

PRÉVISIONS DES DÉFORMATIONS ET DES CONTRAINTES DANS LES BARRAGES EN ENROCHEMENT AVEC MASQUE AMONT EN BÉTON

Michel Massiéra¹, Annie Cormier¹, Yousef Hammamji² et Anna Szostak-Chrzanowski¹

¹. Faculté d'ingénierie (génie civil), Université de Moncton, Moncton, NB, E1A 3E9, Canada, massiem@umoncton.ca

². Hydraulique et Géotechnique, Direction Ingénierie de production, Hydro-Québec, Montréal (Québec), H2L 4P5, Canada

RÉSUMÉ :

Les barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) se déforment pendant leur construction et sous l'effet de la poussée hydrostatique de l'eau pendant le remplissage du réservoir. Pendant la construction, le remblai en enrochement tasse et se compacte jusqu'à l'étape de la fin de la construction. Pendant la mise en eau du barrage, l'enrochement se déforme sous l'effet de la pression de l'eau. Le masque amont en béton de ciment suit les déplacements du talus amont de l'enrochement. Cet article présente les déplacements du talus amont et les déplacements internes qui se développent dans les remblais en enrochement et leur fondation pendant l'étape de la construction et pendant le remplissage du réservoir. Il est conclu qu'il est possible de construire des barrages CFRD sur une fondation de till ou une fondation de mort terrain très dense, sans avoir d'importants déplacements supplémentaires du masque amont en béton de ciment, comparativement aux déplacements du masque amont d'un barrage CFRD reposant sur le substratum rocheux.

ABSTRACT :

Concrete Face Rockfill Dams (CFRDs) deform during their construction and under the effect of water load as a result of reservoir filling. During construction, the rockfill settles and compacts until the end-of-construction stage. During impounding, the rockfill deforms under the water pressure. The concrete face follows the rockfill deformation. The following paper presents the upstream face displacements and the internal movements that develop in the rockfill embankments and its foundation during the construction phase and the reservoir filling. It concludes that it is possible to build CFRDs on till or dense foundation without additional important upstream face movements, comparatively to upstream face movements in a CFRD resting on rock foundation.

1. INTRODUCTION

L'utilisation de barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) est de plus en plus envisagée pour les développements hydroélectriques dans des régions froides situées au nord du Canada et plus particulièrement au nord du Québec. Ce type de barrage en enrochement (CFRD) est de plus en plus utilisé à travers le monde. La hauteur des barrages en enrochement avec masque amont en béton (CFRD) actuellement en construction ou en planification dépasse 200 m. Dans les régions de plus en plus nordiques au Canada, l'utilisation d'enrochements qui sont disponibles en grandes quantités et qui sont peu ou pas sensibles au gel permet d'allonger la période annuelle de construction de tels barrages. La durée totale des travaux de construction de barrages en enrochement avec masque amont en béton (CFRD) par rapport à la durée totale de construction des barrages en remblais zonés pourra être ainsi réduite d'une année, ce qui permettra de réduire grandement les coûts de construction et de rendre les projets hydroélectriques plus compétitifs et économiques.

2. OBJECTIFS PRINCIPAUX DE CETTE ÉTUDE

La plupart des barrages en enrochement avec masque amont en béton (CFRD) reposent sur le substratum rocheux. Il n'existe à travers le monde que quelques

barrages avec masque amont en béton (CFRD) construits sur le mort terrain (les barrages Potrerillos, 116 m de haut, Pichi-Picun Leufu, de 54 m de haut, tous en Argentine (Pujol, 1999); Santa Juana, 103 m de haut (Astete et al., 1992) et Puclaro, 83 m de haut au Chili (Noguera et al. 1999); West Seti, 190 m de haut au Népal (Kenneally et al. 2001) et Morro de Arica, 215 m de haut au Pérou. Dans les régions nordiques du Canada et du Québec, les sites propices aux aménagements hydroélectriques et à la construction de barrages présentent souvent une épaisseur relativement importante de mort terrain très dense (till ou matériaux granulaires). Il apparaît donc très intéressant de déterminer s'il est possible de construire des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) sur de telle fondation de mort terrain et, donc, de déterminer les déplacements qui pourraient être subis par le masque amont en béton de ciment pendant la construction et surtout, pendant la mise en eau comparativement aux déplacements calculés et/ou mesurés du masque amont d'un barrage CFRD reposant sur le substratum rocheux.

L'article décrit les caractéristiques des barrages CFRD analysés reposant sur le substratum rocheux ou sur une fondation de mort terrain (till). Il présente les contraintes et les déplacements calculés dans le corps et le talus amont pendant la construction et la mise en eau de ces barrages CFRD.

