



Partie 3 – Structures & Monitoring

DÉPLACEMENTS D'ORIGINE THERMIQUE DES BARRAGES EN BÉTON : CLARIFICATION ET AMÉLIORATION DES ANALYSES STATISTIQUES

THERMAL DISPLACEMENTS OF CONCRETE DAMS: JUSTIFICATION, CLARIFICATION AND IMPROVEMENT OF STATISTICAL ANALYSIS

M. TATIN^{(a,b)*}, M. BRIFFAUT^(a), F. DUFOUR^(a), A. SIMON^(b), JP. FABRE^(c)

a. Grenoble-INP/Université Joseph Fourier/CNRS UMR 5521, Laboratoire 3S-R, Domaine Universitaire, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

b. EDF DTG, 21 avenue de l'Europe, BP41, 38000 Grenoble, France

c. EDF DTG, 62 Bis rue Raymond IV, BP875, 31685 Toulouse Cedex 6, France

* auteur correspondant : maxime.tatin@3sr-grenoble.fr

RÉSUMÉ

Afin d'analyser les mesures de déplacement des barrages en béton, des modèles physico-statistiques de type régression multilinéaire sont couramment utilisés. Le modèle HSTT (Hydrostatique, Saisonnier, Temporel, Thermique) développé par EDF est un modèle physico-statistique qui permet de soustraire aux mesures brutes les influences réversibles (hydrostatique et thermique) pour mettre en évidence le comportement irréversible de l'ouvrage. Dans cette contribution, les hypothèses et limites théoriques du modèle HSTT sont précisées. Par ailleurs, en s'appuyant sur des simulations aux éléments finis, la capacité du modèle HSTT à capter les différents phénomènes thermiques est évaluée. Enfin, en se basant sur les limites identifiées, un nouveau modèle est proposé afin d'améliorer la

prise en compte de l'effet thermique. La performance de ce modèle est évaluée sur un cas heuristique (simulation aux éléments finis). La nouvelle méthode proposée permet de réduire significativement la dispersion résiduelle du modèle.

ABSTRACT

In order to analyse measured displacements of concrete dams, physico-statistical models such as multi-linear regression are commonly employed. The HSTT model (Hydrostatic, Seasonal, Time, Thermal) developed by EDF is a physico-statistical model to assess the reversible influences (hydrostatic and thermal) and to subtract them to measurements in order to highlight the irreversible



behaviour of the dam. In this contribution, both the hypotheses and the theoretical limits of the HSTT model are clearly pointed out. Moreover, using finite element simulations, the HSTT capability to capture the different thermal phenomena is evaluated. Finally, based on the identified limits, a new model is proposed in order to improve the modelling of the thermal effect. The performance of this new model is evaluated on a heuristic case (finite element simulation). The new method enables to reduce significantly the residual dispersion.

Mots-clés : Barrage en béton, Auscultation, Effets thermiques, Modélisation statistique, Éléments finis.

1. INTRODUCTION

Étant donné que la vulnérabilité structurelle augmente avec le vieillissement des ouvrages, il est essentiel d'ausculter les barrages afin de suivre leur comportement à long terme et de garantir leur sûreté. La partie principale de la surveillance d'un ouvrage réside dans l'analyse des données collectées afin de s'assurer que le barrage se comporte comme prévu et de détecter le plus précocelement possible une éventuelle anomalie. Pour cela, plusieurs grandeurs physiques sont mesurées sur ces ouvrages : déplacements, sous-pressions, fuites etc. Dans cette contribution, l'analyse se concentre sur l'évolution des déplacements.

Le suivi des déplacements des barrages en béton est une composante essentielle de la surveillance du comportement de ces ouvrages. En effet, contrairement aux mesures de pression et débit, les déplacements sont représentatifs de la stabilité interne du barrage. Les déplacements des barrages en béton sont mesurés par des pendules directs ou inversés et suivent des évolutions dictées par plusieurs phénomènes réversibles (charge hydrostatique, effets thermiques) et irréversibles (flUAGE du béton, tassement des fondations, gonflement, endommagement, fissuration etc.). L'analyse la plus simple consiste à tracer les déplacements mesurés en fonction du temps, mais ce type de graphique présente une dispersion importante due aux effets réversibles (thermiques et hydrostatiques) et ne permet pas toujours de tirer des conclusions sur le comportement irréversible de l'ouvrage. Par conséquent, l'utilisation de modèles statistiques est répandue car elle a pour objectif une séparation des influences des différents facteurs explicatifs.

