

CONSIDÉRATIONS GÉOTECHNIQUES SUR L'ÉVOLUTION DES BERGES EN CAS DE CRUE EXTREME

Catherine Thibault

Ministère des Transports du Québec. Québec, Canada (catherine.thibault@mtq.gouv.qc.ca)

Serge Leroueil

Université Laval, Québec, Canada

Jacques Locat

Université Laval, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Une méthodologie permettant d'évaluer l'évolution des berges dans l'éventualité d'une rupture de barrage a été établie par l'Université Laval en collaboration avec l'École polytechnique de Montréal. La détermination de la zone susceptible d'être touchée par la rupture d'un barrage doit considérer non seulement le danger d'inondation, mais aussi le danger lié aux mouvements de terrain. Cette méthodologie, présentée sous forme d'un organigramme, combine les volets hydraulique et géotechnique. Le bief du cours d'eau étudié est divisé en secteurs homogènes sur le plan géotechnique. Pour chacun de ces secteurs, l'organigramme permet d'évaluer l'évolution des berges à des pas de temps successifs pendant le passage de l'onde de crue afin de tenir compte de la variation de l'hydraulique fluviale, des mouvements sédimentaires et des mouvements de terrain induits. Cet article porte sur le volet géotechnique de cette méthodologie.

ABSTRACT

A methodology, making it possible to evaluate the evolution of the banks in case of dam failure, was developed by Laval University in collaboration with Polytechnic of Montreal. The delimitation of the zone susceptible to be affected by a dam failure must consider the danger of flood but also the danger related to slope movements. This methodology, presented in the form of flow chart, combines the hydraulic and geotechnic aspects. The segment of the river studied is divided into geotechnically homogeneous sectors. For each one of these sectors, the flow chart makes it possible to evaluate the evolution of the banks to steps of successive times during the passage of the flood wave in order to take into account the variation of river hydraulics, the sedimentary movements and the induced slope movements. This article relates to the geotechnical aspect of the methodology.

1. INTRODUCTION

L'évaluation de la zone d'influence du danger en cas de rupture de barrage ou de crue extrême est habituellement circonscrite à la zone d'inondation maximale. Cette zone d'inondation correspond implicitement à la zone de danger. L'érosion et les ruptures de talus engendrées par les écoulements suivant une rupture de barrage ou une crue extrême sont habituellement négligées dans la détermination de la zone de danger. Les crues violentes observées dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean en 1996 ont montré la fragilité des berges et du fond des cours d'eau soumis à de telles crues (figure 1). L'incidence de la modification de la géomorphologie des cours d'eau en cas de rupture de barrage ou de crue extrême peut prendre une grande importance, principalement en milieu urbanisé où les implantations sont proches des rives. Dans leur plan de gestion des risques, les autorités doivent considérer un niveau de risque supérieur en milieu urbain. Le problème que cherche à résoudre cette étude est la définition de la zone de danger en tenant compte globalement du niveau maximal des eaux, des mouvements sédimentaires dans le lit majeur du cours d'eau et des possibilités de glissements de terrain induits ou réactivés. La solution au problème considéré résulte du couplage entre la réponse hydraulique au bris de barrage ou de la crue et la réponse mécanique des berges à l'écoulement. L'étude comporte donc un volet hydraulique, réalisé par l'École polytechnique de Montréal,

et un volet géotechnique, traité par l'Université Laval. En combinant ces deux volets, il est possible de réaliser un modèle numérique permettant d'évaluer l'évolution des berges pendant l'onde de crue créée par une rupture de barrage. L'approche générale a été présentée par Mahdi et Marche (2003). Cet article traite seulement du volet géotechnique de cette méthodologie.

2. MÉTHODOLOGIE

Les étapes de la méthodologie générale d'évaluation de l'évolution des berges en cas de rupture de barrage ou de crue extrême sont présentées sous forme d'un organigramme à la figure 2, lequel est une version légèrement différente de celle présentée par Mahdi et Marche (2003). Cet organigramme, traduisant le couplage hydraulique-géotechnique, est composé de 8 blocs :

- 1) Caractérisation géotechnique.
- 2) Paramètres hydrauliques.
- 3) Évaluation de l'érosion.
- 4) Évaluation de la stabilité.
- 5) Évaluation du remaniement.
- 6) Évaluation de la rétrogression.
- 7) Évaluation de la géométrie des débris.
- 8) Évaluation de la stabilité à long terme.



