



Analyse du comportement de barrages en remblai pendant et après leur mise en eau

Michel Massiéra¹, Anna Szostak-Chrzanowski², Maciej Bazanowski²,
Cecilia Withaker³

1. *Faculté d'ingénierie (génie civil), Université de Moncton, Moncton, NB, E1A 3E9; Canada; massiem@umoncton.ca*
2. *Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New-Brunswick Fredericton, NB, Canada E3B 5A3, amc@unb.ca*
3. *Metropolitan Water District of Southern California (MWD), Glendora, CA, USA*

Résumé : La surveillance du comportement réel, non seulement, pendant la construction et pendant la mise en eau, mais tout au long de l'exploitation des barrages en remblai est nécessaire pour s'assurer du bon comportement de ces ouvrages. La surveillance à l'aide de l'instrumentation géotechnique et géodésique appropriée, permet d'avoir un système d'avertissement en cas d'un comportement anormal de ces barrages en remblai. Dans les zones tectoniquement actives, les mesures des déformations enregistrées avec la surveillance automatisée, en comparaison avec le comportement prévu des structures lors des analyses par la méthode des éléments finis, fournissent l'information sur les effets des perturbations sismiques. L'article analyse le comportement de deux grands barrages en remblai, le barrage « West Dam » en Californie et le barrage Tounustouc au Québec pendant le remplissage initial du réservoir en comparant les valeurs des déplacements mesurés et calculés en crête avec un modèle de prédiction déterministe des déformations qui utilise la méthode des éléments finis. Il présente aussi les résultats des mesures géodésiques automatisées qui ont été prises au barrage « West Dam » pendant le remplissage initial du réservoir et les quatre années subséquentes d'opération du réservoir.

Abstract : Safety of embankment dams depends on the proper design, construction, and monitoring of actual behaviour during the construction and the life of the structure. Monitoring of actual behavior during the construction and during the operation of the embankment dam structure is necessary to verify if the dam behaves as expected. The geotechnical and geodetic monitoring may provide a warning system in case of abnormal behaviour of the embankment dam. In the tectonically active zones, the results from automated monitoring surveys, when compared with the predicted behavior of the structures using Finite Element Method (FEM), additionally may give information on the effects of seismic disturbances. This paper analyzes the behavior of two embankment dams, the zoned earth West Dam in California and the Tounustouc CFRD in Quebec during the initial filling of the reservoir, by comparing the values of the observed and calculated displacements of the crest. The calculations were performed using the FEM. This paper also presents an analysis of long term deformations of the West Dam during four subsequent years of operation of the reservoir.

1. INTRODUCTION

La sécurité des barrages en remblai 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 des barrages. L'instrumentation géotechnique et géodésique permet d'avoir un système de surveillance et d'avertissement en cas d'un comportement anormal de ces barrages en remblai. L'accélération des déformations constitue le facteur le plus important pour évaluer le niveau de sécurité de n'importe quelle structure. Par conséquent, la conception d'un système de surveillance géotechnique et géodésique qui puisse détecter les accélérations des déformations aux emplacements critiques du barrage, est de première importance.

L'article analyse le comportement de deux grands barrages en remblai, le barrage du « West Dam » en réservoir « Diamond Valley Lake » (DVL) Californie et le barrage « Tounustouc » au Québec pendant le remplissage initial du réservoir en comparant les valeurs des déplacements

mesurés et calculés en crête avec un modèle de prédiction déterministe des déformations qui utilise la méthode des éléments finis. Il présente aussi les résultats des mesures géodésiques automatisées qui ont été prises au barrage « West Dam » pendant le remplissage initial du réservoir et les quatre années subséquentes d'opération du réservoir.

2. SÉCURITÉ DES BARRAGES EN REMBLAI

2.1 Causes de rupture des barrages zonés en remblai

La rupture d'un barrage en remblai peut être causé par l'érosion interne des sols fins constituant le noyau, par l'érosion des sols sous la fondation ou sous les appuis, par des problèmes de stabilité résultant de trop fortes pressions interstitielles, d'écoulements avec des gradients trop élevés ou critiques et par le débordement de l'eau au dessus de la crête du barrage ou de son évacuateur de crues. Ces conditions physiques qui peuvent mener à la rupture d'un barrage en remblai ont été présentées et priorisées selon

leur relative importance par Andersen et al. (2001). Une des causes moins commune de rupture est l'augmentation importante des pressions interstitielles pendant un tremblement de terre, ce qui peut provoquer une liquéfaction des sols de fondation ou même des sols composant le corps des barrages en remblai. La présence de failles tectoniques actives dans la région où est situé le barrage peut être une source de déformations trop importantes du barrage et de sa fondation et peut, par conséquent, provoquer une instabilité de la structure.

