

ANALYSE DE DÉFORMATION D'UN BARRAGE PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS (MEF). CAS DU BARRAGE EN ENROCHEMENTS DE KERRADA (MOSTAGANEM)

DAM DEFORMATION ANALYSIS BY FINITE ELEMENTS METHOD (FEM). CASE OF ROCKFILL DAM OF KERRADA (MOSTAGANEM)

Réception : 17/01/2019

Acceptation : 09/06/2019

Publication : 30/06/2019

GOURINE Bachir, BOUHOUCHE Nadia, BOUGHARI Youcef

Département de Géodésie Spatiale, Centre des Techniques Spatiales (CTS) – BP 13, 31200 Arzew/Oran, Algérie, E-mail: bachirgourine@yahoo.com bgourine@cts.asal.dz

Résumé- Dans notre pays, les barrages en enrochements constituent l'ossature de l'infrastructure de gestion de l'eau. Malgré leurs caractéristiques avantageuses en termes de résistance et de construction, ces ouvrages nécessitent un dispositif de surveillance précis pour assurer leur sécurité et garantir leur pérennité. Toute forme de surveillance doit être accompagnée d'une instrumentation dédiée et d'une modélisation adéquate. La modélisation du comportement des barrages en enrochements est un processus complexe dans lequel il faut considérer le comportement 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. Dans notre travail, la méthode des éléments finis tridimensionnels (3D) a été employée pour la modélisation d'un comportement linéaire élastique d'un barrage en enrochements. L'objectif visé est la représentation et l'analyse de déformation d'un barrage par les éléments finis 3D sous l'effet du poids propre et de la charge hydrostatique par un programme développé dénommé « FEM_DAM ». L'application a concerné le barrage en enrochements à noyau central argileux de Kerrada, Wilaya de Mostaganem. Les résultats de la simulation sont présentés et discutés.

Mots - clés : Barrage, Surveillance, MEF, Contrainte, Déformation, Déplacement.

Abstract - In our country, rockfill dams are the backbone of the water management infrastructure. Despite their advantageous characteristics in terms of strength and construction, these structures require a precise monitoring device to ensure their safety and ensure their durability. Any form of surveillance must be accompanied by dedicated instrumentation and adequate modelling. The behaviour of rockfill dams modelling is a complex process in which the behaviour of building materials, the interaction between the dam and the subgrade and / or the bedrock, the influence of the hydraulic load on the dam and on the foundation and, the effects of saturation by the water. In our work, the three-dimensional (3D) finite element method has been used to modelling a linear elastic behaviour of a rockfill dam. The assigned objective is the representation and the analysis of dam deformation by the 3D finite elements under the effect of its weight and the hydrostatic load, by a developed program called "FEM_DAM". The application concerned the rockfill dam with central clay core of Kerrada, Wilaya of Mostaganem. The results of the simulation are presented and discussed.

Keywords: Dam, Monitoring, FEM, Constraint, Deformation, Displacement.

1-Introduction

Les barrages en enrochement sont probablement les ouvrages de l'ingénierie hydraulique dont on trouve les traces les plus anciennes, remontant aux premières civilisations égyptiennes. Les techniques de construction, très rudimentaires, se sont

affinées dans le temps en prenant un développement considérable à partir du 20^{ème} siècle. Les progrès et les ouvrages se sont multipliés notamment à partir des années 1960 où de très grands barrages en enrochement ont été construits : les plus grands ouvrages atteignent aujourd'hui plus de 200 m de hauteur. Ce type de barrages fait partie de la

classe des barrages en remblais, les plus répandus dans le monde. Ils représentent environ 70% des grands barrages [16] : leur grande proportion s'explique par leur simplicité de construction, leur bonne adaptabilité à un grand nombre de sites et leur faible coût de construction. Parmi les barrages en remblais, on compte seulement 12% de barrages en enrochement car leur construction nécessite une qualité de matériau qui n'est pas nécessairement présente sur tous les sites.