Figure 1 : Berges de la rivière Ha! Ha! à la suite de la rupture d'un barrage lors du déluge du Saguenay-Lac-Saint-Jean en 1996.

L'évaluation de l'évolution des berges est divisée en étapes de temps, puisque les conditions hydrauliques et géotechniques évoluent au cours du passage de l'onde de crue. Ainsi, l'organigramme est bâti de façon que les blocs 2 à 7 soient réévalués à chaque pas de temps pour chacune des sections hydrauliques. La méthodologie est d'abord appliquée au temps ($t=0$), puis successivement aux pas de temps suivants ($t+\Delta t$) jusqu'au temps final ($t = \text{temps final}$). Les sections hydrauliques divisent le tronçon à l'étude perpendiculairement au cours d'eau. Elles sont définies à partir des caractéristiques hydrauliques et de la caractérisation géotechnique du tronçon. Le nombre total d'analyses est défini en multipliant le nombre de pas de temps par le nombre de sections hydrauliques.

2.1 Caractérisation géotechnique

L'organigramme débute avec la caractérisation des secteurs géotechniques constituant des zones homogènes le long du tronçon à l'étude. Du point de vue géotechnique, cette caractérisation fournit les paramètres de base utilisés tout au long de l'étude de cas. Le tronçon de cours d'eau étudié est donc divisé en secteurs homogènes sur le plan géotechnique en tenant compte de la géométrie des talus, du type de végétation, de la nature des matériaux, des conditions d'eau souterraine, du type de glissement altérant les talus et de la présence d'éléments propres à un site donné tels que l'existence d'infrastructures au sommet ou à la base des talus.

2.2 Hydraulique

Le second bloc de l'organigramme englobe la définition des paramètres et des sections hydrauliques. Les paramètres hydrauliques et la géométrie des sections hydrauliques sont évalués à chaque pas de temps de l'hydrogramme de crue

grâce à un modèle de transport sédimentaire capable d'évaluer l'évolution des sections de la rivière sous l'effet de l'érosion (GSTARS, Yang *et al.*, 1998) et d'un module permettant la redistribution des sédiments à la suite d'une rupture de talus et à la redéfinition des nouvelles sections hydrauliques (REDISSED) (Mahdi et Marche, 2003).

2.3 Érosion

Le troisième bloc concerne l'évaluation de l'érosion. L'érosion à la base des berges peut créer des instabilités de talus qu'il faut évaluer par la suite. Par contre, en l'absence d'érosion, les étapes subséquentes de l'organigramme ne sont pas appliquées et l'analyse est répétée pour le pas de temps suivant.

Les blocs subséquents de la méthodologie s'appliquent seulement dans les cas où les berges sont composées de matériaux cohérents. Dans les cas où les matériaux constituant les berges sont pulvérulents, le modèle GSTARS peut gérer seul les variations de pente des talus, et les blocs 4 à 7 ne doivent pas être considérés dans la méthodologie.

L'érosion de surface ou de masse est principalement fonction de la contrainte de cisaillement (ou d'arrachement) induite par le fluide (τ) et des propriétés du sol contrôlant sa susceptibilité à l'érosion, qui sont exprimés par sa contrainte de cisaillement critique (τ_c). L'érosion survient lorsque la contrainte de cisaillement exercée par le fluide devient égale ou supérieure à la contrainte de cisaillement critique du matériau.

2.3.1 Matériaux pulvérulents

La relation de Shields (Van Rijn, 1989) est utilisée pour déterminer la contrainte de cisaillement critique pour les matériaux pulvérulents.

$$\tau_c = \theta_c \gamma' D_{50} \quad [1]$$

où θ_c est la contrainte de cisaillement critique adimensionnelle (nombre de Shields), (D_{50}) le diamètre moyen des particules et (γ') le poids volumique déjaugé des particules.

2.3.2 Matériaux cohérents

L'érodabilité des argiles diffère selon l'état de leur structure. C'est pourquoi une relation empirique distincte a été déterminée pour les argiles intactes, remaniées et partiellement remaniées, ainsi que pour la croûte argileuse.

