

# Les mesures de déplacements verticaux liés aux pendules

*The measures of vertical movements associated with pendulums*

Roland, A., Vignieu  
18, avenue R. Poincaré - B.P. 23 – 19311 BRIVE CEDEX  
[roland.vignieu@edf.fr](mailto:roland.vignieu@edf.fr)

## MOTS CLÉS

Auscultation, pendules, Kit Z

## RÉSUMÉ

*Dans la plupart des cas, les dispositifs de mesure des déplacements verticaux associés aux pendules, permettent, à moindre coût, d'obtenir à partir de pendules directs (ou inversés de technologie SAM), des résultats satisfaisants.*

## ABSTRACT

*In most cases, devices of vertical measurement movements associated to pendulums, allow, at a lower cost, to obtain from direct or inverted pendulums (technology SAM), reliable results*

## 1. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

### 1.1. Principe du dispositif

#### 1.1.1. Matériel

Celui d'un pendule classique avec table à pointes de visées auquel est ajouté un kit composé d'un repère fixé sur le fil (diabolo), d'un dispositif de lecture (plaque arrière fixée à la table et curseur coulissant sur un réglet gradué vertical également solidaire de la table -voir figure 1 page suivante).

#### 1.1.2. Lecture

Il s'agit du principe d'alignement curseur/fil/table appliqué dans les 3 directions (cercle gauche, cercle droit et Z).

#### 1.1.3. Déplacement

Dans un premier temps, le calcul trigonométrique détermine la position du fil dans le plan horizontal (par intersection de deux droites issues de 2 points connus, les pointes de visées), puis dans un deuxième temps, la résolution par Thalès donne la position verticale du diabolo par rapport à la table.

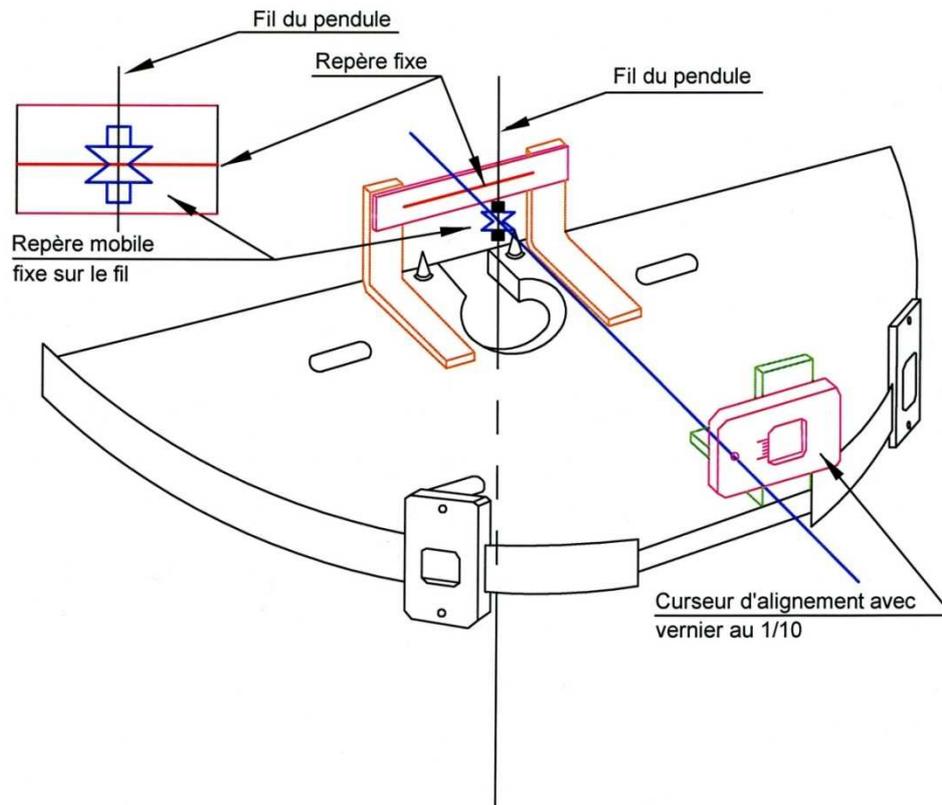


Figure 1 : Schéma de principe des mesures de déplacements verticaux sur pendules

## 1.2. Rappel des conventions de dépouillement

- le déplacement relatif vertical est donné du point haut par rapport au point inférieur, qui est considéré comme plus fixe
- la longueur entre l'ancrage et le repère fixe sur le fil (diabolo) est considérée comme constante,
- les évolutions sont comptées positives vers le haut.

