

Auscultation par GPS d'un barrage en enrochement : modélisation en 3D du comportement du barrage par l'utilisation du logiciel ANSYS

■ Nadia BOUHOUCHE - Bachir GOURINE

La sécurité des barrages en enrochement ne dépend pas seulement d'une conception appropriée et d'une construction adéquate, mais aussi de la surveillance du comportement réel, non seulement, pendant la construction et pendant la mise en eau, mais tout au long de l'exploitation de l'ouvrage.

La surveillance à l'aide de l'instrumentation géodésique et géotechnique appropriée, permet d'avoir un système d'avertissement en cas de comportement anormal de ces barrages.

La comparaison des valeurs de déformations calculées lors de la conception avec les déformations mesurées à l'aide des instruments de surveillance permet de valider ou de faire une réévaluation des paramètres utilisés dans les analyses [Szostak-Chrzanowski, 2008].

La modélisation du comportement des barrages en enrochement est un processus complexe dans lequel il faut considérer le comportement non linéaire des matériaux de construction, l'interaction entre le barrage et le sol de fondation et/ou le substratum rocheux, l'influence de la charge hydraulique sur le barrage et sur la fondation et les effets de saturation par l'eau. Le processus de déformation peut être modélisé en employant la méthode des éléments finis (MEF). Parmi les nombreux logiciels basés sur la méthode des éléments finis, ANSYS 15.0 est celui qui rend l'analyse des structures complexes possible avec moins d'erreurs [Varghese, 2014].

Ce travail vise à analyser le comportement des barrages en enrochement à l'aide du logiciel ANSYS, une application a été faite sur le barrage d'Altinkaya en Turquie.

MOTS-CLÉS

Barrage, déformation, déplacement, Global Positioning System (GPS), Auscultation, Méthode des éléments finis, ANSYS.

par l'augmentation des contraintes effectives lors de la construction par couches successives de matériau, de terre et aussi par des effets de fluage du matériau.

Les déformations sont influencées par les déformations de la fondation, le transfert de contraintes entre les différentes zones du barrage et les autres facteurs (séismes, glissements de terrain, etc.) [Szostak-Chrzanowski, A et al. 2006].

Rôle de la surveillance des barrages en enrochement

L'une des principales tâches de la surveillance est de chercher essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique.

Il existe deux méthodes pour surveiller un barrage :

- La surveillance géotechnique à travers la vérification des paramètres de conception où les paramètres géotechniques sont de la plus haute importance ;
- La surveillance géodésique qui constitue un moyen d'obtention des déplacements planimétriques et altimétriques. [Benmadani & Lemchouchi, 2008].

Auscultation géométrique d'un barrage en enrochement par GPS

Il s'agit des techniques d'observations géodésiques dédiées au suivi du comportement des barrages, qui conduisent à l'évaluation de déplacements temporels absolus d'un

Introduction

Les barrages en enrochement présentent des tassements et subissent des déformations de plusieurs types (affaissement, cisaillement...) ; ils sont soumis aussi à de grandes déformations verticales en raison de leur poids et du réarrangement des blocs d'enrochement. L'étanchéité est souvent assurée par un masque amont et/ ou noyau central ; ces déformations peuvent induire des déformations excessives de l'organe d'étanchéité.

La prévention des tassements s'avère en effet capitale pour assurer l'étanchéité et la stabilité des barrages. L'évaluation des déformations constitue également un enjeu important pour la réhabilitation ou la confortation de ces ouvrages.

■ Sécurité des barrages en enrochement

Les déformations d'un barrage en enrochement commencent souvent pendant la construction, elles sont provoquées

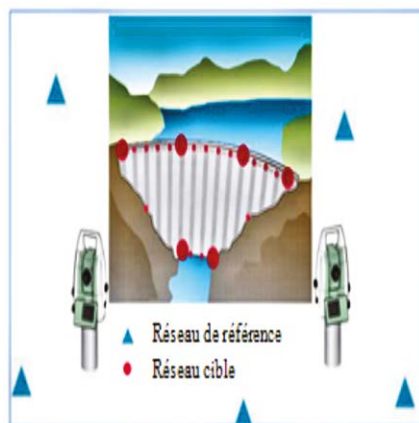


Figure 1. Les principaux réseaux géodésiques d'auscultation d'un barrage [Milev, 2010]

ensemble discret de points construits sur l'ouvrage pour mettre en évidence des mouvements superficiels du barrage et de son voisinage (tendances des déplacements et déformations) par des techniques spatiales de positionnement "GPS" [Kahlouche, 2012].