2.2 Déformations dans les barrages zonés en remblai

Pendant la construction d'un barrage en remblai, des déformations du corps du barrage se produisent. Ces déformations sont provoquées par l'augmentation des contraintes effectives lors de la construction par couches et aussi par des effets de fluage. Les déformations de la fondation, le transfert de contraintes entre les différentes zones du barrage et d'autres facteurs influencent les déformations. Après la fin de la construction d'un barrage, des mouvements appréciables de la crête et du corps du barrage peuvent se développer pendant le premier remplissage du réservoir. Pendant le remplissage du réservoir, les matériaux qui constituent l'épaulement, la transition et le filtre amont d'un barrage zoné en remblai sont submergés s'ils sont situés sous le niveau de l'eau du réservoir. La lente percolation de l'eau à travers le noyau sature progressivement les matériaux du noyau situé sous la ligne de saturation correspondant à l'écoulement permanent. Pendant ce processus de submergence et de saturation progressive, les valeurs des paramètres géotechniques des matériaux et, par conséquent, les valeurs des modules de Young (E) correspondants, décroissent. De plus, les matériaux situés à l'amont du noyau sont soumis aux forces de déjaugement. Le noyau est directement soumis à la poussée hydrostatique de l'eau du réservoir. Le remplissage du réservoir a donc pour effet de produire des déformations supplémentaires. Par après, le taux des déformations diminue généralement avec le temps, à l'exception des variations associées aux variations périodiques du niveau du réservoir (Dascal, 1987) et, dans les zones sismiques, aux tremblements de terre. L'intensité, le taux et la direction des mouvements, à un point spécifique du corps du barrage ou de sa crête, peuvent varier pendant les différentes phases de la construction et de l'opération du réservoir.

2.3 Contraintes dans les barrages zonés en remblai

Dans un barrage en remblai de type zoné, les variations de contraintes peuvent être provoquées par des tassements différentiels entre le noyau et les zones filtres amont et aval. Si le noyau est plus compressible que les zones filtres amont et aval, il se tasse sous son propre poids et, par l'effet de voûte, il s'appuie sur les zones filtres plus rigides, ce qui tend à réduire les contraintes verticales et par conséquent les contraintes latérales vers la base du noyau. Cette situation peut provoquer un claquage hydraulique et un risque d'érosion des particules fines du noyau.

2.4 Sécurité des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD)

En plus des déformations et des contraintes dans le remblai, il est impératif, dans les barrages CFRD, d'évaluer les déplacements du masque amont pendant le remplissage du réservoir. Il faut ensuite vérifier si les déplacements et les contraintes sont compatibles avec l'intégrité structurale du masque amont en béton de ciment, afin que les écoulements à travers les fissures et les joints du masque amont soient réduits au minimum.

3. SURVEILLANCE ET INSTRUMENTATION DANS LES BARRAGES EN REMBLAI

La surveillance d'un barrage en remblai et de ses abords permet d'avoir des informations sur le comportement de sa structure et aussi de l'interaction structure-fondation. La mesure des déformations dans un barrage permet d'avoir une évaluation de sa stabilité et de sa sécurité. Par exemple, des déformations initiales trop grandes ou inattendues peuvent être les seules indications de problèmes potentiels dans le corps du barrage. La surveillance est aussi importante à plus long terme pour l'avancement des connaissances afin d'améliorer les méthodes de calcul en vue d'une conception meilleure et plus sûre des futurs barrages. La vérification des paramètres géotechniques de conception est de la plus haute importance (Szostak-Chrzanowski et al. 2005). Ces paramètres géotechniques peuvent être déterminés in situ ou en laboratoire. Dans les essais de laboratoire, les échantillons de sol ou de roc sélectionnés peuvent être différents selon où ils ont été prélevés. Ils sont aussi soumis à des chargements qui diffèrent des conditions existantes. Par conséquent, la comparaison des valeurs des 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 géotechniques utilisés dans les analyses (Massiera et al. 2002; Szostak-Chrzanowski et al. 2002).

En plus des inspections visuelles (informations qualitatives) et du rassemblement des données environnementales (précipitations de pluie et de neige, températures de l'air et de l'eau, pression atmosphérique, activité sismique naturelle et induite), la surveillance du comportement des barrages en remblai se fait en utilisant de l'instrumentation géotechnique et géodésique. Du point de vue géotechnique, les mesures physiques et géométriques sont utilisées. Les mesures physiques incluent les mesures des pressions interstitielles dans les endroits les plus critiques du barrage et de sa fondation, les mesures des débits à travers le barrage, la fondation et les appuis en utilisant des déversoirs, les mesures des contraintes dans les endroits particuliers tels les appuis très inclinés, les gorges étroites, les interfaces remblai-béton en utilisant des jauges de contraintes. Les mesures géométriques comprennent les mesures qui utilisent les inclinomètres avec tubes à joints télescopiques, les pendules inversés, les extensomètres.

Les méthodes géodésiques permettent de déterminer les déplacements horizontaux et verticaux absolus de points sélectionnés (cibles ou bornes d'observations) situés à la crête ou sur les talus du barrage, par rapport à des points de références stables, en utilisant des techniques de positionnement terrestre ou par satellite. Avec l'avancement actuel de méthodes géodésiques terrestres, les stations totales robotiques qui peuvent reconnaître automatiquement les cibles, sont communément utilisées pour déterminer les coordonnées dans les trois directions à des intervalles de temps présélectionnés (Wilkins et al. 2003). Le système de positionnement global par satellites (GPS) permet de déterminer la position des récepteurs GPS avec une précision de quelques millimètres vis à vis de points de références stables distants de plusieurs kilomètres. Les résultats des mesures fournies par l'instrumentation géotechnique et les méthodes géodésiques sont complémentaires pour déterminer le comportement d'un barrage en remblai.