Le modèle HSTT (Hydrostatique, Saisonnier, Temporel, Thermique) développé par EDF [1] est un modèle physico-statistique qui permet de soustraire aux mesures brutes les influences réversibles pour mettre en évidence le comportement irréversible de l'ouvrage. Les résultats obtenus sur l'analyse de nombreux barrages ont prouvé l'efficacité et la pertinence de la méthode. Néanmoins, la modélisation de l'effet thermique s'appuie uniquement sur des mesures journalières de température de l'air. La température de l'eau, le rayonnement solaire et les phénomènes de couplage tels que la dépendance des conditions aux limites

thermiques vis-à-vis du niveau de la retenue ne sont pas pris en compte. Par conséquent, l'état thermique de la structure ne peut pas être estimé précisément et la qualité du modèle peut encore être améliorée.

Par une approche basée sur une modélisation aux éléments finis, la présente étude vise à mieux comprendre les déplacements d'origine thermique des barrages en béton et à améliorer la modélisation statistique. Dans une première partie le modèle HSTT est présenté et ses limites théoriques identifiées. Ce travail s'appuie sur les travaux de Weber [2] et permet de justifier le passage des champs thermiques aux déplacements. Dans un deuxième temps, la capacité du modèle HSTT à capter les différents phénomènes thermiques est évaluée. Enfin, un nouveau modèle physico-statistique (GRAD) est proposé afin de tenir compte de l'effet de la température de l'eau. Le nouveau modèle est alors validé sur un cas heuristique (simulation EF où tous les phénomènes environnementaux sont maîtrisés).

LE MODÈLE HSTT

Le modèle HSTT est un modèle statistique dont le principe est de décomposer la mesure des déplacements en une somme d'influences réversibles et irréversibles afin d'analyser le comportement du barrage. Il décompose le déplacement en trois composantes : une composante temporelle irréversible, une composante hydrostatique réversible et une composante thermique réversible. Le modèle global est une combinaison linéaire des différentes composantes. La composante temporelle irréversible permet d'évaluer le comportement à long terme de l'ouvrage. Les phénomènes irréversibles sont modélisés dans cette contribution par une fonction linéaire du temps t :

$$f_1(t) = a_1 \cdot t \quad (1)$$

La composante hydrostatique réversible représente les déplacements du barrage induits par la charge hydrostatique. Cette composante est modélisée par un polynôme de degré 4 de la variable z (niveau de remplissage de la retenue) :

$$f_2(z) = a_2 \cdot z + a_3 \cdot z^2 + a_4 \cdot z^3 + a_5 \cdot z^4 \quad (2)$$

La composante thermique réversible est elle-même décomposée en une fonction saisonnière et une fonction journalière. La fonction saisonnière représente les déplacements induits par les effets thermiques saisonniers sur une année. Cette influence thermique est modélisée par une somme de fonctions sinusoïdales de la saison S (où l'angle S augmente linéairement de 2π rad en un an) :

$$f_3(S) = a_6 \cdot \cos(S) + a_7 \cdot \sin(S) + a_8 \cdot \cos(2 \cdot S) + a_9 \cdot \sin(2 \cdot S) \quad (3)$$