## 2. AVANTAGES

- simplicité d'installation et de mesure,
- faible coût du matériel (inférieur à 1 k€),
- possibilité d'effectuer des mesures à fréquence relativement élevée,
- installation possible a posteriori,
- dispositif adapté aux évolutions de grandes amplitudes (recalages du diabolo possibles),
- propriété intégratrice du pendule (déformations sur de grandes hauteurs avec une ligne de plusieurs pendules).

## 3. INCONVÉNIENTS

- sensibilité aux phénomènes de fluage du fil du pendule et/ou de l'ancrage des pendules inversés (cf. § 4.1),
- sensibilité du fil d'acier aux variations de températures (cf. § 4.2),
- il n'existe pas pour l'instant de capteur télémesurable pour cet appareil.
- dépendance de la force de tension du fil sur la mesure (fuite du flotteur, niveau de remplissage incorrect, modification de la densité du liquide amortisseur -antigel/eau-),
- déplacement accidentel du repère fixe sur le fil, qui entraîne un décalage des mesures (chute de glace, desserrement du diabolo, nettoyage trop « appuyé »).

## 4. PHÉNOMÈNES PERTURBATEURS LIÉS AUX MESURE ZÉNITHALES

### 4.1. Problèmes liés aux fluages (phénomènes irréversibles)

#### 4.1.1. Fluage « naturel » du fil du pendule

Ce phénomène intervient durant les trois premières années de mise en service avec un allongement de  $0,05 \pm 0,01$  mm/ml (soit 0,5 mm pour 10 m).

#### 4.1.2. Fluage du fil sur l'ancrage de type « panier »

Ce « symptôme » concerne les pendules inversés mis en service avant 1997 où le fluage du serre-câble dans la résine de la vis de fixation du fil sur le panier d'ancrage entraîne un déplacement artificiel vers le haut avant que le serre-câble n'arrive en butée au bout d'un à 2 ans généralement (voir figure 2 ci-dessous).

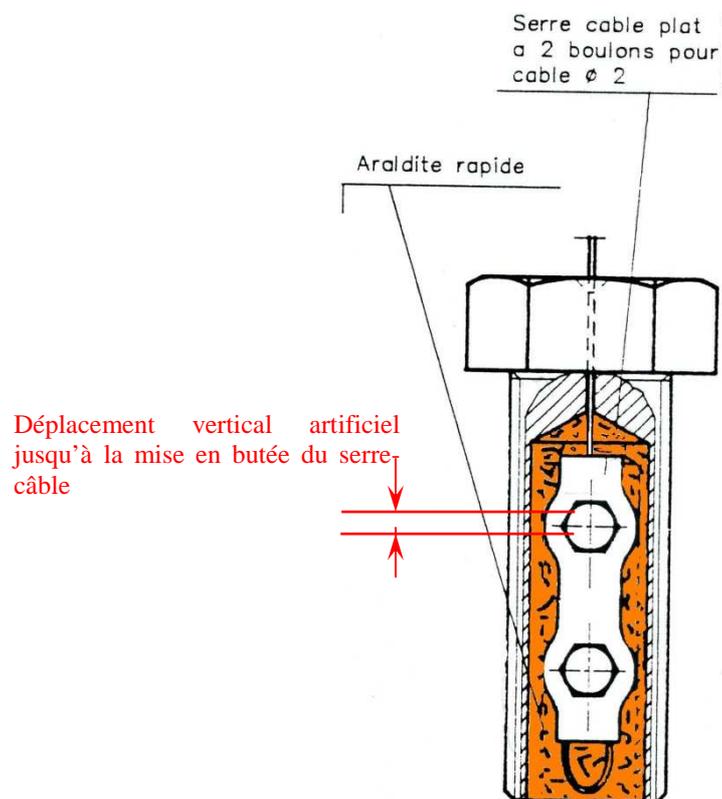


Figure 2 : Fluage du fil par poinçonnement de la résine par le serre-câble

#### 4.1.3. Fluage lié à un défaut de scellement de l'ancrage

Le problème du défaut de scellement des ancrages, observé principalement entre 1993 et 1997, a été mis en évidence grâce aux dispositifs de mesure des déplacements verticaux.