4. MODÉLISATION DES DÉFORMATIONS EN UTILISANT LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

La méthode des éléments finis (MEF) est souvent utilisée dans la conception des barrages en remblai. Avec les analyses qui utilisent cette méthode, on détermine les déplacements, les déformations et les contraintes dans une structure soumise à différentes conditions de chargement et de frontières. Les logiciels qui sont habituellement utilisés par les concepteurs ont été validés. Les différences entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées peuvent être causées par le choix de paramètres géotechniques (mécaniques) et/ou de conditions de chargement et de frontières non adéquats dans la modélisation par éléments finis.

Pour réaliser une analyse par éléments finis d'un barrage en remblai, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Discrétion du milieu en éléments finis et choix des conditions de chargement et de frontières;
- Sélection du modèle utilisé pour les matériaux de fondation et de remblai (linéaire élastique, non linéaire élastique, etc.)
- Sélection des paramètres géotechniques (mécaniques des matériaux).

Le comportement non linéaire du sol ou de l'enrochement avant rupture peut être modélisé en utilisant le modèle hyperbolique développé par Kondner (1963) et Kondner et Zelasko (1963).

5. DESCRIPTION DES BARRAGES EN REMBLAI

5.1 Barrages zonés en remblai du réservoir « Diamond Valley Lake » (DVL) et le barrage « West Dam »

Le réservoir « Diamond Valley Lake » a comporté la réalisation de trois barrages en remblai (Arita et al. 2000). Ces barrages sont des barrages zonés en terre et en enrochement. Puisque les trois barrages ont des comportements similaires, les résultats sont limités à seulement une section transversale au centre du barrage « West Dam ».

La figure 1 présente la coupe type du barrage « West Dam » qui a une hauteur maximale de 87 m, une longueur de 2700 m et un volume de 49,7 millions de m³. La région du réservoir DVL est située dans la zone d'interaction entre la plaque tectonique Nord américaine et celle du Pacifique. Les failles San Jacinto et San Andreas sont respectivement situées à environ 10 km et 30 km du réservoir. Donc, dans la conception du système de mesure des déformations des barrages, il a fallu considérer non seulement les effets de la poussée de l'eau du réservoir et des déplacements des barrages, mais aussi les effets de mouvements de la croûte terrestre dans ce secteur sismiquement actif qui est enclin à de fréquents tremblements de terre. Le réseau local de surveillance a été connecté au réseau GPS régional des stations de référence existant de la Californie du Sud (Bock et al. 1997) qui opère continuellement et qui contrôle les mouvements de la croûte terrestre.

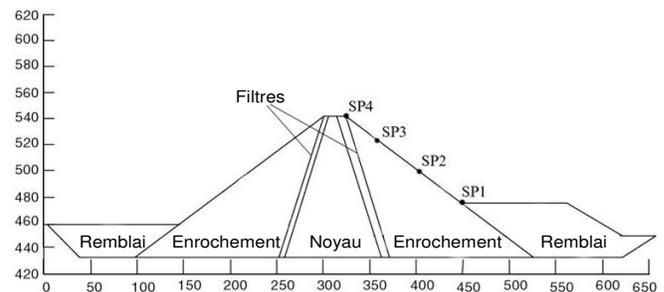


Figure 1 : Coupe type du barrage « West Dam » avec l'emplacement des cibles SP sur le talus aval

Un système de contrôle entièrement automatisé avec une acquisition télémétrique des données a été conçu en employant l'instrumentation géodésique et géotechnique. L'instrumentation géotechnique a été conçue indépendamment de la partie géodésique. Cette instrumentation est composée de 262 piézomètres, 7 inclinomètres, 74 jauges de tassement, 6 extensomètres, 14 déversoirs de jaugeage et 18 accéléromètres. Le système de contrôle automatisé géodésique consiste en 8 stations totales robotiques (Leica TCA1800) avec identification automatique des cibles et les mesures électroniques d'angles et des distances. De plus, 5 récepteurs GPS ont été installés de manière permanente sur les crêtes des barrages pour fournir un système d'alarme qui mettrait en opération les stations totales robotiques en cas de déplacements anormaux en crête (Duffy et al. 2001). Le système géodésique a été conçu pour détecter des déplacements supérieurs à 10 mm avec un niveau de confiance de 95 % (Whitaker et al. 1999). Les déplacements présentés couvrent la période de 82 mois après la mise en eau du réservoir. L'analyse inclut l'évolution des déplacements des quatre cibles situées respectivement au pied aval (SP1), sur le talus

aval (SP2 et SP3) et à la crête (SP4) du barrage « West Dam » (Figure 1).

5.2 Barrage principal en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) de l'aménagement Toulnostouc

Le barrage principal de l'aménagement hydroélectrique Toulnostouc est situé à environ 120 km au nord de la ville de Baie-Comeau au Nord du Québec. Le barrage a 75 m de hauteur et 575 m de long. Le corps principal du barrage est constitué d'enrochement compacté (Fig. 2). Le barrage est construit sur le substratum rocheux. L'épaisseur du masque amont en béton de ciment est de 0,3 m. L'instrumentation installée dans la structure inclut 13 tiltmètres submersibles installés en surface du parement amont en béton, 22 témoins de l'ouverture des joints installés près de la crête, 16 bornes d'observation situés sur l'aval du parapet en crête, 1 déversoir et jaugeage et 2 accéléromètres (Hammamji et al. 2005).

