

RESUME

Les digues des parcs à résidus miniers sont, encore aujourd'hui, sujettes à des défaillances relativement fréquentes suite à des instabilités géotechniques. La problématique générale liée à la stabilité de ces ouvrages de retenue a été présentée dans la partie I. Dans cette partie II, on revoit les principaux facteurs qui affectent la stabilité des digues. Les outils typiquement utilisés pour analyser le comportement des ouvrages sont décrits, en mettant l'emphase sur l'effet des événements critiques comme les pluies abondantes et les séismes. L'article discute aussi de nouvelles avenues pour aider à contrôler certains problèmes, incluant l'utilisation d'inclusions de roches stériles dans les parcs à résidus miniers.

MOTS-CLÉS : Mines, rejets de concentrateur, digues, parcs à résidus, propriétés géotechniques, stabilité, ruptures, pentes, fondations.

ABSTRACT

Tailings dikes are still prone to relatively frequent failures due to geotechnical instability. The general problem related to stability of such retaining works has been presented in part I. In this part II, the main factors that affect the stability of dikes are reviewed. Typical tools used to analyse the behavior of these engineering works are described, with an emphasis on the effects of critical events such as large precipitations and earthquakes. The article also discusses new avenues that help control the problems, including the use of waste rock inclusions in the tailings impoundment.

KEYWORDS : Mines, mill tailings, dikes, impoundment, geotechnical properties, stability, failure, slopes, foundations.

Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers

PARTIE II – ANALYSE ET CONCEPTION

AUBERTIN M.¹, JAMES M.¹, MBONIMPA M.², BUSSIÈRE B.², CHAPUIS R. P.¹,

1 - Polytechnique Montréal, C.P. 6079, Stat. Centre-Ville, Montréal, Qc, Canada, H3C 3A7

2 - Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. Université, Rouyn-Noranda, Qc. Canada, J9X 5E4

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : michel.aubertin@polymtl.ca

I. Introduction

L'entreposage des rejets de concentrateur dans des parcs à résidus miniers nécessite des méthodes économiques et sécuritaires. Ceci représente souvent un défi de taille car ces résidus ont des propriétés géotechniques complexes qui rendent difficile l'analyse de leur comportement. Les entreprises minières et les firmes de consultants spécialisées, qui sont bien conscientes des enjeux et des risques, demeurent confrontées à une incidence élevée de défaillances, dont certaines peuvent avoir des conséquences graves pour la sécurité des personnes et des infrastructures, ainsi que pour les écosystèmes voisins.

Comme on l'a vu dans la partie I, la solution aux problèmes géotechniques passe par une bonne connaissance de l'origine et des propriétés des matériaux en présence. Il faut aussi avoir recours à des technologies qui aident à prévenir ces problèmes, et exercer une surveillance régulière et prolongée des ouvrages. Les parties impliquées doivent favoriser l'adoption d'une approche prudente, en tenant compte des divers risques générés par d'éventuelles défaillances (pendant l'opération et à la fermeture).

Dans cette partie II, les principaux éléments relatifs au comportement des résidus miniers et à l'analyse et la conception des ouvrages sur les sites d'entreposage de ces rejets de concentrateur sont présentés, en insistant sur les aspects liés à la stabilité géotechnique des digues de retenue. Plus de détails et des références complémentaires sont présentés dans Aubertin et al. (2011).

2. Composantes de l'analyse de stabilité

L'évaluation de la stabilité des ouvrages de retenue des résidus miniers se fait habituellement par le biais de techniques qui permettent de calculer un facteur de sécurité FS (aussi appelé coefficient de sécurité) sur la base de la résistance au cisaillement des matériaux pour divers modes de rupture. Les digues de parcs à résidus doivent avoir la capacité de suppor-

ter les combinaisons de charges (statiques et dynamiques) les plus défavorables pendant la construction et l'opération du site, et après sa fermeture. On considère usuellement que les valeurs retenues pour les facteurs de sécurité peuvent varier selon la nature et l'envergure des ouvrages, le type de sollicitation et la probabilité d'apparition des événements, i.e. selon le risque associé à une défaillance. On peut inclure dans l'analyse de stabilité de l'ouvrage et le calcul du facteur de sécurité les effets des dispositifs de réduction des charges (comme les systèmes de drainage pour la dissipation des pressions), mais la sécurité de l'ouvrage ne devrait pas être compromise dans les cas où ces dispositifs ne fonctionneraient pas correctement.

Les étapes, les outils de calculs et les paramètres utilisés pour l'analyse de la stabilité des ouvrages miniers ont été revus dans plusieurs documents, incluant : Vick (1990), Aubertin et al. (2002a, 2011), Fell et al. (2005), D'Appolonia Engineering (2009) et Blight (2010). Ces étapes comportent une caractérisation du site et des matériaux (fondations, digues, rejets, etc.), l'évaluation du volume d'entreposage en fonction du temps, la configuration géométrique des lieux et des ouvrages, ainsi que l'analyse de la réponse des composantes aux sollicitations imposées en terme de contraintes, de déplacements et de facteurs de sécurité contre la rupture.

2.1 Bilan d'eau et crue de projet

Le point de départ des analyses de stabilité des ouvrages qui retiennent l'eau est la détermination du niveau phréatique (eau libre et souterraine) et l'évaluation des pressions interstitielles. La procédure habituelle repose sur l'élaboration de réseaux d'écoulement. Pour cela, on adopte souvent l'hypothèse d'un écoulement stationnaire en milieu saturé sous chargement gravitaire. Toutefois, il est de plus en plus fréquent d'utiliser des outils de calcul plus représentatifs, basés sur des conditions saturées et non saturées (e.g. Chapuis et Aubertin, 2001); il est également souhaitable de faire des analyses transitoires pour prendre en compte les variations observées.

L'établissement des réseaux d'écoulement requiert une évaluation de la position du niveau phréatique en amont et à la base des ouvrages, pour les conditions courantes et pour les

conditions exceptionnelles (associées à de très fortes venues d'eau par exemple). La position de l'eau est alors fonction de la crue de projet sélectionnée. L'ampleur de cette crue est généralement déterminée à partir des données climatiques accumulées et analysées statistiquement. À cet égard, on reconnaît généralement qu'il est de plus en plus difficile d'obtenir une estimation représentative de l'ampleur de ces conditions exceptionnelles (ou critiques) en raison des incertitudes associées aux variations climatiques observées depuis plusieurs années. En plus de réduire la signification (pertinence) des données antérieures, les changements climatiques ont souvent pour effet d'augmenter l'ampleur et la fréquence des événements extrêmes, comme les pluies abondantes et les sécheresses. L'incertitude accrue qui en résulte devrait inciter à la prudence, en basant la conception des ouvrages sur des événements qui ont une très faible probabilité de survenir. Cet aspect est particulièrement important pour les sites d'entreposage avec de grands bassins versants ou pour les parcs à résidus qui accumulent beaucoup d'eau. De telles conditions engendrent de nombreux défis, surtout lorsque l'on considère les risques à long terme (Aubertin *et al.*, 1997, 2002a; Vick, 2001).

La conception des bassins se fait en fonction de la crue de projet, définie à partir d'une combinaison de diverses précipitations, comme la fonte des neiges et une pluie abondante au printemps, ou une précipitation critique pour l'été et l'automne. En ce sens, il est maintenant commun de baser le calcul de la crue de projet sur la valeur de la crue maximale probable, CMP, définie selon la précipitation maximale probable, PMP, pour une période de 24 heures (mais pouvant varier de 6 à 72 heures), pour une superficie de référence typique de 25 km² (ASCE, 1996; Mays, 2001).

