

Auscultation des barrages voûtes : leurs déplacements radiaux



© La médiathèque EDF / Gérard Halary - Barrage et retenue de Cap Long - (Hautes Pyrénées)

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



Les mesures

❖ Le dispositif d'auscultation exploite

- ♦ **Pendules** : 24 répartis sur 5 lignes
- ☞ On mesure les déplacements radiaux et tangentiels, soit : **48 mesures**.

- ♦ Fils : 3 au pied du plot NO
- ♦ Nivellement : 60 repères
- ♦ Extensomètres : 295
- ♦ Piézomètres : 33
- ♦ Fuites : 17 points de mesure

 **"état de santé" du barrage**

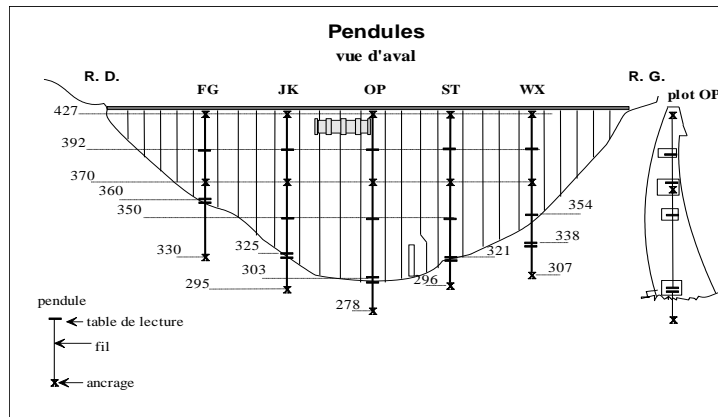
❖ Les mesures de déplacement

- ♦ échantillonnage non régulier
- ♦ tous les capteurs ne sont pas relevés à la même date

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



Les pendules



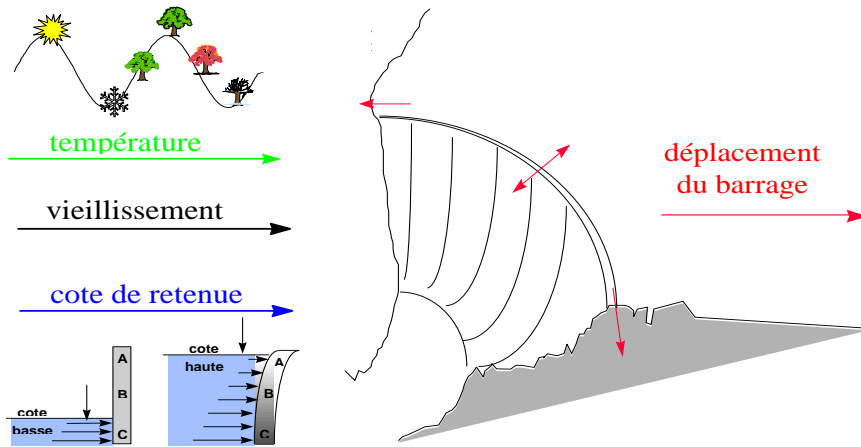
DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
 DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
 DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



Le modèle proposé



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

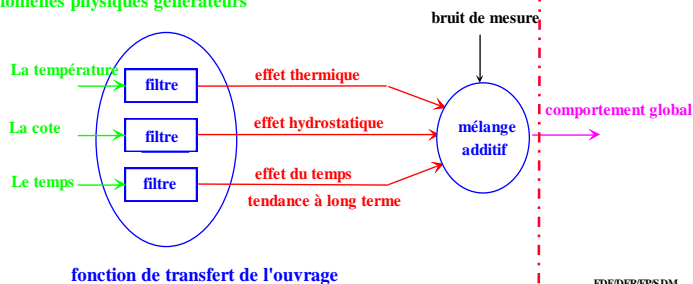
Modèle physique d'un barrage

Identification du déplacement relatif à l'effet du temps :
identification de système

**Validation
du modèle :**
**séparation
de sources**

"solicitations"
phénomènes physiques générateurs

Effets



EDF/DEREPS DM

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

La séparation de sources pour valider le modèle de mélange

- **Problème initial**

On considère une antenne à N capteurs recevant des signaux émis par P sources indépendantes, avec $P \leq N$ pour $1 \leq i \leq N$ $r_i = \sum_{j=1}^P a_{ij} s_j + b_i$

$$r(t) = A.s(t) + b(t)$$

- **Hypothèses**

Les sources s sont indépendantes = origines physiques différentes,
Le bruit est blanc.