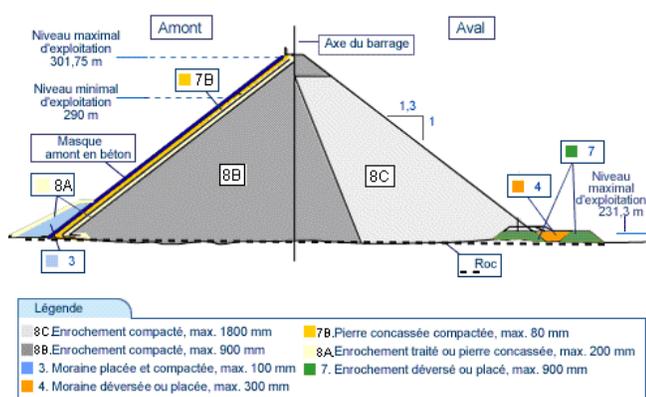


Figure 2 : Coupe type du barrage principal de l'aménagement hydroélectrique Toulnostouc.

6. PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DES MATÉRIAUX

Les paramètres géotechniques (modèle hyperbolique) des matériaux utilisés pour la construction des barrages du réservoir DVL ont antérieurement été présentés par Ebasco (1994) et Szostak-Chrzanowski et al. (2000). Enfin, les paramètres géotechniques pour le barrage CFRD de l'aménagement Toulnostouc ont été présentés par RSW Inc. (2001) et Hammamji et al. (2005)

7. ANALYSE DES DÉFORMATIONS PENDANT LE REMPLISSAGE DU RÉSERVOIR

Les deux barrages ci-dessus présentés, ont été analysés en employant la méthode des éléments finis et le logiciel SIGMA/W (Krahn, 2004). Le comportement des barrages en remblai a été analysé en deux phases. La première phase consistait à faire l'analyse du comportement pendant la construction de chaque barrage. La deuxième phase consistait à faire l'analyse du comportement des barrages,

ainsi construits, pendant remplissage du réservoir. Le barrage principal CFRD Toulnostouc repose directement sur le roc qui est supposé non-déformable. Le barrage « West Dam » a été réalisé après l'excavation de 27 m d'alluvions pour atteindre une fondation adéquate qui est considérée non-déformable.

La comparaison des tassements mesurés, pendant le remplissage de réservoir, à la crête du barrage zoné « West Dam » et celle du barrage principal CFRD Toulnostouc est présentée à la figure 3. À la fin du remplissage du réservoir, le barrage « West Dam » a de plus grands tassements à la crête (175 mm vs 60 mm). Les taux de déformations sont aussi différents pour chaque cas. La comparaison des déplacements attendus au barrage « West Dam » avec ceux du barrage CFRD Toulnostouc (Hammamji et al. 2005), indique que le barrage « West Dam » exigera des observations plus fréquentes à cause de la plus grande accélération des déplacements.

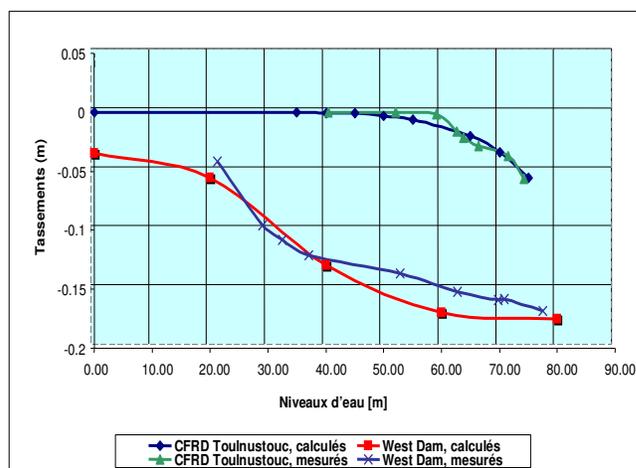


Figure 3 : Tassements calculés et mesurés en crête du barrage « West Dam » et du barrage CFRD Toulnostouc, au cours du remplissage du réservoir.

Dans le cas d'un barrage CFRD, il est prévu que les déplacements soient maximums sur le parement amont du barrage où les relevés géodésiques classiques ne peuvent pas être mis en œuvre (Fig. 4). Il faut installer dans ce cas, de manière permanente, une instrumentation géotechnique (par exemple, des tiltmètres submersibles, et des extensomètres) sur le parement amont en béton, ou encore des inclinomètres dans la zone en pierres concassées qui sert de coussin à ce parement amont. Les relevés géodésiques pourraient être utilisés à la crête et sur le talus aval du barrage CFRD. Il faut noter que les déplacements maximums prévus du parement amont en béton doivent se produire 40 m au-dessous de la crête et atteindre 214 mm pour le barrage reposant sur le roc. Ces déplacements maximums, à la fin du remplissage du réservoir, sont fonction de la hauteur H du barrage CFRD et se situent, sur le parement amont, entre 0,4 H et 0,5 H (Fig. 4).