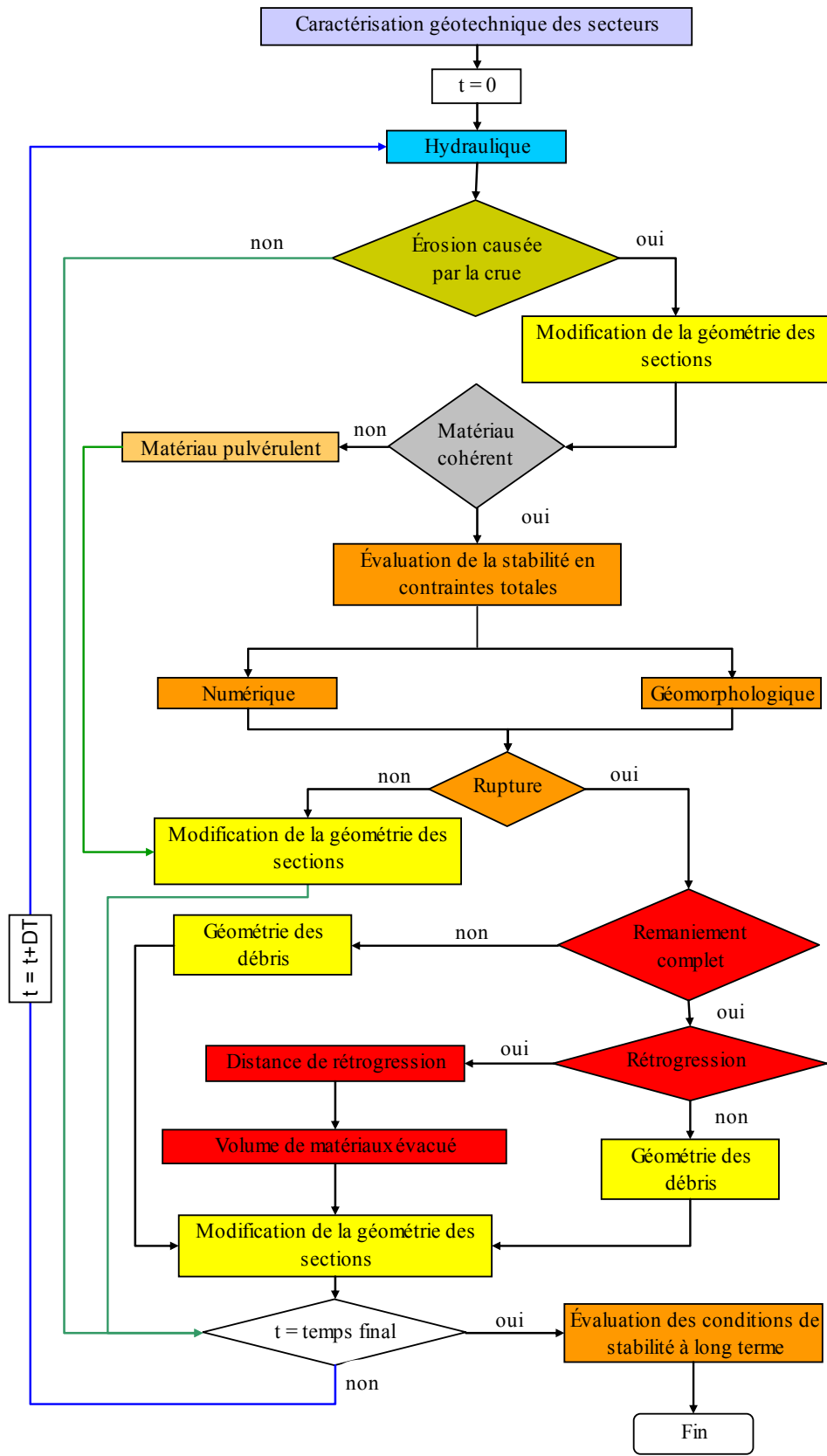


Figure 2 : Organigramme général de l'évaluation de l'évolution des berges en cas de rupture de barrage.