- **Solution**

Chercher une matrice séparante B telle que

$$\hat{s}(t) = B.r(t) \approx \Lambda.P.s(t)$$

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



La séparation de sources "L'idée"

- L'étape essentielle : inverser la matrice de mélange sans connaissance a priori sur le mélange ni sur les sources elles-mêmes.
- Propriété : indépendance statistique .
- Les relations statistiques des observations reflètent fidèlement le mélange. En exploitant ces relations, il est possible d'inverser le système et donc de séparer les phénomènes.

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE





La séparation de sources (les méthodes)

- **Les méthodes adaptatives**
non adaptées à un échantillonnage irrégulier.
- **Les méthodes par blocs**
*Méthodes de séparation fondées sur des cumulants
(LACOUME, CARDOSO, COMMON, GAETA ...)*

*Méthode de séparation basée sur l'utilisation des statistiques
d'ordre 2 (SOBI)*
- **Choix : SOBI car les statistiques d'ordre 4 sont
plus difficiles à estimer (1000 points max)**

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



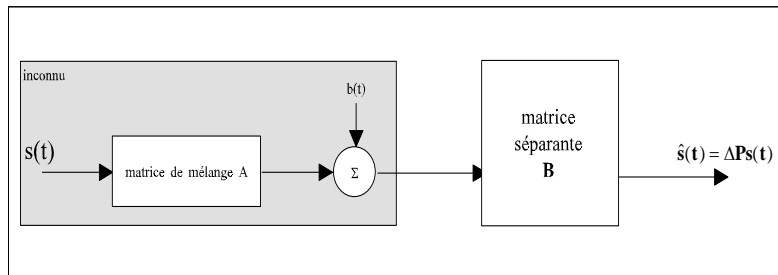
Signaux réels (choix des capteurs)

- **Critères:**
Corrélation entre les signaux capteurs
Position géographique
Nombre de points de mesure
Nature de la mesure
- **Résultats:**
*Les meilleurs résultats sont obtenus avec des capteurs sur une
même verticale, de part et d'autre du milieu du barrage.*

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



La séparation de sources (principe)



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



La séparation de sources (les grandes lignes)

- $B = U.W$
 - U matrice unitaire
 - W matrice de blanchiment
- Les deux étapes
 - Le blanchiment :
 - Projection sur l'espace des s_i (signal)*
 - W est obtenue à partir de R_y*
 - La rotation :
 - La détermination de U se fait en utilisant les propriétés statistiques des signaux sources (cumulants, matrices de corrélation,...)*

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



SOBI

1- Le blanchiment :

*W s'obtient à partir de la partie signal de la matrice de covariance des signaux capteurs.
lorsque $m=n$:*

$$W = R_y^{-1/2} \quad R_y = E[y \cdot y^H]$$

2- Calcul de la matrice de rotation :

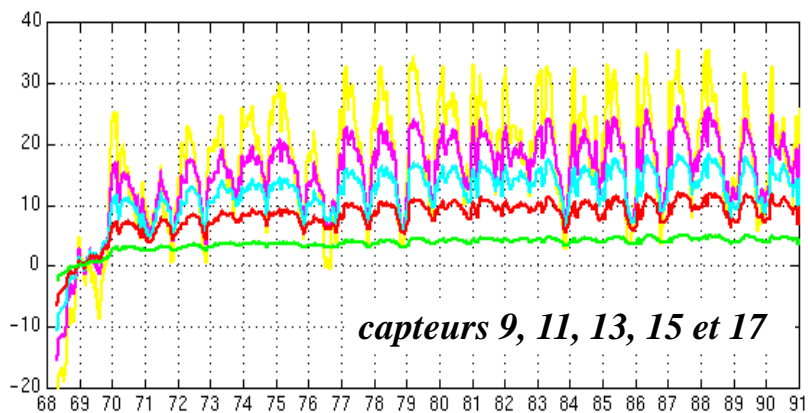
$$z = W \cdot x \quad R_z(\tau) = U \cdot R_s(\tau) \cdot U^H \quad \tau \neq 0$$