Si les points de mesure sont situés à l'intérieur du barrage, seuls les déplacements relatifs sont obtenus. En revanche, pour obtenir des indications sur l'évolution des déformations ou dans le cas d'un comportement particulier, des valeurs de déplacements absolus sont requises. A cet

Tableau 1. Informations sur les dates de mesures et le niveau d'eau

Période N°	Dates de mesure		Niveau D'eau
	Début	Fin	
1	21.09.2000	23.09.2000	170.34 m
2	05.06.2001	08.06.2001	167.53 m
3	20.09.2001	22.09.2001	164.20 m

effet, le système propre au barrage (réseau cibles) est complété par un réseau de référence situé dans une zone stable (réseau d'auscultation) auquel il est relié (cf. Figure 1). A ce dernier, un espace de référence étendu stable (réseau de base) est adjoint. Les trois réseaux doivent être rattachés au même système géodésique [Kahlouche, 2012].

■ Situation et données sur le barrage Altinkaya (cas d'étude)

Le barrage d'Altinkaya (cf. figure 2) est le quatrième plus grand barrage en Turquie, avec une capacité de 139 millions m³. C'est un barrage en enrochement à noyau central argileux destiné essentiellement à l'irrigation et à la production de l'énergie électrique. Il est situé sur la rivière Kızılırmak, à 23 km au sud de Bafra et 35 km à l'ouest de Samsun, au nord de la Turquie [Yazan&Öztan, 2011].

■ Réseau géodésique de suivi des déformations du barrage Altinkaya

Le réseau géodésique du barrage Altinkaya est composé de six piliers encadrant la zone du barrage et onze points cibles établis sur la crête du barrage pendant sa construction (cf. figure 3) [Taşçı, 2012].

Avant de commencer les mesures de déformation, tout l'équipement a été calibré.

Afin d'éviter ou de réduire les erreurs d'équipement, les mêmes récepteurs GPS et antennes ont été utilisés sur les mêmes points pendant toutes les périodes.

Les longueurs des lignes de base varient entre 60 m et 2 km dans le réseau de déformation (Figure 3). Les mesures liées au réseau de référence ont été réalisées avec 3 récepteurs GPS. La période d'observation était de 45 minutes avec un taux d'échantillonnage de 10 secondes. Le masque d'élévation du satellite a été sélectionné à 15° afin d'éviter l'effet de multi-trajet.

Les déformations ont été calculées par la méthode statique du GPS deux fois par an pendant une durée de deux ans [Taşçı, 2010]. Les mesures ont nécessité quatre campagnes de mesures ; deux mesures distinctes ont été faites au barrage d'Altinkaya : une entre les points de référence et l'autre sur les points cibles en utilisant 3 récepteurs GPS Ashtech Z et des antennes GPS 700700B_Mar.III_L1 / L2.

Les informations liées à la mesure de déformation du réseau sont données dans le tableau 2. [Gökalp & Taşçı, 2009].

Le réseau d'auscultation du barrage a été traité avec le logiciel GeoGenious 2000 en un ajustement libre. La précision des lignes de base a montré une valeur maximale de 1,2 mm horizontalement et de 3,2 mm verticalement pour les 4 périodes d'observation [Gökalp, Taşçı, 2009].



Figure 2. Barrage d'Altinkaya

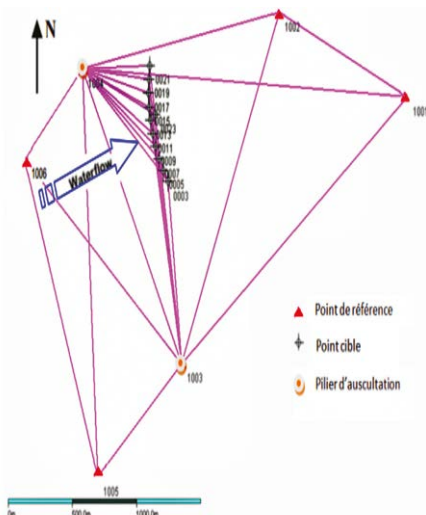


Figure 3. Réseau géodésique du barrage Altinkaya [Gökalp, Taðcı, 2009]

■ La méthode des éléments finis (MEF) pour l'analyse des déformations des barrages en enrochements

La méthode des éléments finis est une méthode numérique pour trouver des solutions approximatives aux équations aux dérivées partielles et équations intégrales. Au lieu de résoudre un problème continu, l'espace où une équation doit être résolue est divisé en un ensemble fini d'éléments interconnectés au niveau des nœuds [Daniel, 2010].

