

Soumis le : 14/01/2021

Forme révisée accepté le : 30/05/2021

Auteur Correspondant: mouniagahlouz@hotmail.com



**Revue
Nature et Technologie**

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – E-ISSN : 2437-0312

Analyse des mesures pendulaires d'auscultation par le modèle HST : cas du barrage Béni-Haroun

Mounia GAHLOUZ^a, Bachir GOURINE^a, Smail GABI^b

^a Centre des Techniques Spatiales, 1 avenue de la Palestine, Arzew, 31200, Algérie

^b Université de Mouloud Mammeri, Nouvelle ville, Tizi-Ouzou, 15000, Algérie

Résumé

La surveillance des barrages fournit des séries de mesures chronologiques issues de différents dispositifs équipant l'ouvrage. Ces mesures doivent être analysées afin de déterminer le comportement du barrage par rapport aux facteurs (pression hydrostatique, température, vieillissement...etc.) influant sur sa stabilité. Le travail présenté dans cet article, porte sur l'analyse d'un ensemble de mesures pendulaires (280 mesures environ), étalées sur une période de 16 ans (du 1er Septembre 2003 au 30 Septembre 2019), du barrage Béni-Haroun (Wilaya de Mila-Algérie) en utilisant le modèle HST ((Hydrostatique, Saisonnier, Temporel). L'application du modèle HST sur ces mesures a permis de quantifier les déplacements relatifs aux effets (hydrostatique, saisonnier et temps) d'une part et de séparer les effets réversibles (effets hydrostatique et saisonnier) de l'effet irréversible (temps) par le calcul des déplacements corrigés d'autre part. Les déplacements dus à l'effet hydrostatique sont plus importants (jusqu'à 14 mm) que ceux dus aux autres effets (ne dépassant pas les 5mm). Afin d'émettre un jugement sur le comportement du barrage, des indicateurs d'interprétation ont été calculés pour chaque effet. Les valeurs obtenues sont négligeables (de l'ordre du millième), ce qui signifie qu'aucun des trois effets ne présente un risque pour la stabilité de l'ouvrage (les indicateurs inférieurs à l'unité).

Mots-clés: Barrage; Comportement; Analyse; Mesures pendulaires; Modèle HST; Déplacements.

Abstract

The monitoring of dams provides a series of chronological measurements from different devices installed in the structure. These measurements must be analyzed in order to determine the behavior of the dam with respect to the factors (hydrostatic pressure, temperature, aging, etc.) influencing its stability. The work presented in this article, concerns the analysis of a set of pendular measurements (280 measurements approximately), spread over a period of 16 years (from September 1, 2003 to September 30, 2019), of the Beni-Haroun dam (Wilaya of Mila-Algeria) using the HST model (Hydrostatic, Seasonal, Temporal). The application of the HST model on these measurements allowed to quantify the displacements relative to the effects (hydrostatic, seasonal and time) on the one hand and to separate the reversible effects (hydrostatic and seasonal effects) from the irreversible effect (time) by the calculation of the corrected displacements on the other hand. The displacements due to the hydrostatic effect are more important (up to 14 mm) than those due to the other effects (not exceeding 5 mm). In order to make a judgment on the behavior of the dam, interpretation indicators were calculated for each effect. The values obtained are insignificant (of the order of a thousandth), which means that none of the three effects presents a risk for the stability of the structure (indicators below unity).

Keywords: Dam; Behavior; Analysis; Pendulum measurements; HST model; Displacement

1. Introduction

Les barrages ont connu une grande évolution dans leur construction ainsi que par rapport à leur capacité de retenue, cela revient au développement des techniques de génie civil et la croissance démographique à travers le monde. L'Algérie pour sa part recense plus de 80 barrages en exploitation avec une capacité qui dépasse les 8 milliards de m³ [1]. Ces infrastructures peuvent

être affectées par les eaux infiltrées dans le corps du barrage ainsi que dans sa fondation, ce qui présente un risque dans le cas où il n'y aurait pas de suivi et d'entretien ; c'est pour cela qu'une surveillance en continue est nécessaire.

La surveillance des barrages a pour objectif d'étudier le comportement de l'ouvrage selon les différents facteurs pouvant affecter sa stabilité, de



Ceci est un document en libre accès selon les termes de [Creative Commons Attribution License CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), ce qui permet de le partager, copier, reproduire, distribuer, communiquer, réutiliser ou de l'adapter avec l'obligation de créditer son auteur.

prévenir les dégradations sur le long terme et d'assurer la sécurité et le bon fonctionnement de cet ouvrage.

Pour émettre un jugement sur le comportement d'un barrage, il faut notamment disposer de mesures continues issues des dispositifs spécifiques à la surveillance de ces ouvrages (réseaux d'auscultation géométrique, stations GNSS¹, piézomètres, thermomètres, pendules, ...etc); et les analyser correctement.

2. Matériels et Méthodes

Outre les méthodes d'analyse, de traitement et d'auscultation utilisées dans le cadre du suivi d'un barrage, la méthode la plus répandue pour ce type d'analyse est l'utilisation du modèle HST. Conçu par l'EDF² (Electricité De France) en 1960, ce modèle permet d'analyser des séries des mesures pendulaires issues des barrages voûte. Il a été généralisé pour d'autres types de mesures et autres types de barrages [2].

Le modèle prend compte de trois effets (Hydrostatique, saisonnier, temps) et permet de corriger les observations brutes des effets réversibles (Hydrostatique, Saisonnier), afin de pouvoir caractériser les déplacements irréversibles et bien examiner le comportement de l'ouvrage au cours du temps.

Le travail réalisé porte sur l'analyse d'un ensemble de mesures pendulaires du barrage Béni-Haroun pour une période de 16 ans par le modèle HST. L'analyse consiste à calculer les déplacements relatifs à chaque effet, ainsi que les déplacements corrigés; afin de pouvoir examiner le comportement du barrage au fil du temps.

L'interprétation des résultats a été faite à travers la détermination de certains indicateurs dits d'interprétation; relatifs aux trois effets; ainsi que par le calcul du coefficient de détermination qui nous informe sur la qualité de l'analyse.

2.1. Description de la méthode

Le modèle d'analyse HST se base sur la détermination des déplacements relatifs aux trois effets (hydrostatique, saisonnier et temps)

L'effet hydrostatique (H) correspond à la variation du niveau de la retenue, il est représenté par une fonction polynomiale de 4^{ème} ordre :

$$H = a_1 Z + a_2 Z^2 + a_3 Z^3 + a_4 Z^4 \quad (1)$$

où Z est la côte centrée réduite du plan d'eau $z(t)$ à l'instant t définie par : $Z = \frac{z(t) - \bar{z}}{\sigma}$ avec \bar{z} et σ la moyenne et l'écart type de la série de mesures respectivement.

L'effet saisonnier (S) correspond à l'influence des écarts de température entre saisons froides et saisons chaudes, cet effet est approximé par les deux premiers termes d'un développement en série de Fourier :

$$S = b_1 \sin(\omega_a t) + b_2 \cos(\omega_a t) + b_3 \sin^2(\omega_a t) + b_4 \sin(\omega_a t) \cos(\omega_a t) \quad (2)$$

$\omega_a = 2\pi / \Delta t_a$ étant la pulsation annuelle et Δt_a une durée correspondant à une année (365,25 jours par année).

