

RESUME

Les digues construites pour les parcs à résidus miniers doivent être conçues de façon à pouvoir supporter les charges critiques anticipées durant l'opération de la mine et après sa fermeture. Divers incidents survenus au cours des dernières années autour du globe montrent qu'assurer la stabilité géotechnique de ces ouvrages de retenue soulève encore de nombreux défis. Plusieurs organisations revoient présentement leurs lignes directrices relativement aux critères de conception et aux méthodes d'analyse pour évaluer la stabilité des ouvrages de retenue et de confinement des rejets miniers. Dans ce premier article, on revoit la problématique générale, les propriétés usuelles des résidus de mines en roches dures, ainsi que les caractéristiques des digues de retenue. Le deuxième article abordera les principaux facteurs qui affectent la stabilité géotechnique des ouvrages.

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

ABSTRACT

Dikes constructed for tailings impoundment must be designed to support critical loads during mining operation and after closure. Various incidents that occurred over the last few years around the globe have shown that ensuring the geotechnical stability of such retaining works still raises numerous challenges. Many organisations are reviewing their guidelines for the design criteria and methods of analysis to evaluate the stability of tailings dikes. In this first article, the general nature of the problem is reviewed, together with typical properties of tailings from hard rock mines and characteristics of dikes. The second article will address the main factors that affect their geotechnical stability.

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

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

PARTIE I – MISE EN CONTEXTE ET CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

AUBERTIN M.¹, BUSSIÈRE B.², JAMES M.¹, MBONIMPA M.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

Quelques-unes des plus grandes structures construites par l'Homme sont des ouvrages de retenue conçus spécifiquement pour l'entreposage des rejets miniers. Plusieurs de ces ouvrages atteignent une hauteur de plus de 100 m, et leur longueur peut excéder une dizaine de kilomètres. De tels ouvrages peuvent circonscrire des centaines de millions de mètres cubes de rejets solides et liquides, entreposés sur des superficies atteignant plusieurs kilomètres carrés. Les résidus miniers n'ayant habituellement aucune valeur commerciale, leur entreposage requiert une méthode économique et une technologie sécuritaire. Ceci représente un défi car ces résidus montrent souvent des caractéristiques géotechniques complexes qui rendent difficile (et incertaine) la prédiction de leur comportement.

Les entreprises minières et les firmes de consultants spécialisées sont bien conscientes des enjeux et des risques associés à l'intégrité de ces ouvrages de retenue. Néanmoins, on relève encore un nombre trop élevé d'incidents récents à l'échelle nationale et internationale (CIGB, 2001; Davies, 2002; Aubertin et al., 2002a, b; Azam et Li, 2010). Cette situation est préoccupante car la défaillance d'une digue de parcs à résidus miniers peut avoir des conséquences graves pour la sécurité des personnes et des infrastructures. Les instabilités majeures sont aussi susceptibles de causer des torts considérables à l'environnement. Elles peuvent également affecter, très négativement, l'image de l'entreprise responsable et de l'industrie minière en général.

Les solutions aux problèmes observés passent d'abord par une bonne connaissance de l'origine et des propriétés des matériaux (sols et rejets), par l'utilisation systématique de technologies visant à prévenir les problèmes et par un suivi approprié des ouvrages. Les parties impliquées doivent également favoriser l'adoption d'une approche prudente (inspirée du principe de précaution), en tenant compte des divers risques générés par d'éventuelles défaillances (pendant l'opération et à la fermeture). Des données historiques indiquent que les instabilités physiques de ces ouvrages miniers ont souvent été le résultat de critères non conservateurs ou d'une vision trop optimiste de leur réponse face aux conditions naturelles.

Des efforts sont actuellement déployés à divers endroits du globe afin d'uniformiser les pratiques de gestion des résidus miniers, incluant les méthodes d'analyse de stabilité et les critères de conception des digues (e.g., European Commission, 2009). Au Canada, l'Association canadienne des barrages (ACB-CDA, 2007a, b, 2010) a proposé des bulletins techniques et des lignes directrices qui décrivent diverses approches d'analyse et de conception avec des critères qui visent à assurer la stabilité de plusieurs types d'ouvrages de retenue, incluant les digues des parcs à résidus miniers. L'Association minière du Canada (MAC, 2011) a aussi présenté des recommandations relatives à la sécurité des ouvrages de rejets miniers et à leur gestion tout au long de leur cycle de vie. Les pratiques dans le domaine minier doivent aussi s'ajuster à l'application de codes plus complets et plus restrictifs, comme l'Eurocode (Section 7: Geotechnical Design; Section 8: Design of structures for Earthquake resistance), le nouveau code du Conseil international du bâtiment (International Building Code, International Code Council, 2009; Day, 2010), le Code national du bâtiment du Canada (CNB, 2005, 2010) et le Manuel canadien d'ingénierie des fondations (CGS, 2006).

Au Québec, les normes et les pratiques applicables sont essentiellement issues de documents spécifiques à l'industrie minière produits par le MDDEFP (i.e. Directive 019) et le MRN (Guide et modalités de préparation du plan de restauration). Comme cela se produit ailleurs, on anticipe une modification des attentes et des lignes directrices.

Cet article en deux parties présente certains éléments relatifs au comportement des résidus miniers et à l'analyse, la conception et la construction des sites d'entreposage de ces rejets de concentrateur, en insistant sur les aspects liés à la stabilité géotechnique des digues de retenue. Plusieurs des éléments de base qui sous-tendent le contenu de ces deux articles se retrouvent dans des documents produits antérieurement par les auteurs et collaborateurs (Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin, 1995; Aubertin et al., 1997, 2002a, b), et ils ne sont pas reproduits ici. On trouvera aussi d'autres informations pertinentes dans Vick (1990), Fell et al. (2005), ACB-CDA (2007a, b), D'Appolonia Engineering (2009) et Blight (2010).