Les étapes de base dans la méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, illustrées dans la figure 4, sont les suivantes [Oudin, 2008] :

- discrétisation du milieu continu en sous-domaines ;
- construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations.

Étape 1 : Discrétisation et prétraitement du modèle éléments finis

La discrétisation consiste à procéder à un découpage du domaine D continu représentant l'objet à modéliser, en sous-domaines De de formes élémentaires (cf. Figure 5).

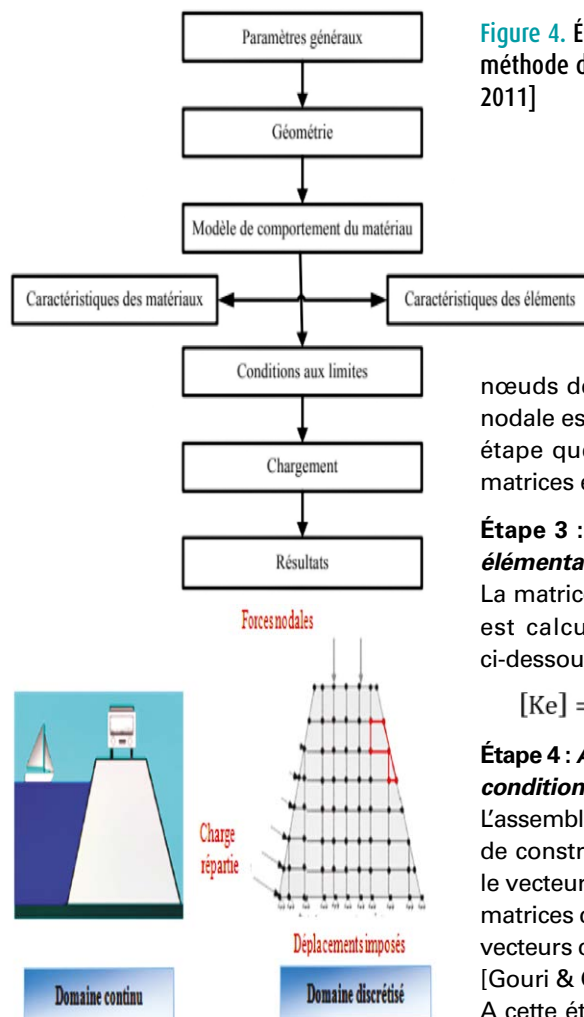


Figure 5. Principe de discrétisation

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie du barrage souvent complexe par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune. Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la figure 4. Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution [Oudin, 2011].

Étape 2 : Construction de l'approximation nodale par sous-domaine

Dans chaque élément De , la variable telle que le déplacement, la pression, la température, est approchée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autres. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de

Figure 4. Étapes générales de la méthode des éléments finis [Mertani, 2011]

nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

Étape 3 : Construction de la matrice élémentaire de rigidité $[K_e]$

La matrice élémentaire de rigidité $[K_e]$ est calculée en utilisant l'équation ci-dessous [Varghese, 2014] :

$$[K_e] = \int B^T [C] [B] dV \quad (2)$$

Étape 4 : Assemblage et application des conditions aux limites

L'assemblage est l'opération qui permet de construire la matrice globale $[K]$ et le vecteur des sollicitations à partir des matrices de chaque élément $[K_e]$ et des vecteurs des sollicitations élémentaires [Gouri & Gilbert, 1981].

A cette étape, toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

Étape 5 : Calcul de la déformation

En appliquant les équations d'équilibre, la déformation à chaque nœud est calculée en utilisant l'équation :

La méthode des éléments finis fournit une solution numérique à un problème complexe. On peut donc s'attendre à ce que la solution converge vers la solution exacte dans certaines circonstances.

$$[K][D] = [P] \quad (3)$$

$$[D] = [K]^{-1}[P] \quad (4)$$

Avantages de la méthode des éléments finis

Voici les avantages de la méthode des éléments finis :

- la méthode peut être appliquée efficacement pour répondre aux limites irrégulières ;

- elle peut résoudre les structures ayant un type de frontière compliqué ; les matériaux homogènes, hétérogènes, anisotropes, isotropes, orthotropes peuvent être traités sans trop de difficultés ;
- les structures à géométrie complexe peuvent être analysées ; l'analyse non linéaire et dynamique peut être effectuée.