3. DÉFORMATIONS DANS LES BARRAGES EN ENROCHEMENT AVEC MASQUE AMONT EN BÉTON (CFRD)

3.1 Types de déformations

Pendant la construction d'un barrage en enrochement, des déformations du corps du barrage se produisent. Ces déformations sont principalement 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 influencent les déformations du corps du barrage. Après la fin de la construction du barrage en enrochement et de son masque amont, des mouvements appréciables du masque amont, de la crête et du corps du barrage peuvent se développer pendant le premier remplissage du réservoir. Dans un barrage CFRD, les déplacements maximums sont mesurés perpendiculairement au masque amont à environ 0,4 à 0,5 fois la hauteur du barrage à partir de sa base (Pinto et Marques Filho, 1998). Le taux de déformations diminue généralement avec le temps, à l'exception des variations associées aux variations périodiques du niveau du réservoir et, dans les zones sismiques, aux tremblements de terre. L'intensité, le taux et la direction des déplacements, à un point spécifique du corps du barrage, de son talus amont ou de sa crête, peuvent varier pendant les différentes phases de la construction et de l'opération du réservoir.

3.2 Raisons pour mesurer les déformations

La principale raison pour mesurer les déformations dans un barrage en enrochement est pour avoir une évaluation fiable de sa stabilité et de sa sécurité. En effet, des déformations trop grandes ou inattendues peuvent être la seule indication de problèmes potentiels dans le corps du barrage ou de sa fondation. Une autre raison qui a une grande importance à plus long terme pour l'avancement des connaissances des ingénieurs est la nécessité de mieux connaître les caractéristiques de résistance et le comportement contraintes-déformations de ces grandes masses d'enrochement. Le développement de méthodes de prévision qui permettent une évaluation des déformations et des contraintes futures et la comparaison de ces valeurs avec celles observées, constituent des outils très valables pour contrôler la sécurité.

Dans les barrages CFRD, il est aussi impératif d'évaluer les déplacements du talus amont pendant le remplissage du réservoir, pour vérifier si ces déplacements 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.

4. INSTRUMENTATION POUR MESURER LES DÉFORMATIONS

4.1 Généralités

Le but de l'instrumentation est d'observer le comportement des barrages. Le type, le nombre et la distribution des

appareils de mesure dépendent des caractéristiques du site du barrage (vallée étroite avec rives escarpées, variation brutale de la géométrie des fondations, dépôts plus ou moins perméables dans le lit de la rivière où sur les appuis, etc.). Le nombre et la distribution des instruments de mesure dépendent des problèmes spécifiques prévus au stage de la conception qui, parfois, contrôlent l'échéancier de construction. Ces instruments sont aussi mis en place de façon à mieux connaître le comportement des barrages, en permettant de faire une corrélation entre les résultats obtenus en place et ceux provenant d'une analyse numérique.

Pour avoir une vue générale des déformations qui se produisent dans le corps d'un barrage il est nécessaire d'avoir, au minimum, une distribution des instruments de mesure dans deux plans principaux. Le plan dans lequel on considère un état de déformation plane qui, généralement, coïncide avec la section transversale où le barrage est le plus élevé et le plan perpendiculaire à celui-ci qui correspond à l'axe du barrage ou un plan proche de celui-ci. L'obtention des résultats en place relativement nombreux, permet de faire les comparaisons avec des analyses bi-dimensionnelles et de vérifier le comportement du barrage, au contact de ses appuis sur chaque rive, dans le sens perpendiculaire à la direction de la rivière.

4.2 Type d'instruments pour mesurer les déformations

Le « ASCE Task Committee (2000) » a présenté en détails les différents instruments de mesure utilisés pour évaluer le comportement des barrages. Les barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) comportent typiquement deux couches d'enrochement de transition d'au moins 3 m de largeur immédiatement sous le masque amont. Ces couches de transition sont généralement en enrochement ou en pierres concassées 0-80 mm pour la première couche, et en enrochement 0-200 mm pour la deuxième couche de transition. Il est possible d'installer dans la première couche des inclinomètres avec joints télescopiques parallèles au masque amont en béton. De plus à la surface du masque en béton, les déplacements dans les trois directions peuvent être mesurés ponctuellement par des tiltmètres submersibles reliés à un poste de lecture.

Cette instrumentation géotechnique située respectivement sous et à la surface du masque amont en béton peut être complétée par une instrumentation géodésique constituée de bornes d'observation situées respectivement à la crête et sur le talus aval du barrage en enrochement. Ces bornes d'observation peuvent être munies de cibles SP (prismes de verre) ou de récepteur GPS. L'installation de ces cibles SP pendant la construction de barrages CFRD permet de mesurer les déplacements qui se produisent pendant la construction, le remplissage et, par la suite, l'opération du réservoir.