2. Instabilités des digues de retenue

Plusieurs inventaires internationaux des cas de défaillance de digues de parcs à résidus ont été publiés au cours des dernières années et certains des événements les plus marquants ont aussi été décrits et analysés dans la littérature spécialisée (e.g., Vick, 1996, 1997, 2001; CIGB, 2001; Davies et Lighthall, 2001; Penman, 2001; Morgenstern, 2001; Aubertin *et al.*, 2002b; Strachan, 2002; Fahey *et al.*, 2002; Rico *et al.*, 2008; Seddon, 2009). Une revue historique récente couvrant un siècle (Azam et Li, 2010), portant sur les cas de ruptures de digues documentés, indique qu'il y a eu une diminution significative du nombre de ruptures entre les années 1960-70-80 (autour de 50 ruptures par décennie) et les années 1990 et 2000 (autour de 20 ruptures par décennie). Mais l'amélioration semble s'être arrêtée il y a une vingtaine d'années. À certains égards, la situation s'est même détériorée puisqu'il y a proportionnellement plus de ruptures pour des digues de petites (moins de 15 m de hauteur) et de moyennes (moins de 30 m) dimensions au cours des deux dernières décennies. Ceci va à l'encontre des observations pour les digues en remblai conventionnelles, qui montrent habituellement une probabilité (ou fréquence) de rupture plus élevée lorsque les dimensions augmentent, du moins jusqu'à une hauteur d'environ 100 m (Marche, 2008). Les petits bassins contenant relativement peu de résidus miniers (moins de 500 000 m³) semblent aussi plus souvent touchés que par le passé. On note également que l'Amérique du Nord (USA et Canada) est le continent où l'on retrouve le plus grand nombre de ruptures (documentées) au cours du dernier siècle (près de 80) devant l'Europe (environ 60), l'Amérique du sud (40) et l'Asie (près de 25).

Les principales causes spécifiques de défaillance incluent un débordement avec submersion de la crête suite à une crue des eaux excessive dans le bassin, l'érosion régressive du matériau dans la digue ou dans la fondation causée par des pressions interstitielles trop élevées (notamment en raison d'un filtre inadéquat ou absent), le mauvais fonctionnement de l'évacuateur de crue, l'érosion des surfaces due à l'entraînement des particules par l'eau, le glissement de zones instables le long des pentes attribuable aux sollicitations statiques ou dynamiques, la liquéfaction des résidus et l'instabilité des sols de fondation face à un tassement marqué ou à une rupture par cisaillement.

La majorité des cas de défaillance (> 80 %) surviennent en période d'opération, suite à une instabilité des pentes et des fondations, aux effets des séismes et au débordement en crête. Les débordements d'eau et les séismes sont les causes les plus fréquentes en phase post-fermeture (Aubertin *et al.*, 2002b; Bocking, 2010). Les digues construites par la méthode amont (voir plus loin) sont les plus vulnérables face à de tels incidents, représentant près de 90 % des instabilités documentées.

On note aussi que plusieurs cas de rupture ont été attribués à des erreurs grossières (« silly mistakes ») et à un manque d'attention aux détails (Penman, 2001). Plusieurs problèmes ont été reliés à une mauvaise communication entre les intervenants (Seddon, 2009), entraînant de mauvaises décisions, notamment en ce qui a trait aux méthodes de construction et à la gestion de l'eau. Le mauvais emplacement des ouvrages (sur des sols mal adaptés par exemple) constitue une autre source fréquente de problèmes. La cause des défaillances peut aussi se situer au niveau d'une documentation erronée ou incomplète qui limite la capacité à transmettre correctement les informations importantes dans l'entreprise (et auprès des consultants) au fil des ans. L'absence de suivi à la fermeture et certaines causes plus difficilement prévisibles (comme les barrages de castors) sont d'autres éléments qui ont engendré des problèmes par le passé (Morgenstern, 2001).

La persistance de ces problèmes peut paraître surprenante puisque les rétro-analyses des instabilités de digues de parcs à résidus miniers indiquent que pratiquement tous les cas peuvent être expliqués par des principes classiques bien connus dans le domaine de la géotechnique. Une application systématique des connaissances appropriées aurait alors suffi pour prévenir la très grande majorité des défaillances observées (Davies, 2002; Aubertin *et al.*, 2002b).

Les phénomènes d'instabilité mentionnés plus haut sont également bien connus dans le domaine des ouvrages en remblai classiques construits en génie civil, généralement pour retenir l'eau (Marche, 2008). Face aux particularités structurales des ouvrages miniers et à la spécificité du comportement de ces résidus, ces phénomènes doivent toutefois être analysés en fonction de caractéristiques distinctes. En ce sens, il faut considérer les différences marquées au niveau des méthodes de construction, de la nature de la retenue (eau versus résidus) et des risques associés aux projets miniers (Vick, 1990; Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin *et al.*, 2002a). Certaines de ces particularités sont décrites dans ce qui suit.