En effet, certains scellements d'ancrages sont défectueux (coulis de scellement n'ayant jamais fait prise, ou bien coulis délavé par des circulations d'eau, etc...) et peuvent ainsi présenter des sensibilités aux variations de sous-pression (pression d'eau dans le terrain par rapport au niveau d'eau dans le tubage -voir figure 3 page suivante-).

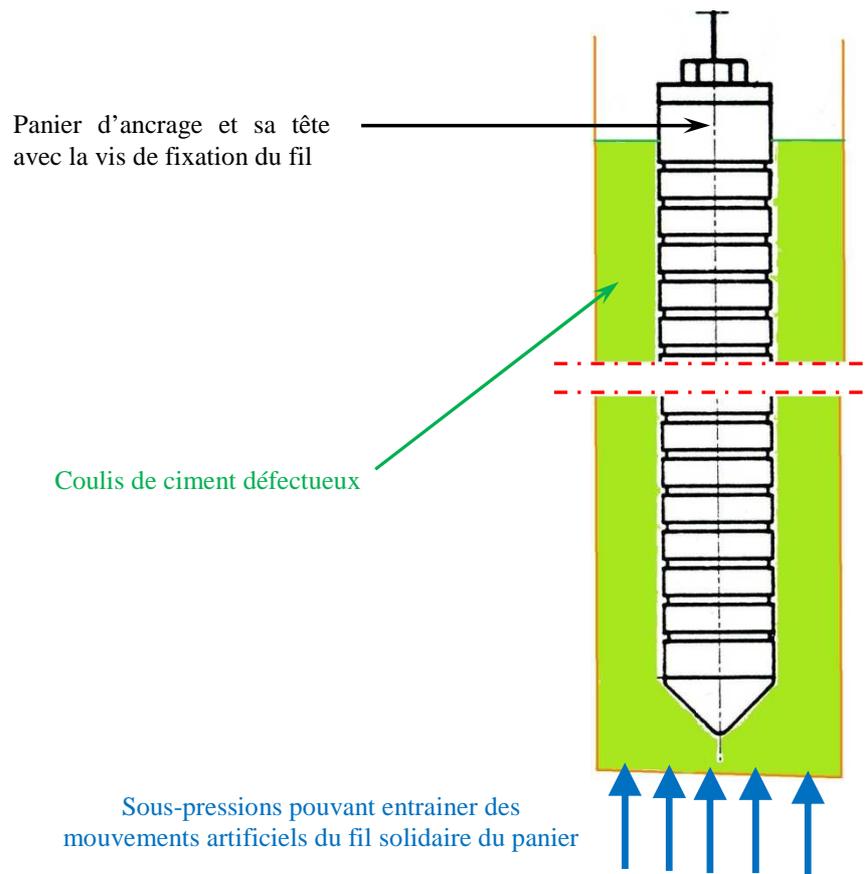


Figure 3 : Scellement défectueux sur un panier d'ancrage de pendule inversé

Ces évolutions évoquées au § 4.1 génèrent des déplacements artificiels et irréversibles vers le bas qui sont sans relation avec le comportement réel de l'ouvrage ausculté. Elles se produisent généralement dans les premières années de mise en service du pendule, comme en témoigne le graphique de la figure 4 ci-dessous.



Figure 4 : Graphique des déplacements verticaux sur un pendule inversé à anomalie au jeune âge

Ces inconvénients ont été pris en compte et traités au fil du temps, notamment avec les ancrages de type SAM évoqués au § 5.5.

#### 4.2. Problèmes liés à la dilatation thermique du fil (phénomènes réversibles)

Coefficient de dilatation du fil du pendule :  $1,65 \times 10^{-5}$  (un essai sur un fil inox effectué en septembre 1986 par DTG avait donné un coefficient de 1,27).

Coefficient de dilatation du béton : de 0,7 à  $1,4 \times 10^{-5}$  (1,0 pris en général pour le béton).

Le différentiel de dilatation entre le fil du pendule et le béton entraîne généralement une inversion du sens des déplacements thermiques verticaux en crête qui peut éventuellement être corrigée dans certaines conditions (par mesure de la température à l'instant de la mesure).