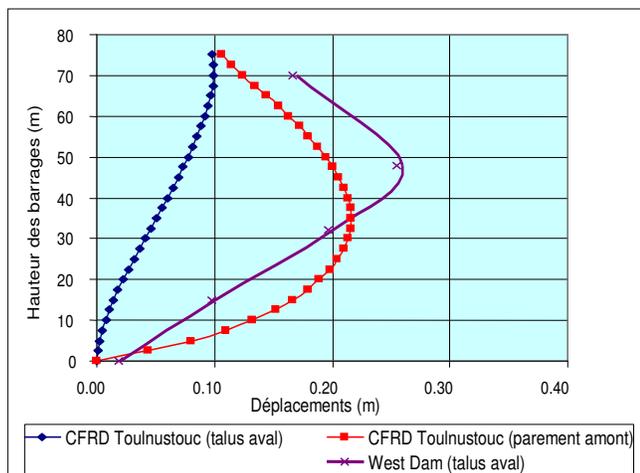


Figure 4 : Déplacements totaux calculés à la fin du remplissage du réservoir pour le barrage CFRD Toulnostouc et pour le barrage « West Dam ».

La figure 5 présente les tassements mesurés à la crête du barrage « West Dam » pendant le remplissage du réservoir. Le taux des tassements est significativement plus grand au début du remplissage du réservoir et se stabilise par la suite. La figure 6 présente la vitesse des tassements à la crête du barrage « West Dam » comparée à la vitesse du remplissage du réservoir. La vitesse des tassements est plus grande au début du remplissage du réservoir et se stabilise par la suite.

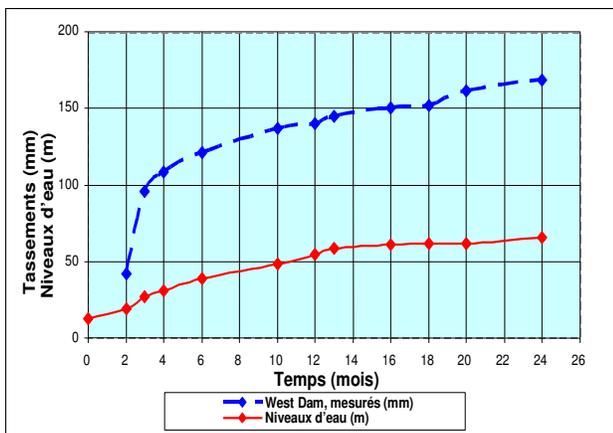


Figure 5 : Tassements en fonction du temps, à la crête du barrage « West Dam » pendant le remplissage du réservoir.

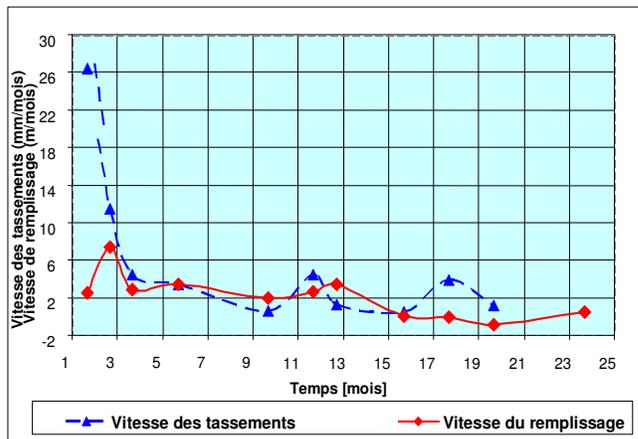


Figure 6 : Vitesse des tassements à la crête du barrage « West Dam » comparée à la vitesse du remplissage du réservoir.

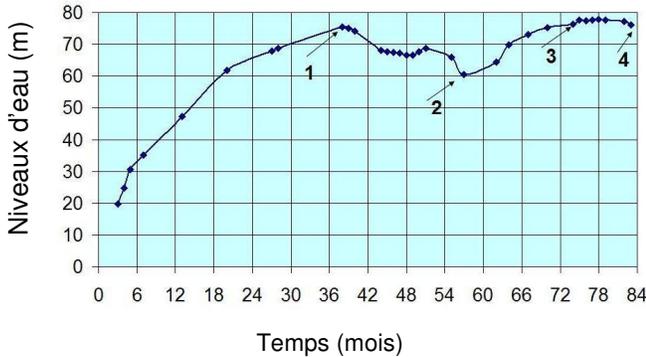
8. ANALYSE DES DÉFORMATIONS PENDANT L'OPÉRATION DU RÉSERVOIR

Les déplacements présentés couvrent la période de 82 mois après le début de la mise en eau du réservoir. L'analyse inclut l'évolution des déplacements des quatre cibles situées respectivement au pied aval (SP1), sur le talus aval (SP2 et SP3) et à la crête (SP4) du barrage « West Dam » (Figure 1).