Dans l'équation (3), la fonction saisonnière est la somme d'une fonction sinusoïdale de période un an ($a_6 \cdot \cos(S) + a_7 \cdot \sin(S)$) et d'une autre de période 6 mois ($a_8 \cdot \cos(2 \cdot S) + a_9 \cdot \sin(2 \cdot S)$). Le terme de période 6 mois (second terme de la décomposition en série de Fourier d'un



phénomène périodique) est rajouté pour améliorer la modélisation des phénomènes de période un an qui ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. La modélisation purement saisonnière de l'effet thermique n'est pas capable de prendre en compte les événements climatiques « anormaux » (par exemple, lors d'une canicule estivale ou d'un hiver particulièrement doux). En effet, les mesures réalisées pendant ces périodes sont généralement mal expliquées par la fonction saisonnière seule et génèrent dans ce cas des résidus importants. La fonction thermique journalière est alors un terme correctif qui permet de prendre en compte les déplacements induits par des conditions thermiques éloignées des normales saisonnières. En utilisant le théorème de réciprocité thermo-élastique [3] et sous certaines hypothèses [2], le déplacement thermique δ_{th} du barrage peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\delta_{th} = \int_H T_M(h) \cdot M(h) dh + \int_H T_G(h) \cdot G(h) dh \quad (4)$$

Où H est la hauteur du barrage, et M et G sont des fonctions de la hauteur qui dépendent de la géométrie de la structure et de ses propriétés mécaniques. En faisant en plus l'hypothèse, que le gradient de température et la température moyenne sont proportionnels (on vérifie qu'ils sont très corrélés) et que ces grandeurs sont indépendantes de la hauteur, l'équation (5) peut alors se simplifier sous la forme :

$$\delta_{th} = T_M \cdot \int_H M(h) dh = A \cdot T_M \quad (5)$$

Ainsi, le déplacement thermique est directement proportionnel à la température moyenne avec un coefficient A qui dépend uniquement de la géométrie et des propriétés mécaniques de l'ouvrage. Dans le modèle HSTT, on fait l'hypothèse que le phénomène majeur qui influe sur les déplacements d'origine thermique de l'ouvrage est la température de l'air. La température moyenne est alors estimée à partir de la température de l'air uniquement. La température de l'air θ est décomposée en deux signaux : la température moyenne saisonnière de l'air θ_s et l'écart $\Delta\theta$ de la température de l'air à cette moyenne saisonnière :

$$\theta = \theta_s + \Delta\theta \quad (6)$$

La température moyenne peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$T_M = T_{M,S} + \Delta\theta_R \quad (7)$$

Où $T_{M,S}$ et $\Delta\theta_R$ sont les températures moyennes induites par la température moyenne saisonnière de l'air θ_s et par les écarts $\Delta\theta$ respectivement. Ainsi le déplacement thermique peut finalement s'écrire :

$$\delta_{th} = A \cdot T_{M,S} + A \cdot \Delta\theta_R \quad (8)$$

La réponse $T_{M,S}$ à la température moyenne saisonnière de l'air est également une fonction saisonnière. Ainsi, la part du déplacement $A \cdot T_{M,S}$ induite par cette excitation saisonnière est reprise par la fonction saisonnière (éq. (3)) du modèle. La fonction thermique réversible totale s'écrit alors sous la forme :

$$f_4(S, \Delta\theta_R) = f_3(S) + a_{10} \cdot \Delta\theta_R \quad (9)$$

La part $\Delta\theta_R$ de la température moyenne induite par les écarts $\Delta\theta$ résulte de la conduction thermique unidimensionnelle avec le signal $\Delta\theta$ appliqué aux deux extrémités du milieu. Ce terme est évalué en convoluant le signal des écarts de température $\Delta\theta$ avec la réponse impulsionale P_M (en termes de température moyenne) du milieu 1D. La forme de la fonction de réponse impulsionale est donnée par l'équation (10) :

$$P_M(t) = \frac{8}{\pi^2 \cdot t_0} \cdot \sum_{n \geq 1} e^{-n^2 \cdot \frac{t}{t_0}} \quad (10)$$

impair

Le paramètre t_0 est le temps caractéristique du milieu 1D. Ce paramètre est représentatif de l'inertie thermique du milieu. Ce paramètre t_0 est ajusté par le modèle de manière à optimiser le résultat de la régression linéaire. De cette manière, la température moyenne calculée est la plus représentative de l'état thermique global de l'ouvrage. L'expression finale du modèle HSTT est donc la suivante :

$$\delta = a_0 + f_1(t) + f_2(z) + f_4(S, \Delta\theta_R) + \varepsilon \quad (11)$$

Où δ représente le déplacement mesuré, et ε représente les résidus du modèle qui contiennent à la fois les incertitudes de mesures et les imprécisions du modèle. Les coefficients a_0 à a_{10} sont alors ajustés par la méthode des moindres carrés (on cherche à minimiser les résidus ε).

