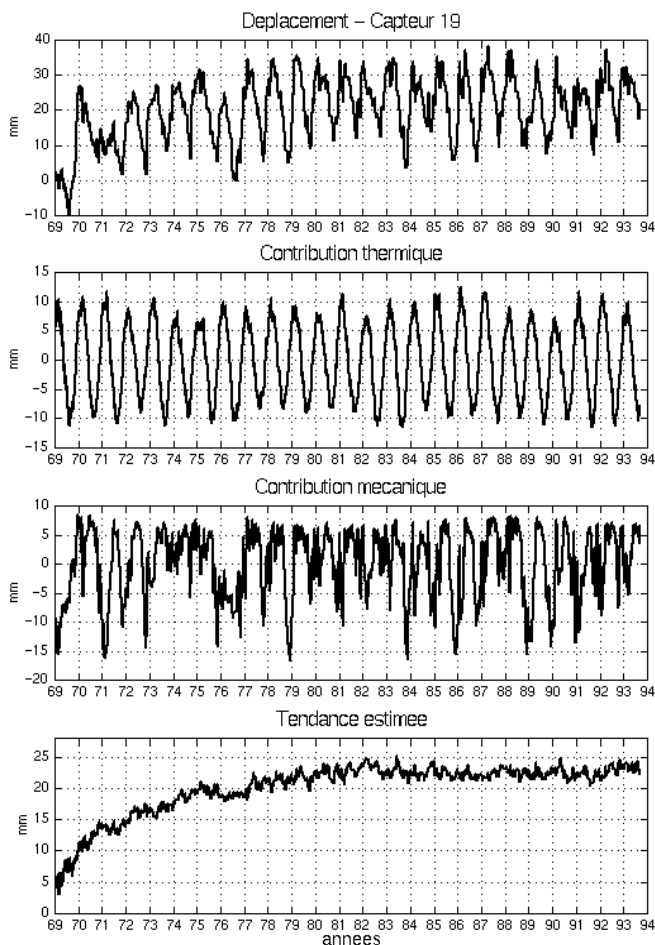
Un souci majeur réside dans le nombre de paramètres du filtre à estimer. L'une des possibilités de réduction des paramètres consiste à sous-échantillonner l'entrée température tout en conservant la mémoire du phénomène physique. On présente, figure 5, l'écart-type entre la tendance et sa moyenne qui augmente naturellement avec le facteur de sous-échantillonnage. Cet écart reste acceptable pour des taux de sous-échantillonnage de 4, voire 6. On passe donc d'un filtre de 100 coefficients à un filtre construit seulement à partir de 20 ou 17 coefficients.



bloc d'analyse = 250, décalage = 10, $mt = 100$ et $mc = 1$

Figure 5 : Influence du facteur de sous-échantillonnage sur l'erreur d'estimation

La figure 6 présente les réponses du barrage aux sollicitations (effets thermique et hydrostatique) ainsi que l'effet d'usure du temps : la tendance.



bloc d'analyse = 250, décalage = 10, $mt = 100$ et $mc = 1$, $fs = 4$

Figure 6 : Décomposition du déplacement du barrage

4 Conclusion

L'approche présentée effectue une décomposition du déplacement observé suivant les phénomènes physiques générateurs. Elle nous permet d'estimer les déplacements dus respectivement à la température, à la cote de retenue et au vieillissement.

Les coefficients des filtres fournissent une information synthétique sur l'état de santé du barrage, qui sera mise à profit pour le suivi du vieillissement.

5 Références

- [1] P. CHEVALIER, P. DUVAUT, B. PICINBONO, « Le filtrage de Volterra transverse réel et complexe en traitement du signal », Traitement du signal, vol. 7, n° 5, 1990.
- [2] S. HAYKIN, « Adaptive filter theory », Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [3] D. BAUDOIS, C. SERVIÈRE, A. SILVENT, « Soustraction du bruit : analyse et synthèse bibliographique. », Traitement du signal, vol. 6, n° 5, 1989.
- [4] G. D'URSO, « Les techniques de séparation de sources appliquées à la surveillance des installations EDF », École des techniques avancées signal image parole, Session 1, Grenoble, Septembre 1996.