

**Analyse dynamique de la stabilité des ouvrages miniers :
Revue des méthodes et outils disponibles et orientations
générales**

Rapport préparé par **Michel Aubertin**, Ph.D.
Professeur Émérite, Polytechnique Montréal
Version du 15 octobre 2024

Soumis à la Direction principale des eaux usées et de la gouvernance de l'eau
Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques,
de la Faune et des Parcs

Préambule

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec a retenu les services de M. Michel Aubertin, consultant Inc., pour la réalisation d'un mandat visant à présenter les orientations générales et les principaux aspects à considérer lorsqu'une analyse dynamique est utilisée pour évaluer la stabilité sismique des ouvrages miniers. L'objectif de ce document est de présenter les principaux outils disponibles et des recommandations générales à l'égard des modalités pour mener des analyses dynamiques à l'appui des demandes d'autorisation. Il était prévu au mandat que ce document pourrait être présenté dans une fiche d'information publiée par le Ministère en lien avec la Directive 019. Il était aussi prévu que des balises plus précises visant à encadrer l'utilisation de l'analyse dynamique seraient développées ultérieurement dans le cadre de travaux menés par le MELCCFP.

Remerciements

Cette version du rapport tient compte des commentaires reçus du MELCCFP sur la version initiale soumise en mars 2024. L'auteur remercie aussi les collègues qui ont accepté de réviser en partie le contenu technique de ce document : Prof. Samuel Yniesta et Dr Abtin Jahanbakhshzadeh de Polytechnique Montréal; Prof. Mourad Karray de l'université de Sherbrooke et un spécialiste du domaine des barrages hydroélectriques. Les échanges avec le Prof. Ross Boulanger (*University of California, Davis*), durant et après une période sabbatique en Californie, ont aussi été bénéfiques pour la préparation de ce document.

Table des matières

1.	Introduction	5
1.1	Généralités	5
1.2	Conception et stabilité des ouvrages	5
1.3	Comportement sismique	5
2.	Documentation.....	7
3.	Méthodes d'analyse recommandées	8
3.1	Description des principales méthodes	8
3.1.1	Analyse pseudo-statique et facteur de sécurité	8
3.1.2	Déplacements permanents.....	9
3.1.3	Analyses semi-empiriques de la liquéfaction	9
3.1.4	Analyses dynamiques numériques.....	10
3.2	Composantes de l'analyse dynamique	10
3.2.1	Loi de comportement.....	11
3.2.2	Potentiel de liquéfaction	12
3.2.3	Interprétation des résultats et validation.....	13
4.	Caractérisation du site et propriétés des matériaux	14
4.1	Types et propriétés des matériaux.....	14
4.2	Investigation et mesures in situ.....	15
4.3	Essais de laboratoire.....	16
4.4	Calibration des modèles constitutifs.....	17
4.5	Évaluation de la liquéfaction	18
5.	Procédure et étapes de l'analyse dynamique.....	19
5.1	Procédure générale.....	19
5.2	Étapes de l'analyse numérique	19
5.3	Chargement sismique	21
5.4	Réponse sismique, variables d'intérêt et liquéfaction	23
5.5	Comportement post-sismique et remarques complémentaires	24
6.	Interprétation des résultats	26
7.	Autres aspects	27
7.1	Gestion environnementale des rejets miniers.....	27
7.2	Amélioration de la stabilité	27
7.3	Remarques complémentaires	28
8.	Références.....	29

1. Introduction

1.1 Généralités

La majorité du territoire québécois est située dans une région sismique relativement stable de la plaque continentale de l'Amérique du Nord. L'activité sismique y varie de faible à modérée, mais elle peut néanmoins mener à des événements majeurs selon la géologie structurale et le champ des contraintes régionales. Certaines régions minières se retrouvent dans les zones sismiques plus actives de l'Ouest du Québec, WQU, et de Charlevoix, CHV, (Adams et al., 2015, 2019; CGC, 2022). Pour les sites d'entreposage de rejets miniers situés dans ces zones, il peut s'avérer nécessaire de procéder à une évaluation spécifique du comportement sismique des ouvrages afin d'évaluer leur stabilité face aux effets d'un tremblement de terre.

L'aspect séismique est particulièrement important pour les parcs à résidus miniers car les rejets du concentrateur de mines en roche dure, communément produits au Québec, ont généralement des propriétés géotechniques très sensibles aux chargements cycliques, en raison de leur déposition hydraulique menant à un état lâche et saturé. Ces résidus miniers contractants, à granulométrie fine, de faible plasticité et sans cohésion effective (en l'absence de minéraux argileux) montrent aussi une faible conductivité hydraulique et une grande compressibilité qui induisent une consolidation lente sous leur propre poids. Il est d'ailleurs reconnu depuis longtemps que de tels résidus sont très susceptibles à une liquéfaction sismique (Vick, 1990; Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin et al., 2002a), pouvant mener à l'instabilité des ouvrages de retenue. D'autres types d'ouvrage minier, comme les haldes à stériles et les digues de retenue des bassins d'accumulation d'eau et de boues de traitement, sont également sensibles aux sollicitations sismiques, principalement en raison des risques d'instabilité de pente.

1.2 Conception et stabilité des ouvrages

La conception et la construction des ouvrages destinés à l'entreposage des rejets miniers, incluant les parcs à résidus avec digues de retenue, les haldes à stériles, les bassins de rétention d'eau et les ouvrages connexes, soulèvent de grands défis en raison des risques de défaillance pouvant causer des dommages environnementaux, sociaux et économiques majeurs. A cet égard, les digues de parc à résidus miniers sont les plus critiques en raison des multiples causes potentielles d'instabilité (p. ex. Davies, 2002; Aubertin et al., 2002a,b, 2011, 2019; Blight, 2010; Azam et Li, 2010; Roche et al., 2017; Rotta et al., 2020; Rana et al., 2021). Les événements quelques fois catastrophiques survenus au cours des récentes décennies démontrent que, malgré l'avancement des connaissances (documentées dans plusieurs publications), les risques de rupture sont encore bien présents pour les ouvrages miniers. En ce sens, les effets potentiels des sollicitations sismiques sont parmi les plus préoccupants pour de tels ouvrages.

Les risques d'instabilité géotechnique dépendent de plusieurs facteurs incluant les phases du cycle de vie de la mine, les propriétés des matériaux (sols de fondation, rejets, remblais) et la méthode de construction des ouvrages. Par exemple, on sait que le risque est typiquement plus élevé lorsque les digues sont construites par la méthode amont, encore aujourd'hui fréquemment utilisée au Québec, au Canada et ailleurs; on peut réduire ce risque en appliquant une méthode de construction des digues avec rehaussement selon l'axe central ou vers l'aval (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a,b, 2011; Jahanbakhshzadeh et al. 2019). La stabilité des haldes à stériles peut aussi être améliorée avec une méthode de construction par bancs afin de réduire l'angle global de la pente extérieure, ce qui augmente le facteur de sécurité (Aubertin et al., 2013, 2021; Maknoon et Aubertin, 2021).

1.3 Comportement sismique

L'évaluation du comportement et de la stabilité sismique des ouvrages miniers peut constituer un volet critique pour une conception sécuritaire. Mais cet aspect a quelques fois été négligé par le

passé, notamment parce l'historique sismique du Québec était relativement peu connu. De plus, l'analyse de la stabilité sismique représente une tâche relativement complexe qui requiert l'utilisation de méthodes de calcul plus élaborées que les méthodes classiques appliquées pour évaluer la stabilité (quasi) statique. L'analyse dynamique (AD) utilise des outils de modélisation numérique pour mieux comprendre et évaluer la réponse des ouvrages et les risques de rupture faces aux sollicitations sismiques. La qualité des résultats obtenus de tels outils numériques dépend fortement des caractéristiques des codes utilisés pour mener les analyses dynamiques (p. ex. FLAC, Itasca, 2016; PLAXIS, Bentley, 2020). On doit aussi prêter une grande attention aux lois de comportement qui doivent représenter adéquatement la réponse cyclique des matériaux (sols et rejets). Les principaux outils disponibles pour simuler le comportement sismique pour l'analyse dynamique des ouvrages durant (et parfois après) le séisme sont présentés dans ce document. On verra ainsi que plusieurs aspects de la réponse sismique doivent être pris en compte dans l'analyse dynamique. Ceci inclus par exemple le potentiel d'amplification ou d'atténuation des ondes sismiques, ce qui peut influencer les déplacements et le risque de liquéfaction, tel qu'observé pour le séisme survenu en 1988 au Saguenay (Mitchell et al., 1990).

Il existe des lignes directrices et recommandations pour la conception sismique des digues et barrages (incluant les ouvrages miniers), afin de protéger la population, l'environnement, et les biens (ACB, 2013, 2019; Aubertin et al., 2011; USSD, 2022). De tels documents spécifient généralement que les ouvrages doivent résister au séisme de conception (souvent de grande intensité) sans un relâchement incontrôlé d'eau ou de rejets. On choisit alors la période de retour PR (ou de récurrence) en fonction des risques (probabilités et conséquences) découlant d'une rupture, avec une valeur de PR pouvant aller jusqu'à 10 000 ans (p. ex. MERN, 2017). Cet aspect est aussi abordé dans le rapport.

Diverses approches sont disponibles pour évaluer la stabilité sismique des ouvrages. Il est généralement recommandé de mener des analyses dynamiques numériques pour la conception géotechnique des ouvrages lorsqu'ils sont potentiellement soumis à des sollicitations sismiques relativement sévères (p. ex. Verret et Péroquin, 2017; USSD, 2022, CGS, 2023). Mais les critères applicables pour identifier le besoin d'une AD pour des ouvrages de génie civil (barrages, fondations) ne sont pas directement applicables dans le cas des ouvrages miniers car les méthodes de construction appliquées (p. ex. rehaussement progressif des digues et des haldes), les matériaux utilisés et la présence des rejets qu'on y entrepose (incluant les résidus miniers et roches stériles) ont des caractéristiques particulières qui peuvent augmenter sensiblement les risques d'instabilité sismique. Des AD sont jugées pertinentes lorsque les ouvrages miniers ont une envergure minimale (Aubertin et al., 2002a) et qu'ils sont situés dans des zones sismiques induisant des risques non négligeables (voir plus loin). De telles AD servent alors à évaluer les effets sismiques sur le comportement cyclique des matériaux (sols, rejets), incluant la génération de surpressions interstitielles, et sur la réponse des ouvrages.

Ce rapport comprend 9 sections. À la suite de cette brève introduction, on retrouvera à la section 2 des suggestions sur la documentation la plus pertinente sur l'analyse de la stabilité dynamique (et statique) des ouvrages miniers et des structures géotechniques similaires. La section 3 porte sur les principales méthodes d'analyse du comportement sismique avec une emphase sur celles recommandées pour la conception des ouvrages miniers. Les approches de caractérisation et d'évaluation des propriétés des matériaux (sols, rejets) sont décrites à la section 4. On présente ensuite à la section 5 la procédure et les étapes de l'analyse dynamique, avec les détails les plus pertinents. La section 6 porte sur l'interprétation des résultats de telles AD. Divers autres aspects, incluant les méthodes pour améliorer la stabilité sismique, sont abordés à la section 7. Des remerciements sont inclus à la section 8. Le rapport se termine à la section 9 avec une liste de références.

2. Documentation

Ce rapport porte principalement sur l'analyse dynamique des ouvrages conçus pour l'entreposage des rejets miniers. Le contenu est en grande partie basé sur les travaux menés par l'auteur et ses collaborateurs (incluant plusieurs étudiants gradués) au cours des deux dernières décennies. Ces travaux spécifiques aux ouvrages miniers font aussi référence à de nombreuses publications portant sur le comportement géotechnique des sols soumis à un chargement cyclique, au développement de lois de comportement, et à l'utilisation de méthodes numériques afin d'évaluer la réponse sismique de divers types d'ouvrage. La liste de références présentée en annexe inclut plusieurs publications d'intérêt portant sur l'un ou l'autre des aspects abordés dans ce rapport; ces publications comportent aussi plus de détails (avec des références additionnelles) sur les thèmes abordés ici.

Afin d'orienter le lecteur, certains documents importants sont mentionnés ici, car ils sont d'un intérêt particulier, en lien avec des thèmes abordés dans le rapport :

- Nature et propriétés des rejets miniers; analyse et conception des ouvrages pour l'entreposage des rejets miniers : Vick (1990), Hustrulid et al. (2000), Aubertin et al. (2002a,b, 2011, 2013, 2021), Fell et al. (2005), Bussière (2007), Blight (2010), ACB (2013, 2019), Hawley et Cuning (2017), Maknoon et Aubertin (2021).
- Comportement cyclique des sols et effets associés, incluant les essais de caractérisation et la liquéfaction sismique : Kramer (1996), Mitchell et Soga (2005), Idriss et Boulanger (2008), Holtz et al. (2011), Briaud (2013), Boulanger et Idriss (2014), Bray et Olaya (2023).
- Analyses dynamiques pour la conception géotechnique des ouvrages : Boulanger et Montgomery (2015), Boulanger et Beaty (2016), Verret et Péloquin (2017). USSD (2022), CGS (2023).
- Travaux spécifiques sur le comportement cyclique des r siduals miniers et sur l'analyse dynamique des parcs à r siduals menés à Polytechnique Montréal par l'auteur et ses collaborateurs : mémoires et thèses de James (2009), Poncelet (2012), Ferdosi (2014), Archambault-Alwin (2017), Zafarani (2022), Contreras (2022); voir aussi les publications issues de ces travaux dans la liste de références.