U diagonalise conjointement K matrices de corrélations
correspondant à K instants différents (problèmes de dégénérescence)

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

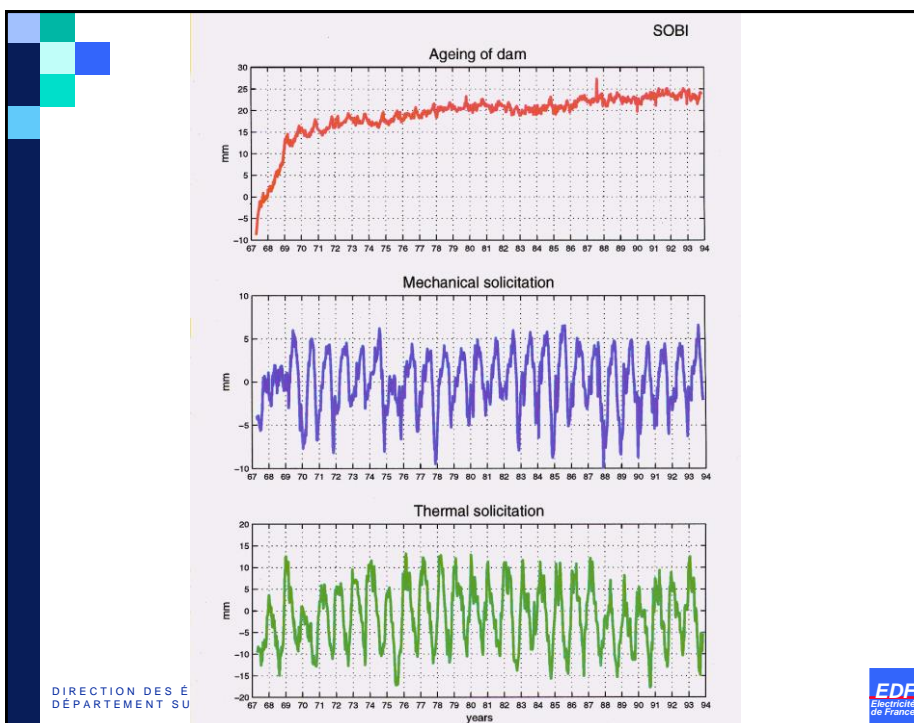
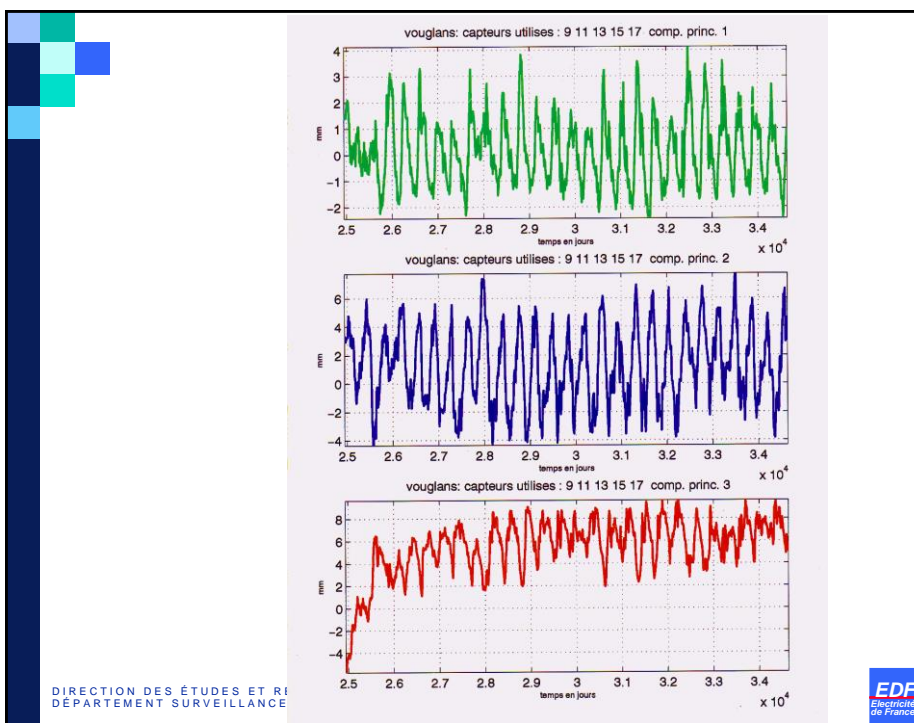