L'effet temps (T) est traduit par une évolution positive ou négative (augmentation ou diminution avec le temps): dissipation des pressions interstitielles de construction, évolution de la perméabilité des matériaux ... etc. Cet effet est dit effet irréversible contrairement aux deux premiers. Il est représenté par la somme d'un terme linéaire, une exponentielle positive et une exponentielle négative du temps réduit τ pendant la période analysée $[t_i, t_f]$ [3].

$$T = c_1 \tau + c_2 e^{\tau} + c_3 e^{-\tau} \quad (3)$$

$$\text{avec : } \tau = \frac{t - t_i}{t_f - t_i}$$

Les termes a_i , b_i et c_i dans, respectivement, les équations (1), (2) et (3) sont des coefficients relatifs aux modélisations des effets hydrostatique, saisonnier et temps respectivement.

On admet qu'en notant Y une valeur observée du phénomène, cette valeur est la somme de trois termes H, S et T telle que :

$$Y = H(Z) + S(\omega) + T(\tau) + \varepsilon \quad (4)$$

Le terme ε représente le résidu du modèle que l'on néglige par simplification.

Une autre façon de visualiser la tendance réversible révélée par le modèle HST (modèle de type additif) est

¹ GNSS: Global Navigation Satellite System

² Electricité De France : <https://www.edftrading.com/>

de calculer les données corrigées Y_c , qui correspondent aux données brutes Y corrigées des effets réversibles estimés H et S [4].

$$Y_c = Y - H(Z) + S(\omega) \quad (5)$$

Tableau 1
Indicateurs d'interprétation (Modèle HST)

Effet	Indicateur	Sens
H	$\alpha = \frac{H(Z_{\max}) - H(\bar{Z})}{Z_{\max} - \bar{Z}}$	Évalué entre le niveau maximal et le niveau moyen pour ne pas prendre en compte les mesures à bas niveau (vidange exceptionnelle).
S	$B = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} + \frac{1}{2}\sqrt{b_3^2 + b_4^2}$	Amplitude maximale qui serait atteinte si les effets annuels et semestriels seraient en phase (b_1, b_2, b_3, b_4 sont des coefficients liés à l'équation de l'effet saisonnier).
T	$v = \frac{\Delta t_a (T_f - T_i)}{t_f - t_i}$	Vitesse d'évaluation annuelle à partir de la valeur initiale t_i et la valeur finale t_f de la période.

2.2. Zone d'étude

L'emplacement du barrage Béni-Haroun se situe au Nord de l'Algérie sur El-Oued El-Kébir, à une quarantaine de km de son embouchure dans la mer Méditerranée. Sa retenue se trouve au sud de ce dernier et se situe à 40 km au Nord Ouest de la ville de Constantine et à 350 km à l'Est d'Alger (Figure 1).

Le barrage se situe à l'extrémité amont de la gorge calcaro-marneuse de Béni-Haroun, à environ 4 km du confluent de l'oued Rhumel et de l'Oued Endja.

L'apport annuel régularisé du barrage est d'environ

435 millions de m^3 , le volume total de la retenue est de 963 millions de m^3 et le volume de la tranche utile entre les cotes 172 m et 200 m est de 723 millions de m^3 .

Le barrage est de type poids rectiligne, construit en béton compacté au rouleau, il s'appuie sur une fondation rocheuse calcaire. Son profil type est triangulaire avec un parement amont vertical et un parement aval incliné (V/H=1, 25/1) (Figure 2).

La crête du barrage est calée à la cote 216,30 m. La hauteur de l'ouvrage est de 118 m au-dessus de la fondation et sa longueur en crête est de 710 m [6].

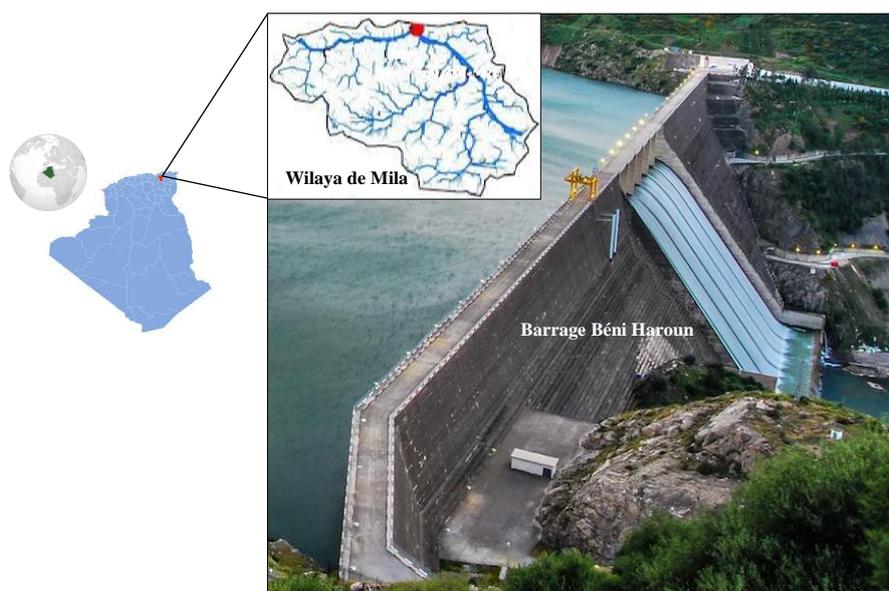


Figure 1 : Situation du barrage Beni Haroun dans le Bassin du Kébir-Rhumel (Wilaya de Mila – Algérie)

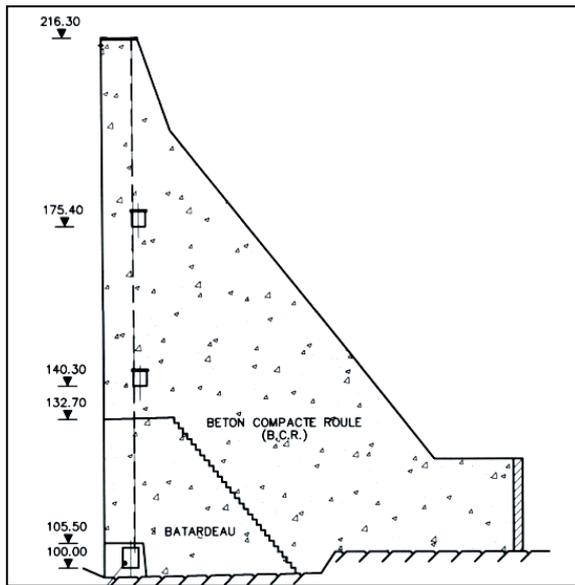


Figure 2. Profil en travers du barrage

2.3. Données utilisées

Le barrage est équipé de différents dispositifs d'auscultation (piézomètres, pendules thermomètres ... etc.) fournissant des séries de mesures permettant sa surveillance en continu.

Les données d'auscultation du barrage de Béni-Haroun sont fournies par [l'Agence Nationale des Barrages et Transferts \(ANBT\)](http://www.anbt.dz)¹. Elles représentent des déplacements pendulaires, ainsi que des mesures de la variation du niveau de la retenue couvrant une période de 16 ans (Septembre 2003 à Septembre 2019).

En réalité le barrage est équipé de 40 pendules directs et inverses qui fournissent des mesures radiales et tangentielles.

Le pendule permet la mesure précise des déplacements horizontaux. Il est essentiellement constitué par un fil suspendu qui est centré avec précision et tendu par un poids. En vue de permettre l'amortissement d'une oscillation éventuelle du pendule, le poids tendeur du fil se trouve dans une cuve remplie d'huile [7].

