
La modélisation et l'auscultation, des outils pour l'analyse du comportement des barrages

Nadia Smail* — Abdelmalek Bekkouche* — Bouchrit Rouissat**

* Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaïd, 13000 Tlemcen, Algérie, n_rouissat@mail.univ-tlemcen.dz, a_bekkouche@mail.univ-tlemcen.dz

** Département d'hydraulique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaïd, 13000 Tlemcen, Algérie, b_rouissat@mail.univ-tlemcen.dz

RÉSUMÉ. La surveillance des barrages vise essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet et une normalité de référence. Mis en exploitation en novembre 1988, après 11 ans de chantier et de multiples contraintes de réalisation, le barrage Izdihar, situé au nord ouest de l'Algérie, en terre à noyau central, a connu un comportement anormal lors de sa mise en eau. Le présent travail est axé sur l'un des phénomènes liés à ce comportement et concernant le développement des pressions interstitielles et de la piézométrie au niveau du noyau central du barrage. La modélisation des paramètres liés à l'écoulement, par le logiciel ANSYS, l'interprétation des mesures d'auscultation et leur confrontations mutuelles ont constitué une base pour expliquer un certain nombre de phénomènes liés à des comportements anormaux, et de proposer des solutions de réhabilitation et de confortement qui s'imposent.

ABSTRACT. The checking of dams aims mainly to compare the behaviour of the works to the predictions of the project. Put to exploitation in November 1988, after eleven years of works and a number of constraints of realization, the dam Izdihar, which is located in the north west of Algeria, and built with a central core of earth, has know an abnormal behaviour at the time of its filing. The present work is mainly axed on the analysis of the dam behaviour. The analysis is based essentially, on the treatment of the auscultation values available in order to judge the general behaviour of the dam. The engaged analysis of auscultation and modelization have allowed to show and to explain a number of phenomena linked to the abnormal behaviours, and to give solutions to the restoring and reinforcement.

MOTS-CLÉS: Barrage, noyau central, auscultation, pressions, Ansys.

KEY WORDS: Dam, central core, auscultation, pressures, Ansys

1. Introduction

La surveillance des barrages vise 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. Pour comprendre le comportement à long terme d'un barrage, il est essentiel d'interpréter soigneusement les données d'auscultation mesurées. Le contrôle de la sécurité d'un barrage exige que les données mesurées soient interprétées dans le temps le plus court possible après les lectures. Afin de garantir la sécurité d'un ouvrage d'accumulation pendant toute la durée de son exploitation, il faut contrôler tant son état que son comportement.

Mis en exploitation en novembre 1988, le barrage izdihar a connu un certain nombre de contraintes liées à son comportement général. En effet, lors de sa mise en eau, des sources sont apparues à l'aval du barrage. L'analyse du système relatif aux mesures d'auscultation et leurs interprétations ainsi que la modélisation du comportement du barrage ont conduit à la compréhension des phénomènes se manifestant, notamment au niveau du noyau central ainsi que la proposition de solutions de confortement.

2. Situation et données sur le barrage

Le barrage EL- Izdihar à SidiI Abdelli est situé au Nord-Ouest de l'Algérie, sur l'oued Isser. C'est un barrage en terre à noyau central d'une hauteur de 60 m. Les principales caractéristiques de l'aménagement arrêtées lors du projet d'exécution se résument ainsi:

- Hauteur maximale au-dessus du lit de l'oued : 60m.
- Longueur en crête: 665m
- Largeur en crête: 13m
- Côte de la crête: 353.5m
- Côte de la retenue normale: 345m
- Côte des plus hautes eaux: 351.3m
- Base de la digue: 340m

Les fondations sont constituées par des alternances de marnes et de grès. Les grès sont plus ou moins cimentés, les bancs les plus compacts présentent des discontinuités bien développées formant des blocs parallélépipèdes. Un voile profond d'environ 70m en partie centrale a été exécuté depuis la galerie d'injection située dans l'axe du barrage.

3. Système d'auscultation du barrage

Au niveau du barrage El Izdihar, le système d'auscultation est composé de trois profils d'auscultation 06, 13 et 18 pour la mesure des pressions et cinq profils piézométriques 05, 09, 11, 15 et 20 pour la mesure des niveaux d'eau.