3. Propriétés des matériaux

L'évaluation de la stabilité des ouvrages doit inclure une caractérisation détaillée des propriétés des sols (fondations, matériaux d'emprunt) et des rejets miniers eux-mêmes. Les diverses techniques disponibles à cet effet sont présentées dans plusieurs documents synthèses couramment utilisés en géotechnique (e.g., Holtz et Kovacs, 1991; Mitchell et Soga, 2005; CGS, 2006; McCarthy, 2007). Les divers essais géotechniques typiquement utilisés ne seront pas discutés ici. La présentation portera plutôt sur les particularités propres aux résidus miniers et aux ouvrages construits pour leur entreposage en surface. Les propriétés des résidus de mines

en roches dures ont été étudiées abondamment et des valeurs typiques ont été présentées par Vick (1990), Aubertin *et al.* (2002a), Fell *et al.* (2005), Bussière (2007) et Blight (2010). On rappelle ici certaines caractéristiques importantes qui peuvent se révéler utiles pour évaluer rapidement (et sommairement) une situation particulière sur le terrain.

La densité (relative) des grains D_r (ou G_s ; masse volumique du solide / masse volumique de l'eau) peut varier de 2,6 à 4,0 (et plus, selon leur minéralogie) pour les r sids des exploitations en roches dures; la valeur de D_r peut cependant être aussi faible que 1,4   1,6 pour les roches sédimentaires. Il est important de connaître précisément la valeur de D_r afin d'évaluer l'état des contraintes en place dans les r sids et les sols sous-jacents.

Les rejets de concentrateur produits par le traitement min rurgique du minerai sont typiquement transportés sous forme de pulpe jusqu'aux bassins du parc à r sids. La densité de pulpe P (% solide, en poids) des r sids lors de leur mise en place varie de 30 à 45 % pour les r sids conventionnels en suspension (« slurried tailings »), de 45 à 70 % pour les r sids épaissis (« thickened tailings »), et de 70 à 85 % pour les r sids en pâte (« paste tailings »); la valeur de P excède 85 % pour les r sids filtrés (« filtered tailings ») (e.g., Martin *et al.*, 2006).

Lors de la mise en place des r sids conventionnels, l'angle de la pente de dépôt est faible, usuellement de l'ordre de 1 à 2 à. Une pulpe épaissie permet cependant d'atteindre un angle plus élevé, qui pourrait aller jusqu'à 6 à ou plus (Blight, 2010). Cet angle peut varier grandement avec la valeur de la densité de pulpe P (Jewell *et al.*, 2002).

Une fois les r sids placés dans le bassin, leur indice des vides, e , varie typiquement de 0,6 à 1,7 pour la fraction fine (< 0,075 mm), et de 0,6 à 0,9 pour la fraction plus grossière (sableuse) que l'on retrouve surtout près des points de déversement. Ces valeurs de e correspondent habituellement à un indice de densité I_D nettement inférieur à 50 % (on observe à l'occasion des valeurs de I_D aussi petites que 10 %); ceci reflète l'état l che des r sids, qui sont alors très compressibles. Le poids volumique (ou unitaire) sec γ_d des rejets varie typiquement de 11,5 à 18,0 kN/m³. Un faible poids volumique en place indique que la résistance mécanique (géotechnique) des r sids est typiquement assez faible.

L'indice de plasticité I_p des rejets de mines en roches dures est généralement inférieur à 10 %, mais il peut varier avec la minéralogie, notamment en présence de minéraux argileux (qui sont usuellement peu abondants pour les mines de métaux). La limite de plasticité est souvent difficile à mesurer.

La conductivité hydraulique saturée, k_{sat} , des rejets de concen-

trateur dépend de leur granulométrie et de leur indice des vides. La ségrégation naturelle des particules déposées par méthode hydraulique entraîne donc une variation de la conductivité hydraulique des matériaux, selon la position latérale et verticale dans le bassin. La conductivité hydraulique k_{sat} peut varier de 10⁻³ cm/s (et plus) pour la fraction grossière à 10⁻⁶ cm/s (et moins) pour la fraction fine; une valeur moyenne autour de 10⁻⁵ cm/s est souvent observée pour des r sids homog nis s. En raison du mode de déposition, qui peut engendrer une stratification, les r sids montrent souvent une conductivité hydraulique anisotrope, avec une conductivité horizontale moyenne supérieure (de 10 à 100 fois, dans certains cas)   la conductivité verticale moyenne (L' cuyer *et al.* 1993).

L'angle de friction interne en condition consolidée, drainée (C-D), ϕ' , est typiquement assez élevé, soit 33 à 41 à pour la fraction grossière et 30 à 37 à pour la fraction fine. Cet angle a tendance à diminuer sensiblement avec une augmentation de la contrainte normale (i.e. l'enveloppe de rupture est courb e vers le bas dans le plan de Mohr). En condition consolidée, non drainée (C-U), la valeur de ϕ (en contraintes totales) est inférieure à celle de ϕ' (différence allant jusqu'à 15   et plus). Comme la valeur de ϕ en condition C-U varie selon le mode et la vitesse de chargement, elle ne constitue pas une propriété intrinsèque du matériau et elle ne devrait donc pas être utilisée directement dans les analyses de stabilité. L'obtention de la résistance en condition C-D à partir d'essais en condition C-U (avec mesures des pressions interstitielles) est discutée dans plusieurs livres de géotechnique (e.g., Holtz et Kovacs, 1991; McCarthy, 2007).

La valeur de la cohésion drainée, c' , de la majorité des r sids de mines en roches dures est pratiquement nulle à l'état saturé. Les valeurs de la cohésion non-consolidée et non-drainée, c_u , et de la cohésion c en contrainte totale (condition C-U) peuvent toutefois être non négligeables (jusqu'à 50 kPa et plus). En condition non drainée (i.e. pour un chargement rapide), le rapport c_u/σ'_{vo} (où σ'_{vo} est la contrainte effective verticale) serait d'environ 0,20 pour un résidu normalement consolidé; la valeur du rapport c_u/σ'_{vo} augmente en condition surconsolidée (suite à l'effet d'un assèchement par exemple). L'apparition de conditions non-saturées, qui engendrent des pressions d'eau négatives (succions), peut produire une cohésion apparente non négligeable (Narvaez, 2013); celle-ci disparaît lorsque les r sids deviennent saturés en eau. Il n'est pas conservateur de considérer la contribution de cette cohésion apparente dans les analyses de stabilité conventionnelles.