À titre d'exemple, on peut mentionner l'évaluation des valeurs de la CMP et de la PMP réalisée par SNC-Lavalin (2004) pour le territoire québécois. Cette évaluation indique que la valeur de la pluie maximale probable est de l'ordre de 370 mm dans le sud du Québec (autour de Montréal), et qu'elle tend à diminuer vers le nord, soit autour de 350 mm en Abitibi (Rouyn-Noranda, Val-d'Or) et de 300 mm sur la Côte Nord (Sept-Îles). Ces valeurs sont assez proches (bien qu'un peu plus faibles dans certains cas) de celles rapportées par l'ASCE (1996) pour le sud du Québec. Ce document américain présente aussi diverses relations entre la durée des précipitations, leur intensité, et la probabilité annuelle p_a de survenir (avec $p_a = 1/PR$, où PR est la période de retour ou de récurrence, exprimée en années). La valeur de p_a associée à la PMP (ou à la CMP) est très faible; elle est quelquefois considérée comme nulle (théoriquement) mais elle serait plutôt de l'ordre de 6×10^{-5} en pratique (Marche, 2008). L'intensité de la PMP est souvent de l'ordre de cinq fois la précipitation correspondant à $p_a = 0,01$. Rappelons aussi que la précipitation de pointe survenue au Saguenay lors des inondations de juillet 1996 (pour

la période de 24 heures la plus critique) était d'environ 170 mm (soit approximativement la moitié de la PMP locale). Au total, on a rapporté qu'il était tombé 280 mm de pluie en 51 heures lors de ces événements (Aubertin *et al.*, 1997). Ces valeurs montrent que des précipitations très abondantes sont susceptibles de survenir dans les régions minières les plus actives, comme l'Abitibi et la Côte Nord (où la PMP est comparable à celle du Saguenay).

La crue de projet est reliée au bilan hydrologique du bassin d'entreposage (et de son bassin versant) et à la distribution des venues d'eau au cours du temps, en tenant compte de tous les apports (précipitations, ruissellement, décharge d'autres bassins, cours d'eau affluents, eaux dans la pulpe, etc.), des pertes encourues (évaporation, percolation dans le sol et dans les digues, débit de l'effluent final, eau recirculée, etc.) et du volume emmagasiné. Pour une conception sécuritaire, il faut considérer des conditions de ruissellement et d'emmagasinement défavorables, incluant la présence préalable d'eau accumulée dans le sol et le bassin (attribuable par exemple à une averse récente ou à la fonte des neiges).

Les ouvrages de retenue et de confinement des rejets miniers doivent permettre de contrôler la crue de projet correspondant à la condition d'accumulation la plus défavorable envisagée, de façon à éviter un débordement en crête qui pourrait conduire à une rupture avec déferlement des eaux et des résidus. Les ouvrages d'évacuation et la revanche minimale (entre l'élévation maximale de l'eau dans le bassin et l'élévation de la crête de la digue) doivent être soigneusement choisis pour ces conditions critiques. La possibilité d'un mauvais fonctionnement des équipements de régulation du niveau d'eau doit aussi être explicitement envisagée. Comme il peut être difficile d'assurer en permanence le bon fonctionnement des ouvrages de contrôle des eaux (évacuateurs de crue ou déversoirs, tranchées de drainage, etc.) pendant l'opération et (surtout) après la fermeture du site, les bassins d'accumulation d'eau devraient pouvoir emmagasiner la totalité de la crue de projet. Il faut aussi s'assurer qu'une grande partie du volume emmagasiné puisse être évacué naturellement dans un délai raisonnable (de quelques jours).

L'ampleur des précipitations de conception, qui contrôlent la crue de projet (ou crue de conception), dépend des dimensions des ouvrages et des risques que représente une défaillance. Ceci s'applique aussi aux autres types d'événements récurrents (séismes et sécheresses, par exemple). À l'étape préliminaire, on peut baser le choix de la probabilité annuelle sur une classification sommaire des ouvrages qui tient compte de leur envergure et des dangers potentiels d'une rupture (e.g. Aubertin *et al.* 2002a). Les dangers liés à une rupture (qui contrôlent le risque) dépendent alors des impacts économiques et environnementaux et des risques de pertes en vies humaines potentielles. Il est utile de rappeler que la rup-

ture d'une digue peut avoir des conséquences désastreuses sur les écosystèmes locaux, surtout lorsque les eaux sont déjà contaminées ou que les rejets sont une source potentielle de contamination chimique (comme c'est le cas pour le drainage minier acide, DMA, et le drainage neutre contaminé, DNC).

Le choix définitif de la probabilité annuelle d'occurrence p_a devrait être basé sur la probabilité cumulative de défaillance (choisie selon le risque), qui peut s'exprimer de la façon suivante (Vick, 1990; Aubertin et al., 1997, 2002a; Mays, 2001) :

$$\text{Equation n}^\circ 1 : P_{cum} = 1 - (1 - p_a)^i \quad (1)$$

où P_{cum} est la probabilité cumulative (généralement exprimée en %) que l'événement critique (précipitation) survienne durant une période de durée i (exprimée en années). Comme on l'a vu, cette probabilité annuelle p_a (= AEP, « Annual Exceedance Probability ») représente l'inverse de la période de retour PR exprimée en années ($p_a = 1/PR$).

L'équation 1 indique que pour une durée de vie $i = 100$ ans, suggérée ici comme valeur minimale de référence pour tous les types d'ouvrages miniers pendant l'opération, la valeur de p_a serait d'environ 1/2 000 pour une probabilité de dépassement $P_{cum} = 5\%$, de près de 1/1 000 pour $P_{cum} = 10\%$, et de l'ordre de 1/450 pour $P_{cum} = 20\%$. Pour une durée de vie de 1 000 ans, suggérée par l'ACB-CDA (2010) pour les sites miniers en phase de fermeture, on obtient alors $p_a \leq 10^{-4}$ (= 1/10 000) pour une probabilité P_{cum} d'environ 10 %. Cette dernière valeur de p_a constitue d'ailleurs une valeur cible de plus en plus fréquemment utilisée en géotechnique pour établir la condition acceptable relativement à la probabilité de défaillance.

La pratique courante est souvent basée sur une probabilité cumulative P_{cum} de défaillance des ouvrages de l'ordre de 10 %. Toutefois, cette probabilité devrait être réduite à 5 % lorsque les risques associés à une rupture sont sévères (Read et Stacey, 2009). La version récente du Code national du bâtiment du Canada (CNB, 2005, 2010) recommande pour sa part (dans le cas des séismes) une valeur de P_{cum} de 2 %, pour une durée de vie utile des ouvrages de 50 ans (voir plus loin).

À la fermeture, les ouvrages maintenus en fonction sur les sites miniers doivent demeurer stables pour une très longue période de temps (i.e. de durée indéterminée). En ce sens, plusieurs spécialistes et organisations considèrent que la crue de projet choisie pour le plan de fermeture d'un site minier devrait être basée sur la précipitation maximale probable (PMP). Dans certains cas, on pourrait considérer une précipitation moindre, en s'assurant cependant que la probabilité d'excéder la capacité du bassin demeure inférieure à une probabilité cumulative jugée acceptable pour la période considérée. Par exemple, D'Appolonia Engineering (2009) recommande que

la crue de projet à long terme (à la fermeture) soit basée sur une valeur supérieure ou égale à 0,5 CMP pour les situations engendrant de faibles risques; la CMP est recommandée si les risques sont significatifs ou élevés. Cette firme spécialisée recommande aussi que l'analyse de la crue de projet prenne en considération des précipitations pouvant atteindre une durée de 10 jours (plutôt que 24 heures, comme c'est habituellement le cas). La Commission Européenne (European Commission, 2009) recommande pour sa part une probabilité annuelle $p_a \leq 1/5\ 000$ (ou même 1/10 000) pour les digues de bassin d'accumulation d'eau qui engendrent des risques élevés à très élevés. Comme on l'a mentionné, la valeur recommandée par l'ACB-CDA (2010) devrait être basée sur une durée de vie minimale de 1 000 ans, ce qui mène à une valeur de $p_a \leq 10^{-4}$ (pour $P_{cum} \leq 10\%$).

Il convient de rappeler à nouveau que les tendances liées aux données climatiques récentes augmentent l'incertitude sur la valeur des données climatiques anciennes qui sont utilisées pour les analyses statistiques. On peut donc anticiper des écarts marqués entre les précipitations antérieures et celles qui devraient être observées au cours des prochaines décennies. Il est cependant hasardeux de prédire l'effet des changements climatiques sur les événements extrêmes. Il faut aussi noter que les données climatiques accumulées dans certaines régions sont affectées par la durée limitée de la période d'observation. Ceci peut créer un biais en faveur des années récentes, négligeant ainsi certains événements critiques plus reculés dans le temps.