Afin de quantifier les déformations engendrées dans le corps du barrage Altinkaya, le logiciel ANSYS basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé.

■ ANSYS V 15.0

ANSYS 15.0 est un code d'éléments finis d'usage général dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physiques en général. Ces problèmes portent notamment sur : l'analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), le transfert de chaleur, la dynamique des fluides, l'acoustique, l'électromagnétique. ANSYS 15.0 (<http://www.ansys.com>) a été développé à Canonsburg en Pennsylvanie par la société du même nom, qui est l'un des plus grands développeurs et fournisseurs de logiciels de simulation numérique. [Mertani, 2011]. Dans notre étude nous avons utilisé l'interface ANSYS Workbench version 15. De façon générale, une résolution par le logiciel ANSYS comporte trois étapes résumées dans le *tableau 2*. Le modèle 3D de la structure du barrage Altinkaya que nous avons développé est illustré dans la *figure 6* ci-contre :

Dans cette analyse statique du barrage Altinkaya, nous avons considéré que les enrochements du barrage sont typique-

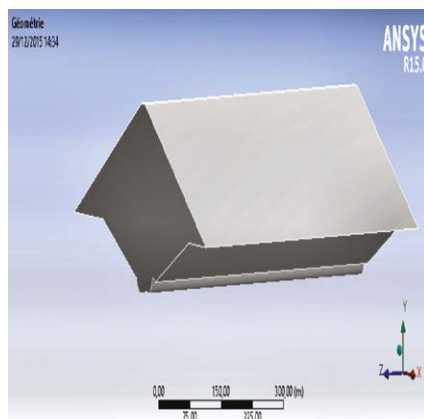


Figure 6. Modèle du barrage Altinkaya en 3D

ment modélisés de manière à ce qu'ils soient liés à la roche de fondation. Le barrage est modélisé de manière à ce qu'il soit considéré comme une structure monolithique avec des propriétés linéaires, élastiques et isotropiques.

L'étape suivante consiste à définir un maillage en éléments finis. Ces derniers peuvent être de différentes formes. Les formes les plus couramment utilisées en 3D sont le tétraèdre ou l'hexaèdre.

Dans notre étude, nous avons opté pour le type de maillage tétraédrique, car il est plus facile à générer et à adapter selon beaucoup de formes de structure complexe.

La discrétisation de la structure, servant à la modélisation, est représentée sur la *figure 7*.

Modélisation

Les déplacements calculés entre la 1^{re} et les autres périodes seront pris comme conditions aux limites.

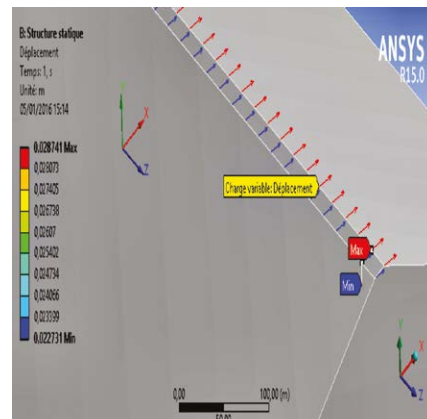


Figure 7. Modèle du barrage discrétisé en sous-domaines, méthode des triangles seuls

Dans cette partie, la première période (*Tableau.1*) sera prise comme période de référence, tous les déplacements et les déformations se calculeront par rapport à elle.

Après insertion des déplacements calculés entre la 1^{re} et la 2^e période sur la crête du barrage, on obtient la *figure 8* (même tendance pour les autres périodes).

D'après les vecteurs déplacements, le barrage tend à se déplacer vers l'amont (même constatation pour toutes les périodes).

■ Champs de déplacement dans le corps du barrage

Les figures 9 et 10 présentent la valeur minimale et maximale respectivement de déplacement engendrées dans le corps du barrage qui correspondent aux périodes 1 et 2, 1 et 4 respectivement. Les valeurs des champs de déplacements totaux sont récapitulées dans le *tableau 4*.