Les zones potentielles d'apparition des déformations doivent être protégées par des mesures adéquates lors de la conception. La prévention des tassements s'avère en effet capitale pour assurer l'étanchéité et la stabilité des barrages [9, 11, 14]. L'évaluation des déformations constitue également un enjeu important pour la réhabilitation ou la confortation de ces ouvrages [6, 10]. Aussi, ils sont soumis 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, en particulier celles relatives au masque amont. L'analyse des déformations des barrages en enrochements comprend une analyse géométrique et interprétation physique. L'analyse géométrique décrit le changement de forme et les dimensions du barrage surveillé. L'interprétation physique a pour objet d'établir la relation entre les charges et les déformations [2, 4].

L'objectif assigné à cet article vise à établir une analyse de déformation de barrage basée sur le concept de la méthode des éléments finis (MEF) élastiques 3D [1, 8, 13, 15, 17]. Le cas du barrage en enrochements de Kerrada (Mostaganem) a fait l'objet du volet application. Cette analyse a été réalisée à l'aide d'un programme, établi dans ce contexte, dénommé FEM_DAM (Finite Element Method for Dam deformation Modelling) [3]. Les résultats du traitement et d'analyse sont présentés et discutés.

2 - Méthode des éléments finis (MEF)

Généralement, la démarche de la méthode des éléments finis s'appuie sur les étapes suivantes [5, 7]:

- 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 $[K] \cdot \{U\} = \{F\}$ avec K : Force de rigidité, U : vecteur de déplacements, F : Charges.

Dans ce contexte, un programme dénommé FEM_DAM, a été réalisé sous MATLAB et dont l'organigramme est illustré par la figure (1).

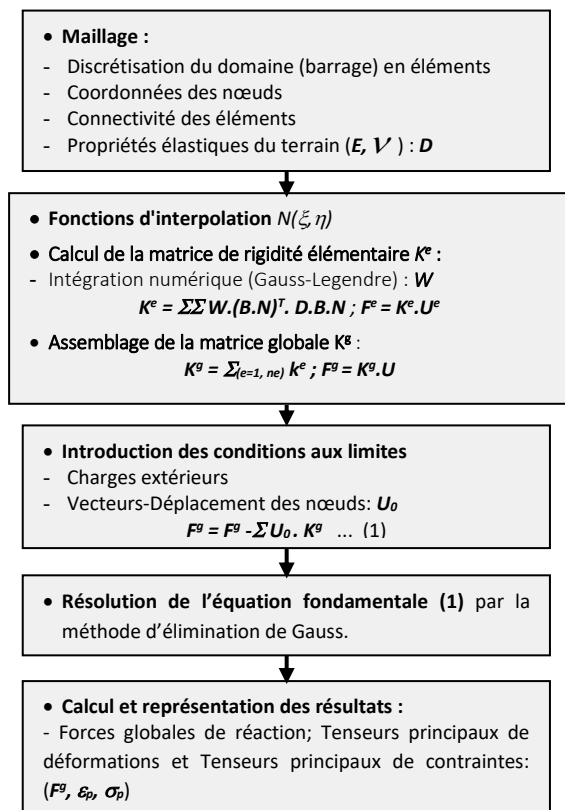


Figure 1: Organigramme général de la méthode des éléments finis.

Figure 1: Flowchart of finite elements method.

Avec :

E , ν , D : module de Young, coefficient de Poisson et matrice d'élasticité, respectivement.

Les exposants (e, g) sont pour les termes élémentaire et globale, respectivement.

3-Résultats et discussion

3.1 - Site du barrage

Le barrage de Kerrada est implanté sur l'Oued Kerrada, affluent de la rive droite de l'Oued Cheliff, à environ 8.2 km du barrage de dérivation du Cheliff, dans la Daïra de Sidi Ali, Wilaya de Mostaganem, figure (2). Le circuit hydraulique prend son origine du barrage prise sur l'Oued Cheliff, pour aboutir à la retenue de Kerrada. D'une longueur de 764m entre les deux rives, une largeur de 375m au niveau des fondations et une hauteur de 112 m, ce barrage fait partie du méga projet d'alimentation en eau potable MAO (Mostaganem-Arzew-Oran).