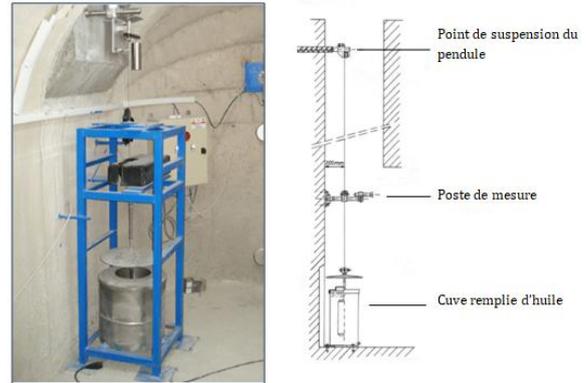


Figure 3. Image d'un pendule

3. Résultats et discussion

Nous disposons sur la période analysée de 278 mesures qui représentent des déplacements radiaux issus des pendules directs (11 pendules) (Figure 4).

Le calcul des déplacements relatifs à chaque effet se fait en déterminant les coefficients liés aux équations de modélisation de ces effets (Equations 1, 2 et 3) ; par régression linéaire multiple [8].

Les coefficients sont calculés via un programme élaboré sous Matlab. L'analyse permet de corriger les mesures par la soustraction des déplacements dus aux effets réversibles. Cette correction permet d'une part, de bien caractériser le déplacement irréversible qui est le facteur majeur présentant un risque sur la stabilité des ouvrages, et d'autre part de mettre en évidence les mesures anormales.

Ainsi la surveillance en temps réel et le diagnostic à long terme sont plus pertinents sur des mesures réduites que sur des mesures brutes [9]. Les figures 5a et 5b représentent les mesures pendulaires brutes et corrigées.

L'analyse permet aussi de quantifier et représenter l'effet des différents facteurs sur l'ouvrage [8], ainsi d'examiner leur influence à travers la détermination des indicateurs d'interprétation.

¹ http://197.112.0.211/soudoud-dzair/index.php?action=esmap_vect&table=chahidgis_barrage&id=56

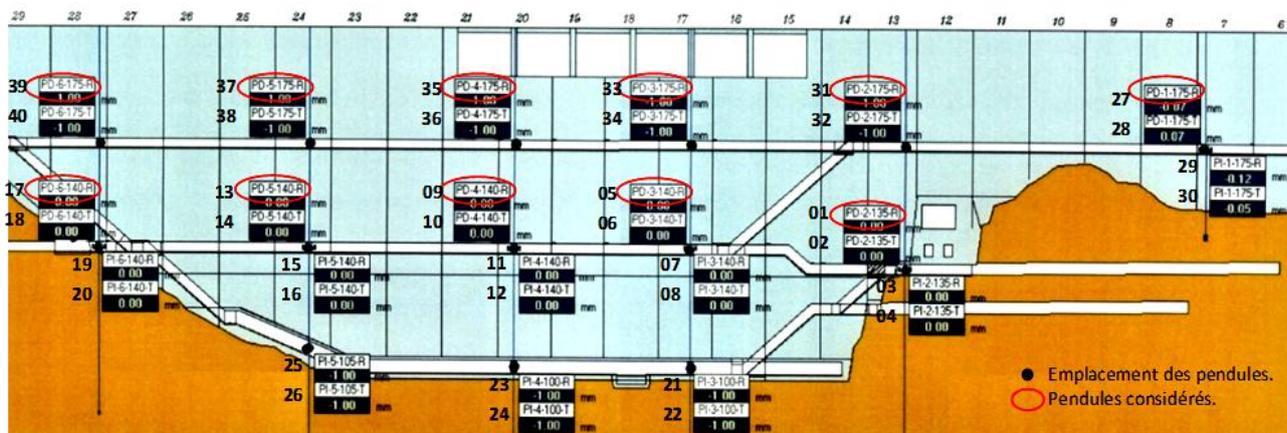
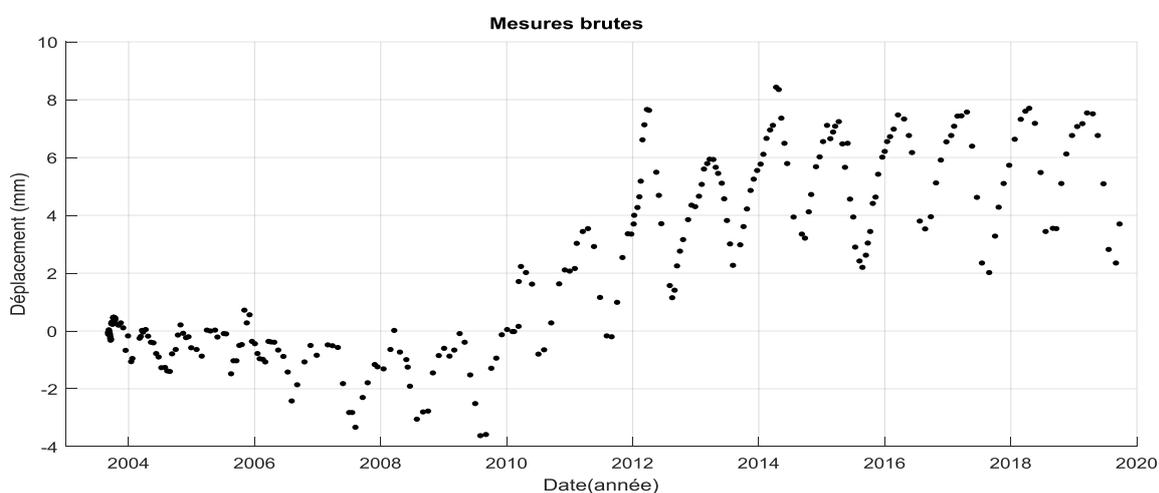
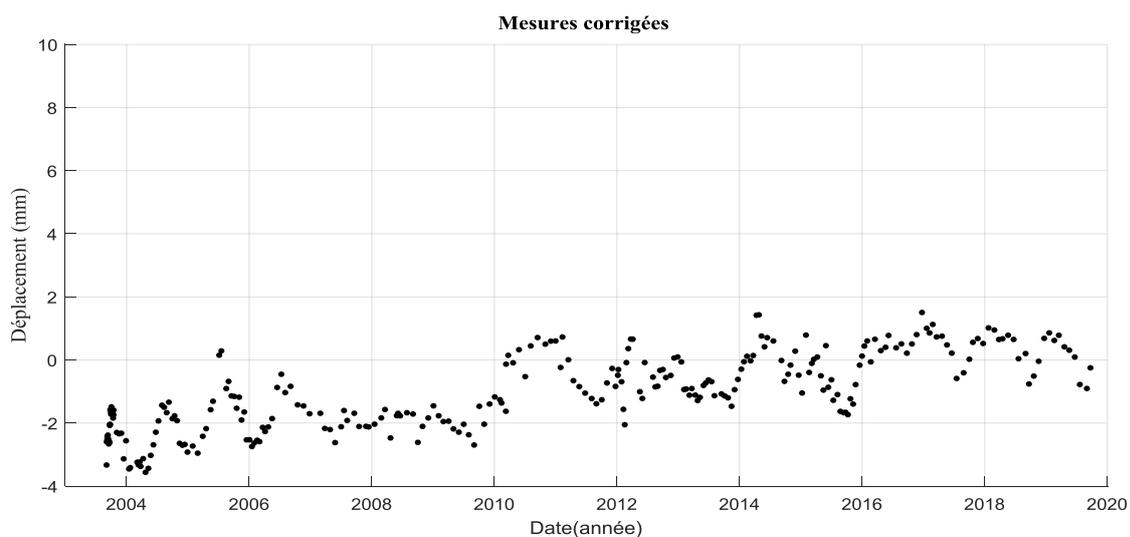