Une relation empirique a été établie à partir des résultats d'essais d'érodabilité sur les argiles intactes de l'Est du Canada réalisés par Lefebvre *et al.*, (1985 et 1986) ainsi que par Rohan *et al.* (1986 et 1989). Le graphique de la figure 3 met en relation la contrainte de cisaillement critique (en Pascal) et l'indice de plasticité pour des argiles intactes de l'Est du Canada. Les résultats sont très dispersés et montrent, en particulier, que la contrainte de cisaillement critique peut parfois dépasser 400 Pa. Sur ce graphique, la ligne pointillée indique la limite inférieure de ces points expérimentaux. Cette droite, exprimée par l'équation 2, est utilisée pour estimer la contrainte de cisaillement critique minimale des argiles intactes. À la vue des données expérimentales, cette équation peut sembler pessimiste. En fait, elle prend en compte, dans une certaine mesure, le fait que l'eau chargée de sédiments est plus érosive que l'eau utilisée dans les essais.

$$\tau_c = 10I_p \quad [2]$$

où (I_p) est l'indice de plasticité.

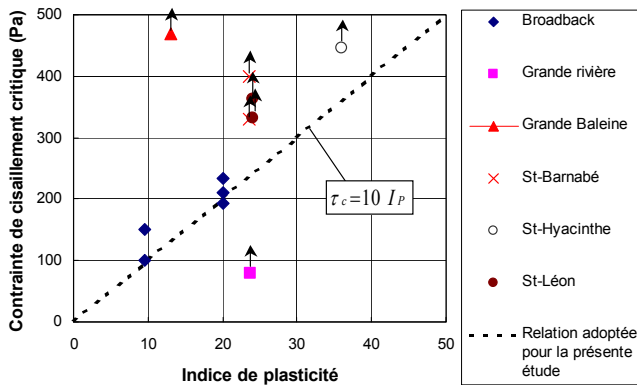


Figure 3: Relation entre la contrainte de cisaillement et l'indice de plasticité pour des argiles intactes de l'Est du Canada.

À la suite de la rupture d'un massif de sol, les débris à la base du talus doivent être au moins partiellement érodés avant que l'action érosive de l'eau déclenche un glissement subséquent. Il est en effet à noter que les débris à la base des berges protègent celles-ci du courant et augmentent leur stabilité en agissant comme contrepoids. Par contre, la présence de débris réduit la largeur du cours d'eau et peut entraîner une augmentation du taux d'érosion sur les berges opposées à cause du déplacement du centre de vitesse maximale du courant (Mehta *et al.*, 1989). La contrainte de cisaillement critique des argiles remaniées ou partiellement remaniées peut donc intervenir dans le processus d'évaluation de l'évolution des berges soumises à une onde de crue.

Une revue de littérature a permis de répertorier diverses relations entre l'indice de plasticité et la contrainte de

cisaillement critique pour les argiles remaniées. Certaines de ces relations sont montrées sous forme graphique à la figure 4. On peut voir que les relations proposées sont extrêmement variables d'une étude à l'autre. En s'appuyant sur quelques résultats expérimentaux obtenus sur des argiles de l'Est du Canada, nous avons retenu l'équation suivante pour la présente étude :

$$\tau_c = 0.83I_p \quad [3]$$

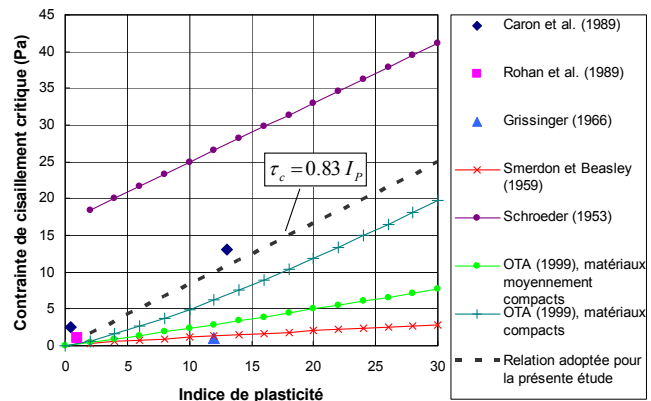


Figure 4 : Relations contrainte de cisaillement critique en fonction de l'indice de plasticité pour des argiles remaniées.