Lors d'essais de consolidation, les rejets de concentrateur montrent habituellement un indice de compressibilité C_c compris entre 0,10 et 0,30 pour les r sids avec une haute teneur en particules fines (plus compressibles) et entre 0,05 et 0,15 pour les fractions plus grossières. Le coefficient de

consolidation c_v varie de 10^{-3} à 10^{-1} cm^2/s pour les fractions fines, et il est généralement supérieur à 10^{-1} cm^2/s pour les fractions grossières. Ces propriétés varient avec l'indice des vides e (ou avec l'indice de densité).

4. Configuration et construction des digues

Les parcs à résidus sont ceinturés, en partie ou en totalité (selon la topographie du site), par des digues qui doivent retenir les solides et l'eau. On peut construire les digues de retenue à partir de matériaux d'emprunt naturels, tel des graviers, des sables, des silts, et des argiles. On peut alors baser leur conception sur des principes bien connus en génie civil et couramment appliqués aux bassins de rétention d'eau (Fell *et al.*, 2005; ACB-CDA, 2007a,b), avec toutefois les ajustements requis pour la retenue de solides (ACB-CDA, 2010; Blight, 2010). Ces digues comportent en général diverses zones, incluant une zone « imperméable » (p.ex. un parement de till ou un noyau de till ou d'argile), des zones drainantes (matériaux granulaires), des zones de transition et de filtration, ainsi que des zones de protection contre l'érosion de surface. La figure 1 illustre des exemples de telles digues. Ce genre d'ouvrage est de plus en plus souvent employé pour contenir les résidus miniers, en raison de leurs nombreux avantages (géotechniques et environnementaux). Par rapport aux digues faites de rejets miniers (décrites plus bas), les digues construites à partir de sols naturels peuvent être montées plus rapidement. Toutefois, afin de minimiser l'investissement initial, ces digues peuvent aussi être construites progressivement, en fonction de l'accroissement des besoins en volume d'entreposage pendant la durée de vie de l'opération minière (selon le schéma de remplissage des bassins; Aubertin *et al.*, 2002a).

Lorsque les matériaux d'emprunt ne sont pas disponibles à un coût raisonnable ou en quantité suffisante, et que les rejets de la mine ont des caractéristiques physiques et chimiques appropriées, on peut utiliser les roches stériles et/ou les rejets du concentrateur pour construire une partie ou la totalité des digues de retenue. Les digues ainsi construites sont montées sur une période de plusieurs années, selon trois principales méthodes de construction, soit la méthode amont, la méthode aval et la méthode de l'axe central; ces méthodes sont schématisées à la figure 2. Les caractéristiques de ces méthodes de construction et de certaines variantes sont présentées par Vick (1990), Aubertin *et al.* (2002a), Fell *et al.* (2005) et Blight (2010).

La méthode amont est la technique de construction traditionnellement utilisée lorsque les rejets de concentrateur sont déposés à l'aide de lances à robinet (« spigotting ») ou avec des hydrocyclones. Cette méthode s'applique lorsque les résidus possèdent les caractéristiques géotechniques et physico-chimiques nécessaires à la construction des digues, quand la région est à faible risque sismique et pour des digues de faible hauteur. La construction des digues par la méthode amont est relativement simple et très économique, ce qui expliquerait son utilisation régulière malgré les limitations qui y sont rattachées (Aubertin *et al.*, 2002a, b). Un inconvénient inhérent aux digues construites selon la méthode amont réside dans le fait que les petites digues construites successivement à partir de résidus miniers peuvent reposer sur des matériaux relativement fins, peu consolidés, qui ont été mis en place au cours des étapes précédentes. En général, ces résidus possèdent des caractéristiques géotechniques peu favorables comme une faible résistance au cisaillement et une grande susceptibilité à la liquéfaction. Les digues sont alors assises sur

Figure 1. Digues de retenue comportant diverses zones construites avec des matériaux d'emprunt (tiré de Aubertin *et al.*, 2002a).