Lors du dimensionnement des ouvrages de retenue d'eau, on doit établir une revanche minimale entre l'élévation maximale de l'eau en amont et l'élévation (cote) maximale de la crête. Cette revanche sert de protection contre les vagues, contre le tassement éventuel et contre tout mauvais fonctionnement des ouvrages d'évacuation. La hauteur minimale de protection serait de 1 m plus une hauteur équivalente à 1,5 fois la dimension de la vague la plus haute, soit de 0,3 à 2,0 m (selon les dimensions du bassin inondé), plus une hauteur de courbure d'environ 0,2 à 1 % de la hauteur de l'ouvrage afin de tenir compte des tassements après la construction (Aubertin et al., 1997, 2002a). Au Québec, une hauteur de revanche minimale de 2 à 3 m devrait idéalement être maintenue dans les situations courantes, afin notamment de tenir compte des dommages liés à la pénétration du gel. Les documents de l'ACB-CDA (2007, 2010) recommandent des méthodes spécifiques pour évaluer la revanche des digues selon les conditions de précipitations envisagées, pendant l'opération et à la fermeture des sites miniers.

2.2 Écoulements de l'eau et pressions interstitielles

L'évaluation des réseaux d'écoulement dans les digues de

parcs à résidus fait appel à la loi de Darcy, en tenant compte des conditions aux frontières et de la nature des matériaux (Vick, 1990; Aubertin *et al.*, 2002a). Toutefois, la présence de matériaux solides en amont des digues, l'effet de l'accumulation progressive des rejets et l'anisotropie de perméabilité des résidus peuvent rendre cette évaluation relativement imprécise. Il est alors nécessaire de porter une attention particulière à la position de l'eau libre et à la longueur de la plage de résidus non submergés, ainsi qu'aux pressions interstitielles en excès générées durant le remplissage des bassins (Aubertin *et al.*, 2011).

Les réseaux d'écoulement ainsi construits sont plus représentatifs lorsque l'on connaît bien les caractéristiques internes du système, comme c'est habituellement le cas pour les digues zonées, formées de sols naturels. L'incertitude est plus grande pour les digues construites avec des rejets, surtout dans le cas de la méthode amont.

Lors de l'analyse et de la conception, on doit viser à ce que le niveau phréatique ne puisse pas atteindre la face aval de la digue de retenue afin d'éviter le suintement et le ruissellement des eaux sur le flanc de la digue. Au besoin, le niveau de la nappe devrait être rabattu par un drain de pied ou un tapis drainant (pour la méthode amont), ou à l'aide d'un drain cheminée (pour les méthodes aval et de l'axe central); des exemples de tels systèmes sont présentés dans Aubertin *et al.* (2002a). La mise en place d'un noyau imperméable peut aussi aider à abaisser la nappe à un niveau acceptable dans la portion aval de la digue.

Il est également nécessaire d'éviter que la surface de l'eau libre dans le bassin d'entreposage ne vienne en contact directement avec la face amont de la digue. Une plage d'une longueur minimale d'environ 100 m est habituellement requise afin d'abaisser suffisamment le niveau de l'eau par rapport à la face de la digue (e.g., Vick, 1990). On doit alors s'assurer que ses berges ne sont pas affectées de façon excessive par l'érosion éolienne et hydrique.

Comme mentionné plus haut, les analyses du réseau d'écoulement se font habituellement pour des conditions (pseudo) stationnaires en conditions saturées. Mais puisque l'on retrouve dans les parcs à résidus des conditions transitoires avec des venues d'eau et un niveau qui change au cours du temps, et un degré de saturation variable, il est avantageux de mener les analyses à l'aide de méthodes numériques (Chapuis *et al.*, 2001). Une telle approche permet d'évaluer les pressions interstitielles en tout point de la digue et d'estimer de façon plus réaliste les débits de fuite. On peut aussi coupler ce réseau avec un calcul de stabilité pour évaluer le facteur de sécurité de l'ouvrage.

3. Modes d'instabilité

3.1 Instabilités dues à l'érosion

L'érosion est un problème communément rencontré sur les parcs à résidus. L'érosion de surface peut être due à l'eau de ruissellement et au vent. Ce type d'érosion est fonction du climat, de l'érodabilité des matériaux (selon la taille des particules et leur cohésion), de la présence de végétation, ainsi que de la longueur et de l'angle de la pente des talus (Aubertin *et al.*, 2002b; Blight, 2010). La végétation est généralement considérée comme le moyen le plus efficace pour prévenir l'érosion de surface à long terme. Les plantes peuvent aussi contribuer à la stabilité des pentes en abaissant la nappe et en agissant comme renforcement. La végétalisation des digues et des rejets doit toutefois se faire de manière à ne pas mettre en danger l'intégrité et la performance des ouvrages, ce qui implique un choix approprié des plantes et un suivi de la croissance et de la diversification naturelle.

Lorsqu'il y a débordement en crête, l'érosion rapide qui en découle peut initier l'apparition et la progression de brèches à travers les digues. Celles-ci peuvent se développer jusqu'à la ruine complète de l'ouvrage. Il existe quelques méthodes pour prédire les caractéristiques du développement d'une brèche à partir des attributs géométriques de la digue, des propriétés des matériaux et des paramètres liés aux causes du problème, mais la prévision de ce phénomène reste difficile (Marche, 2008), particulièrement dans le cas des ouvrages miniers. L'analyse de la formation de brèches devrait aussi inclure une estimation de l'ampleur de la zone inondée par le déversement qui en découle; pour les ruptures de digues de résidus miniers, la grandeur de cette zone peut varier de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres (Vick, 1991; Rico *et al.*, 2008).

Plusieurs cas de ruptures de digue ont été attribués à l'érosion régressive des matériaux à travers les digues et leur fondation. L'érosion régressive (souvent associée au phénomène de renard, ou « piping ») est un phénomène qui se produit lorsqu'il y a une circulation d'eau importante au travers de la digue ou sa fondation. Ces écoulements peuvent, petit à petit, entraîner des particules fines, ce qui accélère l'écoulement jusqu'à la formation d'un véritable conduit dans le corps de l'ouvrage. En pratique, l'érosion régressive se produit lorsque les débits de percolation (et le gradient hydraulique) n'ont pas été bien contrôlés, ou encore lorsque les filtres et/ou drains ont été mal conçus ou mal construits. La présence d'un chemin de moindre résistance, comme des fissures, des voies de percolation à proximité des conduites rigides, ou des zones lâches dans des matériaux hétérogènes, favorisent le développement d'érosion régressive. Outre l'érosion interne (aussi appelée suffosion), qui désigne la migration des particules fines au

sein d'un matériau unique, l'érosion régressive inclut plusieurs phénomènes particuliers, telle l'érosion de contact, de colmatage, et de filtration (Chapuis, 1995; Aubertin *et al.*, 2002b). La stabilité dépend alors de plusieurs facteurs, incluant l'ampleur du gradient hydraulique (Schmertmann, 2002). Pour réduire les risques d'érosion interne, il faut inclure des dispositifs pour diminuer le gradient hydraulique, soit en contrôlant le niveau de la nappe phréatique en amont ou dans la digue (p. ex. drains et filtres), soit en augmentant les pertes de charges et/ou la longueur du chemin de percolation.

3.2 Stabilité face aux sollicitations (quasi) statiques

Le mode d'instabilité le plus critique est souvent associé aux pentes des talus formés par les digues. Les méthodes courantes d'analyse de stabilité de pente constituent des outils très répandus et relativement bien connus et documentés (Hustrulid *et al.*, 2000; Duncan et Wright, 2005; McCarthy, 2007; D'Appolonia Engineering 2009; Chowdury *et al.*, 2010; Read et Stacey, 2009). Ces méthodes sont basées sur le principe de l'équilibre limite suivant lequel le matériau circonscrit par une ou plusieurs surfaces de géométrie donnée (circulaire, plane ou autre) glisse le long de cette surface comme un corps rigide. Les calculs ainsi réalisés visent à évaluer un facteur (ou coefficient) de sécurité FS global (unique) à partir du rapport entre la capacité C (résistance disponible) et la demande D (sollicitations induites), exprimées selon les contraintes, les forces, les moments ou d'autres expressions appropriées (i.e. $FS = C/D$). Selon les mêmes principes, on peut également évaluer la marge de sécurité MS ($= C-D$) face à la rupture (Baecher et Christian, 2003). L'évaluation de FS (et de MS) devrait être basée sur le comportement ultime (post-pic, stationnaire, ou à l'état critique) du matériau plutôt que sur le comportement au pic (qui dépend trop fortement de l'état local).