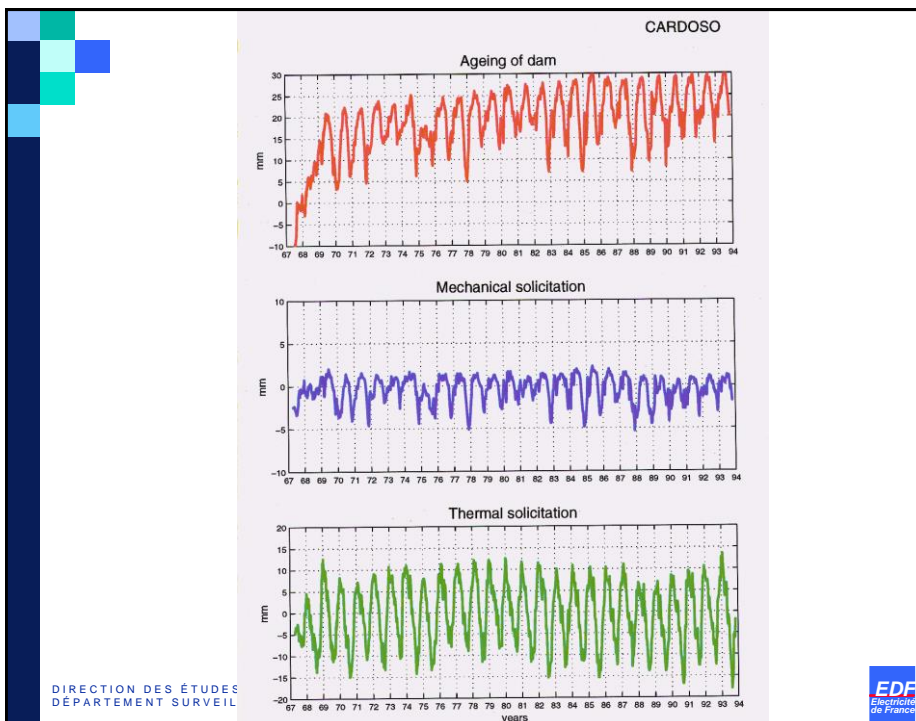
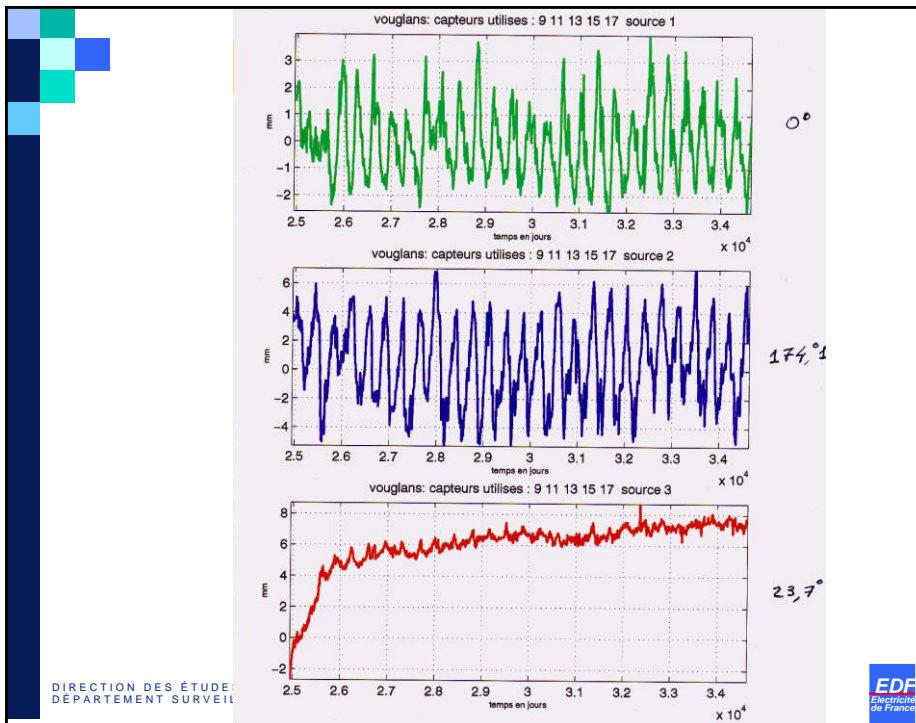
Déplacements Radiaux