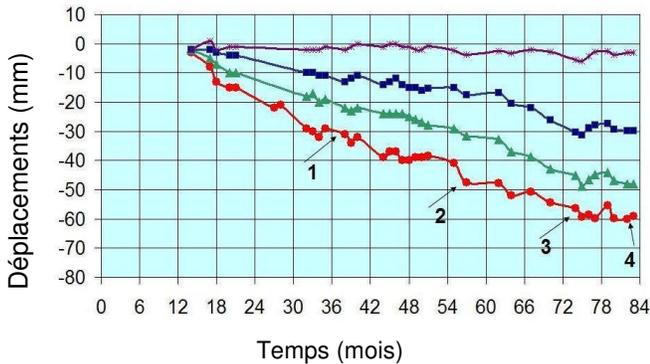
Le remplissage du réservoir a commencé en novembre 1999 et le niveau d'eau a atteint la hauteur de 76 m au-dessus du pied du barrage après 38 mois de remplissage. La figure 7a présente les niveaux d'eau depuis le début du remplissage du réservoir. Entre le trente-huitième et le cinquante-sixième mois (marqués par les flèches 1 et 2), le niveau d'eau a lentement diminué à 61 m et a recommencé à s'élever lentement pour atteindre un maximum (flèche 3) de 78 m au soixante-quatorzième mois (6 ans après le début du remplissage du réservoir). L'effet de la variation du niveau du réservoir sur les déplacements observés, est respectivement présenté dans les figures 7b et 7c pour des déplacements verticaux et horizontaux. Les déplacements présentés sont ceux enregistrés par le système de contrôle automatisé décrit au paragraphe 5.1 qui est rentré en fonction au mois d'octobre 2000, soit près de 12 mois après le début du remplissage du réservoir. La figure 8 présente les déplacements verticaux totaux, en fonction du temps, de la cible SP4 située à la crête du barrage qui a fait l'objet de relevés manuels par une station totale. Pour vérifier si les déplacements suivent un modèle régulier de consolidation tel qu'indiqué par Dascal (1987), les déplacements verticaux ont été tracés sur un graphique semi-logarithmique présenté à la figure 9. En dépit des variations du niveau du réservoir, la courbe présentée à la figure 9 montre les trois étapes du processus consolidation : un tassement faible au début, suivi d'un tassement important correspondant à la consolidation primaire et, à la fin, un tassement de consolidation secondaire qui augmente linéairement dans le temps.

Les résultats indiquent que la variation du niveau d'eau d'environ 20% n'affecte pas la tendance des déplacements verticaux quand le barrage est dans la phase de consolidation secondaire. La figure 7b indique aussi que la tendance des déplacements verticaux après le premier remplissage du réservoir est peu affectée par le changement du niveau d'eau du réservoir. Cependant, les déplacements horizontaux (Fig.7c), qui sont du même ordre de grandeur que les déplacements verticaux sont plus sensibles aux variations du niveau d'eau dans le réservoir.

a) Évolutions des niveaux d'eau



b) Évolutions des déplacements verticaux



c) Évolutions des déplacements horizontaux

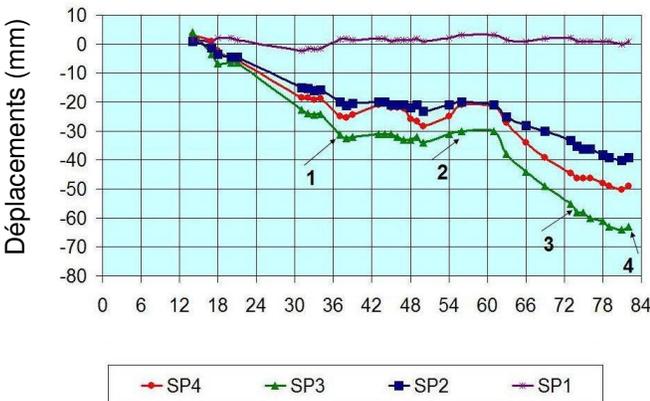


Figure 7 : Barrage « West Dam », évolutions des niveaux d'eau et des déplacements verticaux et horizontaux.



Figure 8 : Déplacements verticaux mesurés en crête du barrage « West Dam » en fonction du temps.

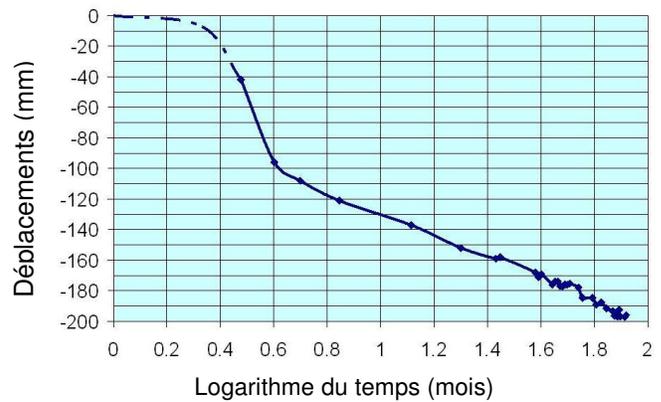


Figure 9 : Déplacements horizontaux mesurés en crête du barrage « West Dam » en fonction du temps.