De nombreuses références additionnelles sont également citées dans le rapport en lien avec des éléments spécifiques.

3. Méthodes d'analyse recommandées

Le comportement et la stabilité sismique des ouvrages de retenue pour les sites d'entreposage de rejets miniers (parcs à résidus, haldes à stériles, bassins de rétention et autres) peuvent être évalués selon quatre principales approches. La méthode pseudo-statique, usuellement basée sur une analyse de stabilité de pente par équilibre limite, considère que les effets d'un séisme peuvent être représentés par une force horizontale équivalente souvent définie en fonction de l'accélération maximale induite par le tremblement de terre (Lambe et Whitman, 1979; Aubertin et Chapuis, 1991; Kramer, 1996; Chowdury et al., 2011; Duncan et al., 2014). La méthode des déplacements permanents, initialement proposée par Newmark (1965), repose sur l'analyse d'une masse (bloc rigide) qui se déplace le long d'une surface de rupture potentielle à l'intérieur de l'ouvrage. Le déplacement de la masse est alors évalué en fonction de sa fréquence naturelle et de l'accélération due aux mouvements de terrain selon l'ampleur du dépassement de l'accélération critique qui initie le déplacement (Kramer, 1996; USSD, 2022). Des approches semi-empiriques ont été développées pour évaluer des aspects particuliers, notamment le potentiel de liquéfaction selon les propriétés des matériaux et les conditions de chargement simplifiées (Youd et al., 2001; Idriss et Boulanger, 2008; James et al., 2011; James et Aubertin, 2016). L'analyse dynamique AD de la réponse sismique se fait à partir de simulations numériques du comportement contrainte-déformation des matériaux constituant les ouvrages (USSD, 2022). Cette dernière approche, plus générale et potentiellement plus représentative pour la conception des ouvrages, demande toutefois une expertise particulière pour mener les simulations, et elle requiert des données d'entrées plus élaborées et un travail d'interprétation spécifique souvent basé sur la performance des ouvrages, ou approche PBD (*Performance Based Design*; Kramer, 2014, 2023; Finn, 2018). Ces quatre méthodes (ou catégorie de méthodes) sont décrites sommairement plus loin dans cette section; le reste du rapport porte essentiellement sur l'AD menée à l'aide d'outils de simulation numérique.

L'analyse du comportement sismique des ouvrages miniers doit tenir compte de plusieurs caractéristiques et facteurs d'influence incluant la stratigraphie et la géométrie des composantes, les conditions de chargement anticipées, les propriétés des matériaux (sols, rejets) et de leur réponse, incluant la baisse (dégradation cyclique) du module de rigidité et de la résistance causée par la génération des pressions interstitielle en excès pouvant mener à la liquéfaction. La qualité des résultats d'analyse dépend aussi grandement de l'investigation de site (section 4), ainsi que de l'aléa et de la représentativité des chargements sismiques selon l'amplitude, la fréquence et la durée (section 5).

3.1 Description des principales méthodes

3.1.1 Analyse pseudo-statique et facteur de sécurité

L'évaluation de la stabilité sismique de la pente des ouvrages peut être basée sur une analyse pseudo-statique par équilibre limite qui évalue et compare les efforts gravitaires et sismiques (forces, contraintes, moments) à la résistance disponible afin d'évaluer le facteur de sécurité FS (Kramer, 1996; Chowdury et al., 2010; Duncan et al., 2014). L'analyse pseudo-statique est relativement simple à réaliser, et elle est utilisée depuis longtemps dans la pratique. Mais sa représentativité est souvent limitée car elle néglige plusieurs facteurs importants liés aux effets d'un tremblement de terre. Selon cette approche, les effets du séisme sont usuellement représentés par une accélération horizontale unique (constante, permanente), qui produit des forces inertielles dans le modèle dont la stabilité est évaluée par équilibre limite (selon un comportement parfaitement plastique). La valeur de l'accélération pseudo-statique appliquée doit alors être estimée en fonction de l'intensité du séisme de conception (Kramer, 1996). Le coefficient pseudo-statique imposé est usuellement exprimé en fonction de l'accélération maximale (a_{\max} ou PGA) du séisme au niveau du roc; des valeurs typiques du coefficient pseudo-statique ont été rapportées par divers auteurs (p. ex. Aubertin et Chapuis, 1991; Jibson, 2011). Il y a cependant une grande incertitude sur la valeur que devrait prendre ce coefficient pseudo-statique, et un jugement géotechnique est nécessaire pour tenir compte de la nature du problème.

L'analyse de la stabilité avec les forces gravitationnelles et sismiques doit mener à une valeur du facteur (ou coefficient) de sécurité pseudo-statique $FS_{ps} \geq 1$. La valeur de FS_{ps} requise (souvent de 1.1, 1,15 ou plus) dépend alors du risque (probabilités, conséquences) associé à l'ouvrage à partir de lignes directrices et selon l'expérience et le jugement des ingénieurs. Un aspect positif de ce type d'analyse est le fait qu'une plus grande valeur de FS_{ps} de l'ouvrage correspond généralement à une valeur FS plus élevée en condition statique (avec $FS_{ps} \geq FS$), ce qui peut contribuer à accroître globalement la stabilité de la pente. L'approche pseudo-statique peut aussi être utilisée pour évaluer la stabilité post-sismique (Duncan et al., 2014).

Cette méthode est relativement facile à utiliser pour évaluer le facteur de sécurité d'un talus, comme une halde à stériles par exemple. Elle peut même être appliquée selon une approche probabiliste pour tenir compte des incertitudes. Mais elle ne donne pas d'information sur l'ampleur des déformations, qui constitue un aspect critique pour évaluer le comportement des ouvrages de retenue comme les digues de parcs à résidus miniers. Il y a aussi de nombreuses limitations propres à cette méthode d'analyse, qui peut s'avérer non conservatrice, notamment lorsqu'il y a une augmentation de la pression interstitielle pouvant mener à une baisse significative de résistance pendant le chargement sismique (p. ex. baisse de 15 % ou plus selon Verret et Péloquin, 2017; voir aussi Stewart et al., 2003; Jibson, 2011). Des variantes ont été proposées afin de rendre cette approche plus représentative (p. ex. Bray et Travararou, 2009; Karray et al., 2017a,b), mais plusieurs limitations demeurent. En général, cette méthode ne devrait pas être utilisée pour statuer sur la stabilité sismique des ouvrages susceptibles à la liquéfaction des matériaux, comme les parcs à résidus miniers de roche dure.

3.1.2 Déplacements permanents

Cette méthode d'analyse, initialement proposée par Newmark (1965), vise à évaluer le déplacement d'une masse (bloc rigide), qui glisse sur une surface (inclinée ou courbe), subissant une accélération qui excède la valeur critique minimale produisant un mouvement (Kramer, 1996; Chowdury et al., 2010; USSD, 2022). L'accélération critique pour initier le mouvement est associée à un coefficient pseudo-statique (produisant une force horizontale) menant à un facteur de sécurité unitaire. Le bloc tend alors à se déplacer lorsqu'une force excédentaire agit sur celui-ci. La méthode utilise l'histogramme de l'accélération d'un séisme, en considérant les périodes où la valeur de l'accélération excède l'accélération critique. Ces accélérations sont intégrées pour obtenir l'histogramme de vitesse du bloc en fonction du temps, menant au déplacement cumulé résultant des périodes durant lesquelles l'accélération critique est dépassée (parfois à plusieurs reprises) pendant le séisme. Le déplacement total, qui est influencé par la durée du séisme et du mouvement, ainsi que par son amplitude et sa fréquence, sert de critère pour évaluer la performance sismique (Kramer, 1996).

La méthode originale, qui postule que le bloc rigide ne se déforme pas, n'est pas réaliste car les ouvrages (talus, digues) se déforment pendant le mouvement dû au séisme. La méthode a été modifiée afin de tenir compte (en partie) du comportement contrainte-déformation des sols (analyses découplées ou couplées) et d'autres facteurs comme la variation de l'accélération critique avec la déformation (Kramer, 1996; Bray et Travararou, 2007, 2009; Jibson, 2011; NASEM, 2016; USSD, 2022; Cho et al., 2022; Cho et Rathje, 2022; CGS, 2023). L'effet de la pression interstitielle induite par les chargements dynamiques ne peut toutefois pas être pris en compte avec cette méthode qui ne devrait donc pas être utilisée (ou être appliquée avec grande précaution) lorsque cet aspect est important, comme c'est le cas pour les parcs à résidus miniers susceptibles à une liquéfaction.

3.1.3 Analyses semi-empiriques de la liquéfaction

L'analyse des effets sismiques devrait comporter une évaluation des conditions menant à la liquéfaction des sols et des rejets; celle-ci est particulièrement importante pour les résidus miniers lâches et saturés qui sont très sensibles à ce phénomène. Suivant une approche semi-empirique initialement proposée par Seed (p. ex. Seed, 1983, 1987), basée sur des essais de laboratoire ou *in situ*, plusieurs variantes de cette méthode ont été développées pour les sols (Kramer, 1996; Youd et al., 2001; Seed et al., 2003; Idriss et Boulanger, 2008). Cette approche peut aussi être

appliquée pour évaluer la liquéfaction des résidus miniers (Vick, 1990; Aubertin et Chapuis, 1991; James et al., 2011; James et Aubertin, 2016; James, 2024). L'évaluation de la liquéfaction est une composante critique de l'analyse du comportement sismique des parcs à résidus miniers; cet aspect est traité plus en détails aux sections 4 et 5.

3.1.4 Analyses dynamiques numériques

Les analyses du comportement contrainte-déformation à partir de méthodes numériques (méthode des éléments finis, MEF, ou des différences finies, MDF), permettent d'évaluer la réponse géotechnique des ouvrages de façon plus réaliste que les méthodes analytiques ou empiriques (Potts et Zdravkovic, 1999, 2001; Muir Wood, 2004). Il existe cependant divers niveaux de complexité dans les analyses dynamiques, selon les lois de comportement utilisées, la nature des sollicitations cycliques imposées, la méthode de calcul des pressions interstitielles et de l'effet sur la rigidité et la résistance des matériaux, ainsi que la technique utilisée pour évaluer les déplacements.

Les analyses dynamiques peuvent être appliquées aux cas des talus (comme les haldes) pour évaluer de façon relativement simplifiée la stabilité des pentes (Chowdury et al., 2010). La valeur de FS peut alors calculée à partir des contraintes (estimées ou simulées) pour un calcul par équilibre limite, comme ceci se fait sous chargement (quasi) statique (p. ex. Maknoon, 2016; Maknoon et Aubertin, 2021).

L'analyse dynamique (AD) numérique est particulièrement utile et fortement recommandée pour évaluer le comportement sismique des ouvrages miniers d'envergure comme des digues de retenue des parcs à résidus miniers lorsqu'ils sont situés dans une région où l'activité sismique est jugée significative. Les AD sont alors communément menées avec des lois de comportement non linéaires couplées permettant de prendre en compte la présence de matériaux liquéfiables (p. ex. sables et silts peu plastiques), avec une baisse de rigidité et de résistance durant les sollicitations sismiques. Les AD utilisent des données sismiques (souvent historiques) pour définir le mouvement de la fondation (roc ou sols) et simuler l'évolution des contraintes totales et effectives, des pressions d'eau interstitielles, ainsi que des déformations et déplacements induits. Cette méthode est présentée plus en détail dans les paragraphes suivants et à la section 5.

3.2 Composantes de l'analyse dynamique

Les analyses dynamiques (AD) numériques du comportement sismique visent à évaluer globalement la réponse d'un système déformable, en fonction des charges appliquées (USSD, 2022). Les simulations sont usuellement réalisées par la méthode des éléments finis ou la méthode des différences finies, utilisées dans des codes tel FLAC (Itasca, 2016), PLAXIS (Bentley, 2020) et LS-DYNA (LSTC, 2015) Les calculs numériques pour l'AD reposent sur des lois de comportement non linéaires capables de représenter la réponse dynamique des sols (et rejets miniers). Il existe d'ailleurs plusieurs modèles constitutifs non linéaires pour représenter le comportement géotechnique de divers types de géomatériaux (sols, roches, rejets et autres) avec une formulation mathématique exprimée selon les contraintes et les déformations (p. ex. Desai et Siriwardane, 1984; Potts et Zdravkovic, 1999; Muir Wood, 2004; Yu, 2007). Mais peu de ces modèles peuvent bien représenter le comportement géotechnique sous chargement cyclique.