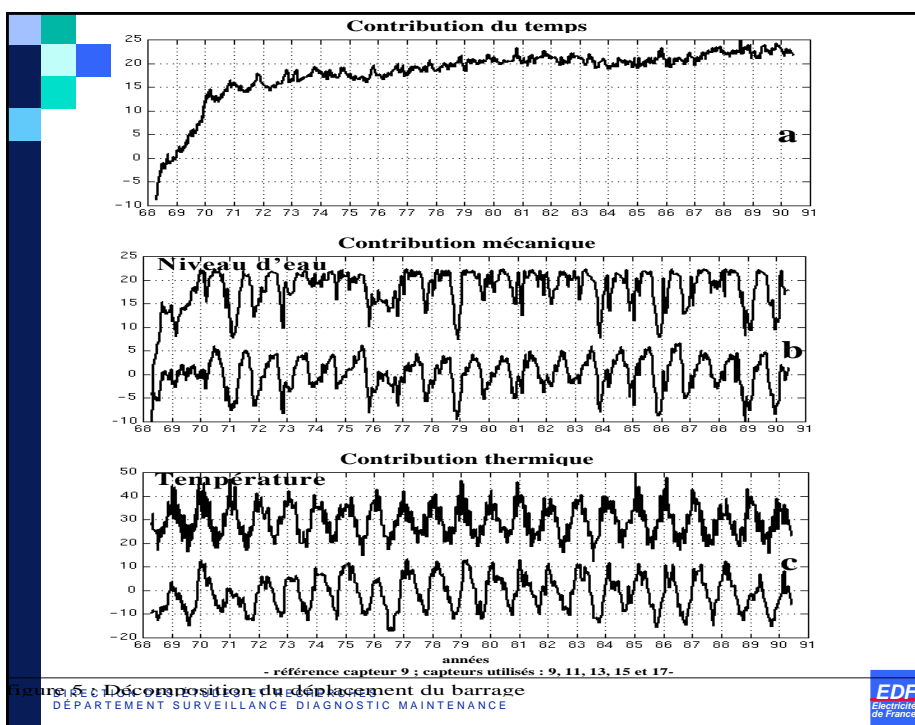


DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE





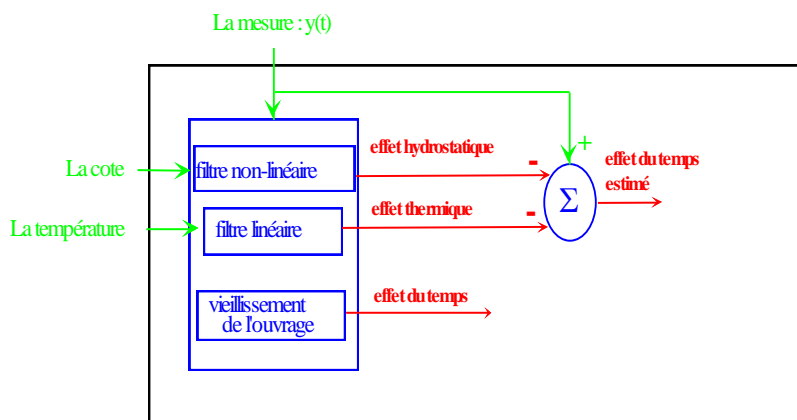




Conclusion sur la modèle

- La séparation de sources fonctionne sur les signaux de barrage
- Trois sources principales - accord avec l'analyse de la DTG.
- Système de surveillance fondé sur la prédiction du déplacement