Dans le barrage CFRD, il existe des témoins de variation des joints pour mesurer les déplacements relatifs entre les joints de construction et d'étanchéité. Dans la plupart des barrages CFRD, ces témoins sont installés au sommet du

barrage pour mesurer les déplacements du joint à la base du parapet.

Ces instruments variés ont une grande importance. Ils fournissent parmi d'autres choses, de précieux renseignements quantitatifs pour déterminer le rapport entre les propriétés des matériaux des barrages et les déformations qui se produisent dans les barrages pendant les diverses périodes de leur construction et de leur utilisation. Pour vérifier les résultats, il est préférable d'employer divers types d'instruments pour un même usage. Par exemple, les tassements peuvent être mesurés avec des tiltmètres et à l'aide d'un inclinomètre avec tubes à joints télescopiques.

5. DESCRIPTION DES BARRAGES EN ENROCHEMENT AVEC MASQUE AMONT EN BÉTON ANALYSÉS

Les hauteurs des barrages en enrochement analysés sont respectivement de 75 m, 100 m, 125 m et 150 m. Leur largeur en crête est identique et égale à 7 m, ce qui correspond à la largeur en crête du barrage de Touloustouc actuellement en construction (Gaudette et Bulota, 2003). Les pentes amont et aval sont respectivement égales à 1.3H:1V. L'épaisseur du masque amont en béton est respectivement de 0,3 m pour les barrages qui ont une charge hydraulique H de 50 m à 100 m et de 0,3 m + 0,002 H à 0,3 m + 0,004 H pour les barrages dont la charge hydraulique H dépasse 100 m (ICOLD, 2002). Les barrages analysés sont composés de 4 zones. Une zone 7B de 3,5 m de largeur en pierres concassées, maximum 80 mm, agit comme coussin du masque amont en béton de ciment. Sous cette zone 7B se situe une zone 8A de 3,5 m de largeur, en enrochement maximum 200 mm, qui agit comme zone de transition avec la zone 8B constituée d'enrochement compacté maximum 900 mm. La zone 8B forme le corps du barrage avec la zone 8C constituée d'enrochement compacté maximum 1800 mm (Figure 1).

Dans les analyses effectuées, ces barrages en enrochement reposent sur le substratum rocheux ou sur une fondation de till dense qui varie de 10 m à 40 m d'épaisseur.

6. MODÈLE HYPERBOLIQUE (ÉLASTIQUE NON LINÉAIRE)

Le modèle hyperbolique utilisé dans cette étude, a été développé par Kondner (1963) et Kondner et Zelasko (1963) pour modéliser le mieux possible le comportement non linéaire du sol et des enrochements avant rupture. Il utilise la relation reliant le module tangent initial E_i à la contrainte de confinement σ'_3 établi par Janbu (1963) :

$$[1] \quad E_i = K P_a \left(\frac{\sigma'_3}{P_a} \right)^n$$

De la même façon, il est possible d'exprimer le module de déformation volumique B en fonction de σ'_3 par (Duncan et al. 1980) :

$$[2] \quad B = K_b P_a \left(\frac{\sigma'_3}{P_a} \right)^m$$

où P_a est la pression atmosphérique. K et K_b sont des paramètres de rigidité adimensionnels, n et m sont des exposants déterminés à partir des essais de laboratoire. Ce modèle hyperbolique, modifié par Duncan et Chang (1970) utilise une relation contraintes-déformations non linéaire et dépendante de l'histoire des contraintes et des propriétés de déformation volumique du matériau (sol ou enrochement).

Quand pour un sol (ou un enrochement) le déviateur de contrainte ($\sigma_1 - \sigma_3$) augmente, le comportement du sol ou de l'enrochement est fonction du module tangent E_t :

$$[3] \quad E_t = \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \phi)}{2c (\cos \phi) + 2 \sigma'_3 \sin \phi} \right]^2 E_i$$

où ϕ est l'angle de frottement et c la cohésion du sol ou de l'enrochement. R_f est le rapport de rupture :

$$[4] \quad R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$$

Ce modèle utilisé dans le logiciel SIGMA/W (Geoslope, 2001) permet de modéliser de façon assez simple et assez fidèle, le comportement d'un ouvrage en remblai reposant sur une fondation rocheuse ou sur une fondation dont le comportement est indépendant du temps.