Les analyses dynamiques engendrent des défis majeurs pour les ouvrages de retenue d'envergure, particulièrement dans le cas des parcs à résidus miniers (James, 2009, 2024; Ferdosi, 2014; Contreras, 2022). Par exemple, les données requises pour calibrer les lois de comportement requièrent plusieurs résultats d'essais de laboratoire ou *in situ*, qui ne sont pas aisément disponibles. De plus, le logiciel de simulation doit inclure des composantes permettant d'introduire le mouvement sismique de façon réaliste, pour diverses fréquences et amplitudes. Le code doit aussi inclure des lois constitutives capables de reproduire le comportement contrainte-déformation non linéaire des matériaux (sols et rejets) en fonction du temps en tenant compte du développement des pressions interstitielles, de la baisse de résistance ainsi que l'effet de la liquéfaction sur les contraintes induites sur les ouvrages de retenue. Les caractéristiques du code numérique doivent donc être adaptées aux calculs impliquant des sollicitations sismiques, avec

des mouvements imposés d'amplitude et de fréquence variable. De plus, les modèles construits numériquement, qui représentent souvent des ouvrages de grandes dimensions, doivent être élaborés en optimisant la taille du maillage (et des pas de temps) avec des conditions frontières représentatives. En ce sens, la modélisation des événements sismiques pour les ouvrages miniers requiert une expertise spécifique pour mener les analyses et interpréter résultats. Quelques éléments particuliers aux AD sont mentionnés ici et revus plus en détail plus loin dans le document.

3.2.1 Loi de comportement

Le choix de la loi de comportement (ou modèle constitutif) est un élément central pour l'analyse dynamique numérique. La formulation de cette loi doit bien représenter la réponse des matériaux (sols, rejets, et autres) et les interactions entre les composantes des ouvrages simulés. Les lois de comportement les plus appropriées pour l'AD sont exprimées de façon couplée afin d'évaluer l'évolution des contraintes (totales et effectives), des pressions d'eau et des déplacements, ainsi que des phénomènes particuliers comme l'amorce de la liquéfaction durant le séisme. Dans certains cas, le modèle doit aussi être applicable au comportement post-liquéfaction (ou post-séisme).

Plusieurs modèles constitutifs ont été développés en géotechnique pour représenter les sols et autres géomatériaux dans les simulations numériques. Certains modèles sont simples, comme le modèle linéaire élastique isotrope (loi de Hooke), mais ils sont peu représentatifs de la réalité dans la plupart des cas. Pour les analyses sous chargement (quasi) statique, on utilise fréquemment le modèle élasto-plastique avec critère de Mohr-Coulomb (et ses variantes) pour reproduire le comportement au-delà du domaine élastique. Ce type de modèle est souvent appliqué pour évaluer la stabilité des ouvrages miniers sous chargement statique et obtenir la valeur de FS par équilibre limite (p. ex. Maknoon et Aubertin, 2021; Jahanbakhshzadeh et Aubertin, 2020, 2024) ou selon l'approche d'analyse contrainte-déformation avec facteur de réduction de la résistance (Majdanishabestari et al., 2022, 2024; Majdanishabestari, 2023), mais ce type de modèle n'est pas directement applicable au chargement cyclique s'il y a risque de liquéfaction.

Les modèles constitutifs utilisés pour représenter le comportement cyclique des ouvrages miniers doivent tenir compte des déformations volumétriques (plastiques, permanentes) qui peuvent réduire (ou parfois accroître) la porosité et ainsi modifier les pressions interstitielles et les contraintes effectives, et ainsi mener à une liquéfaction. Le modèle doit aussi représenter adéquatement la dégradation du module de rigidité G et l'amortissement cyclique de nature hystérétique observés dans les essais de laboratoire (James, 2009; Contreras, 2022).

Les lois de comportement d'intérêt sont donc couplées au niveau des déformations, des contraintes (totales et effectives) et des pressions d'eau. Parmi les modèles existants, deux modèles développés pour les sables (sols granulaires relativement fins) ont été appliqués et validés (en partie) pour évaluer le comportement sismique des résidus miniers de roches dures et simuler la réponse de sites d'entreposage avec digues de retenue : le modèle UBCSAND (Byrne et al., 2006; Beaty et Byrne, 2011) utilisé par James (2009) et Ferdosi (2014) (voir aussi James et Aubertin, 2012; Ferdosi et al., 2015a,b,c; Aubertin et al., 2019; Jahanbakhshzadeh et al., 2019; James, 2024); le modèle PM4Sand (Boulanger et Ziotopoulou, 2017) utilisé par Zafarani (2022) et Contreras (2022) (voir aussi Zafarani et al., 2020, 2021; Contreras et al., 2023a,b). Les principaux avantages et les limitations de ces deux modèles ont été discutés dans quelques publications et résumés par Contreras (2022).

On peut aussi mentionner le modèle NorSand (Jefferies et Been, 2015), basé sur la théorie d'état critique (tout comme PM4Sand), largement utilisé depuis quelques années, notamment en raison de sa capacité à prédire la liquéfaction statique des sables. Certaines limitations de ce modèle pour les chargements cycliques ont été identifiées et discutées par Castonguay (2020). D'autres modèles de comportement cyclique des sables ont aussi été présentés (p. ex. Dafalias et Manzari, 2004; Anthi et Gerolymos, 2019; USSD, 2022; CGS, 2023), mais ils semblent peu utilisés pour les ouvrages miniers.

Il existe aussi des modèles constitutifs capables de représenter le comportement géotechnique des sols plastiques, avec un comportement typique des sols argileux. La représentation du

comportement de tels sols est souvent réalisée avec le modèle élasto-plastique Mohr Coulomb (MC), qui donne usuellement une représentation valable pour évaluer les conditions de rupture sous chargement statique. Mais ce modèle relativement simple ne peut pas représenter plusieurs aspects du comportement des sols (et des rejets), incluant l'évolution des déformations et des pressions interstitielles en excès. En condition quasi-statique, les modèles constitutifs de type CamClay considérant l'état critique (p. ex. Desai et Siriwardane, 1984; Muir Wood, 1990, 2004) sont plus appropriés, mais ils ne sont pas bien adaptés au comportement cyclique. Boulanger et Ziotopoulou (2018, 2022) ont développé le modèle couplé PM4Silt en contraintes effectives afin de représenter le comportement statique et cyclique des silts et des argiles de plasticité relativement faible, que l'on retrouve parfois dans les digues de retenue ou les fondations. Le modèle PM4Silt a été utilisé par Contreras (2022) pour analyser la réponse d'un parc à résidus construit sur un sol argileux; cette loi de comportement pourrait aussi être appliquée aux résidus miniers montrant une certaine plasticité.

Les difficultés induites par la calibration et l'application de tels modèles de comportement sont inhérentes aux analyses dynamiques numériques. Il peut alors s'avérer avantageux d'appliquer aussi une technique d'analyse complémentaire (parfois jugée plus simple) basée sur une évaluation des conditions énergétiques (p. ex. Green et al., 2000; Kokusho, 2020; Khashila et al., 2023); cette approche est toutefois peu utilisée pour les ouvrages miniers (à la connaissance de l'auteur).

Les simulations pour l'AD nécessitent aussi l'utilisation d'un modèle d'amortissement hystérétique afin de tenir compte de la dégradation du module de cisaillement (ou de rigidité) G avec la déformation cyclique (Holtz et al., 2011; James et al., 2011; Contreras, 2022). La dégradation du module de cisaillement (c.-à-d. évolution du rapport G/G_0 défini plus loin) et l'amortissement induit par la déformation en cisaillement cyclique peuvent être introduits à l'aide d'une formulation spécifique comme la fonction hystérétique sigmoïdale Sig3 ou Sig4 disponible dans FLAC (Itasca, 2016).

Les lois constitutives précitées du comportement dynamique (cyclique) comportent généralement plusieurs paramètres (constantes) dont la valeur peut être évaluée à partir de données expérimentales (essais de laboratoire ou mesures *in situ*) ou estimée selon des bases de données. Il est alors essentiel de bien caractériser le site et les matériaux en place à l'aide d'essais appropriés pour concevoir les ouvrages; cet aspect est abordé aux sections 4 et 5.

Les analyses dynamiques numériques font aussi fréquemment appel à des bases données pour représenter les conditions de chargement sismique. Il faut ainsi définir un (ou plusieurs) spectre(s) de chargement (accélération spectrale S_a en fonction de la période T) pour l'analyse et la conception basé(s) sur un aléa représentatif pour la région d'intérêt (Contreras, 2022; James, 2024). Le spectre correspond alors à la période de retour PR sélectionnée (p. ex. de 2 475 ans ou 10 000 ans) selon l'aléa sismique, tel que ceux fournis par la Commission géologique du Canada, CGC; cet aspect est discuté plus en détail à la section 5.

3.2.2 Potentiel de liquéfaction

Un autre élément important de l'analyse dynamique consiste à évaluer la vulnérabilité sismique face à la liquéfaction, qui est un aspect particulièrement important pour les résidus miniers lâches (contractants). Le terme liquéfaction est utilisé en géotechnique pour représenter une baisse rapide de rigidité et de résistance au cisaillement, à la suite d'une augmentation des pressions d'eau interstitielles qui se manifeste surtout dans certains sols compressibles (sables et silts peu plastiques) et résidus miniers pulvérulents, lâches et saturés. Il existe diverses approches pour évaluer le risque de liquéfaction, incluant les approches semi-empiriques, déjà mentionnées, développées principalement pour des dépôts de sable. Ce type d'approche fait généralement référence à des mesures en place (p. ex. essais SPT, CPT, voir sections 4 et 5) et à une évaluation des contraintes induites par le séisme (p. ex. Youd et al., 2001; Idriss and Boulanger, 2008; Boulanger and Idriss, 2014; Robertson, 2015, 2022; NASEM, 2016). Mais comme ces approches engendrent généralement une grande incertitude dans le cas des résidus miniers, il est conseillé d'utiliser plus d'une méthode et de mener des analyses de sensibilité (James et Aubertin, 2016).

La modélisation numérique est souvent utilisée pour mieux comprendre et évaluer le comportement sismique des matériaux et des ouvrages, incluant la liquéfaction. Mais de telles simulations engendrent aussi des incertitudes sur la précision des résultats obtenus, qui dépendent fortement des caractéristiques du code de calcul, de la représentativité du modèle conceptuel à la base du modèle numérique, des lois de comportement utilisées, de la caractérisation des matériaux et des conditions de chargement sismiques imposées. Des étapes de validation sont alors nécessaires pour établir le niveau de confiance face aux outils de calcul utilisés. À nouveau, l'expérience et le jugement professionnel en géotechnique font partie du processus d'évaluation du risque. Ces aspects sont rediscutés aux sections suivantes.

3.2.3 Interprétation des résultats et validation

L'application de l'AD requiert aussi une approche spécifique pour interpréter les résultats de simulation. Cette interprétation diffère souvent des approches classiques basées sur l'évaluation d'un facteur (ou coefficient) de sécurité FS. L'interprétation des résultats de l'AD fait fréquemment référence à une conception liée à la performance des ouvrages (approche PBD; *Performance-based design*) face aux sollicitations cycliques induites par le tremblement de terre. Ceci implique par exemple d'évaluer les déplacements en lien avec le niveau de performance, et les dommages induits et effets associés.

L'approche PBD est de plus en plus souvent utilisée en géotechnique pour la conception des ouvrages d'envergure (ou à risque) à partir d'analyses numériques dynamiques. Un des avantages de l'approche PBD est qu'elle facilite la comparaison de diverses options pour optimiser la conception des ouvrages pour les sollicitations sismiques et post-sismiques. Cet aspect est abordé aux sections 5-7.

Tel que déjà mentionné, la valeur des résultats de l'AD dépend fortement de la qualité des outils utilisés. À cet égard, il ne faut pas négliger le travail de validation des modèles constitutifs et numériques pour bien représenter le comportement des matériaux, incluant la dégradation et l'affaiblissement en lien avec la liquéfaction pour les conditions de sollicitation sélectionnées/retenues pour les analyses. Les professionnels responsables de ces travaux doivent avoir une expertise spécifique pour mener les analyses et interpréter les résultats; ceci va au-delà de savoir utiliser un code numérique. Une attention particulière doit être portée aux paramètres utilisés pour représenter les matériaux avec les modèles constitutifs, selon une calibration tenant compte du chargement sismique de conception. Il faut aussi évaluer la sensibilité de la réponse simulée en fonction de la géométrie et la taille du modèle numérique, des caractéristiques du maillage (type et taille d'éléments), des données d'entrée pour le chargement sismique, des conditions frontières, et du contrôle des pas de temps et de la convergence du modèle numérique. Compte tenu de la variabilité et des incertitudes anticipées pour l'AD des ouvrages miniers, il est fortement recommandé d'inclure une revue et une évaluation indépendante dans le processus de validation menant à la conception.