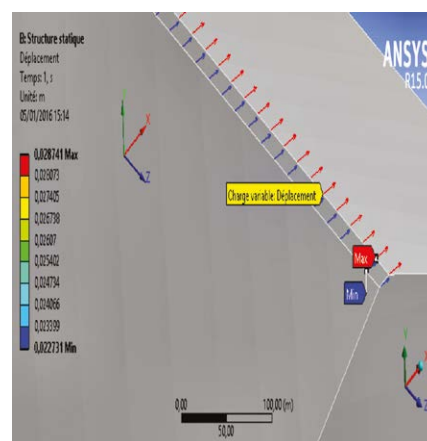


Figure 8. Vecteurs déplacements sur la crête du barrage

Tableau 2. Etapes de modélisation par ANSYS

Procédure	Étapes
Préprocesseur	<ul style="list-style-type: none"> – Entrer le type d'élément – Entrer les propriétés du matériau (module de Young, coefficient de poisson, densité, etc.) – Entrer les données géométriques (épaisseur des plaques, surface, volume, inertie, etc.) – Générer le maillage – Entrer le chargement (forces statiques, gradient de température, etc.) – Entrer les conditions aux limites
Solveur	<ul style="list-style-type: none"> – Entrer le type de calcul effectué (statique, dynamique, etc.) – Listing, impression et visualisation des résultats
Post-Procasseur	<ul style="list-style-type: none"> – Listing, impression et visualisation des résultats

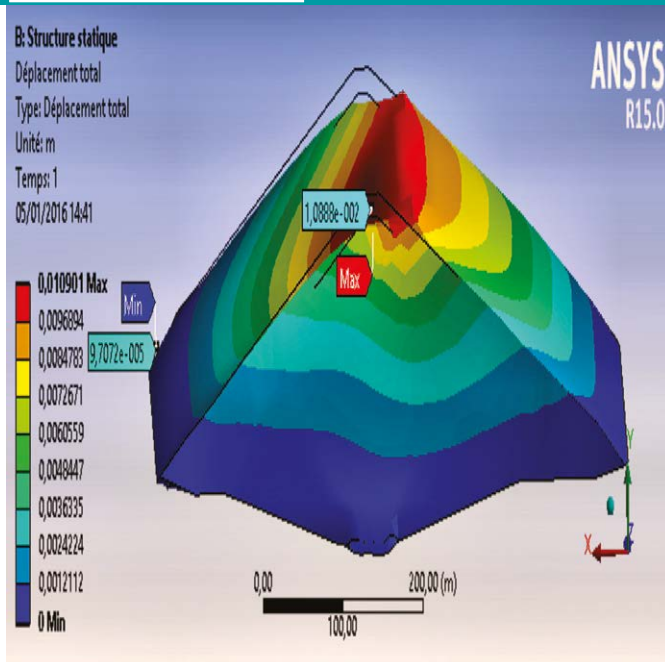


Figure 9. Champ de déplacement minimal dans le barrage entre les périodes 1 et 2, retenue vide

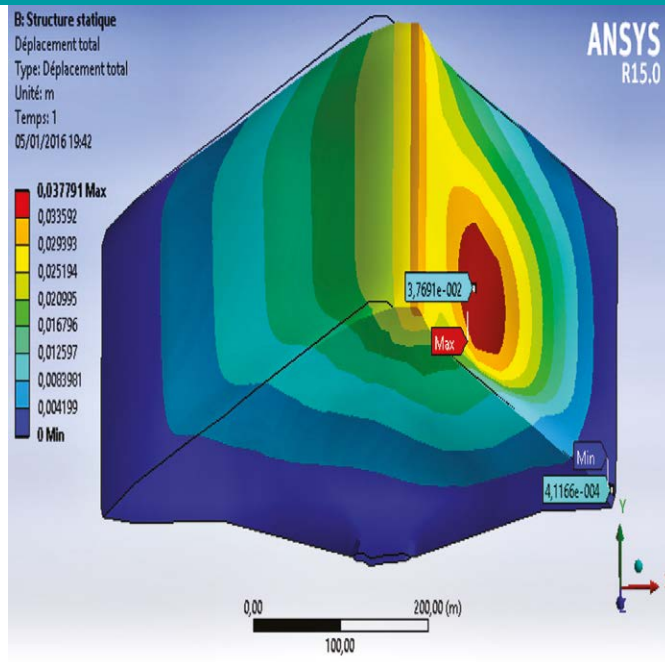


Figure 10. Champ de déplacement maximal dans le barrage entre les périodes 1 et 4, pressions hydrostatiques actives



D'après le tableau 4 on remarque que la même tendance est enregistrée pour la variation des déplacements qui se génèrent au niveau de la crête du barrage quand il est soumis à son poids propre. La valeur maximale est de l'ordre de 23,3 mm entre la 1^{re} et la 4^e période, cela est due à la diminution de la résistance des enrochements constituant le barrage, ce qui a provoqué un affaissement dans la partie amont du barrage.