Figure 4. Emplacements et numéros des pendules du barrage Béni-Haroun



(a)



(b)

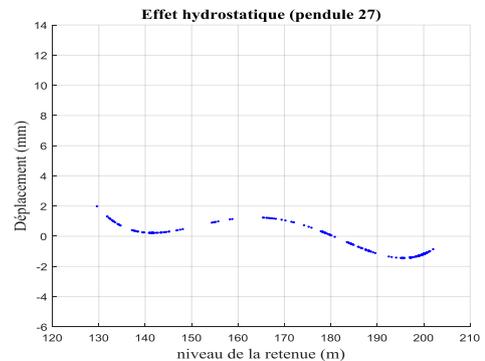
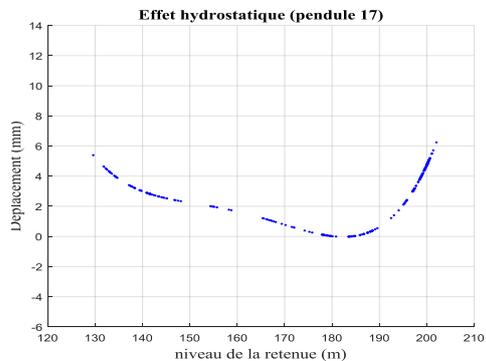
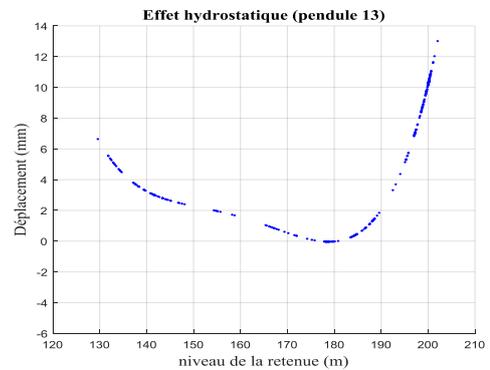
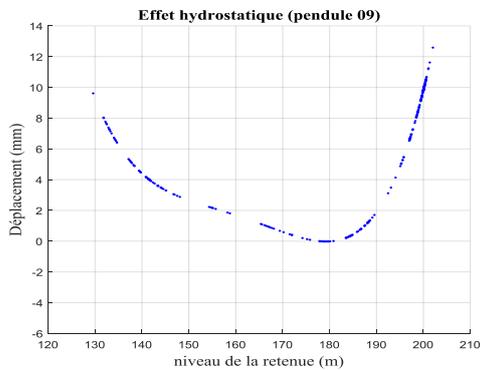
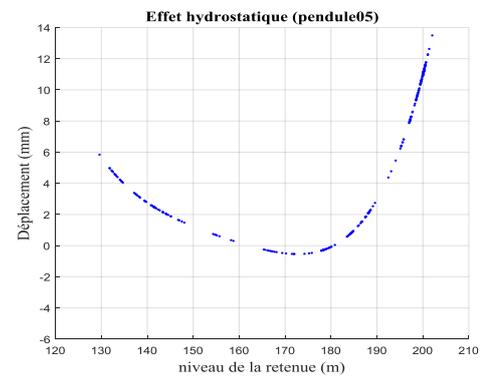
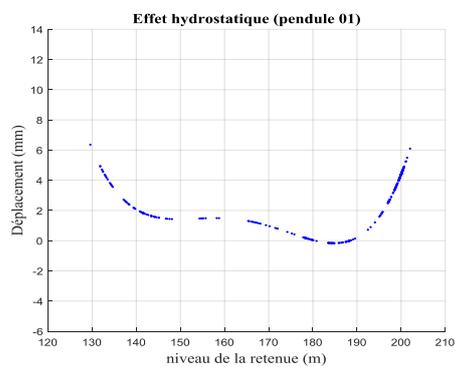
Figures 5 : Mesures pendulaires brutes et corrigées

Les déplacements des différents pendules dus à l'effet hydrostatique sont représentés en fonction du niveau de la retenue (Figure 6).

On a constaté que l'ensemble des pendules donnent pratiquement la même allure et que le déplacement atteint des valeurs maximales pour les cotes 130 m et 202 m, ce qui est anormal. Une augmentation dans le niveau de la retenue engendre naturellement une augmentation dans la pression hydrostatique exercée sur le barrage et vice versa ; ce qui fait que pour un niveau d'eau élevé le déplacement du pendule sera important.

Durant la période où on a enregistré des déplacements élevés pour des niveaux de retenues bas, l'ANBT a constaté des anomalies (sous-pression élevée) pendant le suivi du comportement de l'ouvrage (Août 2003) en plus des travaux d'aménagement qui ont duré jusqu'à 2012.

Pour la période 2012-2019, on a constaté qu'il y a une corrélation entre le niveau de la retenue et le déplacement enregistré. Le remplissage du barrage durant cette période variait entre 180 et 202 mètres.