4. Caractérisation du site et propriétés des matériaux

Une évaluation détaillée des caractéristiques du site et des propriétés géotechniques des matériaux (sols de fondation, rejets, remblais et autres) sous chargement statique et cyclique (dynamique) est nécessaire pour bien analyser la réponse des ouvrages miniers face aux sollicitations anticipées. Les résultats de l'investigation de site servent notamment à construire les modèles utilisés pour mener les simulations numériques sous diverses conditions de chargement. On peut alors comparer la réponse de différentes configurations afin d'optimiser la conception des ouvrages.

Les principales propriétés d'intérêt sont celles qui gouvernent le comportement géotechnique sous le chargement induit durant la construction progressive des ouvrages miniers et lors d'événements particuliers comme des pluies abondantes (analyses de stabilité conventionnelles) et les tremblements de terre. Les caractéristiques visées comprennent : les relations entre les contraintes et les déformations (de cisaillement et volumique) en conditions drainées et non-drainées; les paramètres qui contrôlent les pressions d'eau interstitielles et la consolidation (compressibilité, conductivité hydraulique); la résistance maximale (au pic) et à l'état critique (à volume constant); le module de rigidité (ou de cisaillement) G , avec sa valeur initiale G_0 (ou maximale G_{max}) et son évolution progressive lors d'un chargement monotone et cyclique. Lorsque les matériaux (sols, rejets) sont partiellement saturés (degré de saturation $S_r < 100\%$), il peut aussi être pertinent d'évaluer aussi les caractéristiques de comportement sous des pressions d'eau négatives (p. ex. Narvaez et al., 2015; Essayad et Aubertin, 2020); notons toutefois que l'analyse dynamique porte généralement sur des matériaux saturés afin de représenter une condition conservatrice à l'égard de la stabilité des ouvrages.

Des informations détaillées sur l'investigation de site et la caractérisation géotechnique des matériaux sont fournies dans plusieurs documents techniques, dont ceux mentionnés dans la section 2 et dans la liste de références (voir en particulier Burland et al., 2012; Briaud, 2013; Davis, 2022); voir aussi les références sur le comportement cyclique des sols et géomatériaux (p. ex. Kramer, 1996; Holtz et al., 2011; CGS, 2023). Cette section présente une synthèse des principales composantes de la caractérisation requise pour l'analyse dynamique des ouvrages miniers.

4.1 Types et propriétés des matériaux

Mener une AD requiert l'évaluation des propriétés des sols en place, des rejets entreposés sur le site (issus de l'opération minière), et des autres matériaux de construction. Les propriétés de base et les caractéristiques géotechniques typiques de ces rejets (principalement les résidus miniers et les roches stériles) sont présentées dans divers documents (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a,b, 2011; 2013, 2022; Bussière, 2007). Pour les mines en roches dures, les rejets solides montrent généralement un comportement géotechnique typique des sols granulaires pulvérulents (sans cohésion) comme certains graviers, les sables et les silts peu plastiques. La réponse de tels géomatériaux est essentiellement contrôlée par l'interaction mécanique directe de frottement entre les particules, dont la valeur est représentée par l'angle de friction (frottement) interne effectif ϕ' . La valeur de l'angle ϕ' peut être obtenue expérimentalement en évaluant les contraintes déviatoriques (de cisaillement) maximales en fonction des contraintes de confinement (Mitchell et Soga, 2005; McCarthy, 2007; Holtz et al., 2011). On évalue aussi le comportement volumique (contractant ou dilatant) selon l'indice de vides souvent défini par rapport à la ligne d'état critique, LEC, qui caractérise le comportement à volume constant pour chaque niveau de contrainte (Kramer, 1996; Jefferies et Been, 2015). La LEC est une caractéristique importante pour l'analyse du comportement sismique car elle permet de distinguer le comportement contractant (état lâche) et dilatant (dense), en lien avec la génération de pressions interstitielles en excès sous des conditions de chargement non drainées comme c'est souvent le cas lors d'un tremblement de terre (Mitchell et Soga, 2005).

4.2 Investigation et mesures *in situ*

Les méthodes d'investigation de site pour les projets de nature géotechnique sont présentées en détails dans plusieurs documents déjà cités (voir en particulier la synthèse dans le récent Manuel de la Société canadienne de géotechnique; CGS, 2023). L'investigation requise pour l'analyse et la conception des ouvrages miniers comprend une caractérisation de la topographie, de la géologie et de la stratigraphie du site, une évaluation des propriétés des sols et du massif rocheux, la détermination des conditions hydrogéologiques (niveau phréatique, gradient hydraulique local et régional, conductivité hydraulique des matériaux), ainsi que le zonage et la distribution spatiale des matériaux en place. Ces informations servent notamment à définir le modèle conceptuel des ouvrages analysés (selon les simplifications adoptées), qui est ensuite utilisé pour construire le modèle numérique servant à mener les simulations en fonction des conditions de chargement anticipées (voir sections 3 et 5).

Le travail mené sur le terrain est généralement combiné à des essais de laboratoire, notamment pour les sols granulaires et autres matériaux pulvérulents non plastiques (incluant les roches stériles et les résidus miniers de roches dures) qui sont très difficiles à échantillonner à l'état intact. Leurs propriétés sont alors souvent évaluées (au moins en partie) par des mesures et essais *in situ*, en évaluant par exemple la résistance à l'enfoncement (pénétration) menant à des propriétés index, comme l'indice N_{60} de l'essai de pénétration standard SPT (*Standard penetration test*) et les indices Q , Q_p et F pour les essais de pénétration au cône CPT (*Cone penetration test*).

L'essai SPT, qui évalue le nombre de coup N_{1-60} (valeur normalisée) pour un enfoncement de 0,3 m est utilisé depuis longtemps pour évaluer diverses caractéristiques géotechniques des sols. Il est souvent appliqué aux sols sableux car il permet un prélèvement d'échantillon (remanié) et l'établissement de corrélations avec diverses caractéristiques géotechniques comme l'angle ϕ' et la résistance à la liquéfaction. Mais cet essai *in situ* est peu approprié, en général, pour caractériser les sols (matériaux) mous comme certaines argiles normalement consolidées et les résidus miniers à l'état lâche, avec des valeurs N_{1-60} très faibles (difficiles à interpréter pour un enfoncement rapide).

L'essai de pénétration au cône CPT est plus versatile et il peut être utilisé dans les sols argileux, silteux et sableux, et certains types de gravier. Il est devenu l'essai de terrain privilégié pour les investigations géotechniques. Cet essai fournit un profil (quasi) continu des caractéristiques du sol (ou des rejets) à partir des indices de résistance en pointe Q (ou Q_p) et à la friction latérale F , et des pressions d'eau B_q . Les résultats mesurés peuvent alors être corrélés à diverses caractéristiques des sols (Robertson, 2015, 2016, 2022; CGS, 2023). Notons toutefois que l'essai CPT ne permet pas de récupérer des échantillons, de sorte qu'une campagne de prélèvement doit souvent être menée en parallèle afin de compléter la caractérisation et la classification des sols (et rejets) sur la base d'essais de laboratoire sur des échantillons remaniés (impliquant au minimum la granulométrie et les limites d'Atterberg). Il existe aussi des corrélations entre les indices obtenus des essais SPT et CPT.

L'expérience acquise au fil des années permet aussi d'utiliser les résultats des essais CPT afin d'identifier les principaux types de sols, de distinguer les sols plastiques et non plastiques, et de statuer sur les zones susceptibles à la liquéfaction. L'interprétation de ces essais est cependant plus difficile en présence de couches relativement minces.

Pour les géomatériaux mous (argiles, résidus), on peut aussi mener des essais de cisaillement au scissomètre pour évaluer la résistance au cisaillement non drainée S_u ; l'interprétation de ces essais est cependant incertaine dans le cas des résidus miniers de mines en roche dure (p. ex. Vick, 1990; Jahanbakshshzadeh et Aubertin, 2024).

Certaines techniques géophysiques basées sur la propagation des ondes mécaniques ou électromagnétiques peuvent aussi s'avérer très utiles pour compléter les autres types de mesure ou lorsque les essais conventionnels *in situ* sont difficilement applicables, comme c'est généralement le cas pour les haldes à stériles (p. ex. Anterrieu et al., 2010; Dimech, 2018; Dimech et al., 2019). Des techniques géophysiques peuvent aussi être combinées aux mesures d'enfoncement, comme la mesure de la vitesse des ondes de cisaillement V_s (*In situ shear wave velocity*) qui se combine avec l'essai CPT. La valeur de V_s est d'un intérêt particulier près de la

surface, typiquement jusqu'à 30 m (c.-à-d. V_{s30}). La mesure de V_s peut se faire à partir de la surface, en trous de forage ou en combinaison avec une mesure sismique lors de l'enfoncement des essais au cône, SCPT (CGS 2023; Hussein et Sgaoula, 2024). Cette mesure ne donne toutefois qu'un aperçu des caractéristiques locales *in situ* (sur un assez grand volume) en raison de la variabilité des résultats qui sont influencés par plusieurs facteurs, incluant la contrainte de confinement et les effets de moyenne dans la zone de mesure. Comme on le verra plus loin, les valeurs de V_s peuvent aussi être mesurées lors d'essais de laboratoire (Karray et al., 2015), et être corrélées avec l'état des contraintes et d'autres caractéristiques des sols ou résidus comme la densité et le module de rigidité maximal, G_{max} ou G_o (Grimard, 2018; Grimard et al., 2021).

Globalement les essais *in situ* sont généralement considérés comme plus représentatifs de l'état des sols et rejets en place (que ceux en labo), mais ils sont souvent plus difficiles à réaliser et à interpréter.

4.3 Essais de laboratoire

La campagne de caractérisation des propriétés géotechniques implique dans la majorité des cas un programme d'essais de laboratoire afin de déterminer les principales propriétés de base, ainsi que les caractéristiques de déformabilité et de résistance; il faut aussi évaluer la réponse aux chargements cycliques requise pour l'AD (Kramer, 1996; Mitchell et Soga, 2005; James et al., 2011, Poncelet, 2012; Archambault-Alwin, 2017). Les essais de laboratoire visent d'abord à définir la classification des sols (selon la granulométrie et les limites d'Atterberg) puis à mesurer certaines propriétés géotechniques spécifiques associées à la compressibilité et la consolidation, la résistance au cisaillement, et la conductivité hydraulique saturée. Les essais courants visent à évaluer le comportement contrainte-déformation pour des modes de chargement et des cheminements spécifiques en conditions drainées ou non-drainées, ainsi que la résistance au cisaillement au pic (contrainte déviatorique maximale) en fonction de la contrainte de confinement, la ligne d'état critique, le module de rigidité en fonction du niveau de contrainte sous chargements monotone et cyclique, et l'amortissement produit par les boucles avec inversion cyclique. Les résultats de tels essais permettent aussi d'évaluer plusieurs composantes spécifiques de la réponse des sols (géomatériaux) comme la condition d'amorce de la liquéfaction, la baisse de résistance cyclique et la résistance post-liquéfaction. On utilise aussi les résultats d'essai de laboratoire pour évaluer les paramètres des lois de comportement aux étapes de calibration propre à chaque modèle (Contreras, 2022).

La qualité de l'échantillonnage et la préparation des éprouvettes constituent des aspects importants du programme d'essais de laboratoire. Pour les matériaux pulvérulents, il est très difficile d'obtenir des échantillons intacts qui conservent les caractéristiques naturelles *in situ* (densité, structure et microstructure). Il existe des techniques d'échantillonnage spécialisées pour prélever les matériaux granulaires à l'état quasi-intact (p. ex. gel des sols), mais elles sont dispendieuses et rarement utilisées pour les rejets miniers (notamment parce que leur structure est souvent très variable). La caractérisation des propriétés de sols granulaires se fait donc souvent en combinant des mesures en place et des essais de laboratoire sur des éprouvettes reconstituées (Boulangier et Idriss, 2014). De telles éprouvettes doivent néanmoins être représentatives des conditions de terrain. La méthode de préparation des éprouvettes doit ainsi être développée et mise en application correctement (Poncelet, 2012). Les essais de laboratoire doivent aussi être menés en suivant les normes applicables et interprétés par du personnel spécialisé. Pour les sols cohérents (souvent argileux), certaines techniques permettent un échantillonnage en conservant leur (micro)structure intacte, ce qui permet de faire des essais de laboratoire sur des éprouvettes représentatives des conditions *in situ*.