Figure 2 : Barrage de Kerrada à Mostaganem.

Figure2 : Kerrada's dam in Mostaganem.

C'est un barrage de stockage en enrochements à noyau central argileux qui est exposé à plusieurs charges qui sont :

a. Charges statiques : ce sont des charges qui ne changent pas ou changent lentement. La réponse d'un barrage aux charges statiques est caractérisée par son élasticité. Généralement, c'est la charge permanente ou la pression hydrostatique et le poids propre du barrage. La pression hydrostatique P en un point sur la paroi du barrage dépend proportionnellement

de la hauteur d'eau au-dessus de ce point, on peut déduire sa formule : $P = \rho \cdot g \cdot h$, avec :

ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3)

g : accélération de la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h : hauteur d'eau au-dessus du point considéré (en mètres).

b. Charges dynamiques : ce sont les charges transitoires par nature. Leur durée d'application est typiquement de l'ordre de quelques secondes à cause de la vitesse avec laquelle elles agissent. Dans ce cas, les caractéristiques d'inertie et d'amortissement influent sur le comportement du barrage. Ce type de chargement n'a pas été pris en considération dans le programme FEM_DAM.

Conditions aux limites : elles définissent les charges qui agissent sur la structure (forces..), ou décrivent la manière dont la structure est prise en charge (déplacement, conditions aux limites). Les deux types de conditions aux limites impliquent souvent des simplifications de la situation structurelle réelle, soit de réduire la taille du modèle en remplaçant la structure avec des conditions aux limites ou parce que l'état réel de la charge et de soutien est connu imparfaitement. Un ensemble cohérent de conditions aux limites est nécessaire pour une solution mathématique unique des équations d'éléments finis. Les conditions initiales sont représentées, dans notre cas d'étude, par des vecteurs déplacements simulés des points cibles (auscultation topographique) sur la partie aval du barrage, figure (3).

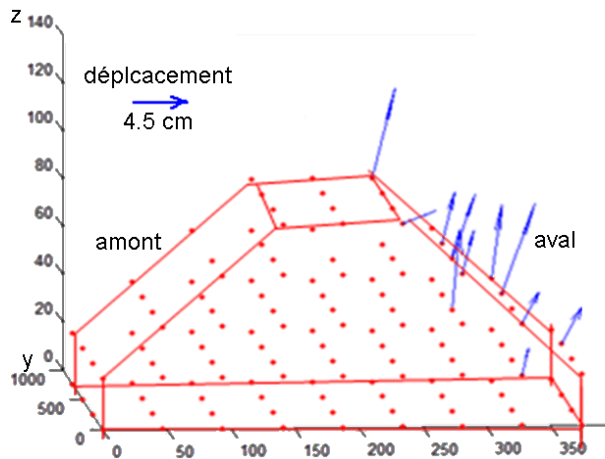


Figure 3: Vecteurs des déplacements simulés (conditions aux limites).

Figure 3: Simulated displacement vectors (boundary conditions).

3 -2. Application

L'analyse statique du barrage Kerrada a été conduite en effectuant l'étude en supposant que l'ouvrage est soumis à son poids propre et à la pression hydrostatique. Ceci pour montrer l'influence du remplissage et du comportement statique sur la stabilité du barrage. L'étude a été réalisée sur l'ouvrage de Kerrada. Les analyses réalisées prennent en considération les effets induits par le remplissage du réservoir à (03) trois différents niveaux de la retenue ($h=0.5\text{m}$, $h=39.1\text{m}$, $h=78.21$ (NNR = Niveau Normal de la Retenue)). Le monolithe du barrage est modélisé en 3D (sans considération du noyau central), le comportement des enrochements est supposé **élastique linéaire** et ses caractéristiques mécaniques sont résumés dans le tableau 1.