7. PARAMÈTRES DU MODÈLE HYPERBOLIQUE

7.1 Enrochement

Pour cette analyse paramétrique, les valeurs des paramètres du modèle hyperbolique de la pierre concassée (zone 7B), de l'enrochement maximum 200 mm (zone 8A), et des enrochements maximum 900 mm (zone 8B) et maximum 1800 mm (zone 8C) présentées au tableau 1, sont identiques à ceux présentés par RSW Inc. (2001) pour le cas d'un compactage élevée. En effet dans la littérature il existe très peu d'essais de compression triaxiale et de compression unidimensionnelle réalisés sur de tels enrochements. Les valeurs de ces paramètres du modèle hyperbolique publiées dans la littérature sont très diverses. Par exemple le Norwegian Geotechnical Institute (NGI, 1987) utilise respectivement des valeurs de $K = 1800$ et $n = 0,25$ avec $R_f = 0,65$ pour l'enrochement maximum 200 mm et $K = 900$ et $n = 0,45$ avec $R_f = 0,70$ pour l'enrochement maximum 800 mm. L'enrochement provient d'un gneiss granitique ou à diorite massif. Saboya et Byrne (1993) recommandent d'utiliser pour une analyse préliminaire des valeurs K variant de 250 à 500, n variant de 0,25 à 0,50 et

R_f égal à 0,60 ou 0,80 selon la grosseur de l'enrochement (maximum 500 mm ou 1000 mm) pour des enrochements provenant d'un basalte massif et d'un basalte breccia.

7.2 Moraine

Dans cette première phase de l'analyse paramétrique, il a été considéré qu'une moraine très dense constitue la fondation des barrages en enrochement avec masque amont en béton. Les valeurs retenues pour les paramètres du modèle hyperbolique de la moraine sont présentées au tableau 1. Ces valeurs ont été présentées par Massiera et Szostak-Chrzanowski (2003). Dans la modélisation, on a considéré que la nappe phréatique était initialement à la surface du mort terrain.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres utilisés dans l'analyse du comportement des barrages CFRD

Paramètres	Enrochement Zones 7B et 8A	Enrochement Zone 8B	Enrochement 8C	Fondation de Moraine
K	1000	500	400	1670
K_b	800	240	240	1030
n	0,5	0,5	0,5	0,5
m	0,2	0,2	0,2	0,5
R_f	0,35	0,35	0,35	0,5
K_{ur}	1200	600	480	2004
ϕ	45°	45°	45°	37°
γ (kN/m ³)	19,5	19,5	19,5	21,44

du remplissage du réservoir, la poussée de l'eau est appliquée par étapes en considérant, à chaque étape, une augmentation du niveau d'eau de 5 m jusqu'au niveau maximum du remplissage du réservoir. Une poussée horizontale de l'eau a été considérée sur la verticale passant par le pied amont des barrages CFRD reposant sur le mort terrain pour tenir compte de la présence d'un écran d'étanchéité à cet emplacement (Figure 2). Dans cette phase, les contraintes calculées à la fin de la phase de construction dans le corps de chaque barrage en enrochement et de leur fondation de mort terrain (si elle existe), ont été prises comme conditions initiales. De plus, le poids volumique du remblai en enrochement et de la fondation de mort terrain (si elle existe) ont été fixées à zéro pour ne pas tenir compte deux fois de l'effet de la gravité. Dans toutes les analyses qui comportent une fondation sur mort terrain, la nappe phréatique a été considérée au niveau de la surface initiale du mort terrain.

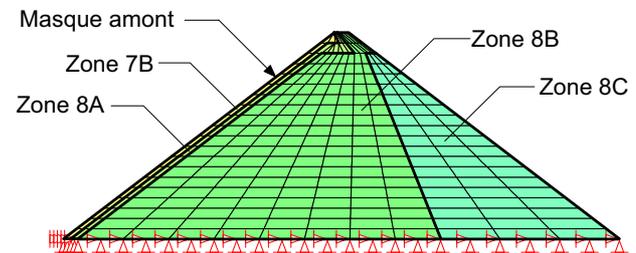


Fig. 1 : Barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur le roc

8. RÉSULTATS DES ANALYSES PARAMÉTRIQUES

8.1 Méthode d'analyse

Cette étude a été réalisée en utilisant les procédures d'analyse statique par élément finis du logiciel SIGMA/W (Geoslope, 2001). Les barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) reposent sur une fondation rocheuse ou sur le mort terrain (moraine). Ils ont respectivement 75 m, 100 m, 125 m et 150 m de hauteur et ils ont été discrétisés en couches d'éléments de 5 m d'épaisseur (Figure 1 et Figure 2). Chaque couche simule l'addition d'une couche de remblai en représentant un accroissement de charge appliquée. Les caractéristiques contraintes-déformations de chaque élément durant les étapes successives de chaque analyse sont modifiées conformément à l'état des contraintes calculées durant l'accroissement de la charge. Pour chaque analyse, les déformations et les contraintes dans le barrage en enrochement et, sa fondation de mort terrain (si elle existe), pendant et jusqu'à la fin de la construction constituent les principaux résultats. Les éléments utilisés sont des éléments quadrilatères à 8 nœuds à l'exception de certains éléments triangulaires à 6 nœuds. Dans la phase