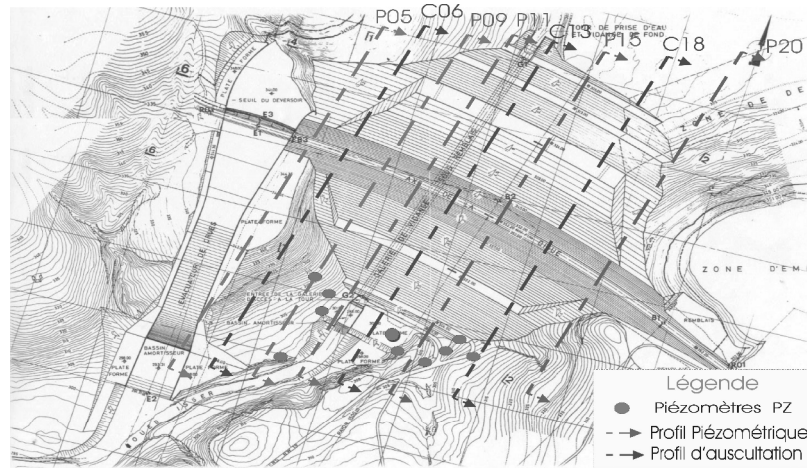


Figure 1. Localisation des profils d'auscultation du barrage

3.1. Pressions interstitielles

30 cellules électriques sont installées dans la fondation et en partie basse du noyau : 09 cellules dans le profil 06, 15 cellules dans le profil 13 et 06 cellules dans le profil 18.

On dispose également de 33 cellules pneumatiques installées dans le noyau : 11 cellules dans le profil P6, 11 cellules dans le profil P13 et 11 cellules dans le profil P18.

3.2. Piézométrie

38 piézomètres ouverts de type CASAGRANDE sont installés dans le barrage et les fondations : 07 dans le profil 05, 08 dans le profil 09, 08 dans le profil 11, 08 dans le profil 15 et 07 dans le profil 20. Dix piézomètres ouverts sont installés sur les versants avals du barrage pour le contrôle des niveaux de la nappe.

4. Comportement hydraulique du barrage

L'analyse du comportement hydraulique du barrage a été guidée par l'analyse des pressions interstitielles mesurées notamment au niveau du noyau central ainsi que l'analyse de la piézométrie avant et après confortement du voile d'injection.

4.1. Piézométrie

Il est à noter, tout d'abord, que le voile d'injection du barrage a subi de multiples interventions pour son confortement. Alors que l'écartement entre forage était de 4m durant le projet initial, il est passé à 2 m lors de la phase de renforcement pour atteindre 1 m en finalité notamment en rive droite.

En rive droite, les niveaux piézométriques au niveau de la recharge aval P9-5 et P9-7 sont supérieurs à ceux des piézomètres localisés à l'aval du barrage, par contre en rive gauche, et en considérant le profil P15, les niveaux des piézomètres en aval du barrage dépassent d'environ 08 m ceux situés au niveau de la recharge aval P15-7 et P15-5.

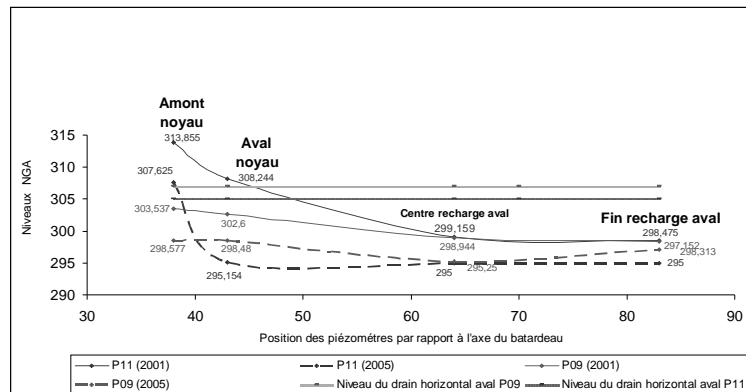


Figure 2. Variations des lignes piézométriques dans les fondations du barrage avant et après confortement du voile injection

4.2. Pressions interstitielles

Nous disposons de la série de mesure allant de 1993 à 2006 avec des lacunes pour certaines capsules de pressions interstitielles. L'analyse des données a été guidée en considérant :

- La variation des pressions interstitielles, en bars, en fonction des niveaux du plan d'eau ;

- La variation des niveaux piézométriques des capsules des pressions interstitielles en fonction du plan d'eau ;
- La variation des coefficients de pressions interstitielles et ce vue l'absence des mesures de pressions totales.