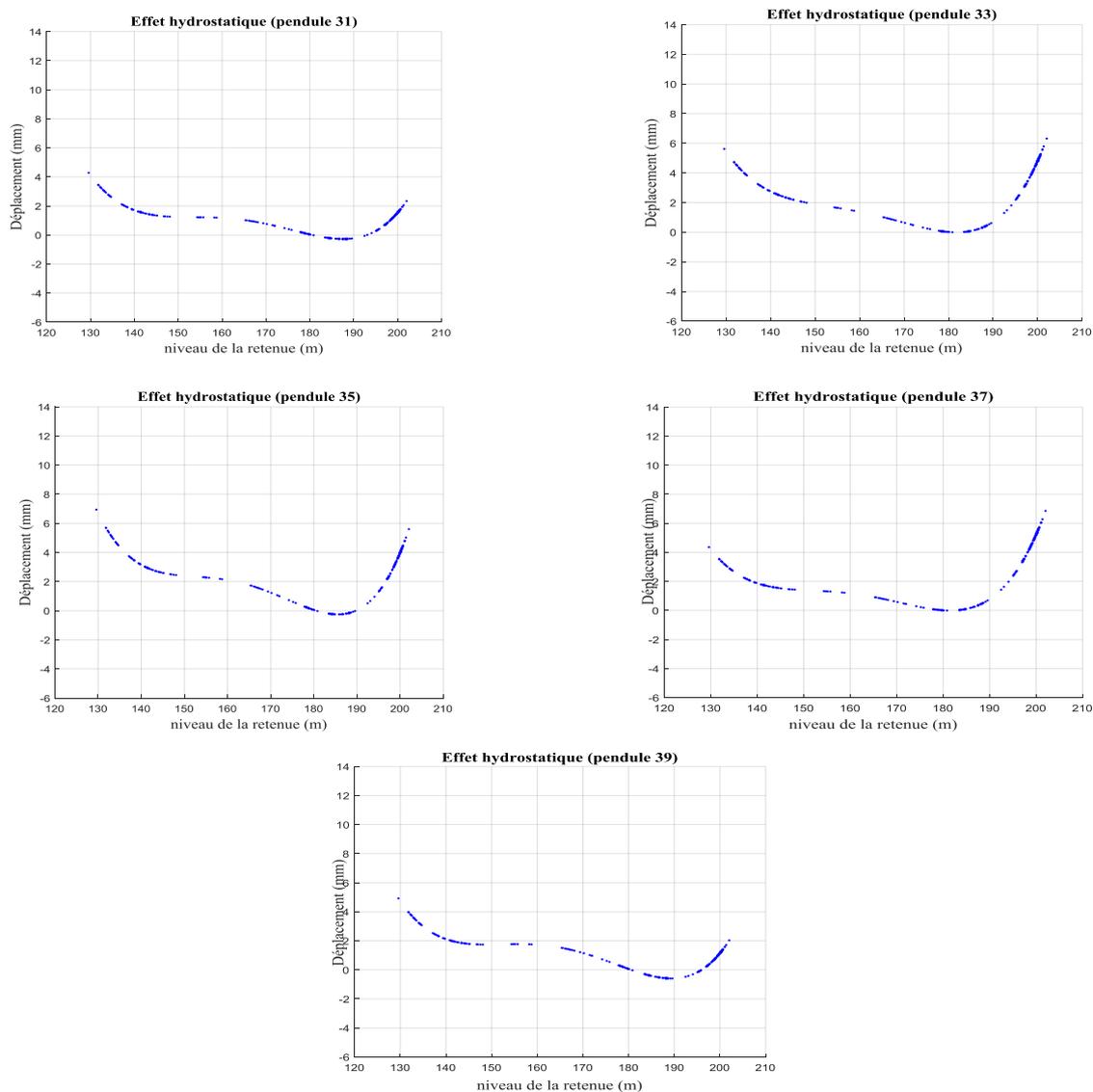


Figure 6. Représentation des déplacements dus à l'effet hydrostatique des pendules 01, 05, 09, 13, 17, 27, 31, 33, 35, 37 et 39.

D'après les valeurs de α (indicateur d'interprétation lié à l'effet hydrostatique) présentées sur la figure 7, la

variation du niveau de la retenue n'influe pas sur la stabilité du barrage (α proche du 0).

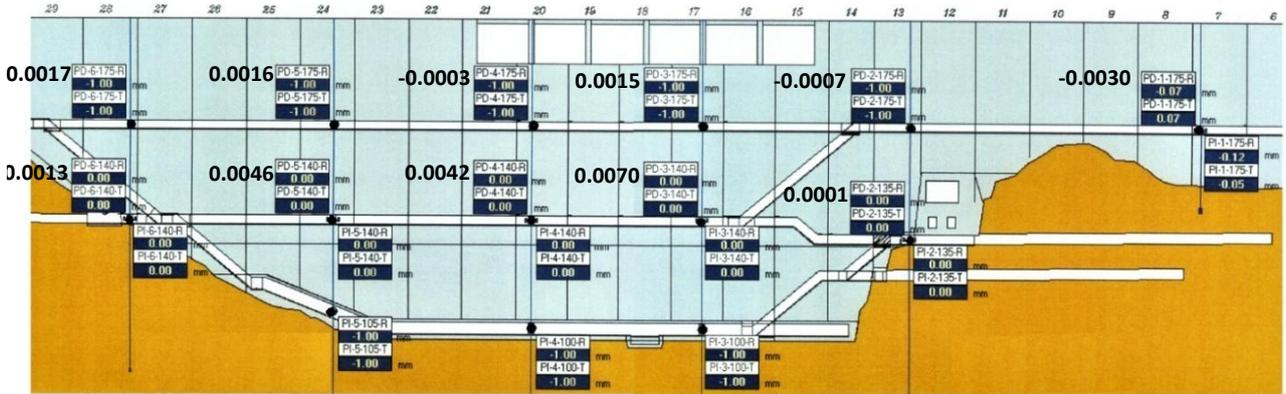
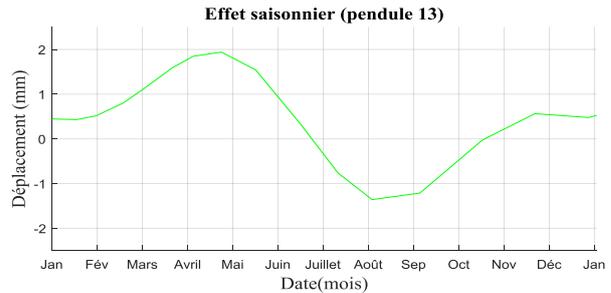
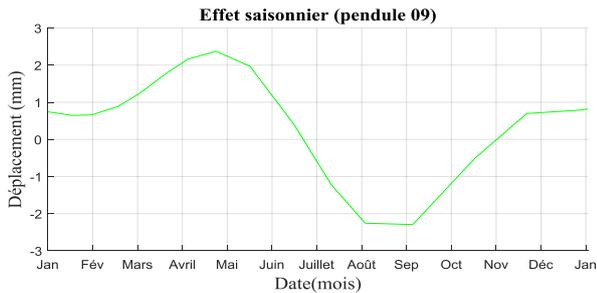
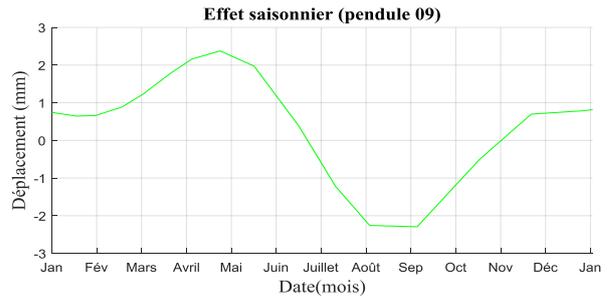
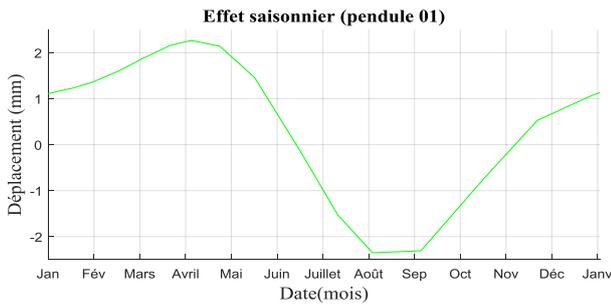


Figure 7. Valeurs de l'indicateur d'interprétation α

Les déplacements dus à la variation thermique (saisonnalité) sont représentés dans la figure 8 en fonction du mois de l'année.