Les principaux essais utilisés pour la caractérisation géotechnique du comportement contrainte-déformation des sols et des rejets miniers sous chargement quasi-statique, en conditions drainées ou non drainées (avec mesure des pressions d'eau) sont le cisaillement simple DSS (*Direct simple shear*), la compression triaxiale conventionnelle CTC (*Conventional triaxial compression*), et le cisaillement direct CD pour des cas particuliers (p. ex. roches stériles, remblais rocheux et interfaces). On peut aussi mener des essais plus spécifiques afin de mesurer des propriétés particulières comme la rigidité à très faible déformation avec colonne de résonance

(*Resonant column device*) ou avec des éléments en flexion (*Bender elements*). La technique piézoélectrique P-RAT (*Piezoelectric ring actuator technique*; Karray et al 2015), qui mesure la vitesse des ondes de cisaillement, peut aussi être appliquée pour estimer certaines caractéristiques comme la rigidité initiale, et pour établir des corrélations avec les mesures *in situ* (Grimard et al. 2021).

Les essais triaxiaux, CTC, sont les plus utilisés car ils fournissent les courbes contrainte-déformation, qui permettent de définir la résistance au pic et la ligne d'état critique LEC (*Critical state line*, CSL); ces paramètres sont notamment inclus dans les lois de comportement basées sur la théorie de l'état critique (p. ex. Mitchell et Soga, 2005; Jefferies et Been, 2015). Cette théorie est régulièrement appliquée pour évaluer le comportement géotechnique des sols (et des résidus miniers) en fonction de l'indice des vides. Comme déjà mentionné, cette théorie fait une distinction entre le comportement à l'état lâche (contractant) et à l'état dense (dilatant), selon qu'on se situe d'un côté ou de l'autre de la LEC; rappelons qu'à l'état critique, la déformation de cisaillement se fait à volume constant. On utilise alors fréquemment le paramètre d'état ψ (*State parameter*) exprimé en fonction de l'indice des vides (actuel et à l'état critique) pour définir la réponse du sol et pour identifier différentes caractéristiques, comme celles pouvant mener à la liquéfaction (Jefferies et Been, 2015).

Les essais CTC et DSS sont aussi d'un intérêt particulier pour les analyses dynamiques car ils peuvent être réalisés en conditions non drainées sous chargement cyclique. Ils sont notamment utilisés pour caractériser le comportement dynamique des résidus miniers (James, 2009; Poncet, 2012; Contreras, 2013; Contreras et James, 2013). Il existe aussi un système d'essai avec chargement combiné, TxSS (*Triaxial-Simple Shear Device*) qui permet d'appliquer à la fois un cisaillement simple et une compression triaxiale (Chekired et al., 2015; Harehdasht et al., 2017); de tels essais ont été menés sur des résidus miniers (Archambault-Alwin, 2017) et les résultats ont été utilisés pour caractériser ces rejets (Jahanbakshshzadeh et Aubertin, 2022) et calibrer le modèle PM4Sand (Contreras, 2022).

Le programme d'essai sous chargement cyclique doit être réalisé selon le rapport des contraintes cycliques CSR (*Cyclic stress ratio*) ciblé (section 5). Ce paramètre est utilisé pour évaluer la résistance à la liquéfaction en fonction du nombre de cycle et d'autres caractéristiques du comportement cyclique (Kramer, 1996; Youd et al., 2001; Idriss et Boulanger, 2008). Dans certains cas, il faut aussi évaluer la résistance résiduelle et la résistance post-cyclique, qui peuvent être nettement inférieures à celle de l'état intact (section 5). La caractérisation expérimentale peut aussi être influencée par d'autres facteurs, comme l'indice de plasticité et la sensibilité des matériaux (c. - à-d. baisse de résistance au-delà du pic), qui ont une incidence sur la réponse aux chargement monotones et cycliques (CGS 2023).

Outre les essais précités, menés sur des éprouvettes de dimension standard (restreinte), on peut aussi réaliser des essais sur modèles physiques instrumentés de grande taille, comme la table sismique (Pépin et al. 2012) et la centrifugeuse géotechnique (Motamed et al., 2024). De tels essais sous chargement cyclique, plus élaborés et plus coûteux, peuvent s'avérer plus représentatifs des conditions *in situ* (malgré leurs limitations), et ils sont particulièrement utiles pour valider les lois de comportement et les modèles numériques (Ferdosi et al., 2015c; Motamed et al., 2024).

4.4 Calibration des modèles constitutifs

Les résultats des principaux essais de laboratoire (particulièrement les essais CTC et DSS) peuvent servir à évaluer les paramètres des lois de comportement. Cette détermination se fait par une évaluation directe et explicite (p. ex. module de rigidité, résistance au pic, ligne d'état critique) ou en comparant les résultats de simulations aux données expérimentales (p. ex. courbe de résistance cyclique). Les résultats expérimentaux visent aussi à déterminer la relation entre la contrainte cyclique CSR et le nombre de cycle requis pour atteindre une condition associée à la liquéfaction (p. ex. rapport des pressions interstitielles $r_u > 0,7$ à $0,9$; voir sections 5-6).

La calibration des paramètres de la loi de comportement repose sur une bonne concordance entre les résultats calculés et les données mesurées (p. ex. Anthi et Gerolymos, 2019). Compte tenu de

la variabilité des propriétés des matériaux, il est souvent utile et pertinent de baser la calibration sur plusieurs essais réalisés sous diverses conditions (c. -à-d. contraintes et porosités/ou densités différentes). Des exemples de calibration de paramètres de lois de comportement cyclique pour des résidus miniers, à partir d'essais et de simulations menées avec le code FLAC, sont présentés par James (2009) et Ferdosi (2014) pour le modèle UBCSand (Byrne et al. 2006) et par Contreras (2022) et Contreras et al. (2023a) pour le modèle PM4Sand (Boulanger et Ziotopoulou, 2017). Contreras (2022) montre aussi les résultats de calibration obtenus avec le modèle constitutif PM4Silt (Boulanger et Ziotopoulou, 2018) à partir d'essais de laboratoire sur un sol argileux de la région de l'Abitibi.

4.5 Évaluation de la liquéfaction

La liquéfaction des sols et des résidus miniers sous un chargement cyclique engendre une baisse rapide de la rigidité et de la résistance au cisaillement. Tel que déjà mentionné, la liquéfaction est surtout observée dans les sols granulaires, lâches et saturés (comme les sables fins et les silts peu plastiques), qui sont sujets à une contraction volumique pouvant engendrer une augmentation des pressions d'eau interstitielles. Lorsque la pression d'eau s'approche de la contrainte totale, les contraintes effectives tendent vers zéro, induisant une baisse marquée de résistance. La diminution de la résistance au cisaillement à la suite d'une liquéfaction cyclique peut atteindre un facteur de 10 ou plus (par rapport à la résistance statique), alors que la baisse de rigidité peut excéder deux ordres de grandeur (CGS 2023). Ceci peut entraîner des grands déplacements et affaissements, une perte de capacité portante et des pressions accrues sur les ouvrages de retenue.

La diminution de la contrainte effective menant à la liquéfaction peut aussi résulter d'un chargement (quasi) statique induit par l'ajout rapide d'une surcharge ou lors d'une perte de confinement comme celle due au grand déplacement d'une digue de retenue (ou une brèche) d'un parc à résidus miniers (Blight, 2010; Grimard, 2018; Riveros et Sadrekarimi, 2021). Le risque de liquéfaction statique doit être évalué lors de l'analyse de la stabilité des ouvrages miniers, mais il n'est pas traité dans ce document.

La baisse de résistance induite par la liquéfaction cyclique ou statique peut être inversée avec la dissipation des surpressions de pressions interstitielles à la suite du drainage, à la consolidation, ou en raison de la dilatance à grande déformation.

Le risque de liquéfaction sismique dépend fortement des caractéristiques de base du sol ou des rejets (définies selon une classification tel USCS; McCarthy 2007), de la densité, et de l'état des contraintes préalables au chargement cyclique. La susceptibilité à la liquéfaction varie avec plusieurs facteurs (Vaid et Sivathalayan, 2000; Idriss et Boulanger, 2008); elle tend à diminuer pour des sols suffisamment grossiers, plus denses, plus âgés, ou en présence d'une cohésion (souvent due à une fraction argileuse).

Les principales méthodes expérimentales mentionnées plus haut pour caractériser le comportement cyclique des sols (et rejets miniers) peuvent aussi servir à évaluer les conditions menant à la liquéfaction (ou à la mobilité cyclique pour les matériaux plus denses). Certaines de ces méthodes, développées surtout pour les sols (p. ex. Kramer, 1996; Jefferies et Been, 2015; CGS, 2023), ont été appliquées au comportement cyclique des résidus miniers qui sont souvent susceptibles au phénomène (p. ex. Wijewickreme et al. 2005; James et al. 2011; Poncelet, 2012; Archambault-Alwin, 2017). Les données expérimentales de laboratoire et les mesures *in situ* peuvent également être utilisées pour établir des corrélations avec la réponse sismique pouvant mener à la liquéfaction (Youd et al., 2001; Boulanger et Idriss, 2008).

La résistance post cyclique (et post-liquéfaction) est aussi d'intérêt lorsque le chargement sismique induit des modifications notables des caractéristiques. Comme on le verra à la section 5, la réponse post-cyclique dépend de facteurs déjà mentionnés comme la densité et de la contrainte de confinement.

Comme c'est généralement le cas en géotechnique, le programme de caractérisation mené pour évaluer le comportement cyclique et la liquéfaction doit tenir compte de la variabilité des propriétés et des incertitudes qui influencent le risque lié à la conception des ouvrages miniers (Fenton et Griffith, 2008; Phoon, 2023).

5. Procédure et étapes de l'analyse dynamique

Les principales méthodes pour évaluer les comportements sismiques et mener des analyses dynamiques sont décrites sommairement à la section 3 et elles sont présentées plus en détail dans quelques documents mentionnés à la section 2 (voir aussi la liste de références en annexe). Des exemples d'analyses numériques dynamiques de parcs à résidus miniers sont présentés dans quelques publications récentes (p. ex. Verdugo et al., 2017; Reimer et al., 2017; Finn, 2018; Salam et al., 2021), et dans diverses thèses dont quelques-unes produites à Polytechnique Montréal (James, 2009; Ferdosi, 2014; Contreras, 2022; Zafarani, 2022) ainsi que dans des articles issus de ces thèses et de travaux connexes.

L'évaluation du comportement sismique par l'AD pour la conception des ouvrages miniers implique plusieurs étapes, incluant : la caractérisation du site et des matériaux; la calibration des paramètres des lois de comportement; l'évaluation des conditions pré-séisme; la simulation de l'effet du tremblement de terre sur les ouvrages en fonction des sollicitations sismiques sélectionnées; et dans certains cas, des analyses post-sismiques de la réponse de ces ouvrages.

Un élément très important pour la représentativité des AD est la sélection et la quantification du chargement sismique pour représenter le(s) tremblement(s) de terre de conception. Cette étape critique est basée sur les risques sismiques associés aux mouvements soudains et au relâchement d'énergie découlant de l'accumulation des contraintes dans la croûte terrestre. Les ondes sismiques induites par les tremblements de terre peuvent être caractérisées à partir de l'enregistrement de mesures *in situ*, choisies et traitées selon divers critères afin qu'elles soient représentatives des conditions du site d'intérêt. Cette section décrit la procédure générale et les principales étapes pour mener des analyses dynamiques, en mettant une emphase particulière sur la définition de l'aléa sismique. À nouveau, plus de détails sont fournis dans les références citées.

5.1 Procédure générale

L'évaluation du comportement sismique requiert d'abord une investigation détaillée du site et une caractérisation des propriétés géotechniques des matériaux, incluant le comportement cyclique des sols et des rejets (voir section 4). Les résultats expérimentaux issus de cette investigation peuvent aussi être utilisés pour évaluer et calibrer la valeur des paramètres des lois de comportement servant à représenter la réponse des matériaux sous chargement statique (pré-séisme et parfois post-séisme) et dynamique (dû au tremblement de terre). Comme mentionné à la section 3, les lois de comportement les plus appropriés pour simuler le comportement des résidus de mines en roches dures incluent le modèle UBCSand (Byrne et al., 2006; Beaty and Byrne, 2011; James et Aubertin, 2012; Ferdosi et al., 2015a,b; James, 2024) et le modèle PM4Sand (Boulanger and Ziotopoulou, 2017; Zafarani et al., 2020, 2021, Contreras et al., 2020, 2023a,b). Le modèle PM4Silt (Boulanger and Ziotopoulou 20; Contreras 2022) est aussi d'intérêt pour les sols (et résidus) cohérents avec une certaine plasticité. Ces lois de comportement et d'autres du même type sont décrites et analysés dans divers documents (Contreras, 2022; USDD, 2022; CGS, 2023).