La nature de l'ouvrage et ses caractéristiques permettent de fixer une valeur de FS acceptable pour une pente. En général, on considère que cette valeur ne devrait pas être inférieure à 1,5 dans le cas du comportement d'ouvrages d'envergure à long terme (Duncan et Wright, 2005; Chowdury *et al.*, 2010; Read et Stacey, 2009).

Les approches conventionnelles d'analyse, développées surtout pour les ouvrages de génie civil, doivent être adaptées pour tenir compte des particularités des ouvrages miniers qui sont construits progressivement, souvent sur plusieurs années, avec des matériaux hétérogènes et de faibles indices de densité. Les paramètres de résistance et les pressions interstitielles doivent être estimés selon le type d'ouvrage et le mode de construction (Vick, 1990; Aubertin *et al.*, 2002a).

Dans le cas où la variabilité des propriétés est un facteur clé (comme lorsque les digues sont faites de résidus), on devrait

utiliser des méthodes d'analyses basées sur une approche probabiliste (stochastique), qui sont de plus en plus utilisées pour évaluer la stabilité des ouvrages géotechniques d'envergure ou à risque (Baecher et Christian, 2003; Duncan et Wright, 2005; Chowdury *et al.*, 2010; Read et Stacey, 2009). De plus, l'évaluation de l'indice de fiabilité (« reliability index »), en complément du facteur de sécurité, devrait être considérée car cet indice peut apporter un complément d'information très pertinent qui aide à la prise de décision pour la conception (Baecher et Christian, 2003; Duncan et Wright, 2005); il s'agit d'une approche relativement nouvelle, qui est peu utilisée à ce jour pour les ouvrages miniers, mais qui devrait être considérée sérieusement pour les projets en cours et à venir.

On peut aussi compléter les analyses par des méthodes numériques qui permettent d'évaluer les contraintes et les déformations (par différences finies ou éléments finis par exemple). Ces méthodes servent à compléter les analyses de stabilité plus classiques, car elles permettent notamment d'évaluer les possibilités de rupture progressive et d'estimer les déplacements induits (Krahn, 2001). On peut aussi utiliser ces approches numériques pour évaluer l'effet de conditions de saturation variables (Fredlund et Rahardjo, 1993; Blight, 2010).

La détermination des paramètres géotechniques appropriés, à partir d'essais de laboratoire ou de terrain, ou selon des essais index (comme l'indice de pénétration standard, N, ou la résistance en pointe au cône), est un volet critique pour l'analyse de stabilité. Une caractérisation partielle ou incomplète des matériaux (et des sites) ajoute à l'incertitude relativement à la stabilité des ouvrages.

L'analyse de la stabilité doit être réalisée pour diverses étapes de construction et de conditions de chargement, incluant la fin de la construction du remblai d'amorce et à chacune des étapes de montée des digues. Il faut aussi procéder à l'évaluation de la capacité portante des sols de fondation, des tassements immédiats et différés dans le temps, et de la stabilité des pentes pour une rupture dans le remblai seul ou dans le remblai et dans le sol. Pour les instabilités de remblais formés de matériaux cohérents (mettant ou non en jeu les matériaux de fondation), l'analyse devrait se faire pour la condition critique à court terme (condition non consolidée, non drainée, i.e. $\phi = 0$ et $c = c_u$) et les conditions à plus long terme (consolidées et drainées avec les paramètres c', ϕ').

L'angle de la pente de la digue joue un rôle critique à l'égard de sa stabilité physique. Pour favoriser le programme de restauration à la fermeture du site, on suggère couramment un angle inférieur ou égal à 18° (~ 3H : 1V). Un angle de l'ordre de 12° (~ 5H : 1V) est souvent souhaitable pour favoriser la revégétation et la stabilité à long terme (Vick, 1990).

On doit aussi porter une attention particulière aux ruptures

peu profondes ou localisées (au bas des pentes par exemple) et aux glissements le long des interfaces. La construction de remblais sur des sols mous (comme certaines argiles) demande aussi une grande attention. On doit notamment évaluer les tassements dus à la consolidation primaire (hydrodynamique) et secondaire (fluage) du sol. L'analyse de la stabilité d'une digue de retenue requiert aussi qu'on vérifie si celle-ci peut résister aux efforts latéraux qui induisent le glissement de la base à l'interface avec le sol en place ou dans une couche molle, plus profonde. La pression latérale exercée sur une digue influence aussi la stabilité de la fondation puisqu'elle crée des efforts additionnels.

Dans certains cas, on peut améliorer la stabilité des digues en produisant des résidus miniers plus denses (épaissis ou en pâte). Mais même les résidus densifiés ne sont pas une garantie de stabilité, comme on l'a observé en Hongrie le 4 octobre 2010 lorsqu'une digue céda en raison d'une fondation sur argile qui a subi un glissement (Gruiz *et al.*, 2012), produisant un des pires désastres dans le domaine minier européen au cours des dernières années.

3.3 Chargements dynamiques

La plupart des ouvrages géotechniques sont susceptibles aux effets des sollicitations dynamiques (souvent cycliques), qui affectent à la fois la réponse des matériaux (i.e. leur résistance à la déformation et à la rupture) et les modes de sollicitation (pressions interstitielles, contraintes totales et effectives). Ces aspects sont abondamment documentés dans la littérature (Kramer, 1996; Fell *et al.*, 2005; Idriss et Boulanger, 2008; D'Apollonia Engineering, 2009; Day, 2010). Les ouvrages miniers peuvent ainsi être affectés par des chargements dynamiques induits par les efforts sismiques, et occasionnellement par le dynamitage ou la machinerie. Comme ce sont surtout les matériaux pulvérulents, fins, lâches et saturés qui sont les plus susceptibles de causer des problèmes, les digues construites avec des résidus (particulièrement avec la méthode amont) sont plus sensibles à ces effets (James et Aubertin, 2010, 2012). De nombreux cas de ruptures liés aux séismes ont d'ailleurs été répertoriés (CIGB, 2001), impliquant, dans la vaste majorité des cas, des digues (en opération) construites par la méthode amont. En majorité, les défaillances survenues sur des ouvrages inactifs ont aussi été reliées à des digues construites par la méthode amont. La conception des ouvrages miniers en relation avec l'effet des séismes implique plusieurs étapes et composantes qui sont résumées ici.

3.3.1 Caractéristiques des sollicitations sismiques

Les conditions de sollicitations sismiques sont définies en termes de magnitude (selon diverses échelles), de l'accélération maximale au pic (PGA) et spectrale (valeur horizontale selon la période), de la durée, de l'énergie, et du contenu fréquentiel. La réponse des matériaux meubles à de tels charge-

ments dynamiques (ou cycliques) a fait l'objet de nombreuses études de laboratoire et de terrain (voir références citées plus haut). Le cas particulier des résidus miniers a été analysé par James *et al.* (2011), qui citent aussi plusieurs autres études antérieures. Ces diverses études ont montré que le comportement dynamique dépend de plusieurs facteurs, incluant les caractéristiques du séisme et du matériau (degré de saturation, granulométrie, indice de densité, conductivité hydraulique, historique de déformation).