Dans les cas où le sol est partiellement remanié à la suite d'un glissement de terrain, il est proposé de faire une interpolation linéaire des relations pour les sols intacts et remaniés pour déterminer la contrainte de cisaillement critique. Cette interpolation, assez arbitraire, est basée sur le paramètre (A) qui dépend de l'indice de plasticité, de la résistance au cisaillement non drainé et du poids volumique des matériaux. Ce paramètre est expliqué en détail à la section 2.5, qui traite de l'évaluation du remaniement. L'équation de détermination de la contrainte de cisaillement critique pour les sols cohérents partiellement remaniés devient alors la suivante :

$$\tau_c = 10I_p - (10I_p - 0.83I_p) A \quad [4]$$

Dans les cas où les matériaux sont susceptibles de se remanier totalement, le paramètre (A) est considéré comme unitaire et la contrainte de cisaillement critique obtenue est celle pour les matériaux remaniés. Par contre, pour des matériaux intacts, ce paramètre est nul et l'équation indique que la contrainte de cisaillement critique correspond à celle des matériaux intacts. En ce qui a trait aux matériaux partiellement remaniés, le paramètre (A), obtenu lors de l'évaluation du remaniement à la section 2.5, est entré dans l'équation 4 afin de déterminer la contrainte de cisaillement critique.

La croûte argileuse est la partie supérieure d'un dépôt d'argile qui est plus ou moins oxydée et dont la structure est modifiée par des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel. Lorsqu'elle est altérée par l'action combinée des agents climatiques et des variations de la nappe phréatique, l'argile est desséchée et se présente généralement sous forme de nodules prismatiques lui procurant un comportement souvent plus proche des matériaux pulvérulents. Ainsi, dans le contexte de ce projet, la croûte argileuse est considérée comme un sol pulvérulent. La contrainte de cisaillement critique de la croûte argileuse peut donc être déterminée selon la relation de Shields (équation 1). Le poids volumique déjaugé est cependant beaucoup plus faible que pour des grains solides, soit de l'ordre de 8 kN/m^3 plutôt que 17 kN/m^3 .

2.3.3 Influence de la végétation

La rugosité d'une surface soumise à un débit constant ou turbulent est exprimée par le coefficient de Manning (n). Dans la présente étude, ce coefficient est utilisé afin de considérer l'influence de la végétation sur l'érosion des berges. Il se définit comme la somme des facteurs influençant la rugosité du chenal.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad [5]$$

où :

- n_0 : tient compte du matériau utilisé,
- n_1 : rend compte du degré d'irrégularité du matériau,
- n_2 : tient compte des variations de la section du chenal,
- n_3 : tient compte du degré relatif des obstructions,
- n_4 : rend compte de l'effet de la végétation,
- m_5 : tient compte de l'effet des méandres.

Ce coefficient peut être déduit à partir de tables telles que celles présentées par Chow (1959). Il doit être déterminé pour chacune des sections hydrauliques. À partir de l'équation 5, il est possible d'écrire que le coefficient rendant compte de l'effet de la végétation augmente le coefficient de Manning de ($\Delta n = n_4 m_5$). Les tables de Chow (1959) indiquent que le coefficient n_4 varie de 0,005 à 0,1 selon le degré d'influence de la végétation sur la rugosité (faible, moyen, élevé et très élevé).

Dans le contexte de la présente étude, une relation entre la contrainte de cisaillement critique adimensionnelle (θ) et la variation du coefficient de Manning a été établie par l'équipe d'hydrauliciens de l'École polytechnique de Montréal (Marche et Mahdi, communication personnelle). Cette relation permet de considérer l'influence de la végétation sur la contrainte de cisaillement critique pour les sols pulvérulents et la croûte argileuse.

$$\theta_c (\text{avec végétation}) = \theta_c (\text{sans végétation}) \left(1 + \frac{\Delta n}{n}\right)^{3/5} \quad [6]$$

La contrainte de cisaillement critique adimensionnelle ainsi obtenue est utilisée dans l'équation 1.