Bien que le modèle HSTT explique plutôt bien, dans la plupart des cas, les déplacements des barrages en béton, la dispersion résiduelle du modèle peut rester élevée dans certains cas, et par conséquent, le comportement irréversible du barrage difficile à estimer.

D'après l'équation (4), la température moyenne et le gradient de température (en fonction de la hauteur) sont nécessaires pour calculer le déplacement d'origine thermique. Dans le modèle HSTT, seule la température moyenne est estimée pour seulement une section horizontale. Cela revient donc à considérer le barrage comme ayant une épaisseur constante et des conditions aux limites thermiques indépendantes de la hauteur et identiques à l'amont et à l'aval.

Par ailleurs, le modèle HSTT ne considère implicitement que la température de l'air alors que d'autres phénomènes thermiques ont un impact important sur le champ thermique calculé (température de l'eau, rayonnement solaire, vent, etc.). Bien que ces phénomènes puissent être captés partiellement par la fonction saisonnière, ils ne sont pas pris en compte directement dans le modèle statistique.

3. IDENTIFICATION DES PHÉNOMÈNES THERMIQUES IMPORTANTS

Afin d'identifier l'influence des différentes sollicitations thermiques sur les déplacements, une modélisation thermomécanique transitoire d'un barrage poids a été réalisée par la méthode des éléments finis [4]. Le modèle prend en compte la température de l'air, de l'eau, les échanges convectifs et radiatifs avec l'environnement alentour, le rayonnement solaire (avec dépendance de l'orientation du