Identification du déplacement relatif à l'effet du temps



Traitement élémentaire DER sur un bloc d'analyse

EDF DER EP SDM

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



Réponse du barrage

• 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** :

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

• 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, appliqué à la cote de retenue :

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

$$H_{cm} = [h_{cm}(0), \dots, h_{cm}(m_c - 1)]$$

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE



Estimation des effets

• Forme vectorielle du système à identifier

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

$$y(k) = e(k) + td(k) \quad \text{et} \quad e(k) = \underline{X}(k) H$$

avec
$$\begin{cases} H = [H_t, H_{c1}, \dots, H_{cp}]^T = [H_1, \dots, H_{p+1}]^T \\ \underline{X} = [\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_{p+1}] \end{cases} \quad \text{et} \quad \underline{X}_j = \begin{bmatrix} x_j(0) & \dots & x_j(-m_j+1) \\ x_j(1) & \ddots & x_j(1-m_j+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_j(n) & \dots & x_j(n-m_j+1) \end{bmatrix}$$

• **Estimation du filtre H** qui minimise l'erreur quadratique moyenne entre l'estimée des effets et la sortie $y(k)$:

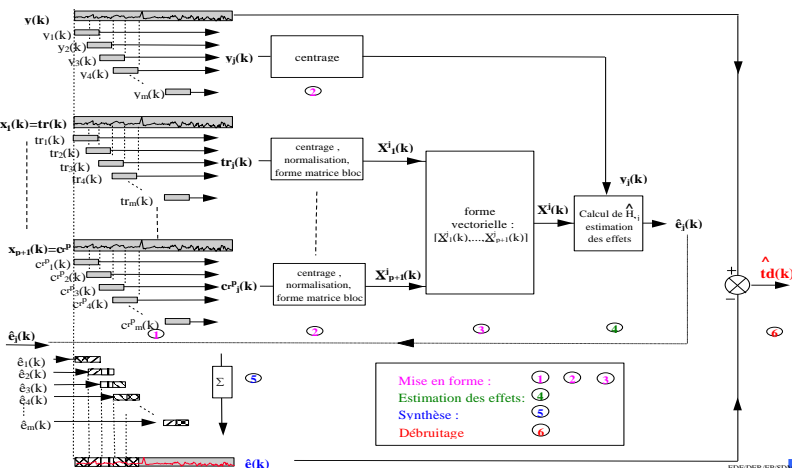
$$\hat{H} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T y(k) \quad \left| \quad \begin{aligned} \hat{e}_t(k) &= \underline{X}_1(k) \hat{H}_1^T \\ \hat{td}(k) &= y(k) - \hat{e}(k) \end{aligned} \right.$$

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

Implémentation

Non stationnaire : évolution de la réponse du barrage aux sollicitations et recherche de tendances à long terme. Estimation de H sur **une fenêtre glissante**.



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF/DER/EP/SDM

EDF
Electricité
de France

Choix des paramètres

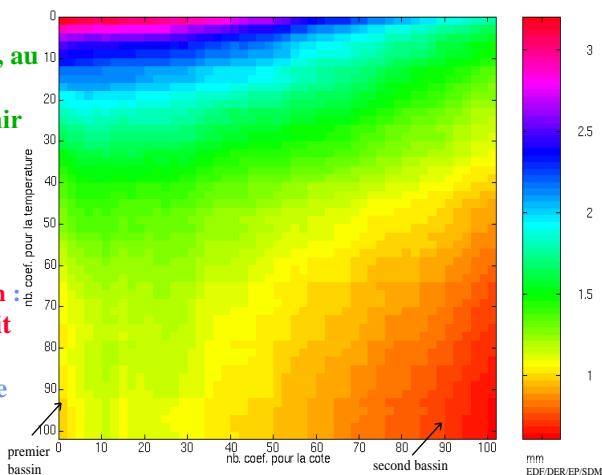
Choix de m_t :

mémoire assez longue, au minimum de 80 coefficients pour obtenir un écart type correct. Nous fixons $m_t = 100$.