L'AD menée à l'aide de méthodes numériques (éléments finis ou différences finies) visent à évaluer les variables les plus critiques pour la stabilité des ouvrages. Ceci inclus les déplacements et l'évolution des pressions d'eau interstitielles pouvant mener à une diminution des contraintes effectives et à la liquéfaction des matériaux pulvérulents. Il faut prêter une attention particulière à l'ampleur et la distribution des déplacements induits par les mouvements sismiques qui peuvent induire une rupture, suivant la baisse de rigidité et de résistance des matériaux.

5.2 Étapes de l'analyse numérique

L'analyse dynamique numérique du comportement des ouvrages débute avec la définition du modèle conceptuel représentant la situation réelle, avec les simplifications jugées appropriées au niveau de la géométrie, du zonage des matériaux et des propriétés prises en compte. Ce modèle conceptuel (et ses variantes, lorsque diverses options sont évaluées) sert à construire le modèle

numérique pour les simulations. Ceci requiert la définition du maillage (éléments finis, différences finies) et des conditions initiales et aux frontières (c.-à-d. dimensions externes, forces ou contraintes, déplacements, position de la nappe phréatique; p. ex. Potts et Zdravkovic, 1999, 2001; Muir Wood 2004). Il faut aussi spécifier les conditions de sollicitation sismique (chargement cyclique avec les données d'entrée pour les mouvements imposés), et cibler les variables d'intérêt suivies (enregistrées) durant les simulations incluant l'évolution des pressions interstitielles, des contraintes totales et effectives, ainsi que des déformations et des déplacements (p. ex. Boulanger et Beatty, 2016; USSD, 2022; voir aussi Ferdosi, 2014; Zafarani, 2022; Contreras, 2022; James 2024, pour l'AD de parcs à résidus miniers). Le modèle numérique discrétisé doit avoir une taille suffisante pour que la position des frontières externes n'affecte pas les résultats de façon significative. De plus, la nature et la finesse du maillage (type, nombre et taille des éléments) doivent être optimisées afin que les simulations mènent à des résultats réalistes (avec convergence numérique selon les tolérances fixées), dans un temps de calcul raisonnable, ce qui implique généralement de comparer les résultats obtenus avec divers maillages et pas de temps.

La loi de comportement et la valeur des paramètres retenue doivent être validées à partir de données expérimentales issues d'essais de laboratoire ou sur modèles physiques (p. ex. table sismique, centrifugeuse). Lorsque possible, on devrait aussi procéder à des rétro-analyses de cas documentés pour évaluer les outils de modélisation. On utilise souvent les résultats des essais cycliques pour la validation en comparant l'évolution des pressions d'eau interstitielles, les boucles contrainte-déformation, l'évolution du module de cisaillement (c.-à-d. rapport G/G_{max}), et d'autres paramètres qui contrôlent la réponse cyclique comme le rapport d'amortissement (*Damping ratio*) en fonction des déformations (James, 2009; Contreras, 2022). L'initiation de la liquéfaction est un autre élément critique à évaluer; dans ce cas, les résultats obtenus (expérimentalement et numériquement) peuvent aussi être comparés aux relations publiées (p. ex. James et al., 2011).

Dans le cas où les sollicitations sismiques induisent une variation non négligeable des variables critiques (p. ex. forte augmentation des pressions d'eau), il est recommandé de mener aussi des analyses post-sismiques avec des propriétés ajustées pour des matériaux « liquéfiés » (Contreras et al., 2023b); cet aspect est abordé plus loin.

Une fois le modèle numérique construit avec les paramètres calibrés de la loi de comportement, la première étape de calcul à grande échelle consiste à évaluer les conditions initiales du site, avant le séisme, en fonction de la topographie et de la géométrie des ouvrages. L'analyse (quasi-statique) des conditions pré-séismes fournit l'état des contraintes totales et effectives et des déformations comme conditions initiales pour les étapes subséquentes.

Les simulations de l'AD peuvent être menées en contraintes totales à partir des équations du mouvement en fonction du temps pour la réponse cyclique, en 1D mais préférablement en 2D (CGS 2023). Les analyses en contraintes totales négligent toutefois la variation des pressions interstitielles, ce qui limite grandement leur représentativité pour les matériaux compressibles, comme les sables lâches et les résidus miniers. Il est donc préférable (et souvent essentiel) de mener les simulations en contraintes effectives pour l'analyse du comportement durant le séisme. Notons toutefois que les analyses post-sismiques peuvent être menées en contraintes totales, comme on le verra plus loin.

L'AD non linéaire couplée en contraintes effectives tient compte des variations de volume et des pressions d'eau interstitielles dues au chargement cyclique. Ce type d'analyse peut se faire en 1D pour des situations particulières (p. ex. liquéfaction des résidus dans un grand bassin), mais il est généralement préférable de procéder en 2D (déformation plane), ou occasionnellement en 3D (pour une géométrie locale, avec une loi de comportement adaptée), pour bien évaluer la réponse des ouvrages (p. ex. parcs à résidus miniers). De telles simulations du comportement en contraintes effectives permettent d'évaluer l'évolution des variables critiques déjà identifiées, soit : les pressions interstitielles, les contraintes déviatoriques (ou de cisaillement) et moyennes, les tassements et les déplacements. De telles AD permettent aussi d'évaluer l'amorce et l'effet de la liquéfaction en fonction du chargement sismique imposé.

Rappelons ici que la réalisation de ce type d'analyse dynamique est relativement complexe et requiert une bonne compréhension du comportement statique et cyclique des matériaux (sols, rejets), des modèles constitutifs, des facteurs qui influencent l'évolution des pressions d'eau et de

ses effets sur la rigidité, la résistance et les efforts induits sur les ouvrages de retenue. La complexité de telles analyses, qui inclut plusieurs composantes, induit aussi des incertitudes non négligeables au niveau des résultats et de leur interprétation. En sens, il est recommandé de mener une étude paramétrique de sensibilité pour cerner l'ampleur des incertitudes, et d'ajouter une revue externe par des spécialistes indépendants.

5.3 Chargement sismique

Des informations sur la séismologie et sur les ondes générées par les tremblements de terre (ondes de compression, de cisaillement, et de surface) sont fournies dans des livres spécialisés (p. ex. Filiatrault, 2002; Malhotra, 2022) ou traitant des aspects géotechniques (Prakash, 1981; Kramer, 1996; Ishihara, 1996; Towhata, 2008; CGS, 2023).

L'AD des ouvrages miniers requiert la détermination des conditions de sollicitation sismique, sélectionnées à partir de l'aléa sismique retenu pour évaluer leur comportement et stabilité. La conception de ces ouvrages vise à ce que ceux-ci soient en mesure de résister aux sollicitations critiques anticipées, sans une défaillance majeure ni relâchement incontrôlé d'eau ou de résidus (Aubertin et al., 2002a,b, 2011; CDA, 2013, 2019). Les lignes directrices qui guident la conception des ouvrages miniers requièrent une très faible probabilité de défaillance dans l'évaluation de la stabilité sismique, en raison des impacts potentiels majeurs induits par une rupture (particulièrement pour les parcs à résidus miniers). Les recommandations sur le choix de l'aléa sismique, basé sur la période de retour PR (en nombre d'années), visent à protéger les travailleurs, la population, les biens et les écosystèmes avoisinants. Par exemple, l'Association canadienne des barrages (ACB, 2013, 2019) recommande de sélectionner les aléas selon une valeur de PR qui varie en fonction de la classification du risque (probabilités et conséquences) de rupture; cette classification mène à des valeurs de PR allant jusqu'à 10 000 ans. Le guide de restauration du MERN (2017) et la Directive 019 (2012) du Québec (actuellement en révision), recommandent une valeur de PR pouvant atteindre 2 475 ou 10 000 ans pour les parcs à résidus (n.b. l'auteur du présent rapport a contribué à ces recommandations). Un aléa correspondant à une valeur de PR de 10 000 ans, ou le séisme crédible maximal, MCE (*Maximum Credible Earthquake*), est quelques fois recommandé pour les cas critiques (à risques élevés) ainsi que pour la phase de fermeture du site (p. ex. Aubertin et al. 2011; James, 2024).

Comme mentionné plus tôt, l'Est du Canada est situé dans une région sismique relativement stable, mais certains endroits où se déroulent les activités minières peuvent néanmoins présenter des intensités sismiques assez élevées. La Commission géologique du Canada, CGC, fournit pour chacune des 3 principales zones sismiques du Québec (Ouest du Québec, WQU; Charlevoix, CHV; Bas-Saint-Laurent, BSL) l'aléa (incluant la magnitude possible) en fonction de la période de récurrence PR. La production minière du Québec est principalement située sur trois territoires géographiques : le Nord-du-Québec, l'Abitibi-Témiscamingue et la Côte-Nord. La région de l'Abitibi-Témiscamingue, qui se trouve à la limite de la zone sismique WQU, comporte le plus grand nombre de mines actives et inactives/fermées, incluant de nombreux sites d'entreposage de rejets miniers. L'activité sismique y varie selon la localisation; par exemple, la région de Val-d'Or montre un aléa sismique avec des accélérations maximales (PGA) entre 0.07 et 0.13 (selon la valeur de PR; Contreras, 2022), et qui tendent à augmenter vers le sud-est. Une portion de la vallée du Saint-Laurent, qui a déjà subi des tremblements de terre majeurs (p. ex. Charlevoix, 1663, Locat, 2011; Saguenay, 1988, Mitchell et al., 1990) est considérée plus à risque (CGS, 2023).

Une fois la valeur de PR fixée, il faut ensuite sélectionner les accélérogrammes selon le spectre de conception pour la zone sismique; on suggère parfois un minimum de cinq cas (James 2024), mais il semble préférable d'utiliser 10 à 12 accélérogrammes (ou plus) pour une meilleure représentativité statistique.

On constate en général que la plus grande accélération spectrale se situe autour d'une période de 0.1 seconde (fréquence de 10 Hz) pour les séismes de l'Est du Canada, qui montrent typiquement des fréquences relativement élevées; les séismes de l'Ouest du pays (et du continent) ont des fréquences plus faibles, pouvant induire des dommages plus grands selon le type d'ouvrage (Ferdosi, 2014; Zafarani, 2022; Contreras, 2022).

Diverses recommandations ont été formulées pour aider à identifier les chargements dus aux sollicitations sismiques pour l'AD (p. ex. USACE, 2026; USSD, 2022). Une approche basée sur les conditions locales, avec une caractérisation de la source sismique et des mouvements associés, est souhaitable car elle peut permettre d'évaluer les risques sismiques du site selon la valeur de PR à partir d'une approche déterministe (*Deterministic seismic hazard assessments*, DSHA), non recommandée pour les analyses détaillées, et/ou probabiliste (*Probabilistic seismic hazard assessments*, PSHA) (CGS 2023). Cette approche locale évalue l'ampleur probable des événements sismiques (c. -à-d. mouvements) selon les données historiques disponibles, mais elle peut utiliser aussi des relations empiriques ou des simulations qui complètent les données mesurées (PEER 2015). Les paramètres d'importance pour les prédictions (estimations) locales incluent la magnitude M ou M_w (*Moment Magnitude*) du séisme, la distance par rapport au plan de rupture, le type de faille, et les conditions du site près de la surface selon V_{s30} par exemple (CGS 2023). Il y a toutefois de grandes incertitudes dans l'application d'une telle approche locale en raison des variations inhérentes aléatoires (souvent représentées par une distribution normale avec un écart-type) et de nature épistémique en raison des données limitées disponibles.

En pratique, il n'est pas toujours possible de lier l'activité sismique à des structures géologiques particulières. On peut alors avoir recours à des cartes régionales représentant le risque, comme celles de la CGC (p. ex. Adams et al. 2019), ou utiliser des modèles sismiques (p. ex. Petersen et al. 2019). Au Canada, il est fréquent d'évaluer les risques sismiques et les chargements correspondants à partir des informations fournies par la Commission géologique du Canada, CGC (*Geological Survey of Canada*, GSC), qui collige systématiquement les données depuis plusieurs décennies. Ces informations sont par exemple utilisées dans le code national du bâtiment du Canada (NRCC 2020) et pour la conception des ponts (*Canadian Highway Bridge Design Code*, CSA, 2019). La 6^e génération des cartes et données sur les risques sismiques au Canada a récemment été publiée (Adams et al. 2019; Kolaj et al., 2020).

Le spectre de conception est évalué en fonction de la période de récurrence PR retenue, qui est typiquement de 2 475 ans pour les parcs à résidus d'une certaine envergure, ou préférable de 10 000 ans pour les cas critiques à risques relativement élevés et aussi dans les cas de fermeture de site (p. ex. James 2024); ces périodes de retour (récurrence) correspondent à une probabilité annuelle p_a ($= 1/PR$) de 4×10^{-4} ou 1×10^{-4} (qui est la valeur suggérée dans plusieurs cas; p. ex. Aubertin et al. 2011). Les spectres pour une période de retour allant jusqu'à 2 475 ans peuvent être obtenus à partir de l'outil de calcul de l'aléa sismique de la CGC. Le spectre peut aussi être estimé pour une période de retour plus longue (p. ex. 10 000 ans, ou $p_a = 10^{-4}$) à partir des recommandations de la CGC, mais cette estimation peut engendrer de grandes incertitudes (Séismes Canada, 2021); une étude sismologique spécifique du site peut alors s'avérer souhaitable (préférable) afin d'évaluer l'aléa pour de telles conditions.