En plus, les remarques suivantes s'appuient sur des considérations spéciales dans l'application de l'analyse du barrage de Kerrada :

- Les enrochements du barrage sont typiquement 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 isotropes. En réalité, le barrage est divisé par des joints de contraction et des ouvertures préexistantes ;

- La roche est modélisée comme un corps monolithique avec un matériau élastique, linéaire et isotrope, alors qu'en réalité elle possède des caractéristiques non linéaires.

Tableau 1: Caractéristiques des enrochements constituant le barrage.

Table 1: Characteristics of the rockfills of the dam.

Masse Volumique (ρ)	1497.8 kg/m ³
Coefficient de Poisson (ν)	0,26
Module d'Elasticité (E)	59.62*10 ³ KN/m ²

Nous avons opté pour un maillage hexaédrique (élément à **8 nœuds**), car il est facile à générer sous MATLAB et nécessite peu d'éléments et de nœuds par rapport à un maillage tétraédrique, ce qui mène à une optimisation du temps de calcul [7,12]. Les déformations induites par la mise en eau de la retenue sont un des problèmes majeurs rencontrés dans la maintenance des barrages en enrochements. Il convient, en effet, d'en contrôler l'ampleur afin de prévenir tout risque. La modélisation numérique permet de simuler et d'analyser aisément le comportement d'un barrage au cours du remplissage de la retenue, suivant trois (03) niveaux de retenue (Bas, Moyen et Normal). Le suivi des déformations dans le barrage se fait de deux manières : (i) suivi des déformations des différents agrégats, (ii) suivi des déplacements totaux. Il est à mentionné que les résultats obtenus ne reflètent pas nécessairement la réalité, ils sont le produit de simulations par le programme FEM_DAM.

Paramètres considérés dans le calcul :

- **Niveaux de la retenue :** Niveau Bas ($h=0.5\text{m}$) ; Niveau Moyen ($h=39.1\text{m}$) ; NNR ($h=78.21\text{m}$) ;
- **Charges :** Niveau Bas ($F=7.3*10^3\text{ Pa}$) ; Niveau Moyen ($F=570*10^3\text{ Pa}$) ; NNR ($F=1140*10^3\text{ Pa}$) ;
- **Conditions aux limites :** Déplacements 3D simulés d'un réseau de points cibles, partie aval ;
- **Maillage de la structure du barrage :** 60 éléments hexaédriques avec 132 nœuds.

3 -3. Résultats

Le tableau 2 récapitule les résultats de simulation obtenus, par FEM_DAM, selon les

différentes hauteurs du niveau d'eau du barrage de Kerrada.

Tableau 2: Statistiques des résultats de simulation de FEM_DAM

Table 2: Statistics of the simulation results of FEM_DAM

		Vecteurs déplacements		Cisaillements totaux		Dilatations moyennes	
		2D (m)	1D (m)				
				Amont	Aval	Amont	Aval
Valeurs minimales	h=0.5 m	0.001	-0.0001	$9.28 \cdot 10^{-7}$	$1.05 \cdot 10^{-5}$	$-9.8 \cdot 10^{-6}$	$-7.15 \cdot 10^{-6}$
	h=39.1m	0.078	-0.006	$7.26 \cdot 10^{-5}$	$7.99 \cdot 10^{-5}$	$-7.67 \cdot 10^{-4}$	$-7.60 \cdot 10^{-4}$
	h=78.21m	0.256	-0.059	$1.45 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	$-7.65 \cdot 10^{-3}$	$-7.00 \cdot 10^{-4}$
Valeurs Moyennes	h=0.5 m	0.045	-0.050	$6.8 \cdot 10^{-5}$	$5.56 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-4}$
	h=39.1m	0.589	-0.423	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$8.80 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$
	h=78.21m	1.273	-0.850	$1.06 \cdot 10^{-2}$	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$-2.55 \cdot 10^{-3}$	$2.02 \cdot 10^{-2}$
Valeurs maximales	h=0.5 m	0.089	-0.099	$1.35 \cdot 10^{-4}$	$1.10 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-5}$	$2.70 \cdot 10^{-4}$
	h=39.1m	1.100	-0.840	$1.01 \cdot 10^{-3}$	$1.75 \cdot 10^{-2}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$1.03 \cdot 10^{-2}$
	h=78.21m	2.920	-1.650	$2.11 \cdot 10^{-2}$	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$2.56 \cdot 10^{-3}$	$2.09 \cdot 10^{-2}$
Avec noyau argileux (h=78.21m)	Min	0.579	-2.831	$-2.7 \cdot 10^{-2}$	$-1.4 \cdot 10^{-3}$	$2.10 \cdot 10^{-4}$	$3.70 \cdot 10^{-4}$
	Moyenne	0.852	-0.537	$-2.8 \cdot 10^{-3}$	$5.60 \cdot 10^{-3}$	$6.70 \cdot 10^{-3}$	$6.90 \cdot 10^{-3}$
	Max	3.593	-0.234	$5.50 \cdot 10^{-3}$	$6.10 \cdot 10^{-2}$	$3.10 \cdot 10^{-2}$	$6.40 \cdot 10^{-2}$