Quand le niveau d'eau dans le réservoir décroît, les déplacements horizontaux se stabilisent. Ils recommencent à augmenter quand le niveau d'eau s'élève de nouveau. Il faut aussi noter que les déplacements horizontaux maximums se produisent au niveau de la cible SP3 qui est située à environ 20 m au-dessous de la crête.

9. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DU BARRAGE « WEST DAM » PENDANT LE REMPLISSAGE ET L'OPÉRATION DU RÉSERVOIR

Le comportement à long terme du barrage « West-Dam » a été modélisé en tenant compte de l'effet des variations du réservoir sur les déplacements. Dans cette modélisation, on suppose que le barrage (Figure 1) repose sur une fondation non déformable et on tient compte des effets de la poussée de l'eau et du déjaugement des matériaux. Lors de la submergence des matériaux, les valeurs du module de Young (E) diminuent (Touileb et al. 2000). Les modules de Young des matériaux dans les zones submergées de la structure deviennent plus petits et les matériaux sont soumis à la poussée d'Archimède, ce qui provoque des déformations dans le corps du barrage en remblai. Les valeurs des modules de Young des matériaux non

submergés ou submergés sont fonction du zonage mais aussi de leur niveau dans le barrage. Les valeurs de ces modules ont été déterminées antérieurement par Massiéra et al. (2002). Les résultats de la modélisation par éléments finis en utilisant un modèle élastique linéaire apparaissent à la figure 10 qui présente les tassements calculés et mesurés en crête (cible SP4) en fonction des variations du niveau d'eau lors du remplissage et de l'opération du réservoir. La figure 11 présente les déplacements horizontaux mesurés en crête (cible SP4) en fonction des variations du niveau d'eau lors du remplissage et de l'opération du réservoir. Les matériaux mis en place et compactés par couches ont une anisotropie transversale qui n'a pas été modélisée dans cette étude.

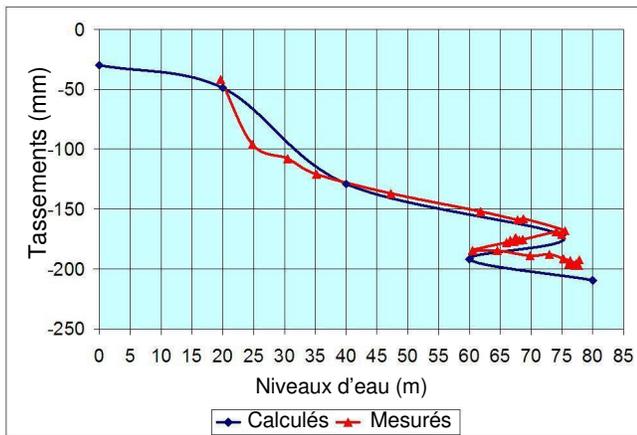


Figure 10 : Tassements calculés et mesurés en crête (SP4) du barrage « West Dam » au cours du remplissage et de l'opération du réservoir

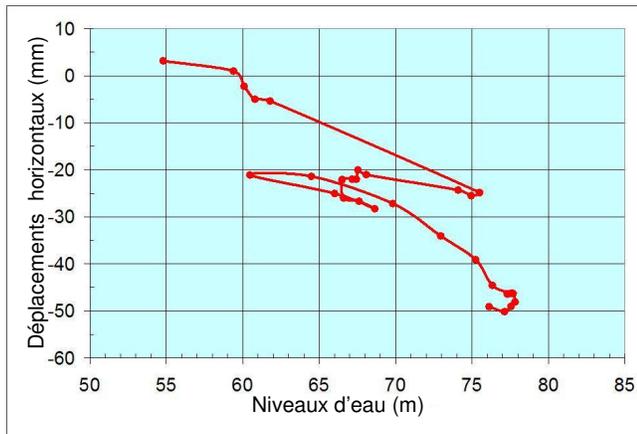


Figure 11 : Déplacements horizontaux mesurés en crête (SP4) du barrage « West Dam » au cours du remplissage et de l'opération du réservoir

10. CONCLUSIONS

La prédiction des valeurs et de la localisation de déplacements maximaux dans les barrages en remblai est

essentielle pour la conception appropriée du système d'instrumentation pour la surveillance du comportement réel. Les réponses aux conditions de chargement sont différentes pour chaque type de barrage et la conception du système d'instrumentation ne peut pas être standardisée. Les barrages en remblai placés dans les zones sismiquement actives sont construits avec des matériaux plus déformables qui doivent éventuellement s'adapter aux conditions de chargements variables causées par l'activité tectonique. Les barrages construits sur un substratum rocheux, dans des zones sismiquement plus stables, peuvent être des structures plus raides. Dans le cas de barrages CFRD, les déplacements maximaux se produisent sur le parement amont en béton du barrage.