Au niveau des fondations : les niveaux piézométriques donnés par les capsules qui se trouvent à l'amont du voile d'injection sont en moyenne d'environ 304 NGA, les niveaux piézométriques donnés par les capsules qui se localisent à l'aval du voile d'injection sont d'environ 305 NGA. Il n'y a donc pas de gradient entre les cellules positionnées à l'amont du voile et celles situées à l'aval. Les niveaux piézométriques des capsules diminuent avec la profondeur.

Pour le corps du barrage : les niveaux piézométriques données par les capsules qui se localisent dans le noyau niveau 310 NGA sont très stables et sont supérieurs à la cote de la retenue. Les coefficients des pressions interstitielles restent inférieurs à l'unité (0,6). Afin d'avoir une schématisation explicite de la variation des champs des pressions interstitielles, il a été représenté, pour les profils 06 et 13, les domaines de variation concentrés des pressions interstitielles. Cette représentation a été guidée par le logiciel MAPINFO avec une analyse thématique de 05 champs. Il est à souligner, que le manque de certaines mesures sur les capsules du profil 18, n'a pas permis d'engager l'analyse thématique afin que cette dernière ne puisse être erronée par difficultés d'interpolation.

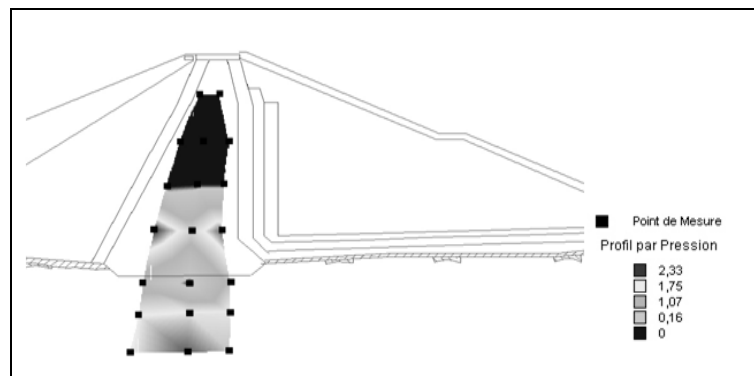


Figure 3. Variations des champs de pression interstitielle, profil 06

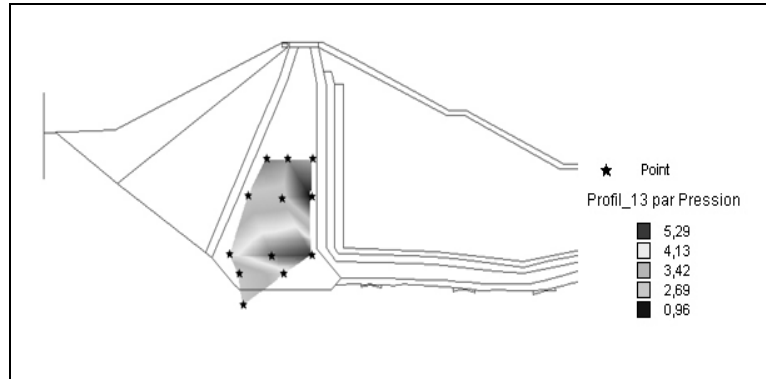


Figure 4. Variations des champs de pression interstitielle, profil 13

Il est à noter, que pour le profil 06, les mesures des capsules hautes ne sont pas disponibles. La plage de pressions nulles signifie l'absence de mesures et non la valeur de la pression. Pour le profil 06, les concentrations de champs maximaux sont enregistrées sur les parements bas du noyau ainsi qu'en fondations, après le voile d'injection. Pour le profil central 13, les valeurs sont beaucoup plus élevées et se localisent sur le parement bas du noyau, au voisinage du drainage horizontal aval.

5. Analyse du comportement du barrage par rapport à la référence du projet

L'analyse des diverses réponses d'un barrage par une modélisation numérique permet de comparer les résultats d'auscultation avec les prévisions des calculs théoriques. L'auscultation est l'interprétation du comportement observé de l'ouvrage par rapport à une référence. On cherche en effet à positionner les nouvelles mesures recueillies par les instruments par rapport à une « plage de normalité ». Cette plage de normalité s'articule autour d'une modélisation numérique dont les résultats aboutiront à définir la référence liée au comportement de l'ouvrage. Ce calage par rapport à une référence a été opéré par l'application du logiciel Ansys en mode thermique pour le comportement hydraulique. Le mode d'analyse utilisé par le logiciel Ansys est celui de l'analyse des écoulements dans le corps du barrage par analogie thermique. En effet, et comme cité précédemment, le flux thermique se propage à travers un massif poreux avec des pertes de chaleur. La charge générée en modèle physique est assimilée à la température, le flux thermique au débit d'infiltration. Le flux est schématisé d'une manière similaire aux lignes de courant dans le modèle physique, les équipotentielles de même charge sont assimilées aux frontières isothermes. Dans l'objectif de rendre explicite l'interprétation des résultats de la modélisation, trois cas d'études, en fonction des variations des niveaux du plan d'eau, ont été engagés en l'occurrence :