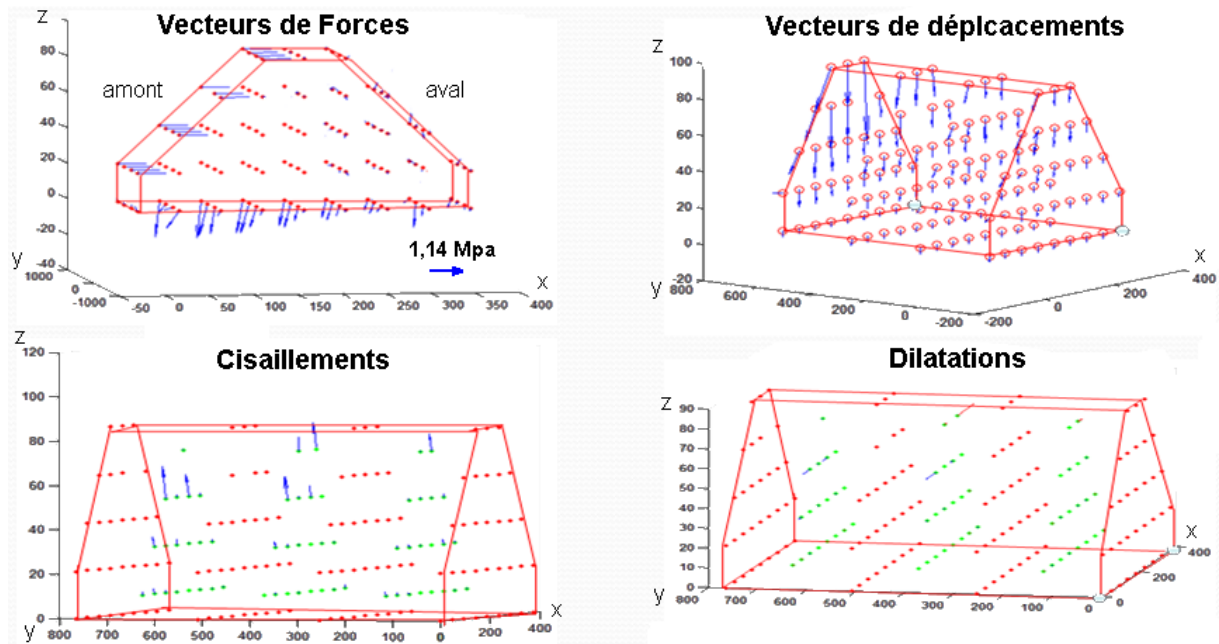


Figure 4: Résultats des déformations du barrage par simulation de FEM_DAM, au niveau NNR

Figure 4: Results of dam deformations by simulation of FEM_DAM, at normal water level.