Dans le cas du barrage « West Dam », les déplacements se sont continués au cours des sept années après la fin de la construction du barrage. Les déplacements verticaux ont atteint 200 mm, ce qui correspond à environ 0,23% H (hauteur du barrage). Ceci confirme l'étude de Dascal (1987) qui indique que les tassements en crête des barrages zonés en remblai, à noyau vertical ou légèrement incliné, demeurent inférieurs à 0,35% de la hauteur du barrage. En général pour ce type de barrage, on considère que les tassements se sont stabilisés quand ils deviennent inférieurs à 0,02% H par année. Dans le cas du barrage « West Dam », le tassement moyen en crête au cours des cinq dernières années a été seulement 0,012% par année. Ceci signifie que les déformations du barrage se sont stabilisées. Les variations du niveau d'eau de 20% n'ont pas affecté le taux de consolidation secondaire du barrage. Toutefois les déplacements horizontaux, qui suivent un mécanisme différent de déformation que le mécanisme de la consolidation, exigent davantage d'études. On devrait noter que les déplacements horizontaux maximum n'ont pas lieu à la crête mais sur le talus aval. Ceci devrait être pris en considération lors de la conception du système de surveillance géodésique.

11. REMERCIEMENTS

Cette recherche a été effectuée avec le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, de la Faculté des études supérieures et de la recherche de l'Université de Moncton et du Fonds d'Innovation de l'Atlantique de l'APÉCA.

12. RÉFÉRENCES

- Arita, A.A., Forrest, M.P., Fotheringham, J.R., Majors, D.G. 2000. Three dams, one reservoir. *Civil engineering*, American Society of Civil Engineers, 70(2): 28-31.
- Andersen, G.R., Chouinard, L.E., Hover, W.H., Cox, C.W., 2001. Risk indexing tool to assist in prioritizing improvements to embankment dam inventories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4): 325-334.

- Bock Y., Wdowinski S., Fang P., Zhang J., Behr J., Genrich J., Williams S., Agnew D., Wyatt F., Johnson H., Stark K., Oral B., Hudnut K., Dinardo S., Young W., Jackson D., Gurtner W. 1997. Southern California permanent GPS geodetic array: continuous measurements of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes. *J. Geophysical Research*, vol.102, #B8, pp.18013-18033.
- Dascal O. (1987) Postconstruction Deformations of Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 113 (1):46-59.
- Duffy, M., Hill, C., Whitaker, C., Chrzanowski, A., Lutes, J., Bastin G. 2001. An automated and integrated monitoring program for Diamond Valley Lake in California. *Proceedings (CD Rom) of the 10th Int. Symp. on Deformation Measurements* (Metropolitan Water District of S. California), Orange, CA, March 19-22, pp. K-1 to K-8.
- Ebasco. 1994. *Domenigoni Valley Reservoir project, West Dam feature design memorandum*, 129p.
- Hammamji, Y., Beauséjour, N., Massiéra, M. Vautour, J., Landry, L.-M. 2005. Toulustouc CFRD main dam : stress-deformation predictions and behaviour during reservoir filling. *Proceedings, CDA 2005 Annual Conference*, Calgary, 3-6 October, CD Rom, Technical Session 5, 12 p.
- Kondner, R.L. 1963. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 89 (SM1): 115-143.
- Kondner, R.L. and Zelasko, J.S. 1963. A hyperbolic stress-strain formulation of sand, *Proceedings of the 2nd Pan American CSMFE*, Brazil, Vol.1, pp. 289-324.
- Krahn, J. 2004. *Stress and deformation modeling with SIGMA/W, an engineering methodology*. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta.
- Massiéra, M., Szostak-Chrzanowski, A., Chrzanowski, Whitaker, C. 2002. Effet du remplissage du réservoir sur les tassements de grands barrages en remblai. *Proceedings, 55-th Canadian Geotechnical Conference*, 20-23 October, Niagara Falls, pp. 935-942.
- RSW Inc. 2001. *Aménagement de la Toulustouc, Barrage-Variante à masque amont. Résultat de l'analyse contrainte-déformation*. Rapport, 11 p.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski, A. Massiéra, M. 2005. Use of deformation monitoring results in solving geomechanical problems - Cases studies. *Engineering Geology*, 79(1&2): 3-19.
- Szostak-Chrzanowski A., Massiéra, M., Chrzanowski, A., Whitaker, C., Duffy, M. 2000. Verification of design parameters of large earthen dams using deformation monitoring data – Potentials and limitations. *Proceedings of the Canadian Dam Association, Third Annual Conference*, Regina, 16-21 September, pp 193-202.
- Szostak-Chrzanowski, A., Massiéra, M., Chrzanowski, A., Le Hoan, F., Whitaker, C. 2002. Verification of material parameters of earthen dams at Diamond Valley Lake using geodetic measurements. *Proceedings of the XXII FIG International Congress*, Washington, D.C., U.S.A. April 19-26.
- Touileb, B. N., Bonelli, S., Anthiniac, P., Carrère, A., Debordes, D, La Barbera, G., Bani, A., Mazza, G. 2002. Settlement by wetting of the upstream rockfills of large dams. *Proceedings, 53rd Canadian Geotechnical Conference*, 15-18 October, Montreal, pp. 263-270.
- Whitaker, C., Duffy, M.A., Chrzanowski, A. 1999. Installation of a continuous monitoring scheme for the Eastside Reservoir Project in California. *Proceedings, 9th International FIG Symposium on Deformation Measurements*, Olsztyn, Poland, pp 85-97.
- Wilkins, R., Bastin, G., Chrzanowski A. 2003. Alert: a fully automated real time monitoring system. *Proceedings, FIG 11th International Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, May 25-28*, pp. 209-216.