Le point de départ des analyses de stabilité face aux sollicitations sismiques est la détermination des caractéristiques du séisme de conception pour le projet. Au Canada, on utilise couramment les données de la Commission géologique du Canada, issus spécifiquement des travaux de Adams et Halchuk (2004), qui forment la base de référence du Code national du bâtiment du Canada (CNB, 2005, 2010) et du Manuel canadien d'ingénierie des fondations (CGS, 2006). Les cartes de zonage récemment produites indiquent que plusieurs régions minières du Québec font partie de la Région Est du Canada, qui montre un potentiel sismique significatif. Ces données et sur leurs implications pour les ouvrages miniers sont aussi discutés dans Aubertin *et al.*, (2011)

Adams et Halchuk (2004) soulignent aussi les fortes incertitudes associées aux données et aux analyses proposées dans le CNB (2005, 2010), ce qui devrait inciter les concepteurs des ouvrages à adopter une approche conservatrice (mais réaliste) pour le choix de la probabilité annuelle p_a , afin de dégager une marge de sécurité lorsqu'il y a un risque d'instabilité sismique (surtout lorsque la liquéfaction est un facteur à considérer). Par exemple, il est suggéré d'utiliser $p_a \leq 10^{-4}$ pour les ouvrages de retenue présentant des risques élevés d'instabilité face aux séismes (ACB-CDA 2007). Ce risque est fonction de la probabilité de défaillance et des dégâts engendrés.

3.3.2 Stabilité des pentes

Les événements sismiques peuvent déstabiliser les pentes (Chowdury *et al.*, 2010) et cet aspect doit faire l'objet d'évaluations spécifiques. L'analyse de stabilité des pentes des ouvrages vis-à-vis des conditions de chargement dynamique peut se faire selon plusieurs méthodes, mais l'approche pseudo-statique constitue encore aujourd'hui la technique d'analyse la plus utilisée. Selon cette approche, partiellement empirique, on procède à une analyse de stabilité par les méthodes conventionnelles d'équilibre limite en ajoutant au poids de la zone cisailée une force horizontale appliquée au centre de gravité de la masse. La grandeur de cette force horizontale est contrôlée par le coefficient sismique n_g , qui peut être relié (indirectement) à l'accélération de projet (Aubertin *et al.*, 2002a; Day, 2010).

En principe, la détermination de l'accélération de projet (et des autres caractéristiques du séisme de conception) peut se

faire essentiellement de la même manière que le choix de la crue de conception (et des autres événements récurrents, de nature probabiliste). Les indications du CNB (2005, 2010) fournissent des balises à cet égard, notamment pour la valeur de la probabilité annuelle acceptable. On note aussi que pour la fermeture des sites miniers, la valeur de l'accélération de projet est de plus en plus souvent basée sur le séisme maximal probable (MCE, « Maximum Credible Earthquake »), ou sur une forte proportion de cette valeur.

L'analyse pseudo-statique conventionnelle constitue une approche préliminaire qui vise un premier niveau d'évaluation du risque potentielle. Cette approche n'est pas toujours suffisante (ni même adéquate) pour prédire le comportement des digues et des remblais en cas de sollicitations sismiques sévères, car elle ne tient pas compte de plusieurs facteurs importants tels la distribution des forces dynamiques dans la masse, l'augmentation des pressions interstitielles, la réduction de la résistance du matériau, les déformations induites et l'effet des sollicitations cumulées. On peut néanmoins considérer que la méthode pseudo-statique est acceptable pour des analyses de base lorsque les digues sont peu élevées (hauteur ≤ 15 à 20 m par exemple), dans des zones où l'accélération est relativement faible ($\leq 0,15$ g) et où les risques (et les dommages potentiels) sont minimales.

Pour les cas plus critiques, il faut avoir recours aux méthodes d'analyses plus élaborées. Les développements récents au niveau des lois de comportement et des outils de calculs numériques permettent d'ailleurs de réaliser des analyses plus complètes, afin d'évaluer globalement l'état des contraintes (totales et effectives) et des déformations dans les ouvrages miniers lors des événements sismiques (D'Appolonia Engineering, 2009; James et Aubertin, 2010, 2012). On peut anticiper que de telles approches seront de plus en plus souvent utilisées au cours des prochaines années car elles sont plus représentatives du comportement réel des matériaux et des structures.

3.3.3 Liquéfaction

Lorsque des sols ou des résidus miniers saturés et compressibles sont soumis à des sollicitations mécaniques cycliques, le drainage peut être trop lent pour accommoder une contraction rapide du volume (densification). Il en résulte une augmentation de la pression interstitielle qui réduit les contraintes effectives et, par conséquent, la résistance au cisaillement du matériau. Ce phénomène, appelé liquéfaction (qui inclut aussi le phénomène de mobilité cyclique), est rencontré surtout avec les matériaux pulvérulents ayant un comportement contractant et contenant une assez forte proportion de particules fines (Kramer, 1996; Fell et al., 2005; Idriss et Boulanger, 2008; James et al., 2011). Suite à sa liquéfaction, le matériau meuble se comporte comme un fluide ayant le poids volumique du matériau saturé. Il peut en découler des consé-

quences importantes, notamment en ce qui a trait aux pressions sur les ouvrages de retenue (qui peuvent pratiquement doubler en quelques secondes).

Il est bien connu que les résidus de mines en roches dures sont particulièrement susceptibles au phénomène de liquéfaction en raison de leur très forte teneur en eau, de leur faible densité et de leur comportement contractant (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a, 2011; James et al. 2011, 2012).

La résistance des matériaux face aux sollicitations dynamiques peut être évaluée par le biais d'essais cycliques de laboratoire (compression triaxiale, cisaillement simple), des mesures à la centrifugeuse, des essais sur table sismique, et par des essais en place comme l'essai de pénétration standard (SPT) ou préférentiellement l'essai de pénétration au cône (CPT) (e.g. Holtz et Kovacs, 1991; Kramer, 1996; Idriss et Boulanger, 2008).

Le facteur (ou coefficient) de sécurité FS face à la liquéfaction est communément défini en comparant la résistance au cisaillement cyclique mobilisable du matériau (CRR) à la contrainte de cisaillement critique induite suite aux sollicitations dynamiques (CSR) anticipées (CGS, 2006; Idriss et Boulanger, 2008). L'évaluation de FS prend alors en compte une série de facteurs, incluant la magnitude du séisme, la résistance cyclique, l'effet de la profondeur et l'état des contraintes initiales. Pour ces raisons, la valeur du facteur de sécurité FS contre la liquéfaction des matériaux (sols, rejets) n'est pas unique pour un événement sismique donné, car elle varie dans le temps et selon la localisation (Idriss et Boulanger, 2008). On ne peut donc pas définir un critère de stabilité unique à cet égard, mais on devrait tout de même viser $FS > 1$ en tout point.

Le danger de liquéfaction peut aussi être évalué par des analyses numériques en contraintes effectives, avec solutions couplées ou découplées (James et Aubertin, 2012). Dans ce cas, on utilise souvent le rapport des pressions interstitielles, r_u (= surpressions induites/ contraintes effectives naturelles) pour établir l'imminence de la liquéfaction (i.e. $r_u \sim 1$ devient la situation critique); la valeur de r_u peut aussi être reliée à celle du facteur de sécurité FS (Idriss et Boulanger, 2008).

La résistance au cisaillement des résidus liquéfiés est nettement moindre (souvent 10 à 20 %) que la résistance au cisaillement initiale. Cette perte de résistance peut entraîner des déformations excessives ou une rupture. Des problèmes de stabilité peuvent aussi se produire même si la liquéfaction n'est pas atteinte, car la génération des pressions interstitielles due à un séisme réduit la résistance à la déformation et la rupture des matériaux.

A noter enfin qu'il peut aussi y avoir une liquéfaction statique lorsque l'augmentation de la pression interstitielle et la perte de résistance au cisaillement se produisent sous l'action d'un

chargement quasi-statique, comme lors de l'application d'une surcharge (Fell et al., 2005). Ce type de liquéfaction serait à l'origine de la rupture, en 1994, de la digue de retenue des résidus à Merriespruit, en Afrique du Sud, qui causa 17 morts, ainsi que de graves dégâts matériels et environnementaux (Blight, 2010).

4. Critères de stabilité

Une fois que l'on a déterminé adéquatement les propriétés géotechniques des matériaux utilisés dans la construction des ouvrages (i.e. sols de fondation, remblais et rejets), à l'aide d'essais de laboratoire et de terrain (ou par méthodes prédictives éprouvées), il faut définir les modes d'instabilité potentiels qui dictent les solutions à appliquer pour évaluer la capacité C de l'ouvrage face aux sollicitations imposées. Il faut aussi établir le mode et l'ampleur de ces sollicitations, qui contrôlent la demande D . Ceci permet d'évaluer la stabilité des ouvrages par le biais d'un facteur de sécurité $FS (= C/D)$ global, ou (plus rarement) d'une marge de sécurité $MS (= C-D)$.