2.4 Évaluation de la stabilité

L'étape centrale de l'organigramme est l'évaluation de la stabilité des berges soumises à l'action érosive de l'eau. Les analyses de stabilité des talus soumis à l'érosion causée par la crue sont réalisées en contraintes totales, considérant que les pressions interstitielles n'ont pas le temps de se stabiliser à la suite de la modification de la géométrie des talus. Si les berges subissent de l'érosion, mais sans rupture du talus, les sections hydrauliques sont modifiées directement dans le modèle de transport sédimentaire. Dans le cas contraire, les blocs de l'évaluation du remaniement, de la rétrogression et de la géométrie des débris doivent être considérés. À la fin de la crue, la stabilité des berges est considérée à long terme (en contraintes effectives) de manière à évaluer le recul maximal des berges après le passage de l'onde de crue.

Deux méthodes d'analyse de stabilité sont proposées : la méthode numérique, dont les analyses sont basées sur la méthode de Bishop modifiée, et une approche géomorphologique. Le modèle numérique nommé BISHOP, développé par l'École polytechnique de Montréal, est décrit dans Mahdi (2003) et a été couplé à GSTARS par Mahdi et Marche (2003).

L'approche géomorphologique est basée principalement sur la géométrie actuelle des talus. L'objet de cette approche est de déterminer l'angle du talus (β) pour lequel se produit la rupture d'un talus de hauteur (H). Elle permet de réaliser des évaluations de stabilité en conditions de pressions interstitielles drainées. On peut aussi utiliser une analyse simplifiée pour les analyses à court terme. La méthodologie proposée est particulièrement utile dans les cas où les conditions d'eau dans le massif de sol ne sont pas bien connues. Il est important de noter que l'approche n'est applicable que pour des secteurs homogènes sur les plans géologique et géotechnique. De façon générale, l'approche comporte 4 étapes et ce, pour les analyses de stabilité en contraintes effectives ou totales.

La première étape est la réalisation du graphique indiquant la relation entre la hauteur des talus en fonction de leur angle pour différents coefficients de sécurité. Un exemple de graphique est illustré à la figure 5.

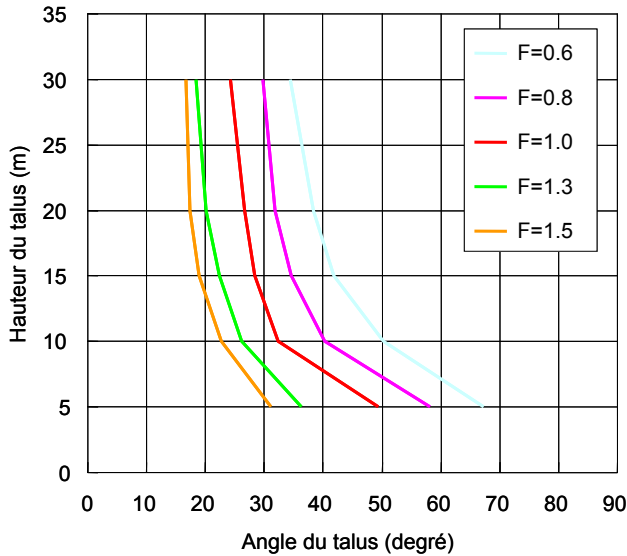


Figure 5 : Exemple de graphique montrant la hauteur des talus en fonction de leur angle.

Deuxièmement, la variation du niveau d'eau à la base du talus au cours du passage de l'onde de crue doit être prise en compte dans l'évaluation du coefficient de sécurité. L'effet de la submergence est considéré à l'aide d'un facteur de submergence (μ_{sub}), qui est le rapport entre le coefficient de sécurité initial au temps ($t=0$) et le coefficient de sécurité évalué à un pas de temps donné au cours de l'onde de crue. Troisièmement, l'angle du talus auquel se produirait une rupture (β_{rup}) est déterminé pour les conditions de submergence considérées. Sur le graphique de la première étape, (β_{rup}) correspond à l'angle du talus pour un (μ_{sub}) et une hauteur donnée. Finalement, cet angle est comparé avec l'angle du talus analysé afin d'évaluer s'il peut y avoir rupture du talus ou non. Cette approche est détaillée dans Thibault (2003).

2.5 Évaluation du remaniement

Les matériaux cohérents sont qualifiés de remaniés lorsque les liens et l'arrangement entre les particules sont brisés. Le remaniement des sols entraînés dans un glissement peut être partiel ou complet.