8.2 Hypothèses et conditions adoptées dans l'analyse

Dans les cas où le barrage CFRD repose sur le roc, la fondation rocheuse est considérée comme indéformable et les nœuds à la base de l'ouvrage sont donc fixes (Figure 1). Dans les cas où le barrage CFRD repose sur le mort-terrain, c'est la base du mort terrain au contact du substratum rocheux qui est considéré comme indéformable. Aux frontières verticales de la fondation sur mort terrain situées à deux fois la demi largeur du barrage, les déplacements verticaux sont permis mais non les déplacements horizontaux (Figure 2). Tous les autres nœuds sont libres de se déplacer dans les directions verticales et horizontales. L'accroissement de chargement est provoqué par la mise en place d'une nouvelle couche de remblai simulée par l'ajout d'une couche d'éléments. Outre le masque amont en béton de ciment, les barrages en enrochement CFRD sont constitués de 4 zones : le coussin sous le masque amont (zone 7B), la transition (zone 8A) et les zones 8B et 8C qui forment le corps du barrage. Le coussin sous le masque qui est formé de pierres concassées, maximum 80 mm (zone 7B) et la transition en enrochement, maximum 200 mm (zone 8A) ont été simulées avec des propriétés identiques car leur mise en place et leur compactage par couche de 450 mm)

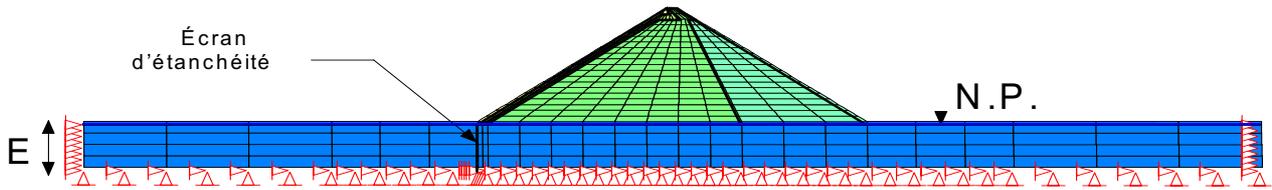


Fig. 2 : Barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

d'épaisseur se fait de la même façon. Les enrochements tout-venant utilisés dans les zones 8B (maximum 900 mm) et 8C (maximum 1800 mm) ont été simulés avec des paramètres K légèrement différents (500 et 400). Pour la fondation de mort terrain, il a été tenu compte de la présence de la nappe phréatique en surface. L'ensemble des paramètres utilisés dans les modélisations est présenté au tableau 1.

8.3 Déplacements calculés pendant la construction

8.3.1 Déplacements du talus amont

Dans un barrage en enrochement CFRD, il est important de connaître les déplacements du talus amont où sera construit le masque amont en béton, si ce masque en béton est construit en phases avec, par exemple, un retard correspondant à une différence de niveau de 50 m entre le niveau du remblai du barrage et le niveau du sommet du masque amont. Les figures 3 et 4 représentent les iso tassements et les iso déplacements horizontaux qui sont calculés à la fin de la construction dans un barrage en enrochement de 100 m de hauteur reposant sur le roc. Dans le tableau 2, on constate que les tassements maximums du talus amont augmentent d'une part, avec la hauteur du barrage, mais aussi avec l'épaisseur du mort-terrain. Il en est de même pour les déplacements horizontaux et les déplacements totaux maximums du talus amont. Ces déplacements maximums totaux se produisent à environ $0,75 H$ (hauteur du barrage) à partir de la base. Par exemple, pour un barrage en enrochement reposant sur le roc, les tassements maximums sont multipliés par 2,66 et passent de 0,187 m 0,498 m quand la hauteur du barrage double de 75 m à 150 m. Un comportement semblable est observé quand les barrages en enrochement reposent sur une fondation de moraine très dense tel que le montrent les figures 5 et 6 qui représentent les iso tassements et les iso déplacements horizontaux dans un barrage en enrochement de 100 m de hauteur reposant sur un mort terrain (moraine) de 40 m d'épaisseur.

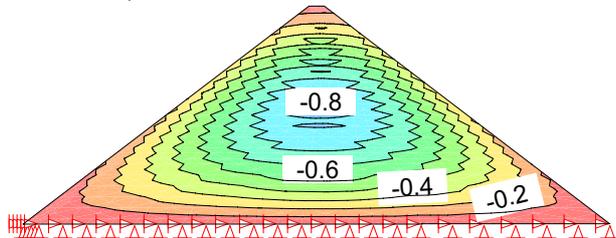


Fig. 3 : Iso tassements pendant la phase de construction du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur le roc