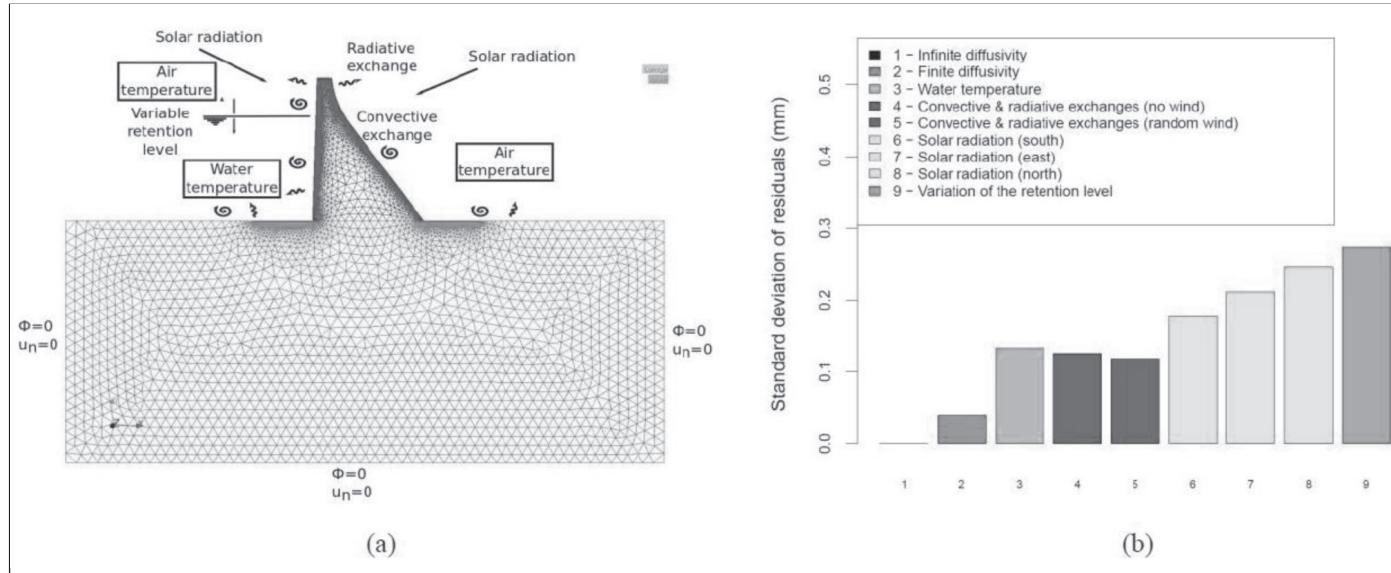


Figure 1 : Maillage et conditions aux limites du modèle aux éléments finis (a). Dispersion des résidus d'HSTT pour les différentes simulations aux éléments finis (b).

barrage). L'effet du vent est étudié en faisant varier les échanges convectifs dans le temps. De plus, le niveau de la retenue est variable au cours du temps afin d'étudier son effet sur les conditions aux limites thermiques (et donc sur les déplacements). La figure 1 (a) montre le maillage et les conditions aux limites utilisés pour les simulations. On peut noter que des éléments très fins ($\approx 5\text{cm}$) sont utilisés proche des frontières afin de capter les fréquences élevées des sollicitations thermiques.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les phénomènes qui ne sont pas bien expliqués par le modèle HSTT. Pour cela, la méthode employée consiste à ajouter progressivement les différentes sollicitations et de réaliser une nouvelle simulation pour chaque phénomène ajouté dans le modèle. Chacune des simulations produit une série temporelle de déplacements de l'ouvrage sur laquelle une analyse HSTT est réalisée. La première simulation ne prend en compte que la température de l'air (réservoir vide) et la diffusivité du milieu est considérée comme infinie. Dans ce cas, le modèle HSTT marche parfaitement et la dispersion des résidus (écart-type du signal des résidus) est quasiment nulle. La figure 1 (b) montre l'évolution de la dispersion obtenue pour chaque analyse HSTT, c'est-à-dire à chaque fois qu'un nouveau phénomène thermique est pris en compte dans le modèle.

Il ressort de cette étude (figure 1) que 3 phénomènes majeurs doivent être intégrés à la fonction thermique du modèle HSTT pour obtenir une diminution significative de la dispersion résiduelle du modèle : la température de l'eau, le rayonnement solaire (qui a plus ou moins d'impact en fonction de l'orientation du barrage – l'orientation donnée sur la figure 1 (b) est celle du parement amont du barrage) et les variations du niveau de la retenue.

Dans cette étude, l'ordre d'ajout des phénomènes dans la modélisation a été défini à priori. On peut penser que les résultats de cette étude peuvent être légèrement différents suivant l'ordre d'apparition des phénomènes thermiques dans la modélisation. Notamment les effets convectifs en présence de vents sont considérés comme négligeables à

l'issue de cette étude mais pourraient avoir plus d'importance en présence de rayonnement solaire. Néanmoins, les différents cas de figure n'ont pas été explorés à ce stade.

4. AMÉLIORATION DU MODÈLE HSTT : PRISE EN COMPTE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

Dans le modèle HSTT, la température moyenne est calculée à partir de la température de l'air sur les deux limites du milieu 1D. Pour intégrer la température de l'eau, il suffit de changer la condition aux limites à l'amont : on exprime alors la température amont T_{am} comme étant égale à :

$$T_{am} = \gamma \cdot T_{eau} + (1 - \gamma) \cdot T_{air} \quad (12)$$

Où γ représente la part immergée de la hauteur du parement amont. L'intégration de la température de l'eau génère une différence entre la température amont et aval, et donc un gradient de température. La prise en compte du gradient se fait par l'introduction d'une nouvelle variable explicative. Identiquement au calcul de la température moyenne, le gradient de température se calcule par un produit de convolution. La réponse impulsionnelle pour le gradient est donnée par l'équation :

$$P_G(t) = \frac{24}{\pi^2 \cdot t_0 \cdot L} \cdot \sum_{n \geq 1}^{\text{pair}} e^{-\frac{n^2 \cdot t}{t_0}} \quad (13)$$