- Niveau minimum du plan d'eau enregistré 313.608 NGA
- Niveau moyen du plan d'eau en fonction de la densité de la série 322.03 NGA
- Niveau maximum du plan d'eau enregistré 326.98 NGA

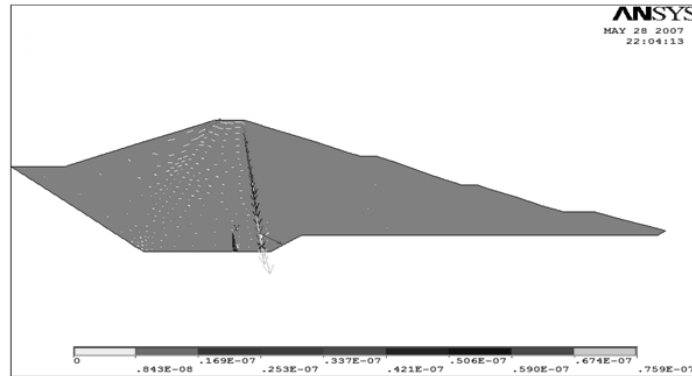


Figure 5. Flux thermique, Niveau plan d'eau 326.98 NGA

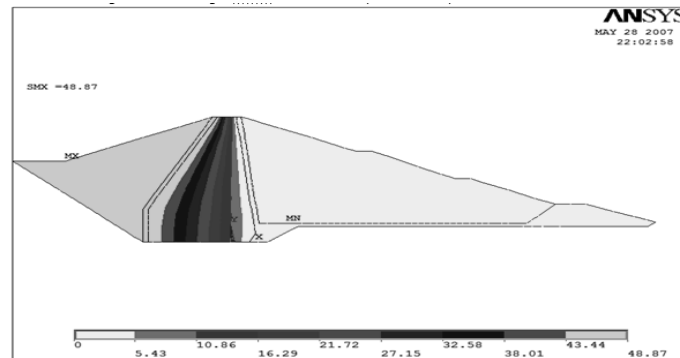


Figure 6. Isothermes, Niveau plan d'eau 326.98 NGA

5.1. Solutions de la modélisation

La comparaison des résultats de la modélisation avec les mesures d'auscultation s'articule autour des points suivants :

- Pressions interstitielles

Le profil d'auscultation arrêté pour la comparaison mesures - modélisation est le profil P13. Le tableau 1 illustre la confrontation des mesures d'auscultation avec ceux relatifs à la modélisation par le logiciel Ansys pour les trois niveaux d'eau. La

position des capsules de pressions interstitielles servant de comparaison est décrite ainsi :

C80 : Parement aval, noyau central, niveau 301.00 NGA

C82 : Parement amont, noyau central, niveau 301.00 NGA

P37 : Parement amont, noyau central, niveau 310.00 NGA

P38 : Centre, noyau central, niveau 310.00 NGA

P34 : Parement aval, noyau central, niveau 310.00 NGA

Plan d'eau 326.98 (H=44.48 m)	C80 (m)	C82(m)	P37(m)	P38(m)	P34(m)
Modélisation	307.216	341.291	346.351	338.271	318.0018
Auscultation	313.29	331.31	332.60	337.10	337.50

Tableau 1. Comparaison des résultats de modélisation avec ceux d'auscultation, pressions interstitielles, Niveau du plan d'eau 326.98 NGA

- Piézométrie

Le profil d'auscultation arrêté pour la comparaison mesures - modélisation est le profil P11 central. Le tableau 2 illustre la confrontation des mesures d'auscultation avec ceux relatifs à la modélisation par le logiciel Ansys pour les trois niveaux d'eau. La position des piézomètres servant de comparaison est décrite ainsi :