L'effet saisonnier déterminé par le modèle HST permet de quantifier les déformations d'origine thermique [8], en effet on a remarqué que le mur se déplace vers l'aval dès que la température commence à diminuer (vers septembre), et se déplace vers l'amont lorsque la température augmente (à partir du mois d'Avril); sauf que ces déplacements ne sont pas significatifs et ne représentent aucun risque sur la stabilité du barrage car les valeurs du facteur B (indicateur d'interprétation lié à l'effet saisonnier) sont presque nulles (Figure 9). Ce phénomène a été remarqué

dans le cas d'un barrage nommé A, dont les données sont analysées par L'EDF ; où ils ont constaté qu'à partir de mi-janvier à la fin Juillet la crête de la clef du barrage se déplace de 13 mm vers l'amont et à partir du mois d'Août le barrage repart vers l'aval sous l'effet de la diminution de la température [9] ;



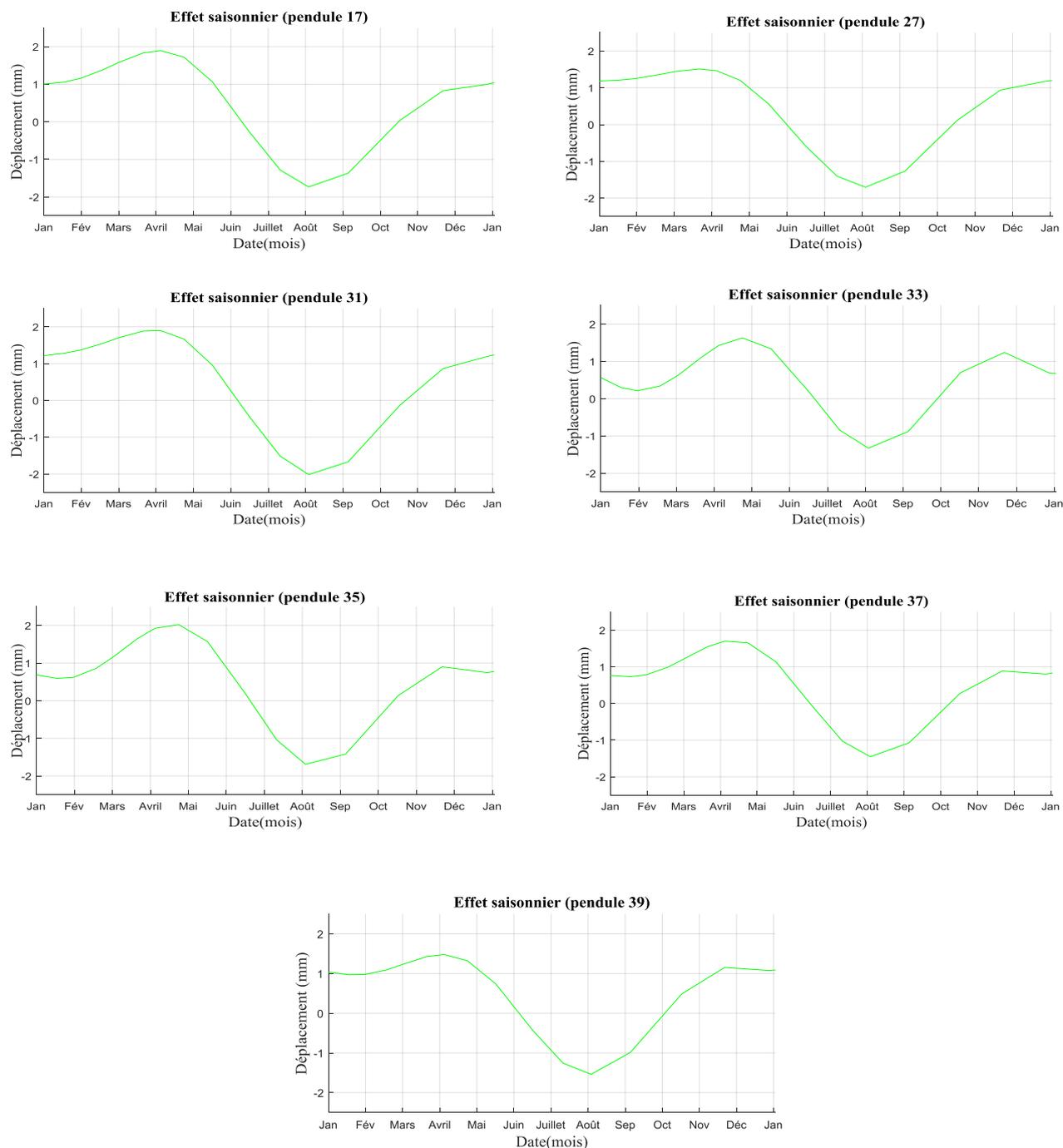


Figure 8. Représentation des déplacements dus à l'effet saisonnier des pendules 01, 05, 09, 13, 17, 27, 31, 33, 35, 37 et 39.

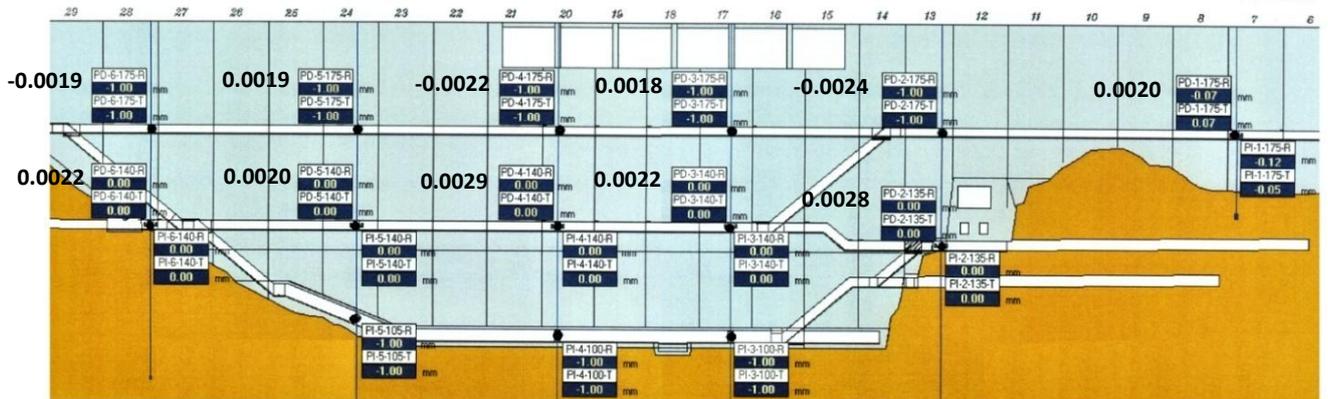


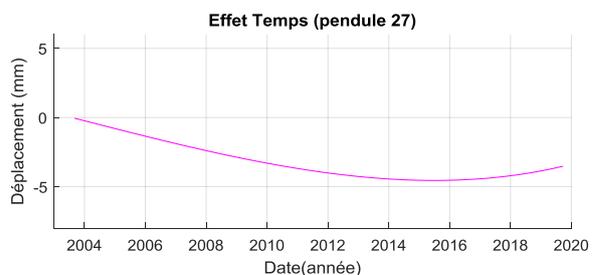
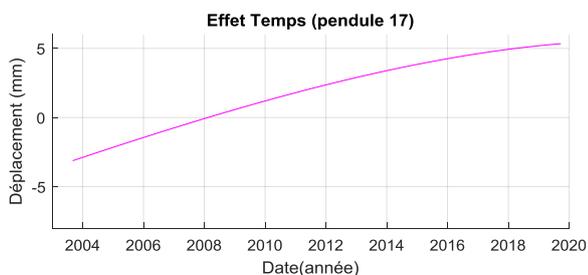
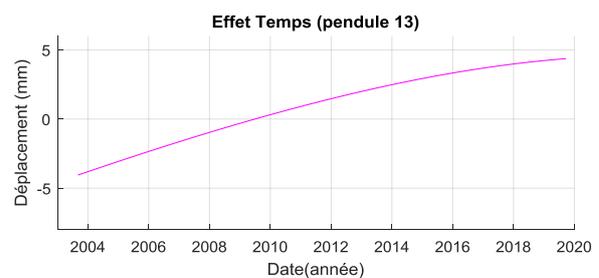
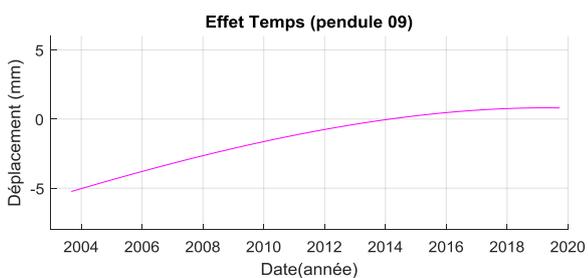
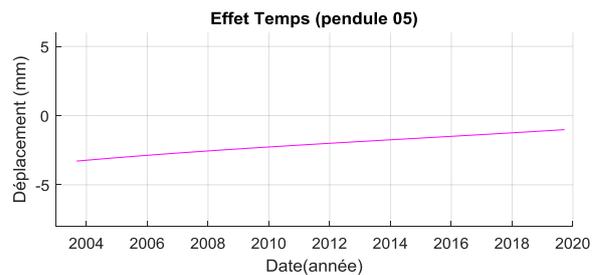
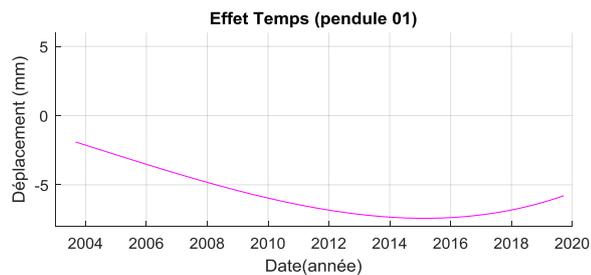
Figure 9. Valeurs de l'indicateur d'interprétation β