Les incertitudes sur les caractéristiques exactes des matériaux et sur les conditions thermiques réelles du béton et du fil du pendule rendent l'analyse des phénomènes thermiques difficile à interpréter. Toutefois, le traitement statistique d'un échantillon suffisamment important permet de s'affranchir de ces effets réversibles (sans toutefois avoir à les expliquer) et ainsi de mettre en évidence les évolutions irréversibles (voir figure 5 ci-dessous).

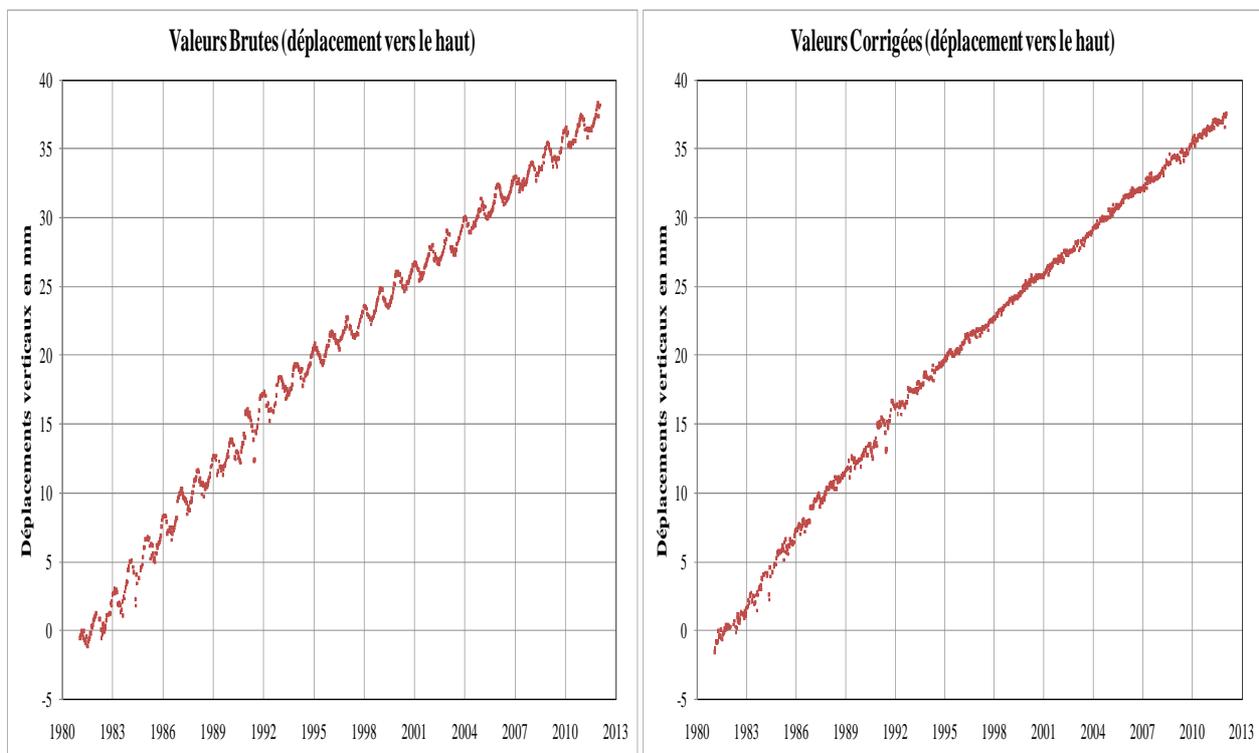


Figure 5 : Graphiques des déplacements verticaux sur un pendule direct en structure sur un ouvrage à pathologie de gonflement du béton - Valeurs brutes et corrigées des effets réversibles

## 5. HISTORIQUE ET AMÉLIORATIONS

### 5.1. Amélioration de la lisibilité

Les premiers repères fixés sur le fil du pendule comportaient une plaque de « plexiglas » transparent (Fig. 6). La rotation aléatoire du fil du pendule pouvait alors rendre la lecture malaisée (visées non perpendiculaires à la plaque de plexiglas). C'est pourquoi, vers 1995, l'adoption du diabolos comme repère sur le fil a été généralisée.