On constate que pour le niveau d'eau minimum, les vecteurs des déplacements sont de l'ordre de quelques centimètres dus à la

faible force hydrostatique appliquée. Très faibles valeurs pour les déformations, le corps du barrage est pratiquement peu déformable.

Cependant, à un niveau moyen de retenue, l'effet de charge hydrostatique s'ajoute au poids propre du barrage, ce qui engendre des forces significatives sur la fondation (Amont). La figure 4 montre un exemple des résultats graphiques par FEM-DAM, pour le niveau normal de la retenue (NNR). On remarque que les vecteurs de déplacements verticaux sont importants dans la partie supérieure du barrage et que ce dernier a subi des cisaillements et des dilatations significatives sous l'effet de la poussée d'eau.

D'après le tableau 1, et en termes de déplacements, le barrage a subi un tassement important pour une retenue d'eau maximale (NNR) avec un déplacement planimétrique significatif, de l'ordre de 0.8m et 1.3m, respectivement. Pour un niveau de retenue bas, le barrage est sous l'effet de son propre poids seulement. Les déplacements engendrés n'exèdent pas 5 cm en planimétrie et en altimétrie, respectivement. En termes de déformations, il est clair que l'augmentation de l'effet de la charge hydrostatique influe considérablement sur le corps du barrage. On constate aussi que les cisaillements totaux et les dilatations moyennes sont plus importants dans la partie amont que dans la partie aval. Selon les trois cas d'étude (différents niveaux d'eau), le barrage de Kerrada a montré une déformation significative au niveau de sa partie supérieure 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 du barrage.

D'autres tests ont été effectués en considérant le noyau central argileux, dans le programme FEM_DAM. Les résultats de la simulation ont montré des déplacements et déformations significatifs sur le barrage. Par comparaison entre les résultats (avec et sans considération du noyau central argileux, pour $h=78.21\text{m}$: NNR), en moyenne, les déplacements et les déformations sont moins importants si on considère le noyau argileux dans la modélisation. Cela peut être expliqué par le fait que le noyau argileux absorbe et amortit à un certain niveau l'intensité des forces appliquées sur le barrage.

Il est possible d'intervenir sur un barrage en cas de déplacement jugé important (comportement anormal), en connaissant d'abord la cause (étanchéité, pression d'eau, ou bien infiltration dans le cas d'un barrage en

enrochement). On peut citer quelques solutions :

- Limiter le niveau d'eau en amont du barrage à une hauteur compatible avec les activités humaines nécessaires. Pour cela, il est possible d'installer un système de siphon en tuyaux PVC à travers le barrage ou utiliser les évacuateurs des crues ;
- Installer en aval sur le cours d'eau un système anti-remontée ;
- Doter la digue du barrage d'un système de drainage interne adéquat en cas d'infiltration et améliorer l'étanchéité du remblai ;
- Garantir la stabilité du remblai de la digue en mettant en place un dispositif évitant toute résurgence sur le talus aval et tout risque à long terme d'érosion interne. Pour cela, il faut mettre en place un masque amont en argile comme première ligne de défense et un filtre sur le talus aval recouvert par un masque aval en matériaux latéritiques comme deuxième ligne de défense ;
- Etancher la fondation du barrage et empêcher le développement d'érosion interne dans la fondation en mettant en place un rideau d'étanchéité. Le rideau est réalisé au pied amont du barrage et connecté au masque amont, la ligne de drainage est réalisée au pied aval.

4- Conclusion

Le programme développé FEM_DAM qui est basé sur la méthode des éléments finis 3D, nous a permis d'évaluer et de représenter le comportement tridimensionnel élastique du barrage en enrochements de Kerrada (Mostaganem), en termes de déplacements, de tenseurs de contraintes et de déformations (dilatations et cisaillements). Le maillage utilisé est un maillage cubique (hexaédrique) à 08 nœuds. Les simulations du comportement de ce barrage ont été basées sur l'application des charges hydrostatiques selon 03 niveaux de retenue (bas, moyen et NNR), la considération des vecteurs de déplacements simulés de quelques nœuds dans la partie aval du barrage (conditions aux limites), les propriétés physiques des matériaux (Grès: recharge) et aussi la considération ou non du noyau central argileux. Les résultats des simulations ont montré qu'en termes de déplacements, le barrage a subi un tassement important pour une retenue d'eau (NNR) avec