Choix de m_c :

deux bassins d'attraction :

- un premier très étroit autour de $m_c = 1$;
- un second à partir de $m_c = 45$ qui est très étendu.



*Ecart-type en millimètres
par rapport à la tendance moyenne*

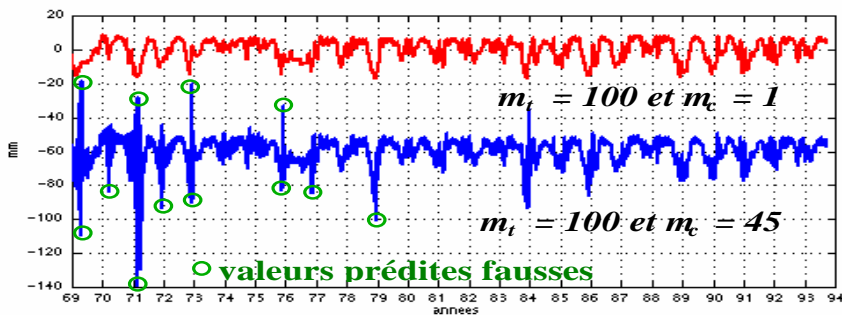
DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

Choix de m_c

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

- l'écart-type est tout à fait acceptable ;
- le modèle choisi doit avoir un bon caractère prédictif.



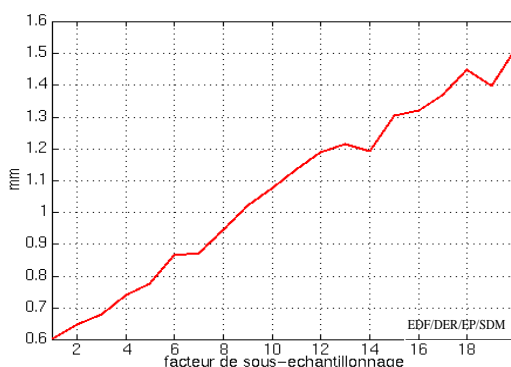
Comparaison entre deux estimées de la contribution mécanique

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

Nombre de paramètres à estimer

Le nombre de paramètres du filtre à estimer constitue un souci majeur. L'une des possibilités de réduction des paramètres consiste à sous-échantillonner l'entrée température tout en conservant la mémoire du phénomène physique.

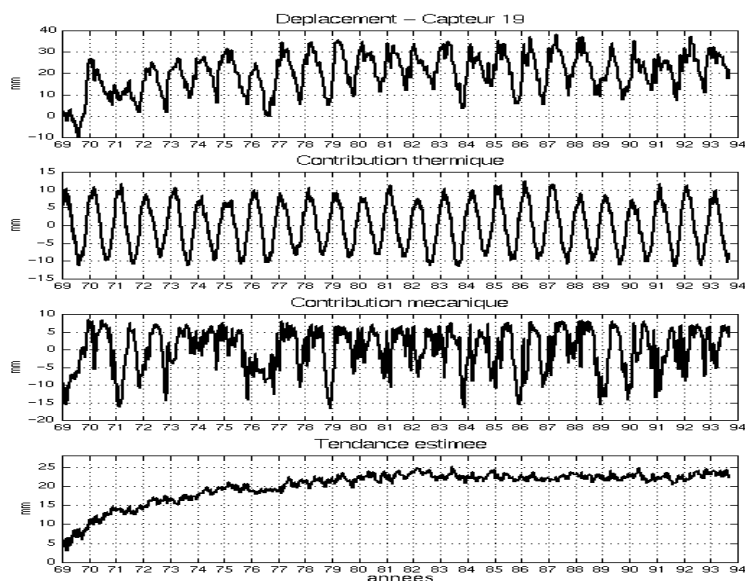


Influence du facteur de sous-échantillonnage sur l'erreur d'estimation

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France

Décomposition du déplacement



DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES
DÉPARTEMENT SURVEILLANCE DIAGNOSTIC MAINTENANCE

EDF
Electricité
de France



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.