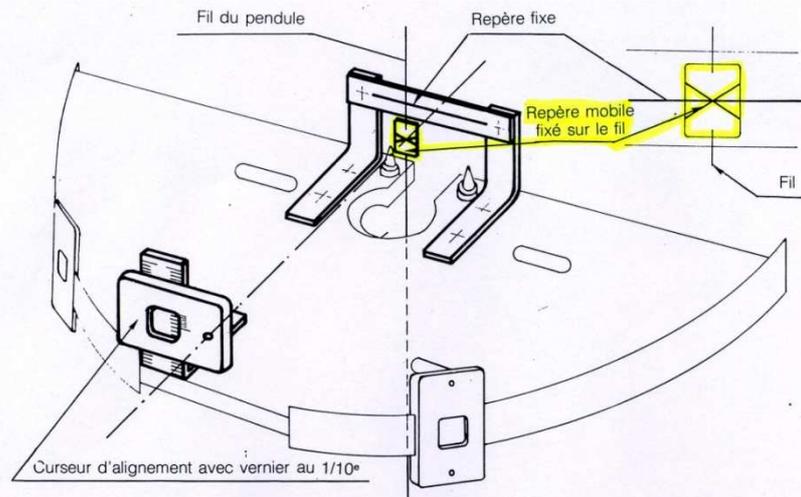


Figure 6 : Ancien repère -plaque en plexiglas- fixé sur le fil du pendule

## 5.2. Constance de la force de traction sur le fil

La poussée d'Archimède par l'intermédiaire du flotteur dans le cas d'un pendule inversé ou la traction des contrepoids dans le cas d'un pendule direct dépendent de la densité du liquide amortisseur. Dans les premières mises en service, ce liquide était le plus souvent de l'antigel. Par le phénomène de condensation sur les pendules inversés ou par apport d'eau par les forages sur les pendules directs, une modification de la densité de l'antigel était observée et donc de la force de traction sur le fil du pendule. Par la suite, l'antigel a été progressivement remplacé par de l'eau ; la mise en place d'un chauffage d'appoint a été effectuée si nécessaire.

D'autre part, quelques rares cas de fuite sur certains flotteurs de pendules inversés sont apparus. Ils ont été rapidement détectés car ils avaient entraîné des déplacements artificiels vers le haut.

Enfin, il faut veiller à la bonne immersion des flotteurs ou des contrepoids (évaporation importante du liquide dans certaines atmosphères) pour que la tension exercée sur le fil soit toujours identique.

## 5.3. Déplacement du repère (diabolo) sur le fil

Le déplacement accidentel du diabolo sur le fil par chutes de blocs de glace a fait l'objet dans certaines situations de la mise en place de protections en bas des tubages de pendules directs. Des améliorations ont été également apportées par l'adoption de protection (entonnoir inversé par exemple) contre les cheminements d'eau le long du fil qui pouvaient perturber les mesures et donner lieu à des nettoyages systématiques du diabolo (risques accrus de déplacement accidentels).

## 5.4. Fluage des fils et/ou des ancrages

Afin de pallier le phénomène de fluage des fils, ces derniers sont maintenus en tension durant au moins trois années avant d'être mis en service (pré-fluage). Quant aux problèmes découlant de la mauvaise qualité de scellement des ancrages, des essais de mise en place d'ancrages démontables ont été réalisés vers 1997. Ils ont donné lieu à 2 brevets (CAMILLE et SAM) qui sont exposés au § 5.5.

## 5.5. Modification des ancrages

La volonté d'étanchéité des tubages des pendules inversés, issue de l'expérience historique acquise sur l'ensemble des pendules installés sur les barrages, dont certains étaient très anciens, et les anomalies qui y avaient été détectées (débits d'eau, encrassement, pouvant gêner le libre mouvement, et, surtout, formation de calcite pouvant réduire le domaine libre, voire bloquer le fil) conduisirent progressivement, après quelques tentatives d'amélioration du processus ancien (recouvrement partiel du bas du tubage par le coulis de scellement du panier), à la solution, quasi-généralisée aujourd'hui à EDF, de fermeture totale du tubage par la mise en place d'un fond plein, installé de façon à garantir une bonne étanchéité et la fixité de l'ancrage du fil. Ainsi, deux procédés ont vu le jour en 1997 et 1998 : les procédés CAMILLE et SAM, dont les principes sont sommairement développés ci-après.

### 5.5.1. Le procédé CAMILLE

Le principe retenu est celui d'un accrochage type "cliquet-rochet". Le dispositif mobile, support du fil, comporte trois cliquets disposés à 120°, conçus pour s'encliqueter d'eux-mêmes. En fond de tubage, l'accrochage des cliquets s'effectue sur la surface inférieure, saillante, d'un cône monté sur un cardan et fixé en bout d'une tige, elle-même solidaire du fond plein (Fig. 7).