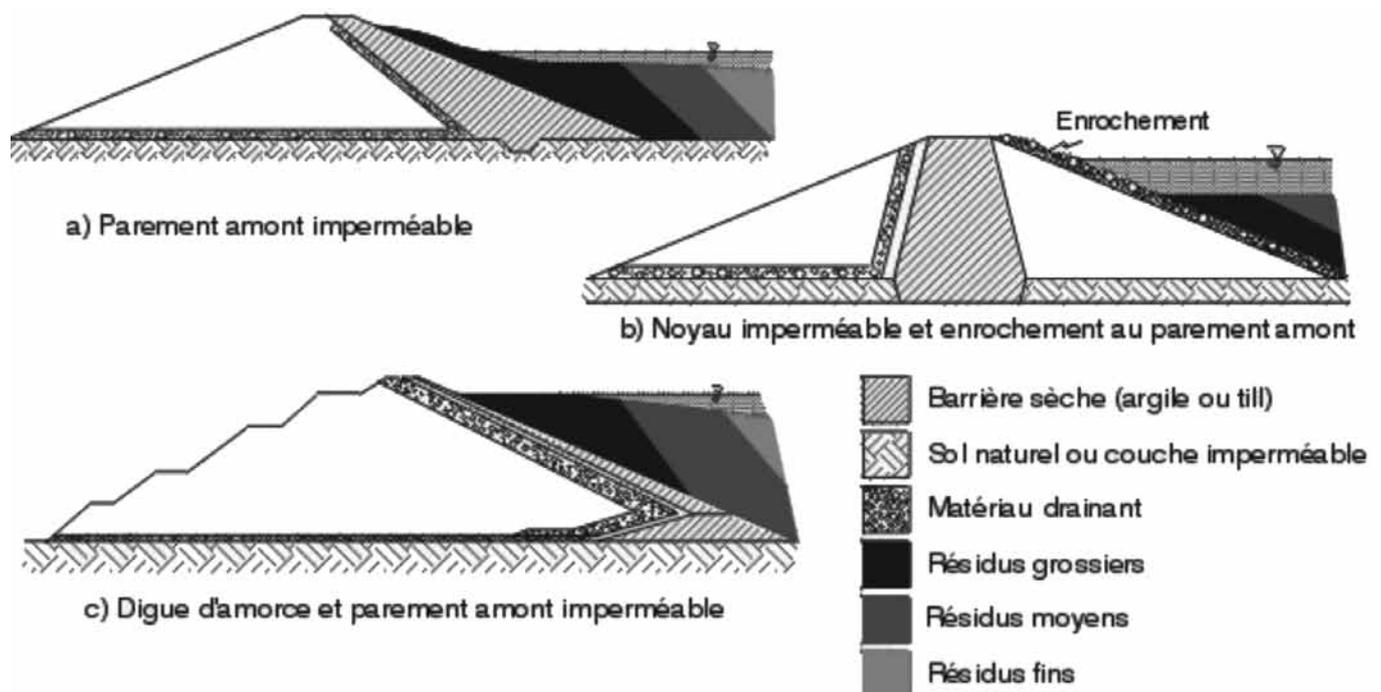
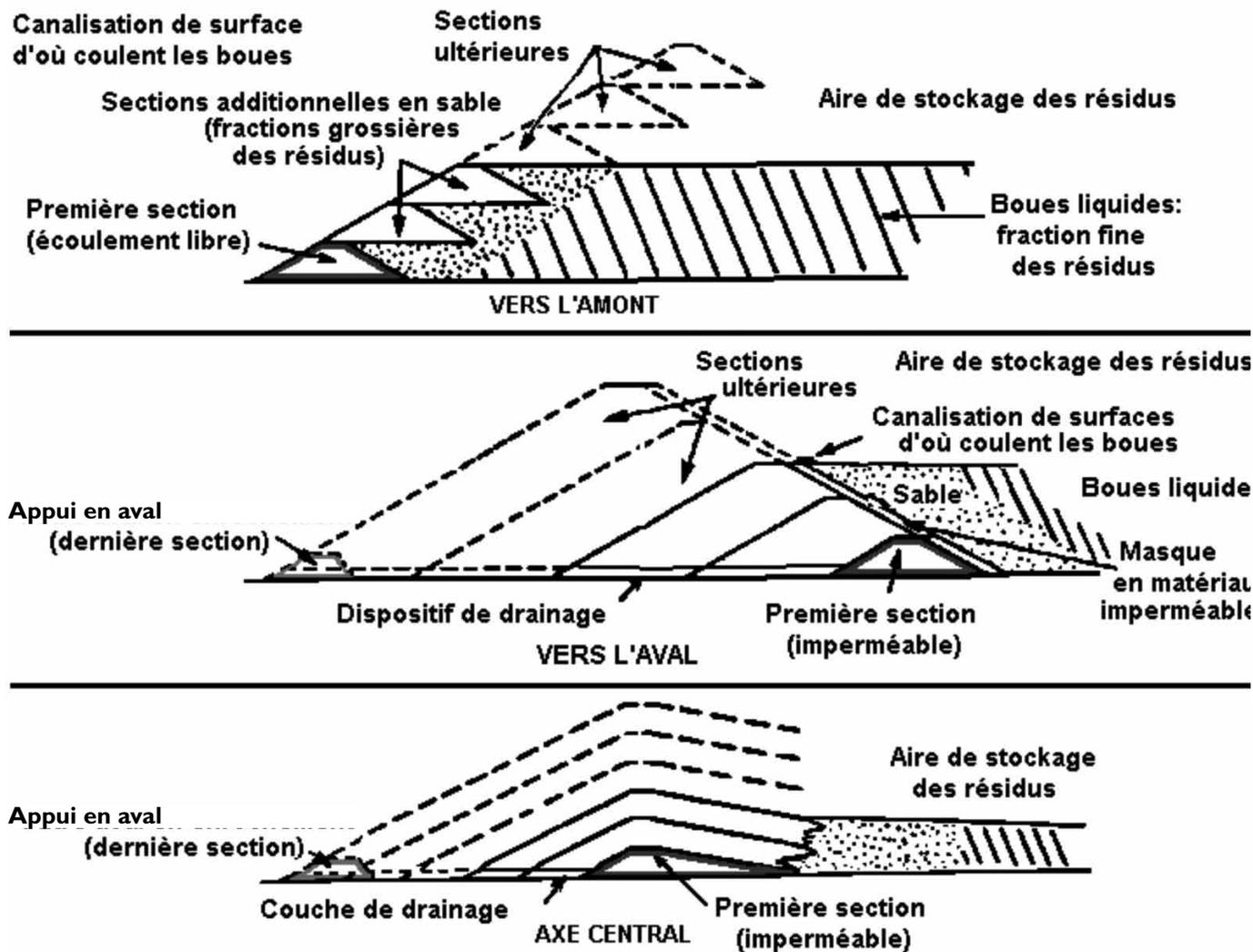


Figure 2. Méthodes de construction des digues formées de rejets miniers (tiré de Aubertin et al., 2002a).