Or, quand le barrage est soumis à la charge hydrostatique et à son poids propre, on constate que le déplacement s'oriente vers le centre de la digue et au niveau de la crête du barrage, sa valeur maximale est égale à 37,6 mm engendrée entre la 1^{re} et la 4^e période, à cause de la charge d'eau et des pressions hydrostatiques appliquées sur le talus amont. Les tassements du barrage sont assez réguliers et se génèrent dans la crête ; ils sont accentués au niveau du talus amont.

■ Déformations dans le corps du barrage

Les valeurs minimales et maximales induites dans le corps du barrage sous l'effet de son poids et la pression hydrostatique sont représentées dans les figures ci-contre.

Les valeurs maximales et minimales des déformations induites dans le corps du barrage sont résumées dans le tableau 5.

La déformation produite entre la 1^{re} et la 3^e période, et entre la 1^{re} et la 4^e période est de l'ordre de 307 ppm ; cela signifie que le corps du barrage n'a pas bougé pendant ces deux époques. On peut considérer que l'ouvrage est stable vu qu'il est soumis uniquement à son poids propre.

On constate que les mouvements les plus importants observés se produisent entre la 1^{re} et la 3^e période, au milieu de la crête du barrage du côté amont, c'est-à-dire du côté où la charge d'eau est exercée.

Ces mouvements sont dus à la diminution du niveau de la retenue (de 170,34 m à 164,20 m) en raison de l'absence des précipitations dans cette

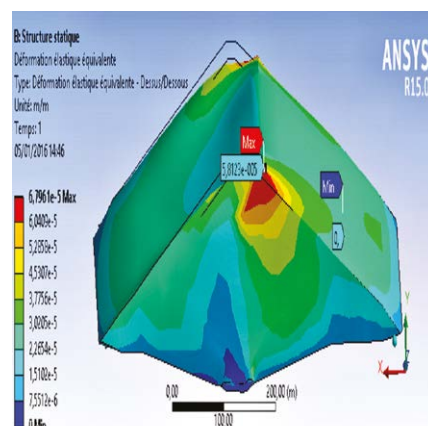


Figure 11. Déformation minimale du barrage entre les périodes 1 et 2, retenue vide

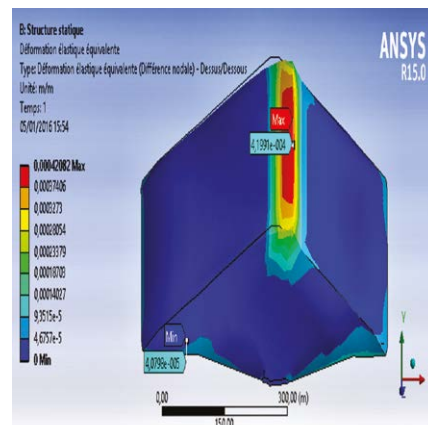


Figure 12. Déformation maximale du barrage entre les périodes 1 et 3, pressions hydrostatiques actives

Tableau 4. Tableau récapitulatif des valeurs maximales et minimales des déplacements

	Périodes	Valeurs maximales (mm)	Valeurs minimales (mm)
Poids propre	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	10.8	0.09
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	27.6	0.84
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	23.3	0.64
Pression hydrostatique et poids propre du barrage	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	43.1	0,29
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	10.9	0.47
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	37.6	0.41



Tableau 5. Tableau récapitulatif des valeurs maximales et minimales de déformations

	Périodes	Valeurs maximales (ppm)	Valeurs minimales (ppm)
Poids propre	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	58,1	0
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	307	43,3
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	307	38,2
Pression hydrostatique et poids propre du barrage	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	245	20,7
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	419	40,7
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	311	56,4

période et de la grande production électrique ; la déformation induite est de l'ordre de 419 ppm.

Le remplissage du réservoir a un effet sur le comportement des enrochements du barrage. L'eau a entraîné un soulèvement des particules immergées, qui a diminué leurs résistances et peut endommager leurs formes.