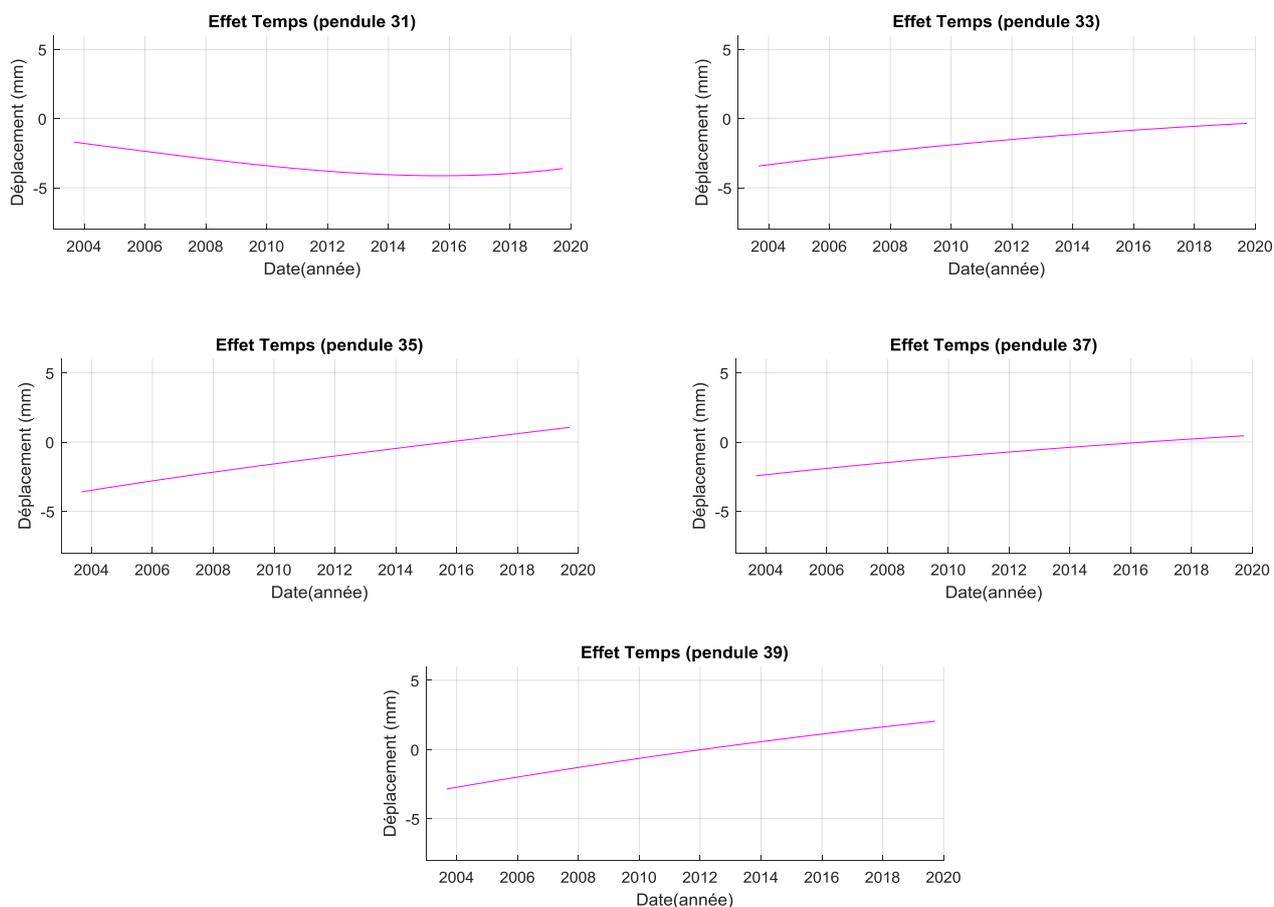
L'effet temps est illustré par les courbes des déplacements en fonction de la date (Figure 10).

On remarque deux tendances différentes ; celle qui correspond aux pendules 01, 27 et 31 et celle qui correspond aux autres pendules (05, 09, 13, 17, 33, 36,

37 et 39).

Les valeurs de l'indicateur d'interprétation v relatif à l'effet irréversible (temps), sont presque nuls ce qui signifie que le barrage ne présente aucun effet irréversible (Figure 11).





Figures 10. Représentation des déplacements dus à l'effet temps des pendules 01, 05, 09, 13, 17, 27, 31, 33, 35, 37 et 39.

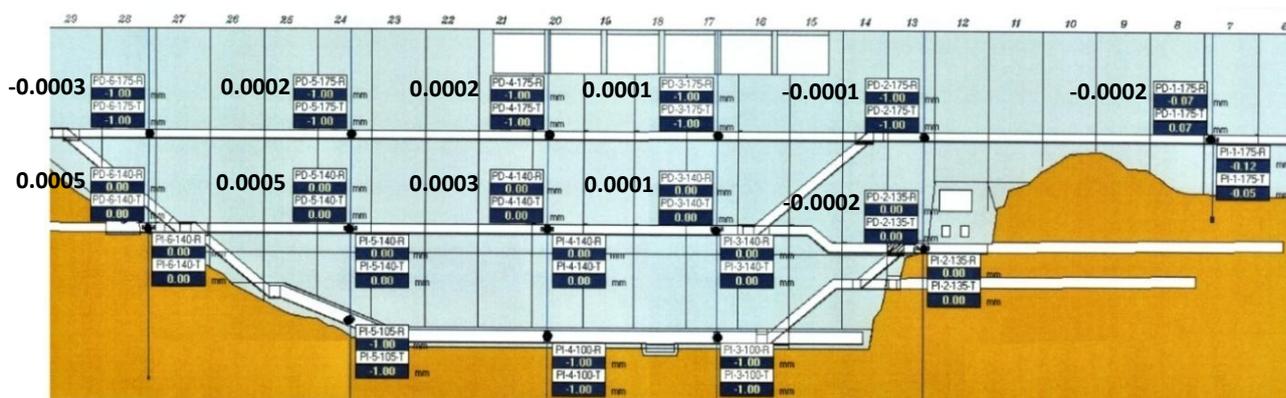


Figure 11. Valeurs de l'indicateur d'interprétation v

La qualité d'une analyse statistique dépend de la valeur du coefficient de détermination R^2 qui est le rapport entre les variations expliquées par le modèle et les variations totales des mesures faites sur les instruments.