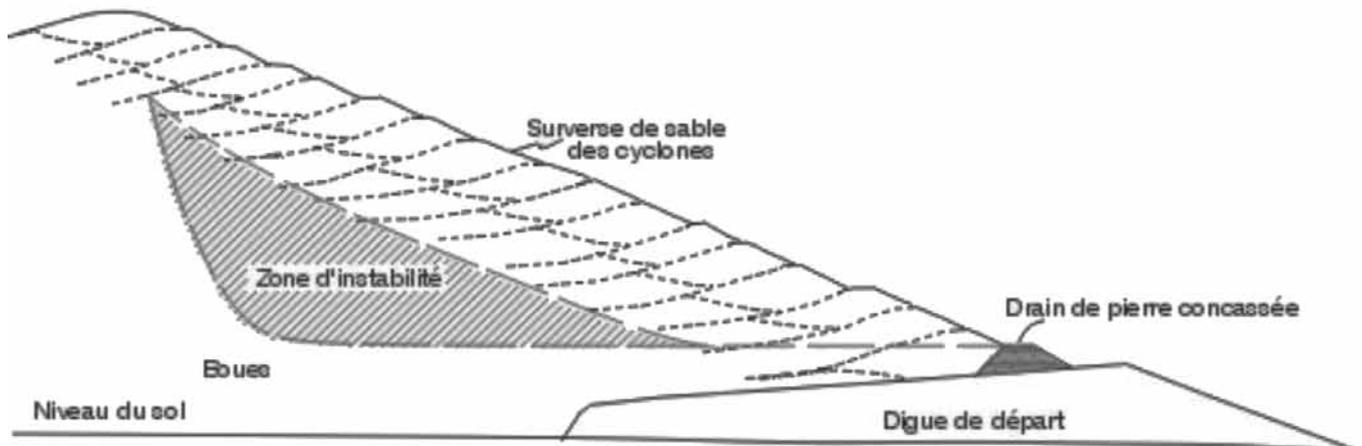


une zone potentiellement instable (tel qu'illustré à la figure 3). Ces caractéristiques augmentent les risques d'instabilité, comme le démontrent les statistiques sur les cas de rupture mentionnées précédemment. Lorsqu'elle est utilisée pour des projets d'envergure, cette méthode demande un suivi serré de la réponse des matériaux sur le site, notamment en termes de pressions d'eau et de tassements, ce qui peut augmenter considérablement la complexité du mode de gestion. Plusieurs instabilités ont d'ailleurs été attribuées à l'absence d'un suivi régulier (par du personnel qualifié) des ouvrages en période de production. Il faut donc être très prudent lorsque cette méthode est utilisée (ou a été utilisée par le passé). La méthode aval se révèle la plus coûteuse, mais aussi la plus sécuritaire pour la construction des digues de parcs à résidus miniers. Comme son nom l'indique, la digue de retenue est alors construite à l'aval de la digue d'amorce, généralement à partir des rejets grossiers séparés par des hydrocyclones. La crête de la digue se déplace ainsi vers l'extérieur du parc à résidus tel que montré à la figure 2 (voir aussi Aubertin et al., 2002a, qui montrent diverses configurations pour la méthode

de construction vers l'aval). Cette méthode engendre typiquement une meilleure stabilité que la méthode amont et elle génère, de plus, un bilan d'entreposage positif puisque le volume disponible dans le bassin augmente progressivement avec la hauteur de la digue. La quantité de matériau grossier nécessaire à la construction de la digue est toutefois très grande et constitue souvent la principale limite imposée.

La méthode de l'axe central représente une solution de compromis entre les deux méthodes précédentes. Il s'agit, comme on peut le voir à la figure 2 (voir aussi Aubertin et al., 2002a), de maintenir la crête de la digue à la même position horizontale, avec une élévation qui se fait selon un axe vertical. Cette méthode confère une meilleure stabilité que la méthode amont, et elle demande moins de matériaux grossiers que la méthode aval. Comme cette dernière, elle nécessite habituellement l'utilisation d'hydrocyclones pour séparer les fractions grossières et fines des résidus. La méthode de l'axe central se prête bien à presque toutes les situations, sauf si la fraction grossière des résidus n'est pas assez abondante.

Figure 3. Zones d'instabilité potentielle dans le cas d'une digue construite avec la méthode amont (tiré de Aubertin et al., 2002a).



5. Principes de conception des digues

Lors de la conception des ouvrages, on doit s'assurer que les digues, les fondations et les ouvrages connexes vont demeurer stables pendant leur durée de vie utile. Cette dernière est généralement différente pour la période d'opération de la mine (incluant les extensions possibles suite à l'augmentation des réserves par exemple) et à sa fermeture. La conception doit notamment prévoir que les ouvrages seront en mesure de maintenir la retenue lors d'événements exceptionnels (crues, séismes, grands vents, etc.). Les digues sont construites selon une séquence dictée par le schéma de remplissage (« stage curve ») spécifique de chaque bassin. Ce schéma représente la relation (graphique) entre la hauteur des digues, le volume et la masse volumique des résidus entreposés, le niveau de production du concentrateur et le temps (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a; Blight, 2010). La hauteur des digues est alors ajustée en fonction des besoins d'entreposage, et selon la revanche minimale requise lors de l'opération usuelle et pour la crue de conception (ou crue de projet).