Conclusion

Cette analyse a permis de vérifier la capacité du logiciel ANSYS dans la modélisation du comportement d'un barrage en enrochements soumis à une combinaison de charge hydrostatique et son propre poids, avec la considération des mesures d'auscultation GPS. Ces derniers ont montré que la crête du barrage a subi des mouvements horizontaux et verticaux caractérisés par une direction dominante vers l'aval et par un phénomène de tassement.

Le barrage Altinkaya a montré une déformation maximale au niveau de sa crête en raison de son poids propre et de la charge hydrostatique ; cette dernière joue un rôle important sur l'évolution des déformations et des déplacements.

L'ensemble du massif en enrochements du barrage présente un faible tassement général de l'ouvrage dû aux actions du poids propre et de la pression de l'eau. Compte tenu des résultats de l'analyse effectuée, on peut considérer que l'ouvrage a un comportement tout à fait satisfaisant pendant la période d'observation GPS (09/2000 jusqu'à 05/2002) ; l'ouvrage présente toutes les garanties d'une bonne durabilité. ●

Contacts

BOUHOUCHE Nadia,
bouhouchenadia@yahoo.fr

GOURINE Bachir
bachirgourine@yahoo.com
Centre des techniques spatiales,
Département de Géodésie spatiale, Arzew,
Algérie

Bibliographiques

1. Benmadani, M & Lemchouchi, W. *Étude de différences techniques d'auscultation des barrages*. Mémoire d'ingénieur, Centre des Techniques Spatiales, Arzew-Algérie (2008).
2. Daniel, C. *Méthode des éléments finis par l'exemple*. Groupe Mécanique Modélisation Mathématique et Numérique, Université de Caen, France (2010).
3. Gökalp, E & Taşçi, L. *Deformation monitoring by GPS at embankment dams and deformation analysis*. Survey Review, 41, 311 pp.86-102 (2009).
4. Kahlouche, S. *Projet de mise en place d'un réseau d'auscultation géométrique du barrage de Sikkak (Tlemcen) à partir d'observations spatiales*. Atelier technique de l'Agence Spatiale Algérienne sur l'Utilisation des technologies spatiales au service des ressources en eau (2012).
5. Taşçi, L. *Analysis of dam deformation measurements with the robust and non-robust methods*, Scientific Research and essays Vol.5 (14), (2010).
6. Mertani, B. *Modélisation numérique et expérimentale du comportement des panneaux sandwichs à âme en nids d'abeilles*, Mémoire de magister université Ferhat Abbas – Setif (2011).
7. Milev, J. *Geodetic Deformation Analysis as the main part of monitoring projects*, Using Adjustments in a Monitoring Network (2010).

8. Moulay, E. *Etude paramétrée de la stabilité des barrages poids*, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie (2014).
9. Szostak-chrzanowski, A. et al. *Kinematic Analysis of Behavior of Large Earth Dams*, TS 68 – Deformation Measurements of Dams. Munich, Germany (2006).
10. Varghese, B. et al. *Finite element analysis of arch dam*. International Journal of Research in Engineering and Technology, IJRET, India (2014).
11. Yazan & öztan, *Altinkaya Braji ve hes jeoteknik çalışmaları*. Ankara, Turkey (2011).

ABSTRACT

KEYWORDS: Dam, deformation, displacement, Global Positioning System (GPS), auscultation, Finite Element Method, ANSYS.

The safety of rockfill dams does not depend only on an appropriate design and adequate construction, but also for monitoring the current behavior, not only during construction and during impoundment, but throughout dam process [Szostak-chrzanowski, 2008]. Monitoring using the appropriate geodetic and geotechnical instrumentation allows warning system in case of anormal behavior of the dams. The comparison calculated behavior deformations values when designing and deformations measured using the monitoring instruments, allows to validate or make a reassessment of the parameters used in the analyzes. Modeling the behavior of rockfill dams is a complex process in which we must consider the nonlinear behavior of construction materials, the interaction between the dam and the soil foundation and / or bedrock, the influence of hydraulic load on the dam and on the foundation and the effects of water saturation. The deformation process can be modeled using the finite element method (FEM). Among the many processors based on the finite element method, ANSYS which makes possible the analysis of complex structures with fewer errors [Varghese, 2014]. This work aims to analyze the behavior of rockfill dams using the ANSYS computer code; an application was made on Altinkaya Dam in Turkey.