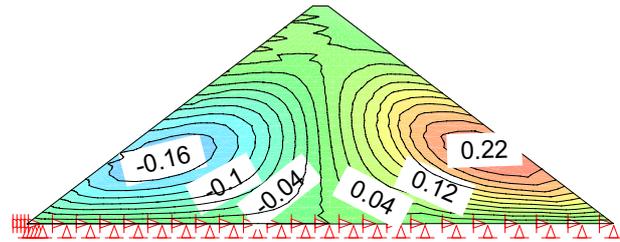


Fig. 4 : Iso déplacements horizontaux pendant la phase de construction du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

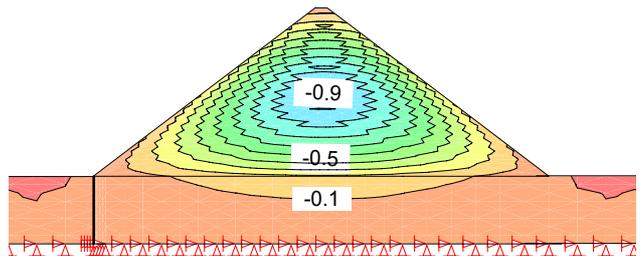


Fig. 5 : Iso tassements pendant la phase de construction du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

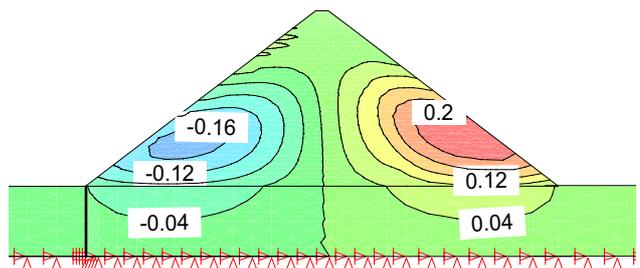


Fig. 6 : Iso déplacements horizontaux pendant la phase de construction du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

Tableau 2 : Déplacements maximums du masque amont des barrages CFRD ayant des hauteurs différentes et reposant sur le substratum rocheux ou sur une fondation de moraine ayant des épaisseurs différentes

Caractéristiques de la grille			Phase de construction			Phase de mise en eau		
Hauteur du barrage (m)	Épaisseur de moraine (m)	Nombre d'incréments	Déplacements maximums du masque amont			Déplacements maximums du masque amont		
			X (m)	Y (m)	X-Y (m)	X (m)	Y (m)	X-Y (m)
75	0	15	-0,094	-0,187	0,188	0,191	-0,141	0,234
	10	15	-0,103	-0,195	0,196	0,193	-0,142	0,235
	20	15	-0,104	-0,202	0,203	0,205	-0,143	0,245
	30	15	-0,103	-0,207	0,208	0,216	-0,144	0,253
	40	15	-0,102	-0,210	0,212	0,229	-0,144	0,262
100	0	20	-0,140	-0,278	0,280	0,303	-0,230	0,374
	10	20	-0,150	-0,286	0,289	0,304	-0,229	0,371
	20	20	-0,154	-0,293	0,296	0,321	-0,228	0,383
	30	20	-0,155	-0,299	0,302	0,338	-0,225	0,393
	40	20	-0,154	-0,304	0,307	0,357	-0,223	0,404
125	0	25	-0,189	-0,381	0,384	0,412	0,329	0,515
	10	25	-0,199	-0,390	0,394	0,432	-0,331	0,530
	20	25	-0,205	-0,399	0,403	0,456	-0,328	0,543
	30	25	-0,208	-0,406	0,410	0,479	-0,321	0,555
	40	25	-0,208	-0,412	0,417	0,506	-0,313	0,568
150	0	30	-0,239	-0,498	0,505	0,581	-0,453	0,720
	10	30	-0,252	-0,508	0,515	0,577	-0,448	0,709
	20	30	-0,258	-0,517	0,524	0,608	-0,441	0,724
	30	30	-0,263	-0,524	0,532	0,642	-0,428	0,738
	40	30	-0,264	-0,532	0,540	0,669	-0,416	0,749

8.3.2 Déplacements du corps des barrages

Pendant la construction les tassements maximums dans le corps des barrages se produisent à la mi-hauteur de l'axe des barrages en enrochement reposant sur le roc (Figure 3). Les tassements maximums sont multipliés par 3,06 et passent de 0,529 m à 1,619 m quand la hauteur du barrage double de 75 m à 150 m. Les déplacements horizontaux maximums se produisent dans l'épaulement aval à environ 0,3 H (hauteur) à partir de la base, car à l'amont les zones 7B et 8A plus rigides restreignent les déplacements latéraux (Figure 4). Les déplacements horizontaux maximums sont multipliés par 2,5 et passent de 0,154 m à 0,385 m quand la hauteur du barrage double de 75 m à 150 m. Un comportement semblable est observé quand les barrages en enrochement reposent sur une fondation de moraine très dense (Figures 5 et 6).