Dans le modèle HSTT, on calcule la moyenne de température induite par les écarts de la température de l'air à sa moyenne saisonnière. Le nouveau modèle, appelé GRAD, calcule la température moyenne T_M et le gradient de température T_M issu des écarts des températures amont T_{am} et aval $T_{av} = T_{air}$ à leur moyenne saisonnière respective. Par ailleurs, le modèle GRAD intègre 15 termes dans les réponses impulsionnelles (équations (10) et (13)) alors que le modèle HSTT ne considère que le premier terme. Une

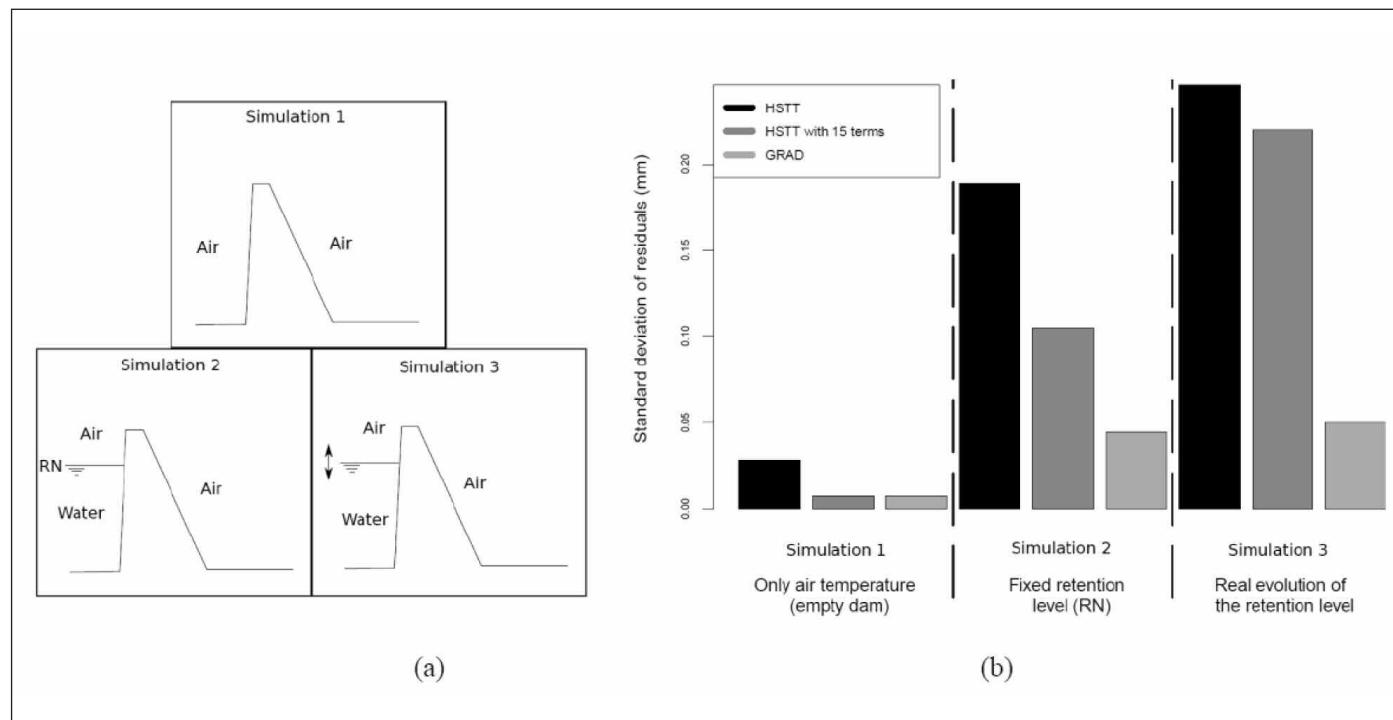


Figure 2 : Description schématique des trois cas heuristiques (a). Dispersion résiduelle des modèles HSTT et GRAD appliqués sur les trois simulations (b).

étude préliminaire a montré qu'au-delà de 15 termes, l'amélioration apportée est négligeable.