4.1 Choix des événements récurrents

Un élément essentiel pour déterminer les conditions de sollicitations consiste à fixer la probabilité de défaillance acceptable pour l'ouvrage pour sa durée de vie. Cette probabilité de défaillance contrôle l'ampleur des événements critiques occasionnels inclus dans les analyses, via la probabilité annuelle $p_a (= AEP)$. La méthode de calcul pour évaluer la probabilité cumulative P_{cum} de défaillance a été présentée plus haut (équation 1; voir aussi Aubertin et al., 1997, 2002a; Mays, 2001; ACB-CDA, 2010). La pratique courante est souvent basée sur une probabilité cumulative P_{cum} maximale de 10 % pour la durée de vie des ouvrages (qui sont maintenus en bon état durant toute cette période). On considère que celle-ci devrait être réduite à 5 % lorsque les risques (dangers) associés à une défaillance deviennent sévères (Read et Stacey, 2009).

La détermination de la durée de vie des ouvrages peut être assez délicate, particulièrement lors de l'analyse des conditions de fermeture. Il faut ici considérer le fait que les ouvrages qui subsistent dans le programme de restauration d'un site minier doivent demeurer stables à très long terme. En ce sens, Vick (2001) considère que plusieurs de ces ouvrages deviennent alors « permanents » (i.e. d'une durée de vie indéfinie). Plusieurs organisations ont aussi émis récemment des recommandations visant à allonger la durée de vie de conception des ouvrages dans le plan de fermeture (par rapport aux pratiques antérieures). Par exemple, l'Association canadienne des barrages (ACB-CDA, 2010) recommande une durée de vie minimale de 1 000 ans pour les ouvrages miniers; on y recommande aussi l'utilisation d'une probabilité annuelle $p_a \leq 10^{-4}$ pour la crue de projet après la fermeture des sites miniers.

Cette valeur de $p_a (= AEP = 1/10\ 000)$ est également recommandée par plusieurs autres organisations (pour les travaux publics et miniers). Lorsque les ouvrages sont "permanents" à la fermeture du site, Vick (2001) recommande de baser leur conception sur les événements les plus critiques qui peuvent survenir (i.e. PMP et CMP pour les précipitations, et le séisme maximal crédible - MCE). Aubertin et al. (1997, 2002a) ont aussi fait cette recommandation pour tous les bassins de rétention d'eau (comme dans le cas des couvertures aqueuses) car ils doivent maintenir leur intégrité à très long terme. D'Apollonia Engineering (2009) recommande de son côté que la crue de projet à la fermeture soit choisie entre 0,5 PMP et la PMP (selon le risque), ce qui correspondrait à $p_a \leq 10^{-5}$ à 10^{-4} . De telles valeurs de la probabilité annuelle $p_a (= AEP)$ sont inférieures (d'au moins un ordre de grandeur) à la pratique courante appliquée à plusieurs sites miniers.

Pour les événements sismiques, les nouvelles normes du CNB (2005, 2010) imposent $p_a \leq 4 \times 10^{-4}$ pour des ouvrages qui ont une durée de vie utile de 50 ans. Pour des ouvrages plus persistants, comme c'est le cas avec certains des ouvrages miniers à la fin des opérations, il serait préférable d'opter pour une valeur de p_a plus faible (i.e. le séisme maximal crédible, MCE) tel que recommandé par Vick (2001) et Aubertin et al. (2002a); dans ce cas, la magnitude du séisme pourrait atteindre 7,5 (à 8) pour certaines portions du territoire québécois (selon les données de Adams et Halchuk, 2004).

4.2 Classification des ouvrages et facteurs de sécurité

Après avoir statué sur les événements récurrents inclus dans les calculs, on doit procéder aux analyses de stabilité à proprement parler. On évalue alors la valeur du FS , qui est ensuite comparée aux valeurs cibles.

Les valeurs de FS retenues pour la conception des digues de retenue (et structures connexes) peuvent dépendre des caractéristiques des ouvrages. Par exemple, un exemple de classification selon l'envergure est présenté par Aubertin et al. (2002a). Une classification du même type, mais plus restrictive, est utilisée depuis peu pour les digues et barrages du Québec (MDDEP, 2011).

Le choix du facteur de sécurité dépend aussi, et surtout, des dangers (conséquences d'une défaillance), qui affectent directement les risques que présente l'ouvrage. À cet égard, Aubertin et al. (1997, 2002a) ont présenté une classification selon trois niveaux de danger (faible, significatif, élevé) qui tient compte des pertes économiques, des pertes de vies humaines et des impacts environnementaux. Plus récemment, l'ACB-CDA (2010) a proposé une classification analogue, mais qui inclut aussi les impacts sociaux et qui comporte cinq niveaux de risque (de faible à extrême). En l'absence d'une analyse

de risque spécifique, fortement suggérée pour les ouvrages géotechniques majeurs (Fenton et Griffiths, 2008), cette classification semble appropriée pour évaluer les conditions qui s'appliquent pendant l'opération de la mine et à la fermeture.

Le facteur de sécurité FS global peut être calculé avec les méthodes conventionnelles d'analyse de la stabilité géotechnique (Duncan et Wright, 2005; McCarthy, 2007; Chowdury et al., 2010; Day, 2010). Comme on l'a déjà mentionné, la valeur de FS est définie numériquement comme le rapport entre la résistance mobilisable (la capacité C) et la sollicitation appliquée en termes de contraintes, de forces et/ou de moments (la demande D). Le facteur (coefficient) de sécurité jugé acceptable varie selon la nature des ouvrages, le mode de rupture, le type de sollicitations et la probabilité d'apparition de l'événement. De telles valeurs ont été proposées par Aubertin et al. (1997, 2002a) pour la stabilité des pentes amont et aval (court-terme et long terme), le glissement des digues due à la poussée des terres, la résistance de la fondation et l'effet des séismes. A titre d'exemple, une valeur de $FS = 1,5$ est souvent prescrite pour la stabilité des pentes d'ouvrages d'envergure, selon un comportement à long terme. Des valeurs cibles de FS sont aussi proposées par Fell et al. (2005), Duncan et Wright (2005), ACB-CDA (2007), et Chowdury et al. (2010).

5. Considérations complémentaires

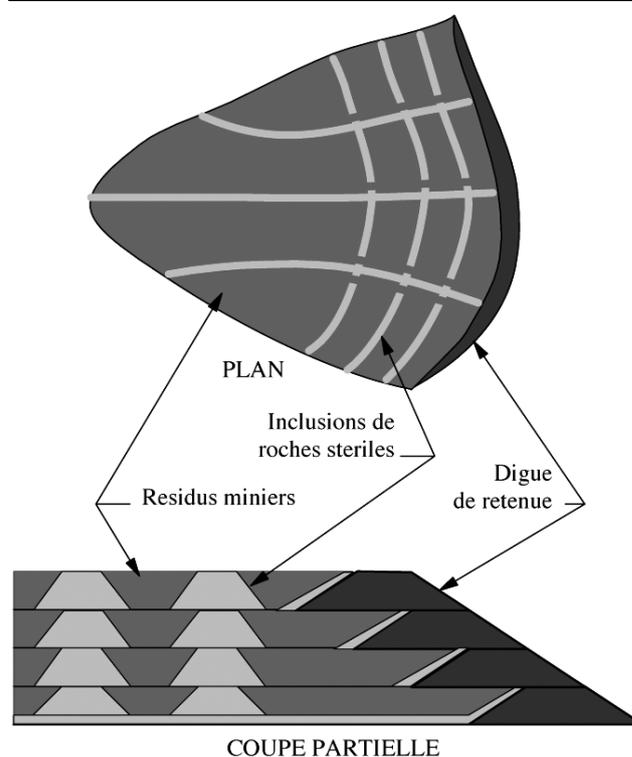
5.1 Amélioration de la stabilité

Plusieurs recommandations ont été formulées au fil des ans afin d'améliorer la stabilité des ouvrages de retenue et de confinement des rejets de concentrateur (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a, b, 2011; Fell et al., 2005; D'Appolonia Engineering, 2009; Blight, 2010). On ne répétera pas ici les principes et les techniques qui sont déjà bien connus dans le domaine. On abordera plutôt brièvement certaines des approches plus nouvelles qui peuvent aider à assurer la stabilité des parcs à résidus.