Les principaux objectifs lors de la conception devraient inclure (Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin et al., 2002a, b):

- La consolidation rapide et la stabilisation des matériaux sur le site, ce qui peut se faire par l'ajout de systèmes de drainage dans les bassins ;
- La réduction des pressions d'eau dans les ouvrages de retenue, notamment en éloignant la zone submergée de la crête de la digue (figure 4) et en abaissant le niveau de la nappe dans le corps de celle-ci ;
- L'optimisation de la superficie affectée par la construction du parc à résidus et une minimisation de la grandeur du bassin de drainage en amont du site ;
- La prévention contre le relâchement de contaminants dans l'environnement.

Les digues devraient être construites par du personnel formé à cet effet, supervisé par des professionnels spécialisés dans le domaine, et on doit inclure dans le processus, un contrôle de qualité approprié. Plusieurs ruptures de digues ont été attribuées à de mauvaises pratiques de construction, particulièrement lorsque la méthode amont est utilisée; cela peut être évité par des mesures de contrôle strictes.

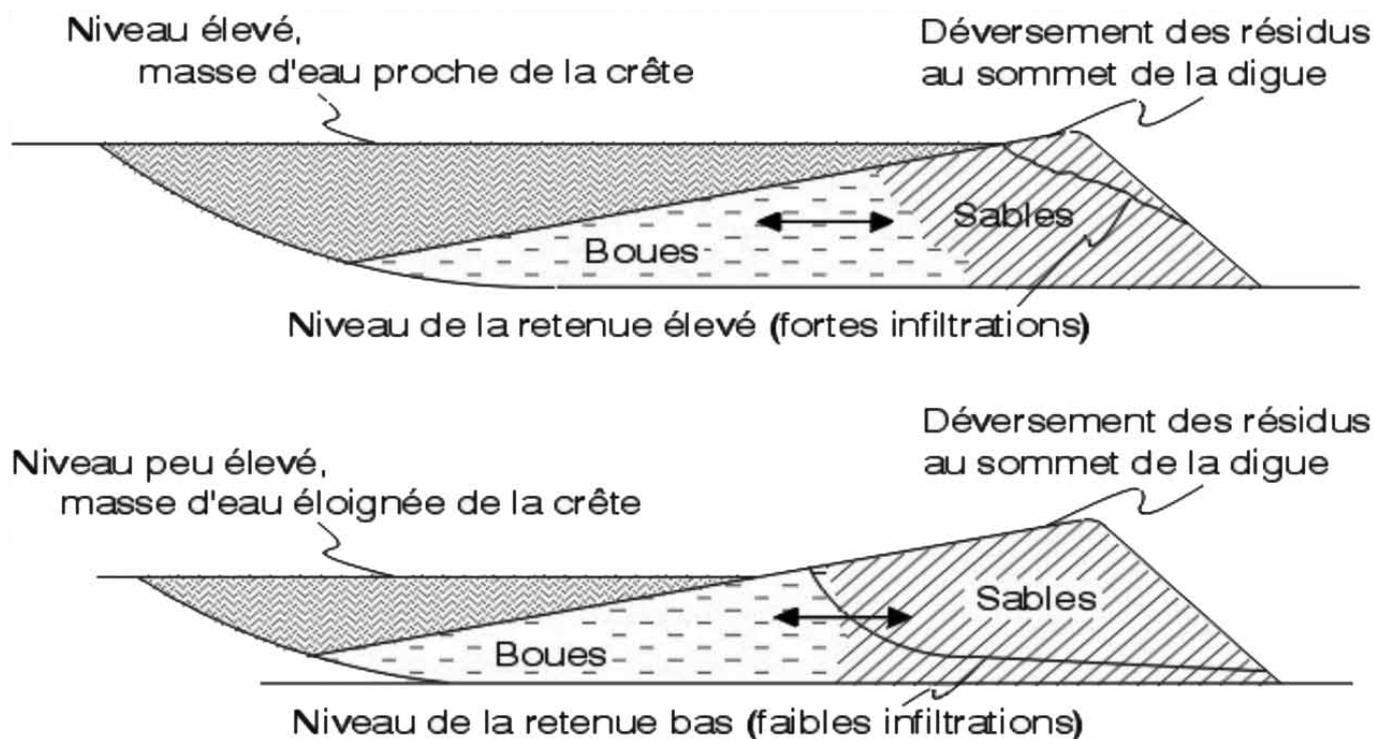
6. Dernières remarques

Les questions reliées à l'analyse de la stabilité des ouvrages sont abordées dans un article compagnon de celui-ci (Aubertin et al. 2013, partie II). Les digues de parcs à résidus doivent avoir la capacité de supporter les combinaisons de charges les plus défavorables pendant la construction et l'opération du site, et après sa fermeture. Les étapes, les outils de calculs et les paramètres utilisés pour la conception des ouvrages miniers ont été revus dans plusieurs documents synthèses, incluant : Vick (1990), Aubertin et al. (2002a, 2011), Fell et al. (2005), D'Appolonia Engineering (2009), James (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.

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 (www.polymtl.ca/enviro-geremi). Ces travaux se poursuivent dans le cadre des activités de l'Institut de recherche Mines et Environnement (IRME UQAT-Polytechnique).

Figure 4. Influence de la position de l'eau libre sur l'élévation de la nappe dans une digue faite de rejets miniers (tiré de Aubertin et al., 2002a).



Références bibliographiques

ACB-CDA (2007a). Dam Safety Guidelines, Association canadienne des barrages – Canadian Dam Association.

ACB-CDA (2007b). Dam Safety – Technical Bulletins, 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.