La performance du modèle GRAD a été comparée à celle d'HSTT sur trois cas heuristiques. Il s'agit de trois simulations aux éléments finis définies par la figure 2 (a). La première simulation ne prend en compte que la température de l'air, la retenue étant alors considérée comme vide. La deuxième simulation prend en compte la température de l'air et celle de l'eau avec une cote de retenue fixe. Enfin, la troisième simulation prend en compte la température de l'air et celle de l'eau avec une cote de retenue variable au cours du temps.

La figure 2 (b) montre une mesure de la dispersion résiduelle (écart-type des résidus) des deux modèles appliquée sur les séries de déplacements issues des 3 simulations. Pour la première simulation, l'amélioration apportée à HSTT est due uniquement à l'ajout de termes dans les réponses impulsionales. En effet, le modèle GRAD n'apporte rien sur cette simulation car la simulation n'intègre pas la température de l'eau, donc aucun gradient ne se développe dans l'ouvrage. Pour la deuxième simulation, l'amélioration vient à la fois de l'ajout de termes et de la prise en compte de la température de l'eau avec le modèle GRAD. Enfin, pour la dernière simulation, l'ajout de termes n'améliore pas significativement les résultats en comparaison à l'amélioration apportée par le modèle GRAD. Il est intéressant de remarquer également que la dispersion du modèle HSTT augmente sensiblement entre la simulation 2 et la simulation 3 alors que celle du modèle GRAD n'augmente presque pas. Le modèle GRAD est, par conséquent, capable de tenir compte de l'effet thermique induit par la variation du niveau de la retenue, ce phénomène étant directement intégré dans le modèle à travers l'équation (12).

5. CONCLUSION

Le modèle physico-statistique HSTT permet d'interpréter les déplacements mesurés sur les barrages en béton en séparant les effets des différentes influences (hydrostatique, thermique, irréversible). Cependant, il ne tient compte pour l'estimation des déplacements thermiques que d'un nombre limité de paramètres physiques. Il peut alors présenter dans certains cas une dispersion résiduelle importante qui réduit par conséquent la précision de l'analyse du comportement irréversible du barrage.

En s'appuyant sur un modèle éléments finis, les phénomènes thermiques sont analysés en termes de source de dispersion pour le modèle HSTT. Les résultats montrent que la température de l'eau, le rayonnement solaire et le couplage entre les conditions aux limites thermiques et les variations de la cote de retenue doivent être intégrés dans le modèle afin d'améliorer la précision du déplacement thermique estimé.

Par ailleurs, d'autres limites du modèle HSTT ont été identifiées. Les principales limites étant l'utilisation de la température moyenne uniquement (l'influence du gradient est négligée) et que le barrage est approché, d'un point de vue thermique, par un milieu 1D.

Basés sur ces observations, des améliorations sont proposées. L'introduction d'un gradient de température et la prise en compte de la température de l'eau permet déjà d'améliorer sensiblement les résultats sur un cas heuristique. Néanmoins, malgré ces améliorations, le modèle GRAD possède encore une certaine dispersion. Celle-ci vient du fait que l'on considère que T_M et T_G sont constants sur la hauteur et que la température à l'amont T_{am} est homogène et indépendante de la hauteur. L'intégration dans l'apprécie d'un profil de température de l'eau plus réaliste fait



partie des futurs travaux en discrétisant le barrage en tranche sur sa hauteur.

RÉFÉRENCES

[1] Penot I., Daumas B., Fabre J.P. (2005). Monitoring behaviour. *International Water Power & Dam Construction*. Décembre 2005, pp 24-27.

[2] Weber B., Perner F., Obernhuber P. (2010). Displacements of concrete dams determined from recorded temperatures. *Proceedings of the 8th ICOLD European Club Symposium*.

[3] Timoshenko S.P., Goodier J.N. (1970). Theory of elasticity. *McGraw-Hill*.

[4] Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.P. (2013). Thermal Displacements of Concrete Dams: Finite Element and Statistical Modelling. *Proceedings of the 9th ICOLD European Club Symposium*, Venise.