Une première approche consiste à utiliser les rejets de concentrateur (et les stériles) comme remblai souterrain (et dans certains cas, pour remblayer des fosses). Il s'agit d'une façon efficace de réutiliser des rejets en minimisant leur quantité et leur empreinte en surface. Cette technique est particulièrement intéressante dans le cas des résidus réactifs (générateurs de DMA) puisque les techniques de remblayage modernes (i.e. remblai en pâte cimenté) leur assurent une certaine stabilité chimique (Benzaazoua et al., 2008). Lorsque combinée à la désulfuration environnementale, cette technique de remblayage aide à réduire considérablement les risques environnementaux, et à améliorer la stabilité géotechnique des ouvrages puisque la nappe phréatique peut être abaissée sans risque d'oxydation des résidus dans ce cas.

Il existe aussi d'autres approches pour aider à prévenir les problèmes de stabilité des ouvrages de surface. En particulier, diverses techniques d'épaississement, de densification et d'assèchement des résidus sont susceptibles d'aider la stabilité des résidus. Il s'agit d'approches prometteuses pour aider à améliorer les propriétés mécaniques et hydrauliques des résidus, tout en réduisant les volumes entreposés en surface. Mais il y a relativement peu de cas bien documentés qui démontrent clairement les bénéfices réels (pratiques) associés à la production de tels résidus densifiés.

Figure 1. Inclusions de roches stériles placées dans un parc à résidus miniers (basé sur le concept proposé par Aubertin et al., 2002b, et développé par James et Aubertin, 2010, 2012).



Afin d'optimiser le mode de gestion des rejets solides et liquides sur un site minier, on peut d'autre part envisager de déposer une portion ou la totalité des roches stériles à l'intérieur du parc à résidus (Aubertin et al., 2002b; James et Aubertin, 2010). Les roches stériles, qui ont généralement de meilleures propriétés mécaniques que les rejets de concentrateur, servent alors de matériau de renforcement, en plus de favoriser le drainage et la dissipation des pressions interstitielles. Dans ce cas, les roches stériles peuvent être placées sur le parement amont des digues, et aussi à l'intérieur des bassins de résidus sous forme de tapis drainant et de remblais continus élevés progressivement au fur et à mesure que les rejets y sont accumulés (tel qu'illustré à la figure 1). Les inclusions de roches stériles peuvent également jouer un rôle important pour améliorer la stabilité des parcs à résidus miniers dans le cas de séismes (James et Aubertin, 2010, 2012).

5.2 Auscultation et entretien des ouvrages

L'analyse, la conception, la construction et la fermeture des sites d'entreposage de rejets miniers constituent un ensemble d'activités complexes en raison de la variété des conditions de site, des types de matériaux et de structures, ainsi que des méthodes de construction utilisées. Cette diversité impose une vérification soignée des caractéristiques et des paramètres retenus pour la conception initiale, ainsi qu'un suivi des conditions in situ et des modifications apportées tout au long de la période de construction. Dans plusieurs cas, la conception des ouvrages évolue d'ailleurs pendant la construction, ce qui affecte leur opération ainsi que les conditions qui prévalent lors de la fermeture.

Un des objectifs de l'auscultation est de détecter les anomalies à temps pour apporter des correctifs appropriés, afin de garantir la stabilité physique des ouvrages, et aussi, d'assurer la stabilité géochimique des rejets et la protection de l'environnement. En ce sens, on ne peut pas séparer les aspects géotechniques et environnementaux puisque les deux volets sont reliés ; une défaillance relative à un volet a souvent une incidence directe sur l'autre.

La conception globale d'un programme d'auscultation, y compris le choix des appareils et de leur localisation, se fait en fonction des mesures requises. Les appareils sont sélectionnés selon plusieurs critères (e.g. Aubertin et al., 2002a). Il faut aussi établir la fréquence de lecture des paramètres qui varie tout au long de l'évolution du projet. À la fermeture d'un site minier, l'auscultation doit se poursuivre sur une période assez longue afin que l'on puisse évaluer l'évolution de ses caractéristiques. Une période minimale de 50 ans pourrait être envisagée pour le suivi des sites peu problématiques, alors qu'une période plus longue (100 ans et plus) devrait être considérée pour les cas plus critiques (e.g. les sites potentiellement générateurs d'eaux acides).

Les données mesurées sur le terrain doivent être comparées à celles qui ont été prévues lors de la conception, afin de pouvoir évaluer si le comportement des ouvrages est conforme à ce qui a été anticipé (Aubertin et al., 2011). L'évaluation de la réponse in situ sert aussi à valider les hypothèses de conception et à fournir l'information requise pour modifier certains aspects en cours de route. Il faut aussi être attentif aux observations visuelles et aux indices en découlant. Un grand nombre de problèmes potentiels peut être détecté par l'œil expérimenté et averti. Les instruments fournissent une information très utile, mais qui, seule, conduit rarement à la compréhension de la nature des problèmes rencontrés (Aubertin et al., 2011).

Il est également utile d'insister sur la nécessité d'entretenir convenablement les divers ouvrages pendant l'opération de

la mine et aussi, dans certains cas, après la fermeture. Les ouvrages miniers, comme ceux de génie civil, doivent être conçus de façon à maintenir leur intégrité durant une certaine période. Le cas de la fermeture et de la restauration des sites miniers pose un défi particulier à cet égard.

5.3 Plan d'urgence et analyse de risque

Même si tous les critères de stabilité sont respectés, il demeure toujours une certaine probabilité que des événements exceptionnels ou imprévus provoquent la rupture, partielle ou totale, de l'un ou l'autre des ouvrages de retenue. C'est pour cette raison que l'exploitant, ou son mandataire, doivent préparer un plan d'urgence et définir les mesures appropriées afin d'assurer la sécurité des populations et des écosystèmes avoisinants (Aubertin et al., 2002a). Le plan d'urgence se fonde sur les risques associés à chacun des ouvrages. Pour chaque composante, il est nécessaire de répertorier les risques associés à son utilisation, pendant l'opération et lors de la fermeture. Ces risques dictent les procédures d'intervention. Il convient donc d'examiner chacun des risques associés à la défaillance majeure (rupture) ou mineure d'un ouvrage (cet exercice fait d'ailleurs partie de l'analyse de risque).

Il a d'ailleurs souvent été question dans ce qui précède du risque associé à la défaillance (instabilité, rupture) d'un ouvrage. En raison de la nature même des géomatériaux (sols, roches et rejets) et des impacts qu'une défaillance peut avoir sur le milieu, il semble naturel que le domaine de la géotechnique fasse de plus en plus appel à des outils qui permettent d'évaluer le risque (Fenton et Griffiths, 2008). Celui-ci est défini comme étant la combinaison de la probabilité de défaillance (basée sur les critères de conception déjà énoncés) et de ses conséquences. L'analyse de risque peut constituer un outil très utile dans le secteur minier, et il est d'ailleurs employé de plus en plus régulièrement pour identifier et évaluer les dangers, les conséquences et les responsabilités associées aux divers ouvrages (Read et Stacey, 2009). Ceci est particulièrement opportun puisque des incertitudes significatives affectent souvent les paramètres utilisés pour mener les analyses de stabilité, notamment au niveau des événements récurrents (généralement peu documentés en régions éloignées) et des propriétés des rejets miniers eux-mêmes. Ceci est notamment le cas pour les précipitations, car la courte période de collecte des données historiques et l'incidence possible des changements climatiques (qui ont tendance à modifier la fréquence des événements extrêmes) ont pour effet d'accroître l'incertitude.