P11-1 : Parement amont, noyau central

P11-3 : Parement aval, noyau central

Plan d'eau 331.37 (H=48.87 m)	P11-1(m)	P11-3(m)
Modélisation	338.50	315.29
Auscultation	333.315	315.98

Tableau 2. Comparaison des résultats de modélisation avec ceux d'auscultation, piézométrie, Niveau du plan d'eau 331.37 NGA

Les valeurs des pressions interstitielles mesurées sont en adéquation avec celles calculées à l'exception du parement aval du noyau où nous enregistrons des écarts importants. Cette manifestation a été d'ailleurs confirmée par l'analyse thématique engagée, qui a témoigné d'une concentration élevée des valeurs de pressions interstitielles dans cette zone. Pour la piézométrie, les comparaisons faites convergent vers une compatibilité entre les niveaux mesurés et ceux calculés.

Les mêmes conclusions sont valables pour la modélisation avec les autres niveaux d'eau de retenue.

5. Conclusion

A travers l'analyse du comportement engagée ci-dessus, les conclusions suivantes sont à citer :

Les évolutions des piézomètres montrent l'amélioration du voile d'étanchéité, avec une baisse considérable des niveaux piézométriques de fondation aval pour une période où le plan d'eau a connu un rehaussement. Cette baisse est accompagnée d'un tarissement des sources à l'aval. Certains piézomètres, notamment ceux localisés au niveau du noyau, enregistrent des niveaux supérieurs aux niveaux du plan d'eau. Les niveaux piézométriques au niveau de la recharge du barrage, avant le confortement du voile, enregistrent des niveaux supérieurs à ceux du drainage horizontal aval avec un écart dépassant les 4m. Après confortement, un rabattement considérable est enregistré. Un rabattement de 6m est enregistré sur le profil central P11 à l'amont du noyau, un rabattement d'environ 13 m est enregistré à l'aval du noyau, et pour le profil 09, les rabattements sont d'environ 5m,

En rive droite, les niveaux piézométriques à l'aval du barrage sont inférieurs à ceux installés au niveau de la recharge du barrage et coïncident avec les niveaux du lit d'oued. En rive gauche, les niveaux piézométriques à l'aval du barrage sont supérieurs à ceux installés au niveau de la recharge du barrage et à ceux du lit d'oued.

L'analyse des pressions interstitielles montre des niveaux stables et supérieurs à la côte du plan d'eau. Ceci caractérise un noyau central en phase de consolidation.

A défaut de disposer des valeurs de pressions totales, les coefficients des pressions interstitielles des cellules restent inférieurs à l'unité. La concentration des valeurs élevées des pressions interstitielles est remarquée en fondation, à l'aval du voile d'injection et sur les parements bas du noyau. Cette situation, combinée avec celle des niveaux piézométriques dans la recharge aval et à l'aval du barrage, témoigne d'une situation anormale vis à vis des écoulements dans le corps du barrage ainsi que ces fondations.

Pour limiter le gradient hydraulique, il est jugé nécessaire de réaliser un voile de drainage au pied aval du barrage et non pas sous le noyau de la digue comme réalisé.

L'évaluation du dispositif de drainage, tel que réalisé, est nécessaire et une étude doit être engagée en vue de définir la position exacte du voile de drainage à l'aval.

Cette proposition est consolidée par les niveaux d'eau dans la recharge inférieurs à ceux en aval du barrage ainsi que la stabilité des gradients hydraulique en fondations avant et après le voile d'injection actuel.

6. Bibliographie

- ANBT., « Rapport général sur les travaux de l'écran d'étanchéité du barrage Izdihar », 2002
- COBA., « Géologie du barrage Izdihar », 1981.
- COBA., « Auscultation du barrage Izdihar », 1986
- COBA., « Monographie du barrage Izdihar », 1998.
- Rouissat N., « Etude méthodologique pour le suivi de comportement des barrages en remblais », *Mémoire de Magister*, Université de Tlemcen, 2007.
- Rouissat N., « Importance des mesures d'auscultation pour l'analyse du comportement des barrages en terre », *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*, Nantes, 18-19 et 20 juin 2008.
- Rouissat N., « Comportement des barrages lors de la mise en eau », *Colloque international sur la caractérisation et modélisation des matériaux et structures*, Tizi Ouzou, 16-17 et 18 novembre 2008, Algérie.
- Rouissat N., « Analyse des systèmes d'injection des voiles et leur influence sur le comportement des barrages », *1^{er} symposium méditerranéen de géoengineering*, Alger, 20-21 juin 2009.