Ce coefficient est compris entre 0 et 1 ; plus R^2 est proche de 1, meilleur est l'adéquation. En pratique, une analyse est de bonne qualité lorsque le R^2 est au moins de l'ordre de 0,8 [8].

Le calcul des coefficients R^2 liés à l'ensemble des

pendules analysés en utilisant le modèle HST montre que l'analyse est de bonne qualité pour tous les

pendules à l'exception du pendule 01 dont la qualité est jugée médiocre ($R^2=0.778$) (Figure 12).

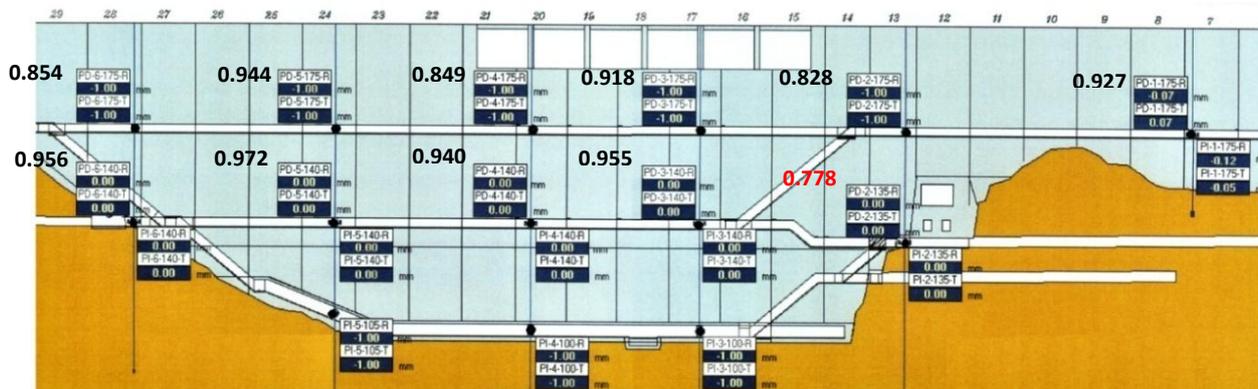


Figure 12. Valeurs du coefficient de détermination R^2

Les différentes valeurs relatives aux coefficients d'interprétation obtenues durant cette analyse sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau 2.

Valeurs des indicateurs d'interprétation relatifs au modèle HST

Pendule	α (effet H)	B (effet S)	ν (effet T)	R^2
01	0,0001	0,0028	-0,0002	0,778
05	0,0070	0,0022	0,0001	0,955
09	0,0042	0,0029	0,0003	0,940
13	0,0046	0,0020	0,0005	0,972
17	0,0013	0,0022	0,0005	0,956
27	-0,0030	0,0020	-0,0002	0,927
31	-0,0007	-0,0024	-0,0001	0,828
33	0,0015	0,0018	0,0001	0,918
35	-0,0003	-0,0022	0,0002	0,849
37	0,0016	0,0019	0,0002	0,944
39	-0,0017	-0,0019	-0,0003	0,854

4. Conclusion

Les méthodes d'analyse statistique des mesures d'auscultation des barrages sont utilisées depuis plusieurs années. La simplicité et la flexibilité de ces modèles ont en fait des outils puissants de représentation graphique et d'interprétation des mesures pour suivre le comportement de l'ouvrage et détecter les phénomènes anormaux.

L'application du modèle HST sur les séries de mesures de déplacements pendulaires du barrage de

Béni-Haroun a permis d'une part de séparer les effets réversibles (effets hydrostatique et saisonnier) pour mieux comprendre le comportement de l'ouvrage à chacun de ces effets et de bien quantifier les déformations relatives, et d'autre part, de définir les déplacements irréversibles (effet de vieillissement), en éliminant les mesures anormales pouvant entraver le diagnostic. D'après l'analyse des résultats de l'application du modèle HST et vu les valeurs des

indicateurs d'interprétation obtenus, on peut dire que le barrage est en bon état. Les trois effets (hydrostatique, temps et saison) n'influencent pas sur la stabilité de l'ouvrage. Particulièrement il n'y a pas de déplacements irréversibles affectant la structure.

En perspectives, cette thématique reste ouverte et le travail peut être étendu à l'étude du comportement du barrage par rapport à l'effet thermique en y appliquant le modèle HSTT (ajout de l'effet thermique) qui tient compte des mesures de la température de l'air et de développer les aspects relatifs la prédiction du comportement d'un barrage à court et moyen termes.

Références

- [1] ANBT (2019). <http://www.soudoud-dzair.com/>
- [2] Bonelli S., Analyse retard des mesures d'auscultation des barrages. Revue française de Géotechnique, 108 (2004): 31-45. <https://doi.org/10.1051/geotech/2004108031>
- [3] Gahlouz. M (2020). « *Analyse et interprétation des données d'auscultation des barrages par le modèle HST (application au barrage Bénie Haroun)* ». Mémoire de Master en Géotechnique et environnement. Université de Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou). Disponible en ligne : <https://dl.ummo.dz/handle/ummo/12053>
- [4] De Bigault De Granrut. M (2019). « *Analyse et interprétation de la pression de l'eau en fondation des barrages-voûtes à partir des mesures d'auscultation* ». Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes ; France. Disponible en ligne : <https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=012684331380167808104:oe5oj--md1a&q=https://www.theses.fr/2019GREAI048.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwjfkzcxNDwAhWqO-wKHcy-AJgQFjAAegQIDRAC&usq=AOvVaw1BO6PLx7ycxv3xwnXbdNc2>
- [5] Bonelli. S, Tourment R., Felix H. (2003). Analysis of earth dam monitoring data. Séminaire Franco/Polonais, Cemagref et Université de Polytechnique de Cracovie. PP 133-150
- [6] ANBT (2017). Fiche technique du barrage Béni-Haroun
- [7] Comité Suisse des Barrages (2005). Dispositifs d'auscultation des barrages, partie 03 : Appareils et méthodes de mesure. Edition Avril 2005. Disponible en ligne : [http://www.swissdams.ch/fr/publications/publications-csb/2005_Dispositif_auscultation-Part_3%20\(complete\).pdf](http://www.swissdams.ch/fr/publications/publications-csb/2005_Dispositif_auscultation-Part_3%20(complete).pdf)
- [8] Royet. P, Felix. H. et Hoonakker M, (2012). Les mesures d'auscultation: Principes et outils. Rapport d'auscultation du Comité Français des barrages et des réservoirs. Disponible en
- ligne sur : https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/col2012-2-01-mesures_d_auscultation-principes_et_outils.pdf
- [9] Penot I., Fabre J-P., Daumas B., Analyse et modélisation du comportement des ouvrages de génie civil par la prise en compte des températures de l'air : Méthode HST Thermique. 23^{ème} congrès des grands barrages (CIGB ICOLD), Braxilia, Mai 2009.