6. Conclusions

Les rejets miniers et les ouvrages construits en surface pour leur entreposage peuvent montrer des comportements géotechniques variés et complexes, qui engendrent souvent de

grandes incertitudes. Pour cela, les ingénieurs (et les autres professionnels du domaine) doivent adopter une approche prudente (conservatrice) lors de la conception des ouvrages. À bien des égards, les conditions actuelles du marché rendent encore plus exigeantes les questions reliées à la stabilité des ouvrages, compte tenu des caractéristiques des mines récentes et en développement. Les défis sont très grands, mais les professionnels du domaine sont en mesure de répondre aux besoins si on leur en donne les moyens. Pour cela, ils devraient être impliqués à toutes les étapes de l'analyse et de la conception de ces ouvrages, de leur construction, de l'auscultation et du suivi, et de l'évaluation régulière de leur comportement. Ils doivent aussi être impliqués dans le processus de sélection des modes d'entreposage et de restauration, qui doivent tenir compte des aspects environnementaux aussi bien que des questions relatives à la stabilité physique des ouvrages et des rejets eux-mêmes.

Les ouvrages dont il est question ici devraient être conçus selon une approche qui anticipe des exigences de plus en plus sévères, tant du point de vue géotechnique que par rapport aux contraintes environnementales, appelées à évoluer dans le temps. Dès le départ, il faut concevoir les ouvrages en fonction de la fermeture et de la restauration du site. Cela a souvent été dit, mais en pratique, relativement peu de projets incluent une évaluation détaillée des travaux devant mener à la restauration finale du site.

Afin d'aider ceux qui ont à gérer les sites à long terme, il faut bien documenter chacune des étapes de construction des parcs à résidus. Les informations doivent être disponibles pour le personnel de la mine et les consultants. Les responsabilités relatives au comportement des ouvrages et à d'éventuelles défaillances doivent être bien comprises à tous les niveaux.

Remerciements

Les auteurs soulignent le support financier du CRSNG et des partenaires de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers ; ces travaux se poursuivent dans le cadre de l'Institut de recherche Mines et environnement (IRME UQAT-Polytechnique).

Références bibliographiques

- ACB-CDA (2007). Dam safety guidelines, Association canadienne des barrages – Canadian Dam Association.
- ACB-CDA (2010). Application of 2007 dam safety guidelines to mining Dams - design considerations. Draft (Sept. 2010), Association canadienne des barrages – Canadian Dam Association.
- ADAMS, J., HALCHUK, S. (2004). Implications of Canada's 4th generation hazard model for Canadian Dams. Proc. CDA Annual Conference, Ottawa, 10 p.
- ASCE (1996). Hydrology Handbook. 2nd edition, Management Group D, American Society of Civil Engineers.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., JAMES, M., JAOUHAR, E.M., MARTIN, V., PÉPIN, N., MBONIMPA, M., CHAPUIS, R.P. (2011). Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. C.R. Symposium sur les Mines et l'Environnement, Rouyn-Noranda, CIM, CD Rom, 38 p.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., BERNIER, B. (2002a). Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur cédérom, Presses internationales Polytechnique.
- AUBERTIN, M., DIONNE, J., MARCOUX, L. (1997). Design guidelines and stability criteria of engineering works for water covers. Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, Vol. IV, pp : 1851-1866.
- AUBERTIN, M., MBONIMPA, M., JOLETTE, D., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R.P., JAMES, M., RIFFON, O. (2002b) Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. Défis & Perspectives : Symposium 2002 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, CIM. Comptes-Rendus sur CD-ROM.
- BAECHER, G. B. CHRISTIAN, J.Y (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering. Wiley.
- BENZAASOUA, M., BUSSIÈRE, B., DEMERS, I., AUBERTIN, M., FRIED, É., BLIER, A. (2008) Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. Minerals Engineering 21: 330-340.
- BLIGHT, G. E. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press, Taylor-Francis.
- CGS (2006). Canadian Foundation Engineering Manual. 4th Edition, Canadian Geotechnical Society.
- CHAPUIS, R.P. (1995). Filtration des sols pulvérulents et des sols fins : critères et exemples. Vecteur Environnement, Vol. 28(4), pp : 19-29.
- CHAPUIS, R.P. AUBERTIN, M. (2001). A simplified method to estimate saturated and unsaturated seepage through dikes under steady-state conditions. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp : 1321-1328.
- CHOWDHURY, R., FLENTJE P., BHATTACHARYA, G. (2010). Geotechnical slope analysis, CRC Press, Taylor & Francis, London.
- CIGB (2001). Tailings dams - Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.
- CNB (2005, 2010) Code National du Bâtiment – Canada, Conseil national de recherche.
- D'APPOLONIA ENGINEERING (2009). Engineering and Design Manual – Coal Refuse Disposal Facilities. 2nd Edition, Mine Safety and Health Administration (MSHA), Pittsburgh, PA, USA.
- DAY, R.W. (2010). Foundation engineering handbook – Design and construction with the 2009 International Building Code, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.

- DUNCAN, J.M., WRIGHT, S.G. (2005). Soil strength and slope stability. Wiley.
- EUROPEAN COMMISSION (2009). Management of tailings and waste-rock in mining activities. Reference Document on Best Available Techniques.
- FELL, R., MACGREGOR, P., STAPLETON, D., BELL, G. (2005). Geotechnical engineering of dams. A.A. Balkema - Taylor & Francis, London.
- FENTON, G.A., GRIFFITH, D. H. (2008). Risk assessment in geotechnical engineering. Wiley.
- FREDLUND, D.G., RAHARDJO, R. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc., New-York.
- GRUIZ, K., FEIGL, V., KLEBERCZ, O., ANTON, A., VASZITA, E. (2012). Environmental risk assessment of red mud contaminated land in Hungary, GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, ASCE GSP 225, pp 4156-4165.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.E. (1991). Introduction à la géotechnique (traduit par J. Lafleur). Presses internationales Polytechnique, Montréal.
- HUSTRULID, W.A., MCCARTER, M.K., VAN ZYL, D.J.A. (Eds.) (2000). Slope stability in surface mining. Littleton, Colorado, SME
- IDRISS, I.M., BOULANGER, R.W. 2008. Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.
- JAMES, M., AUBERTIN, M. (2010). On the dynamic response of tailings and the stability of tailings impoundments for hard rock mines. Geotechnical News, Sept. 2010, pp : 39-43.
- JAMES M., AUBERTIN, M. (2012). The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments. GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, ASCE GSP 225, pp : 4166-4175
- JAMES, M., AUBERTIN, M., WIJEWICKREME, D., WILSON, G.W. (2011) A laboratory investigation of the dynamic properties of tailings. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 48, pp. 1587-1600.
- KRAHN, J. (2001). The limits of limit equilibrium analysis. R.M. Hardy Key-note Address. 54th Canadian Geotechnical Conference, Sept. 2001, Calgary, Canada. CD-Rom: 1-18.
- KRAMER, S.L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.
- MCCARTHY, D.F. (2007). Essentials of Soil Mechanics and Foundations. Prentice Hall, 7th ed.
- MARCHE, C. (2008). Barrages, crues de rupture et protection civile. 2e édition. Presses Internationales Polytechnique, Montréal.
- MAYS, L.W. (2001). water resources engineering. John Wiley & Sons.
- MDDEP (2011). Règlement sur la sécurité des barrages, Loi sur la sécurité des barrages. Éditeur officiel du Québec (mise à jour au 1er mars 2011).
- READ, J., STACEY P. (EDS) (2009). Guidelines for open pit slope design. CRC Press.
- RICO, M., BENITO, G., DIEZ-HERRERO, A., (2008). Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials, Vol. 154, pp : 79-87.
- SCHMERTMANN, J.H. (2002). A method for assessing the relative likelihood of failures of embankment dams by piping. Discussion. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, pp : 495-496.
- SNC-LAVALIN (2004). Estimation des conditions hydrométéorologiques conduisant aux crues maximales probables (CMP) au Québec. Rapport final, Ministère de l'environnement, Centre d'expertise hydrique du Québec.
- VICK, S.G. (1990). Planning, design, and analysis of Tailings dam. BiTech Publ., Vancouver.
- VICK, S.G. (1991). Inundation risk from tailings dam flow failures. Proc. IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp : 1137-1158.
- VICK, S.G. (2001). Stability aspects of long-term closure for sulphide tailings. Safe Tailings Dams Constructions, Proc. Seminar in Gaellivare, Sept. 2001, 12 p.