### 5.5.1. Le procédé SAM

Pour réaliser son accrochage en fond de tubage, le procédé SAM utilise un principe simple et astucieux, celui du coincement conique (type cône morse utilisé couramment en mécanique), procédé qui, par ailleurs, présente l'avantage de garantir un positionnement unique (voir figure 7).

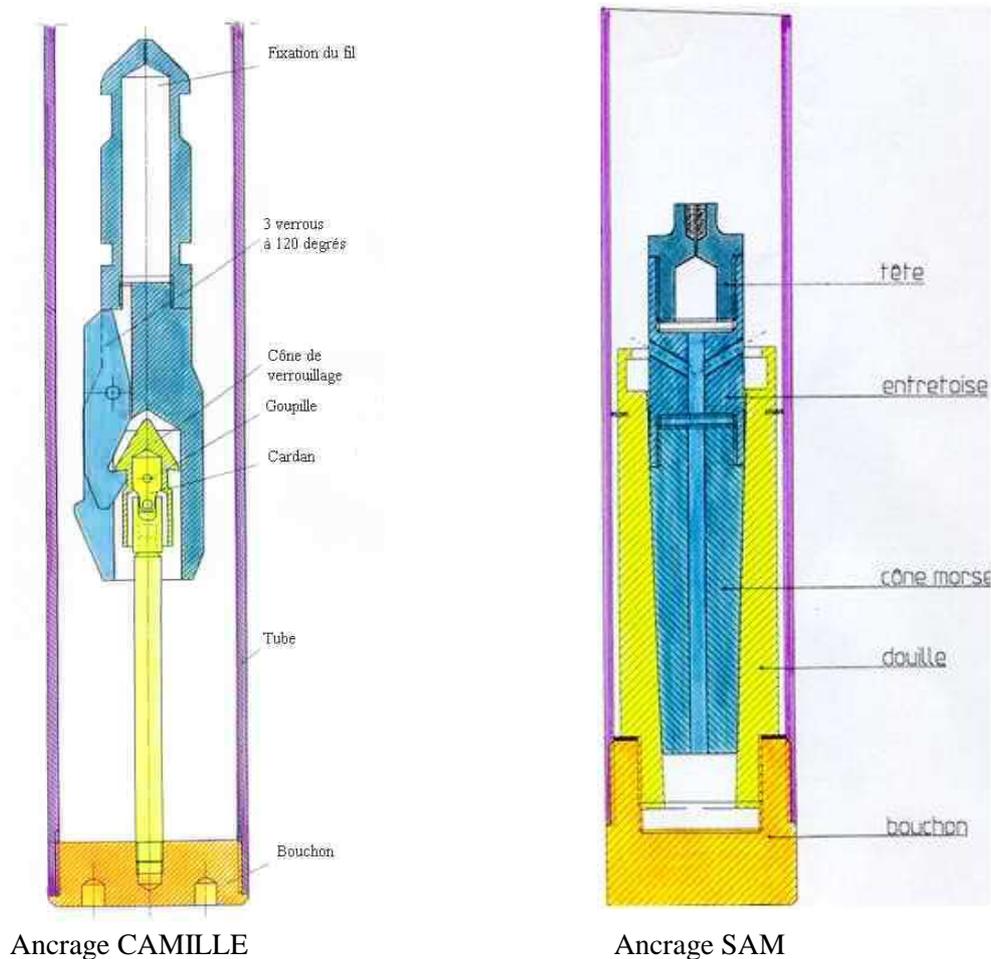


Figure 7 : Ancrages CAMILLE (cliquet-rochet) et SAM (cône morse)

## 6. BILAN ACTUEL

### 6.1. Bilan quantitatif

L'installation de ce type de matériel concerne historiquement le Grand Sud-ouest de la France, où plus de 200 pendules sont équipés d'un dispositif de mesures zénithales.

Dans le tableau récapitulatif de la figure 8, il apparaît que les pendules directs et les pendules inversés équipés d'un ancrage de type SAM ne présentent pas (ou très peu) de défauts majeurs autres que ceux liés au fluage du fil. Les anomalies sur les pendules inversés avec ancrages traditionnels (de type panier) restent inférieures à 15 %.