8.4 Contraintes calculées pendant la construction

Les contraintes maximums verticales et horizontales se retrouvent dans l'axe et à la base des barrages reposant sur le roc ou encore dans l'axe des barrages et à la base de la fondation sur mort terrain.

8.5 Déplacements du talus amont calculés pendant le remplissage du réservoir

Les valeurs calculées correspondent aux déplacements provoqués par le remplissage du réservoir. Pour avoir les

déplacements totaux il faut ajouter à ces déplacements, les déplacements calculés pendant la construction.

Dans un barrage en enrochement CFRD classique où le masque amont en béton de ciment est construit après que le remblai en enrochement soit terminé, il est très important d'évaluer les déplacements du masque amont sous l'effet du remplissage du réservoir et de vérifier si ces déplacements sont inférieurs aux déplacements compatibles avec l'intégrité structurale du masque amont en béton de ciment. Les figures 7 et 8 représentent les iso tassements et iso déplacements horizontaux qui sont calculés lors du remplissage du réservoir d'un barrage en enrochement de 100 m de hauteur reposant sur le roc. Dans le tableau 2, on constate que les tassements, les déplacements horizontaux et les déplacements totaux maximums du talus amont augmentent d'une part avec la hauteur du barrage, mais aussi avec l'épaisseur du mort terrain. Cependant, les tassements sont légèrement supérieurs dans le cas du barrage CFRD sur roc, car lors du remplissage du réservoir, la fondation sur mort terrain est soumise à une poussée latérale transmise par l'écran d'étanchéité vertical situé au pied amont du barrage. Les déplacements maximums du talus amont correspondent aussi aux déplacements maximums de l'ensemble du barrage pendant le remplissage du réservoir. Ils se situent entre 0,4 et 0,5 H (hauteur du barrage) à partir de la base. Dans les cas où les barrages en enrochement reposent sur le roc, ces déplacements maximums triplent quand la hauteur du barrage double de 75 m à 150 m (Tableau 2). Un comportement semblable est observé quand les

barrages en enrochement reposent sur une fondation de moraine très dense (Figures 9 et 10).

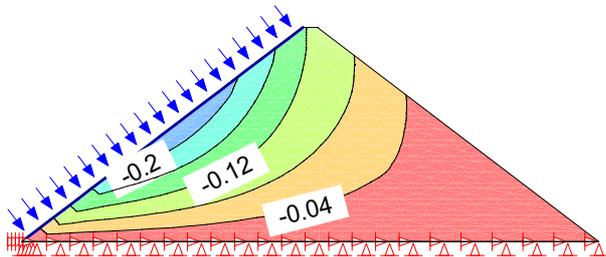


Fig. 7 : Iso tassements pendant la mise en eau du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur le roc

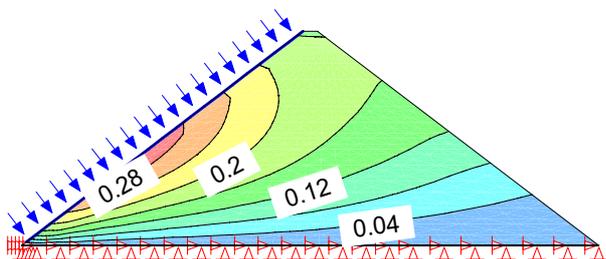


Fig. 8 : Iso-déplacements horizontaux pendant la mise en eau du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur le roc

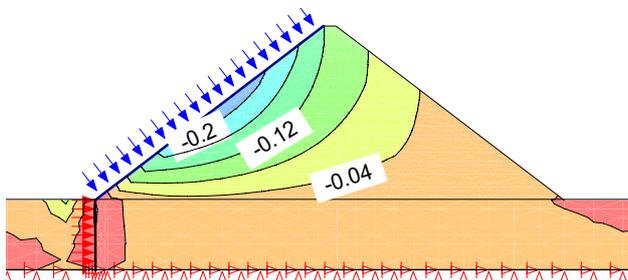


Fig. 9 : Iso-tassements pendant la mise en eau du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

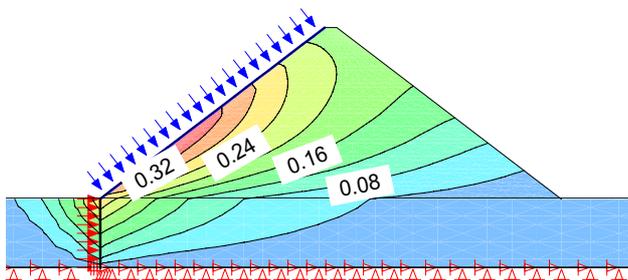


Fig. 10 : Iso déplacements horizontaux pendant la mise en eau du barrage CFRD de 100 m de hauteur reposant sur 40 m de moraine

8.6 Contraintes calculées pendant le remplissage du réservoir

La poussée hydrostatique de l'eau sur le masque amont provoque une augmentation importante des contraintes horizontales dans les zones 7B et 8A qui servent de coussin au masque amont en béton. Dans le corps du barrage, la contrainte horizontale est maximum dans la zone 8A à environ 0,26 H (hauteur du barrage) à partir de la base. Les contraintes verticales sont maximum dans l'axe et à la base des barrages reposant sur le roc ou encore, dans l'axe et à la base de la fondation sur mort-terrain.

9. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de déterminer s'il est possible de construire des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) sur une fondation de mort terrain dense. L'étude a été effectuée pour des hauteurs de barrages variant de 75 m à 150 m reposant sur le substratum rocheux ou sur une fondation de till variant de 10 m à 40 m d'épaisseur. Les déplacements du talus amont et les déplacements internes qui se développent dans chaque barrage modélisé, pendant la construction et pendant la mise en eau ont été présentés et illustrés.

Pour deux barrages de hauteur identique reposant respectivement sur le substratum rocheux et sur une fondation de moraine de 40 m d'épaisseur, la différence entre les déplacements du talus amont engendrés par la construction et par la mise en eau de ces barrages est minime. Il est donc possible de construire les barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) sur une fondation de mort terrain très dense. Actuellement l'étude se poursuit pour des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment (CFRD) reposant sur une fondation de mort terrain atteignant 120 m d'épaisseur et relativement moins dense pour correspondre à des dépôts d'origine fluviatile et fluvio-glaciaires de sable fins à moyens contenant des proportions variables de graviers.

10. REMERCIEMENTS

Cette recherche a été effectuée avec le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et de la Faculté des études supérieures et de la recherche de l'Université de Moncton. Les auteurs remercient aussi M. Gustavo Gonzaga de RSW Inc. et Mme. Janelle Vautour pour l'aide apportée à la réalisation de cette étude.

11. RÉFÉRENCES

ASCE Task Committee. 2000. Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. ASCE Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance.

- Astete, J., San Martin, L., Alvarez, L. 1992. The Santa Juana CFRD for irrigation in Northern Chile. *International Water Power and Dam Construction*, 44(4): 42-44.
- Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S., Mabry, P. 1980. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. Rapport no. UCB/GT/80-1, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Duncan, J.M., Chang, C.-Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE*, 96 (SM5): 1629-1653.
- Gaudette, M., Bulota, G. 2003. Improving the flood control at a lower cost for a future Hydro-Québec hydroelectric facility in the Toulmoustouc River, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4): 775-779.
- Géoslope. 2001. SIGMA/W for finite element stress and deformation analysis. User's Guide. Calgary, Alberta.
- ICOLD. 2002. Concrete face rockfill dams. Concepts for design and construction. ICOLD Committee in Materials for Fill Dams. Draft.
- Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Vol. 1. Proceedings European conference of soil mechanics and foundation engineering, Wiesbaden, Germany, pp. 19-25.
- Kenneally, D., Fuller, M., He, Q. 2001. The West Seti CFRD planned for western Nepal. *International Journal of Hydropower and Dams*. 8(5): 75-77.
- 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. et Zelasko, J.S. 1963. A hyperbolic stress-strain formulation of sand. Vol. 1. Proceedings of the 2nd Pan American CSMFE, Brazil, pp. 289-324.
- Massiéra, M., Szostak-Chrzanowski, A. 2003. Contraintes et déformations dans les barrages zonés en remblai lors de leur construction. Comptes rendus 56^e Conférence canadienne de géotechnique, Winnipeg, 29 septembre-1^{er} octobre. Société canadienne de géotechnique, Rexdale, Ont., 9 p., CD Rom.
- Noguera, G., Bellet, A., Vidal, L. 1999. Design and construction of Chile's Puclaro dam. *International Water Power and Dam Construction*, 59(9): 16-19.
- Norwegian Geotechnical Institute. 1987. Analysis of displacements and stresses in Storvatn dam. Rapport 68611-84, Oslo, Norvège.
- Pinto, N.L. de S., Marques Filho, F.L. 1998. Estimating the maximum face deflection in CFRDs. *International Journal of Hydropower and Dams*, 5(6): 28-30.
- Pujol, A. 1999. Argentina's dam construction program. *International Journal of Hydropower and Dams*, 6(2): 26-27.
- RSW Inc. 2001. Aménagement de la Toulmoustouc, Barrage-Variante à masque amont. Résultat de l'analyse contrainte-déformation. Rapport, 11 p.
- Saboya, F., Byrne, P.M. 1993. Parameters for stress and deformation analysis of rockfill dams. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4): 690-701.