AUBERTIN, M. (1995). Critères de stabilité physique des ouvrages pour la fermeture des sites d'entreposage des rejets miniers. Colloque sur « Les mines de demain en Abitibi-Témiscamingue », organisé par la régionale de Abitibi-Témiscamingue de l'Ordre des ingénieurs du Québec en collaboration avec l'ICM/CIM et l'URSTM, Rouyn-Noranda.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. BERNIER, B. (2002a). Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur cédérom, Presses internationales Polytechnique.

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., CHAPUIS, R.P. (1991). Critères de conception des ouvrages de retenue des résidus miniers dans la région de l'Abitibi. C.R. 1ère Conférence Canadienne de Géotechnique Environnementale, SCG-CGS, pp : 114-127.

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. C.-R. sur CD-ROM.

AZAM, S., LI, Q. (2010). Tailings dam failures : A review of the last one hundred years. Geotechnical News. Vol. 28, no 4, pp : 50-54.

BLIGHT, G. E. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press, Taylor-Francis.

BOCKING, K. (2010). Post-closure liabilities. ACG Newsletter; Dec. 2010, pp : 20-23.

BUSSIÈRE, B. (2007). Colloquium 2004: Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, pp : 1019-1052.

CGS (2006). Canadian Foundation Engineering Manual. 4th Edition, Canadian Geotechnical Society (voir aussi la version française à paraître à l'automne 2013).

CIGB (2001). Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, Commission Internationale des Grands Barrages, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.

CNB (2005, 2010). Code National du Bâtiment – Canada, Conseil national de recherché du Canada.

D'APPOLONIA ENGINEERING (2009). Engineering and Design Manual – Coal Refuse Disposal Facilities. 2nd Edition, Mine Safety and Health Administration (MSHA), Pittsburgh, PA, USA.

DAVIES, M.P. (2002). Tailings impoundment failures: Are geotechnical engineers listening? Geotechnical News. Sept. 2002, pp : 31-36.

DAVIES, M.P., LIGHTHALL, P.C. (2001). Geotechnical aspects of several recent mine tailings impoundment failures. Proc. 54e Conférence Canadienne de Géotechnique, Calgary, CD-Rom, pp : 321-326.

- DAY, R.W. (2010). Foundation engineering handbook – Design and construction with the 2009 International Building Code. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- EUROPEAN COMMISSION (2009). Management of tailings and waste-rock in mining activities. Reference Document on Best Available Techniques.
- FAHEY, M., NEWSON, T.A., FAJIYASU, Y. (2002). Engineering with tailings. Environmental Geotechnics, Vol. 2, Edited by Guilherme de Melo and Almeida, AA Balkema Publishers, Lisse, pp : 947-973.
- FELL, R., MACGREGOR, P. STAPLETON, D., BELL, G. (2005). Geotechnical engineering of dams. A.A. Balkema - Taylor & Francis, London.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.E. (1991). Introduction à la géotechnique (traduit par J. Lafleur). Presses internationales Polytechnique, Montréal.
- INTERNATIONAL CODE COUNCIL (2009). International Building Code, Country Club Hills, IL.
- JAMES, M. (2009). The use of waste rock inclusions to control the effects of liquefaction in tailings impoundments. PhD Thesis, École Polytechnique, Montreal.
- JEWELL, R.J., FOURIE, A.B. LORD, E.R. (2002). Paste and thickened tailings – A guide, The Australian Center for Geomechanics.
- L'ÉCUYER, M., CHAPUIS, R.P., AUBERTIN, M. (1993). Field and laboratory investigations of hydraulic conductivity of acid producing mine tailings. Proc. ASCE-CSE Conf. on Env. Engng, Montreal, Vol. 1, pp : 213–220.
- MCCARTHY, D.F. (2007). Essentials of Soil Mechanics and Foundations, Prentice Hall, (7th ed.).
- MAC. (2011). Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities.. The Mining Association of Canada / L'Association Minière du Canada.
- MARCHE, C. (2008). Barrages, crues de rupture et protection civile. 2e édition. Presses Internationales Polytechnique, Montréal.
- MARTIN, V., AUBERTIN, M., MCMULLEN, J. (2006) Surface disposal of paste tailings. Proc. 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics, Thomas H.R. (ed.), Cardiff UK. Thomas Telford, vol. 2, pp : 1471-1478.
- MITCHELL, J. K. SOGA, K. (2005). Fundamentals of soil behavior. John Wiley.
- MORGENSTERN, N.R. (2001). Geotechnics and mine waste management – Update. Safe Tailings Dams Constructions, Proc. Seminar in Gaellivare, Sept. 2001, 14 p.
- NARVAEZ, B. (2013). Étude expérimentale de la résistance en traction des résidus miniers à l'aide d'essais de flexion. Mémoire M.Sc.A, Polytechnique Montréal.
- PENMAN, A.D.M. (2001). Risk analysis of tailings dams construction. Safe Tailings Dams Constructions, Proc. Seminar in Gaellivare, Sept. 2001, 17 p.
- RICO, M., BENITO, G., DIEZ-HERRERO, A., 2008. Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials, Vol. 154, pp : 79-87.
- SEDDON, K. (2009). The risk of tailings disposal. ACG Newsletter, Dec. 2009, pp. 17-19.
- STRACHAN, C. (2002). Review of tailings dam incident data. Mining Environmental Management. Tailings Management Guide, January 2002, 7-9.
- VICK, S.G. (1990). Planning, design, and analysis of tailings dam . BiTech Publ.
- VICK, S.G. (1996). Failure of the Omai dam. Geotechnical News, Sept. 1996, pp.: 34-39.
- VICK, S.G. (1997). Failure of the Omai dam: Closure. Geotechnical News, March 1997, pp. 49-55.
- 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.