Dans plusieurs cas, il faut aussi procéder à un ajustement (souvent significatif) des enregistrements (accélérogrammes) sélectionnés, selon le spectre de conception pour la période d'intérêt de l'ouvrage (généralement la période naturelle T_s de la structure) ou sur une plage de périodes d'intérêt (généralement 0.2 à 1.5 T_s). La sélection spécifique des accélérogrammes compatibles avec les spectres de conception se fait généralement à partir de bases de données (p. ex. NGA-East, Goulet et al., 2014, PEER, 2015; NGA-West2, Ancheta et al., 2013) ou selon les informations fournies par la CGC. On peut aussi utiliser des mouvements synthétiques (Atkinson, 2009; Atkinson et Adams, 2013). Dans tous les cas, il faut bien justifier les conditions de sélection appliquées.

Les enregistrements inclus dans les bases de données de l'Est du Canada sont plus pertinents pour définir l'aléa sismique dans les régions du Québec, mais ces bases ne contiennent que quelques séismes pour des magnitudes et intensités données. Ces aléas sismiques sont généralement associés à des séismes à haute fréquence, mais on devrait aussi considérer des scénarios alternatifs avec des mouvements à plus basse fréquence, notamment dans l'étude paramétrique de sensibilité (Ferdosi, 2014; Contreras, 2022).

Un ajustement des enregistrements peut aussi être fait selon une ou plusieurs mesures d'intensité IM (*Intensity Measure*) de l'activité sismique (NIST, 2017). Les IM les plus courantes sont celles associées aux pics (ou maxima, *peaks*), basées sur le spectre temporel des mouvements enregistrés tel l'accélération (PGA), la vitesse (PGV) et (plus rarement) le

déplacement (PGD) (p. ex. Kramer et Mitchell, 2006; Zafarani, 2022). La valeur de PGA est souvent utilisée dans les analyses sismiques (et l'évaluation du risque de liquéfaction) car c'est une information aisément accessible. Mais cette mesure d'intensité (IM) est incomplète, car il faut aussi tenir compte de la fréquence (ou contenu fréquentiel) des ondes pour bien évaluer la réponse dynamique des sols et des ouvrages. D'autres mesures d'intensité peuvent être utilisées pour l'ajustement des accélérogrammes (p. ex. Kramer, 1996; James, 2009, 2024; Contreras, 2022; Zafarani, 2022; He et Rathje, 2024; Rathje, 2024), incluant la valeur de l'intensité Arias (AI); notons toutefois que l'estimation de AI est basée principalement sur des données de l'ouest (Abrahamson et al. 2016), de sorte que les résultats sont plus incertains pour l'Est du continent (Lee et Green 2010; Farhadi et Pezeshk, 2020). De façon générale, les méthodes disponibles pour déterminer les accélérogrammes engendrent toutes une incertitude non négligeable, d'où l'intérêt de mener des études de sensibilité avec plusieurs cas (Contreras, 2022; Zafarani, 2022).

5.4 Réponse sismique, variables d'intérêt et liquéfaction

La réponse sismique des ouvrages dépend de l'amplitude et de la fréquence des ondes sismiques qui se propagent de la source dans le massif rocheux vers la surface, en passant par les sols de fondation et les rejets. La propagation verticale des ondes de cisaillement produisant des mouvements horizontaux est la composante d'intérêt pour les analyses du comportement dynamique des ouvrages. Il est aussi possible de réaliser une analyse des mouvements verticaux, mais ceci est rarement le cas en pratique pour les ouvrages miniers.

La réponse simulée dépend aussi de la loi de comportement retenue pour représenter les divers matériaux dans le modèle numérique. Le modèle constitutif appliqué dans l'AD peut traiter différemment certains aspects comme l'effet de variations fréquentiels durant le séisme, le ramollissement induit par les chargements cycliques, ou l'influence de la dilatance sur le gain de résistance. Tel que vu précédemment, le modèle constitutif doit être calibré à partir de résultats d'essais représentatifs des matériaux, et il devrait aussi être validé pour des conditions de chargement différentes de celles utilisées pour la calibration ou à l'aide d'essais sur modèles physiques (p. ex. table sismique, centrifugeuse), de rétro-analyses de cas documentés, ou de comparaisons avec des bases de données.

Les informations extraites des simulations doivent porter sur les variables critiques, incluant la distribution des pressions d'eau interstitielles et le rapport des pressions r_u ($r_u = \Delta u / \sigma'_v =$ pression d'eau en excès/contrainte effective verticale; Idriss et Boulanger, 2008; James et al. 2011), en lien avec l'amorce de la liquéfaction; l'amortissement ou l'amplification du mouvement induit du roc vers la surface; la réponse spectrale (accélération, vitesse) en surface et aux profondeurs d'intérêt; l'évolution et le profil du rapport des contraintes de cisaillement cycliques CSR (*Cyclic stress ratio*) en fonction de l'accélération horizontale ($CSR = \tau_{cyc} / \sigma'_{vo}$; τ_{cyc} représente la contrainte de cisaillement cyclique et σ'_{vo} la contrainte verticale effective pré-séisme); l'ampleur des déformations de cisaillement et des déplacements (ampleur cumulée et vitesse) durant le chargement dynamique.

L'évaluation des contraintes cycliques CSR est particulièrement importante dans l'AD. La caractérisation expérimentale des matériaux et diverses corrélations permettent de déterminer les relations entre le nombre de cycles de chargement (pour des contraintes de cisaillement uniformes) et la valeur de CSR (Kramer, 1996; James et al. 2011; James et Aubertin, 2016). La valeur de la contrainte CSR peut alors être comparée à celle du rapport de résistance cyclique CRR (*Cyclic strength ratio*) pour évaluer le facteur de sécurité contre la liquéfaction $FS_L (= CRR/CSR$; CRR représente la valeur de CSR à l'amorce de la liquéfaction; voir plus bas). La valeur de résistance cyclique CRR dépend de plusieurs facteurs, notamment du type de sol ou rejet (granulométrie, plasticité), de sa densité et de l'état des contraintes naturelles (Idriss et Boulanger, 2008; James et al. 2011; James et Aubertin, 2016). La valeur de CRR pour les matériaux en place peut être estimée (et corrigée/ajustée) de diverses façons, notamment à partir des essais de pénétration standard SPT (peu appropriés pour les résidus miniers lâches) et les essais au cône CPT (mieux adaptés aux résidus et à plusieurs types de sols – Section 4). Comme on l'a vu, les essais CPT peuvent aussi être combinés aux mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement *in situ* V_s afin de fournir une caractérisation plus complète des propriétés en place (Grimard et

al. 2021; CGS 2023; James, 2024). L'évaluation de CSR et de CRR permet alors de statuer sur l'incidence d'une liquéfaction.

L'évaluation de la liquéfaction sismique est particulièrement importante le cas pour les parcs à résidus miniers car les rejets de concentrateur de roche dure (pulvérulents, compressibles et peu plastiques) sont souvent très sensibles au phénomène (James et al. 2011; Poncelet, 2012; James et Aubertin 2016; James 2024). Le phénomène de liquéfaction sismique est essentiellement lié à l'augmentation des pressions d'eau interstitielles (en excès) sous l'effet de la contraction volumique due au chargement cyclique des matériaux lâches et pulvérulents; ceci abaisse les contraintes effectives qui peuvent alors devenir très faibles. Les matériaux cohérents/plastiques (sols argileux), denses (compactés ou âgés), cimentés, ou suffisamment grossiers (comme les roches stériles) sont peu susceptibles à la liquéfaction. La liquéfaction des sols et des résidus peut aussi se produire sous chargement (quasi-)statique (Jefferies et Been, 2015), mais ce phénomène n'est pas traité directement dans ce rapport.

D'un point de vue pratique, des observations expérimentales ont montré que lorsque les pressions interstitielles se rapprochent du double de la valeur à l'équilibre, menant à une valeur élevée du rapport des pressions d'eau r_u ($> 0,7$ à $0,9$; p. ex. Idriss et Boulanger, 2008), la rigidité et la résistance du sol baissent considérablement. La résistance au cisaillement et la rigidité post-cyclique (à court terme) sont également grandement réduites, ce qui peut augmenter les pressions exercées sur les ouvrages de retenue. Une perte de résistance $\geq 15\%$ est quelques fois jugée suffisante pour qu'il y ait un effet lié à la liquéfaction (Verret et Péroquin, 2017).

Dans certains cas, il peut aussi y avoir un gain subséquent de résistance dû au drainage ou lorsque les déformations augmentent et engendrent une dilatance.

Outre les analyses dynamiques numériques qui évaluent les contraintes effectives dans le modèle simulé, il existe aussi des méthodes empiriques et analytiques pour évaluer le risque de liquéfaction sismique (p. ex. Kramer, 1996, 2023; Idriss et Boulanger, 2008; Jefferies and Been, 2015; James et Aubertin, 2016). Certaines approches pour évaluer la liquéfaction sismique sont basées (directement ou indirectement) sur la mécanique des sols à l'état critique (*Critical state soil mechanics*). Comme mentionné à la section 4, l'état critique correspond à la condition pour laquelle les déformations de cisaillement se font à volume constant (Muir Wood, 1991; Mitchell et Soga, 2005; Holtz et al., 2011; Burland et al., 2012). L'utilisation et les limitations de ce type d'approche, qui fait souvent référence au paramètre d'état ψ (*State parameter*), sont discutées dans diverses publications (p. ex. Boulanger and Idriss 2014; Jefferies et Been, 2015; NASEM, 2016; Wijewickreme et al., 2017; Verma et al., 2019; CGS 2023). Bien que développé surtout pour les sables, ce type d'approche peut aussi être appliqué aux silts peu plastiques (indice de plasticité $I_p \leq 7$) et les résidus miniers de roche dure.

5.5 Comportement post-sismique et remarques complémentaires

Il est recommandé d'évaluer le comportement post-sismique des ouvrages lorsque les sollicitations cycliques sont susceptibles de modifier le comportement des matériaux (par exemple pour une baisse de résistance $\geq 15\%$; Verret et Péroquin, 2017), mais cet aspect soulève aussi des incertitudes. L'analyse post-sismique requiert usuellement une estimation de la résistance résiduelle (ou post-cyclique) spécifique, basée sur des mesures appropriées, qui n'est qu'une fraction de la résistance ultime ou au pic (p. ex. Ishihara 1993; Olson et Stark 2002; Idriss et Boulanger, 2007, 2008; Robertson, 2010, 2022; Kramer et Wang, 2015; CGS 2023).

A l'échelle des ouvrages, il y a aussi des défis particuliers pour évaluer le comportement post-liquéfaction (ou post-séisme) en contraintes effectives. Pour cette raison, on peut avoir recours à des analyses en contraintes totales afin d'analyser le comportement post-sismique (Contreras et al., 2023b). A cet égard, les résultats expérimentaux présentés par James et al. (2011) obtenus d'essais DSS non-drainés sur des résidus miniers, avec chargement cyclique et en condition post-cyclique, ont mené à un rapport de pression interstitielle r_u (avec $r_u = \Delta u / \sigma'_v$) allant de 0,68 à 0,82. La valeur mesurée par ces auteurs (et d'autres) pour le rapport de résistance au

cisaillement post-cyclique en contrainte totale non drainée, S_u/σ'_{v0} , est usuellement proche de 0,10; la plage observée pour S_u/σ'_{v0} peut toutefois varier grandement, allant de 0,05-0,08 jusqu'à 0,12-0,16, selon les conditions d'essais (Contreras, 2022). Pour des résidus de roche dure, l'état critique (souvent proche de la résistance au pic) est généralement atteint à grande déformation (>10-20 %) et le rapport de la résistance au cisaillement non drainée S_{u-cs}/σ'_v est proche de 0,22, comme celui des argiles normalement consolidées (Vick, 1990; Jahanbakshshzadeh et Aubertin, 2022, 2024).

En plus des incertitudes face au comportement sismique et post-sismique des sols et rejets, il faut aussi rappeler que les modèles de comportement utilisés pour l'AD ont leur limite et négligent certains aspects. Par exemple, ils ne peuvent généralement pas représenter la migration des particules, les mélanges induits par les séismes, les effets de déplacement localisé dus à la bouillonnance, ou la reconsolidation post-liquéfaction. Ceci devrait inciter à mener des analyses additionnelles et des études de sensibilité en considérant de tels aspects lors de la conception basée sur l'AD, avec un évaluation externe indépendante et un suivi du comportement post-construction (voir section 7).