Il est à noter que les systèmes d'ancrage de type CAMILLE (principe du cliquet-rochet) ont été abandonnés en 1998 du fait de leur manque de fiabilité.

Pendules équipés en Z	Nombre	Défauts	Observations
-----------------------	--------	---------	--------------

Pendules directs	104	2	Chute de glace
Pendules inversés (panier)	75	11	Problème d'ancrage
Pendules inversés (ancrage SAM)	23	0	En service depuis 1999
Pendules inversés (ancrage Camille)	4	2	Entre 1997 et 1998
<b>Total</b>	<b>206</b>	<b>15</b>	

Figure 8 : Tableau récapitulatif d'installation des dispositifs de mesures zénithales sur les pendules

## 6.2. Bilan qualitatif

Ces dispositifs de mesures de déplacements verticaux apportent le plus souvent des résultats intéressants, notamment dans les cas :

- d'évolutions réelles importantes liées principalement au phénomène de gonflement des bétons (voir figure 5),
- de confirmation de la stabilité mécanique du pied des ouvrages,
- de mise en évidence de phénomènes réversibles de décompression du pied amont de barrages poids et poids-voûtes (cette décompression se traduisant par un déplacement vers le haut, voir figure 9),
- de compressions cycliques en pied aval des barrages à voûtes et contreforts (cette compression entraînant un déplacement vers le bas, voir figure 9).

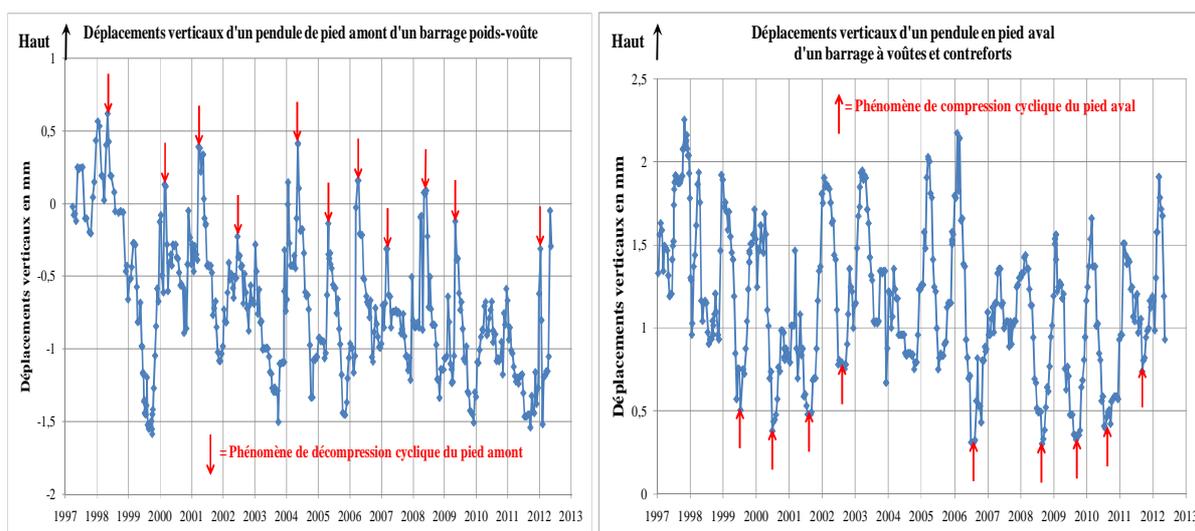


Figure 9 : Graphiques d'évolution de pendules en pied de barrage

## 7. CONCLUSIONS

L'équipement des pendules en dispositif de mesures de déplacement verticaux peut permettre, à moindre coût, la mise en évidence ou la confirmation de phénomènes irréversibles (gonflement des bétons) ou réversibles (notamment en pied des ouvrages).

De plus, la technologie actuellement employée pour la réalisation des pendules inversés (SAM) a permis de s'affranchir en grande partie des problèmes rencontrés au niveau des ancrages (entre autres, fluage et sous-pressions).

Cet appareil est à conseiller pour les pendules dont le fil n'est pas soumis à de trop fortes variations de températures (pendules inversés ou pendules internes aux structures), faute de quoi une correction de température serait nécessaire pour diminuer la dispersion due à la sensibilité thermique du fil d'acier.