un déplacement planimétrique significatif. Pour un niveau de retenue bas, le barrage est sous l'effet de son propre poids seulement. En termes de déformations, il est clair que l'augmentation de l'effet de la charge hydrostatique influe considérablement sur le corps du barrage. On a constaté aussi que les cisaillements totaux et les dilatations moyennes sont plus importants dans la partie amont que dans la partie aval. La charge hydrostatique joue un rôle important sur l'évolution des déformations et des déplacements du barrage.

5- Références bibliographiques

- [1] Addaci, O., 2012. *Analyse numérique par la méthode des éléments finis d'un pieu isolé sollicité par une charge latérale*. Mémoire de Magistère, Université de Batna, Algérie.
- [2] Baghzim, H., 2015. *Etude numérique de la conception des barrages en terre*. Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie.
- [3] Boughari, Y., 2016. *Modélisation par la méthode des éléments finis de la déformation d'un barrage*. Mémoire d'ingénieur, Juin 2016, Centre des techniques Spatiales, Arzew – Algérie.
- [4] Degoutte, G., 1993. *Auscultation des barrages*. Session de formation continue ENGREF «Sécurité des barrages en service», Montpellier, mai 1993, Édition ENGREF-Cemagref, pp. 119-135, France.
- [5] Dhatt, G., Touzot, G., 1981. *Une présentation de la méthode des éléments finis*. Meloine S, A. Editeur Pan. et les Presses de l'Université Laval Québec, publié en France dans la Collection « Université de Compiègne ».
- [6] Gökalp, E., & Taşçı, L., 2009. *Deformation monitoring by GPS at embankment dams and deformation analysis*. Survey Review, 41, 311 pp.86-102.
- [7] Kattan Peter, 2006. *MATLAB guide to Finite Elements - An Interactive Approach*. ISBN: 9783540706984.
- [8] KTH, 2011. *Introduction to a finite element analysis program: ANSYS*. Department of Solid Mechanics, USA.
- [9] Larbi, M., & Mezoudji, F., 2014. *Analyse des déformations des barrages en enrochements*. Mémoire de Mastère : Université de Tlemcen, Algérie.
- [10] Massiéra, M., & al., 2008. *Monitoring and Deformation Aspects of Large Concrete Face Dams*. Proceedings, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 13th FIG Symposium on Deformation Measurements, Lisbon, Portugal, 12-15 May.
- [11] Massiéra, M., & al., 2006. *Comportement des barrages en enrochement avec masque en béton de ciment fondés des alluvions granulaires*. Congrès général annuel de la société canadienne de génie civil. , 23-26 Mai, Calgary, Alberta, Canada.
- [12] Moreau, N., 2014. *Génération de maillages volumiques et adaptables pour la simulation physique*. Rapport de stage. Université Claude Bernard Lyon 1, France.
- [13] Oudin, H.2011. *Méthode des Eléments Finis «MEF »*.Cours, École d'ingénieur. Nantes, France.
- [14] Szostak-chrzanowski, A., et al., 2006. *Kinematic Analysis of Behavior of Large Earth Dams*. TS 68 – Deformation Measurements of Dams. Munich, Germany.
- [15] Szostak-Chrzanowski, A., et al., 2008. *Study of a long-term behavior of large earth dam combining monitoring and finite element analysis results*. 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, Portugal.
- [16] Thinley, U., 2001. *Establishment of kurichhu hydropower dam deformation monitoring basis using global positioning system*. University of applied sciences of southern Switzerland (SUPSI), CH-6928 Manno, Switzerland.
- [17] Varghese, B., 2014. *Finite element analysis of arch dam*. International Journal of Research in Engineering and Technology, IJRET, India.