Le remaniement des argiles nécessite une certaine énergie de remaniement qui est principalement fonction de la résistance au cisaillement non drainé (c_u) et de l'indice de plasticité (I_p) des matériaux. La condition pour qu'il y ait remaniement peut être écrite comme suit pour les argiles de l'Est du Canada (Leroueil *et al.*, 1996) :

$$\frac{\gamma H}{c_u} \geq 2.7 + 0.13 I_p \quad [7]$$

où (γ) est le poids volumique de l'argile et (H) est la hauteur du talus. Afin de rendre cette équation plus générale et applicable à d'autres matériaux, les termes de droite peuvent être remplacés par un facteur (K). L'équation 7 devient donc :

$$A = \frac{\gamma H}{K c_u} \quad [8]$$

Lorsque le facteur (A) est supérieur ou égal à 1, le remaniement est complet. Dans le cas contraire, le remaniement est partiel et des débris partiellement remaniés demeurent à la base du talus à la suite d'un glissement.

2.6 Évaluation de la rétrogression

La distance de rétrogression est un paramètre déterminant pour établir la largeur de la zone à risque au sommet des berges. La distance de rétrogression des glissements a fait l'objet d'études (Mitchell et Markell, 1974; Leblais *et al.*, 1983), mais les résultats sont peu précis. Pour un site donné, il semble préférable de l'évaluer en fonction de la géométrie des glissements observés dans la région du site étudié.

2.7 Évaluation de la géométrie des débris

Dans les cas où les matériaux sont partiellement ou complètement remaniés, la géométrie des débris à la base du talus doit être estimée sur la base de diverses hypothèses concernant la géométrie de la surface de rupture et des débris.

Cette modification de la géométrie de la section est alors entrée dans le modèle hydraulique et utilisée pour les analyses au pas de temps suivant.

3. DISCUSSION ET CONCLUSION

La méthode proposée est un exercice visant à définir les limites approximatives d'une zone de danger située en bordure d'un cours d'eau dont le débit et le niveau sont susceptibles d'atteindre des valeurs catastrophiques suivant une rupture de barrage ou une crue extrême. De façon générale, la pratique actuelle tient seulement compte de la zone d'inondation dans la délimitation de la zone de danger. La méthode proposée permet de définir la zone de danger de façon à inclure non seulement la zone d'inondation, mais aussi la zone juxtaposée à celle-ci tenant compte des mouvements de terrain déclenchés par le processus d'érosion.

La méthodologie proposée sert de base à la mise en œuvre d'un modèle numérique ayant pour but de réaliser des cartes indiquant le recul maximal des rives en aval d'un barrage en cas de rupture de celui-ci. Ces cartes pourront

par la suite être utilisées dans l'élaboration de plans de gestion du risque. Le modèle numérique général consiste en un jumelage de modèles hydro-sédimentologiques et d'un modèle d'évaluation de la stabilité basé sur la méthode de Bishop modifiée. Ce jumelage a été réalisé par Mahdi et Marche (2003).

La méthodologie a été conçue dans une optique de généralisation. En effet, elle est présentée sous forme d'un organigramme composé de blocs relatifs aux aspects propres au site étudié, et aux concepts et théories associés à l'évaluation de la modification morphologique d'un talus en cas de rupture. La méthodologie proposée comporte plusieurs hypothèses simplificatrices et elle est par conséquent approximative. Les recommandations ci-dessous ont pour but de réduire le nombre d'hypothèses nécessaires au développement de cette méthode :

- Valider l'ensemble de la méthodologie proposée en l'appliquant à un cas de rupture de barrage survenu dans le passé et dont l'information nécessaire à une analyse à rebours de la situation est disponible.
- Préciser les valeurs de cisaillement critique des matériaux cohérents pour chacun des sites à l'étude grâce à des essais en forure représentant les conditions catastrophiques du cas étudié afin de préciser le taux d'érosion dans les matériaux intacts, partiellement remaniés et remaniés.
- Développer les connaissances concernant l'influence de la végétation sur l'érodabilité des berges et son effet sur la contrainte de cisaillement critique pour les matériaux pulvérulents et pour la croûte argileuse.
- Développer la méthode en tenant compte du potentiel de glissements rétrogressifs dans les argiles sensibles.
- Valider numériquement le volume de matériaux évacué à la suite d'un glissement afin de préciser l'apport de sédiments dans le cours d'eau.
- Valider et raffiner l'approche géomorphologique d'analyse de stabilité des talus.

4. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Hydro-Québec pour sa participation à cette étude et son appui financier. Ils tiennent également à souligner la collaboration de Tewfik Mahdi, Claude Marche et Daniel Lavallée de l'École polytechnique de Montréal, qui ont travaillé sur la partie hydraulique de ce projet. Ils remercient aussi toutes les personnes, les techniciens et les étudiants qui ont contribué à cette recherche, et tout particulièrement Denis Demers du ministère des Transports du Québec pour ses conseils et commentaires constructifs. Nous remercions Paul Flon et Denis Robitaille pour l'évaluation de cet article.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Caron, O., G. Lefebvre. et K. Rohan, 1989. *Analyse d'érodabilité des argiles du lit de la Grande Rivière*, 23^e Congrès de l'Association internationale de recherches hydrauliques, Séance technique B, Hydraulique fluviale, Ottawa, Canada.

Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. Éd. McGraw-Hill, New York, p. 680.

Grissinger, E.H., 1966. Resistance of selected clay systems to erosion by water. *Water resources research*, 2(1), p.131-138.

Lefebvre, G., Rohan, K. et Douville, S., 1985. Erosivity of natural intact structured clay; evaluation. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4): p. 508-517.

Lebuis, J., Robert, J.-M. et Rissmann, P., 1983. Regional mapping of landslide hazard in Québec. *Symposium on slopes on soft clays*, Linköping, Swedish, Geotechnical Institute, p. 205-262.

Lefebvre, G., Rohan, K. et Milette, J.-P., 1986. Erosivity of intact clay; influence of the natural structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4): p. 427-434.

Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Faure, R. et Lee, H., 1996. A geotechnical characterization of slope movements. *Proc. 7th Symp. Landslides*, Trondheim 1, Balkema, Rotterdam, p. 53-74.

Mahdi, T. 2003. *Prévision par modélisation numérique de la zone de risque bordant un tronçon de rivière subissant une rupture de barrage*. Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal, p. 300.

Mahdi, T., et Marche, C., 2003. *Prévision par modélisation numérique de la zone de risque bordant un tronçon de rivière subissant une crue exceptionnelle*. *Canadian Journal of Engineering*, 30, p. 568-579.

Metha, A.J., Hayter, W.R., Krone, R.B. et Teeter, A.M., 1989. Cohesive sediment transport. I: Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8): p. 1076-1093.

Mitchell, R.J. et Markell, A.R., 1974. Flowsliding in sensitive soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 11(1): p. 11-31.

Office of Technology Applications (OTA), 1999. *Hydrain - Integrated drainage design computer system*. Federal Highway Administration, HYCHL - Roadside Channels, Washington, DC, ??p. 6.

Rohan, K., Lefebvre, G., Douville, S. et Milette, J.-P., 1986. A new technique to evaluate erosivity of cohesive material. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 9(2): p. 87-92.

Rohan, K., Lefebvre, G. et Milette, J.-P., 1989. *Érosion des sols cohésifs par un écoulement turbulent*, 23^e Congrès de l'Association internationale de recherches hydrauliques,

Séance technique B, Hydraulique fluviale, Ottawa, Canada.

Schroeder, K.B., 1953. Interim report on channel deterioration study of natural and artificial drainageways in Republican, Loup, and Little Sioux River areas - Nebraska and Iowa. United States Bureau of Reclamation, Hydrology branch, Denver, Colorado.

Smerdon, E.T., et Beasley, R.P., 1959. The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils. Research bull. 715, University of Missouri, College of agriculture, Agr. Exp. Station.

Thibault C., 2003. Évolution des berges de rivière en cas de rupture de barrage: Cas du barrage Première-Chute. Mémoire M.Sc., Département de génie civil, Université Laval, p. 117.

Van Rijn, L.C., 1989. Handbook: Sediment transport by currents and waves. Delft hydraulics, Report H461.

Yang, C.T., Trevino, M.A. et Simoes F.J.M., 1998. User's Manual for GSTARS 2.0 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 2.0). U.S. Department of the Interior, Bureau of reclamation, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado, March 1998.