6. Interprétation des résultats

La conception sismique des ouvrages miniers peut se faire à partir d'approches classiques (section 3) qui impliquent généralement l'évaluation du facteur de sécurité FS, avec parfois la probabilité de défaillance PoF (p. ex. Fenton et Griffith, 2008), comme c'est le cas avec l'analyse pseudo-statique (pour les haldes à stériles par exemple) ou l'évaluation de la liquéfaction des résidus dans le parc (James et Aubertin, 2017). Rappelons que la valeur de FS est obtenue en comparant la capacité C et la demande D, c.-à-d. $FS = C/D$. La capacité peut être définie selon la contrainte qui contrôle la résistance au cisaillement sur la surface de glissement, le moment ou les forces pour contrer le mouvement ou la rotation, ou la valeur de la résistance cyclique CRR pour la liquéfaction, alors que la demande représente la sollicitation induite par le chargement dynamique (ou statique) exprimée selon le même type de variable.

On peut aussi utiliser les simulations numériques avec chargement pseudo-statique pour évaluer les contraintes (et les déformations) et estimer la valeur de FS de la surface critique en appliquant un facteur de réduction de résistance (*Strength reduction factor*), comme cela est fait pour la stabilité statique des haldes à stériles (Majdanishabestari, 2023).

Pour les analyses plus élaborées (parfois complémentaires) basées sur l'AD numérique, il faut définir une méthodologie et des critères spécifiques pour interpréter les résultats de simulation. L'interprétation des AD est usuellement basée sur la performance des ouvrages face aux sollicitations cycliques. Une telle approche PBD (*Performance-based design*), décrite en détail par Kramer (2014, 2023), lai (2018) et Finn (2018), implique usuellement une évaluation quantitative de la réponse (simulée) des ouvrages selon les déplacements locaux et/ou globaux induits par un ou plusieurs niveaux de sollicitation sismique. On peut aussi évaluer les contraintes et les pressions d'eau en lien avec le risque de liquéfaction pour statuer sur la performance.

Selon l'approche PBD, l'ouvrage analysé doit montrer une performance minimale pour l'événement sismique retenu, selon une évaluation déterministe ou préférablement probabiliste. L'analyse de plusieurs événements, avec différentes caractéristiques, est d'ailleurs généralement préférable pour tenir compte des incertitudes déjà mentionnées.

En pratique, on évalue l'ampleur des déplacements (ou la vitesse de déplacement) à des endroits (zones) ciblés selon des valeurs critiques ou admissibles, afin de statuer sur la performance (Ferdosi et al., 2015a,b; Contreras, 2022). Par exemple, la performance peut être évaluée en fonction d'un déplacement minimal donné, souvent de l'ordre de 1 m pour des talus ou des digues; le volume correspondant à un tel déplacement devient alors la condition utilisée pour statuer sur la performance des ouvrages (Ferdosi, 2014; Zafarani, 2022; Contreras, 2022).

La performance peut aussi être liée à l'état des dommages induits (p. ex. pas de dommage, dommages mineurs réparables, majeurs, ou catastrophiques; p. ex. He et Rathje 2024; Rathje, 2024) et aux impacts associés (humains, économiques, opérationnels, environnementaux).

Comme mentionné à la section 3, l'approche PBD est avantageuse à plusieurs égards, notamment parce qu'elle est compatible avec une approche probabiliste et qu'elle facilite la comparaison de diverses options pour optimiser la conception des ouvrages (p. ex. digue amont, aval ou axe central; ajout et configuration des inclusions; voir aussi section 7).

Le comportement post-sismique doit aussi être analysé lorsque les effets du tremblement de terre peuvent produire des variations importantes de la réponse des matériaux (p. ex. liquéfaction). L'approche PBD implique alors une évaluation des déplacements et/ou des taux de déplacement (vitesses) après la fin du séisme (Contreras et al., 2023).

Rappelons à nouveau que la fiabilité des analyses numériques dépend de nombreux éléments, incluant la loi de comportement utilisée et la calibration, la qualité du code et le traitement numérique. Cette fiabilité reflète le niveau de confiance face aux résultats obtenus, en fonction de l'incertitude et des variations anticipés (Kramer, 2014). La calibration et la validation (p. ex. modèles physiques, étude de cas documentés) des modèles constitutif et numérique est alors une étape clé pour établir le niveau de confiance, mais ceci n'est pas un exercice trivial et il demande une expertise approfondie; une évaluation externe peut aussi s'avérer bénéfique dans bien des cas.

7. Autres aspects

7.1 Gestion environnementale des rejets miniers

La conception et la construction des ouvrages pour l'entreposage des rejets miniers doit se faire selon les règles de l'art, en suivant les recommandations applicables et une approche prudente visant à assurer la stabilité face aux sollicitations critiques (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002b, 2011, 2013; Aubertin, 2023). D'un point de vue géoenvironnemental, il faut aussi appliquer autant que possible une approche de gestion intégrée des rejets miniers, avec une planification proactive dès le départ du projet en tenant compte des conditions de fermeture et des travaux de restauration (*Designing for closure*; Aubertin et al., 2002a, 2015, 2016; Aubertin, 2023). La prise en compte des caractéristiques hydrogéochimiques des rejets et de leur comportement (transitoire) à court terme et sur une très longue période pour la phase de fermeture (durée souvent indéterminée) fait aussi partie des considérations importantes.

7.2 Amélioration de la stabilité

La stabilité géotechnique des ouvrages peut être améliorée de plusieurs façons. A cet effet, le comportement sismique peut être avantageusement modifié à l'aide de techniques similaires à celles utilisées pour accroître la stabilité face aux chargements statiques. Ceci implique par exemple de choisir des méthodes de construction pour les digues et les haldes qui favorisent la stabilité durant la construction et après la fermeture du site. On optera ainsi pour une construction de digues par la méthode de l'axe centrale (plutôt que vers l'amont) afin d'augmenter la stabilité géotechnique (Jahanbakhshzadeh et al., 2019), ou l'ajout des bancs lors de la construction des haldes pour réduire l'angle global de la pente et augmenter le facteur de sécurité (Maknoon et Aubertin, 2021; Aubertin et al., 2021).

On sait aussi que le comportement sismique des rejets de concentrateur dans le parc à résidus miniers est affecté par leur densité. En ce sens, on peut utiliser une technique de densification avant déposition pour produire des résidus épaissis (c. -à-d. teneur massique en solide ou densité de pulpe P de 45 à 70 %), en pâte (P de 70 à 85 %), ou filtrés ($P > 85$ %) (p. ex. Martin et al. 2006). Ces techniques visent à diminuer la teneur en eau dans les résidus et augmenter leur densité initiale, ce qui peut être avantageux pour la stabilité géotechnique. Contreras et al. (2023b) ont évalué les effets d'une densification (limitée) des résidus face au comportement sismique; les résultats montrent une certaine amélioration (marginale) pour les conditions prises en compte. Il faut aussi garder en tête qu'une densification avec une teneur en eau initiale plus faible peut mener à une désaturation des résidus, ce qui peut avoir un effet négatif sur la réactivité des minéraux sulfureux (lorsque présents) et sur la qualité du lixiviat. La conception optimale des ouvrages miniers devrait tenir compte des aspects liés à la stabilité géotechnique et à la stabilité géochimique, qui sont parfois en contradiction (Aubertin et al., 2015, 2016).

La densité et la résistance des résidus peuvent aussi être augmentées après leur déversement dans les bassins en ajoutant un système de drainage qui favorise la consolidation. C'est l'un de objectifs de la technique des inclusions de roche stérile, IRS, proposée il y a plus de vingt ans, et appliquée à quelques sites miniers incluant la mine Canadian Malartic en Abitibi (Aubertin et al., 2002b, 2021; James et Aubertin, 2009; James et al., 2013, 2017). Cette technique implique la construction d'un réseau continu d'inclusions (rangées) de roche stérile à l'intérieur du parc. Les IRS sont rehaussées verticalement en séquence au fur et à mesure de la déposition des résidus. En complément, on peut aussi mettre une couche de roches stériles sur le fond du parc et la face amont des digues pour améliorer le drainage et la consolidation. Les IRS perméables placées à l'intérieur du parc à résidus durant la construction jouent un rôle assez similaire aux drains verticaux dans les sols mous, en fournissant un chemin de drainage additionnel (horizontal) pour accélérer la dissipation de la pression interstitielle durant et après la construction (Saleh Mbemba et al., 2019), et aussi suite à un séisme (Ferdosi, 2014). Les IRS contribuent ainsi à augmenter la densité des résidus en réduisant leur teneur en eau, ce qui accroît leur rigidité et leur résistance au cisaillement. Les IRS permettent aussi de contrôler le niveau d'eau

dans les bassins en accélérant l'abaissement de la nappe, ce qui peut améliorer le comportement géotechnique des résidus, surtout s'ils deviennent non saturés (p. ex. Narvaez et al. 2014; Essayad et Aubertin, 2020). A cet égard, la désaturation des résidus peut occasionner une augmentation de leur résistance au cisaillement, ce qui peut aider à améliorer leur comportement cyclique (e.g Daliri, 2013; Daliri et al., 2014).

Les IRS ajoutent aussi un renforcement dans le parc, ce qui augmente la rigidité et la résistance des ouvrages de retenue (Jahanbakhshzadeh et Aubertin, 2020, 2023, 2024). Diverses analyses ont ainsi montré que les IRS augmentent la stabilité et réduisent les déplacements sous chargement sismique et statique (James et Aubertin, 2012; Ferdosi et al., 2015a,b; Aubertin et al. 2019; Jahanbakhshzadeh et al., 2019; Zafarani et al., 2020; Contreras et al., 2023b). Parmi les autres avantages des IRS, on peut mentionner la création de cellules (compartiments) dans le parc à résidus miniers, qui ajoutent une flexibilité accrue pour la déposition hydraulique et la possibilité d'entamer plus tôt les travaux de restauration (James et al., 2013, 2017; Aubertin et al., 2021). La conception d'un parc à résidus avec IRS requiert l'évaluation du nombre, de l'espacement et de la position des inclusions et de leur dimension afin d'optimiser leur efficacité; ces aspects ont été traités dans plusieurs publications récentes dont plusieurs portent sur la stabilité sismique évaluée à partir d'analyses dynamiques.

7.3 Remarques complémentaires

Parmi les autres aspects à considérer pour évaluer la stabilité sismique des ouvrages miniers, il faut prêter une attention particulière au type de sol de fondation qui peut affecter grandement le comportement géotechnique. Par exemple, un sol mou (p. ex. argile normalement consolidée) peut réduire considérablement le facteur de sécurité face à une rupture impliquant la fondation sous une halde ou sous une digue. La présence de sols mous peut aussi affecter la réponse et le risque de rupture des ouvrages lors d'un séisme, notamment en raison du potentiel d'amplification des ondes sismiques (Contreras, 2022).

Comme on l'a mentionné ailleurs dans ce document, l'analyse dynamique peut s'avérer requise pour évaluer la réponse des ouvrages miniers, surtout pour les cas susceptibles aux effets de la liquéfaction (c. -à-d. baisse significative de résistance face aux sollicitations cycliques). En ce sens, des approches hiérarchiques ont été développées afin de statuer sur le type d'analyse à utiliser et sur le besoin de réaliser des analyses numériques dynamiques (p. ex. Verret et Péloquin, 2017; USSD 2022; CGS 2023). De telles approches progressives ont surtout été développées pour des ouvrages de génie civil, notamment ceux conçus pour retenir l'eau (comme des barrages hydroélectriques), qui diffèrent grandement des ouvrages miniers (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002a,b, 2011). Pour les ouvrages miniers, il est recommandé de procéder à des AD lorsque les conditions sismiques peuvent entraîner une perte de résistance significative, tel que définie plus haut.

Comme c'est le cas pour l'évaluation du comportement des ouvrages miniers face aux sollicitations (quasi) statiques, durant et après leur construction, la conception sismique requiert aussi une instrumentation appropriée afin de faire un suivi de la réponse en termes des pressions d'eau, des déplacements et des forces (accélération) induites par un possible tremblement de terre, ou autres sources de vibration (p. ex. Dunncliff, 1993; De Rubertis, 2018; CGS 2023). Rappelons en terminant que le plan d'urgence requis pour chaque site minier doit aussi tenir compte des risques associés à une défaillance lors d'un événement sismique.

8. Références

- Abrahamson, C., Shi, H. M. et Yang, B. 2016. Ground-Motion Prediction Equations for Arias Intensity Consistent with the NGA-West2 Ground-Motion Models. PEER Report No. 2016/05.
- ACB 2007, 2013. Association Canadienne des barrages/Canadian Dam Association (CDA). Dam safety guidelines.
- ACB 2014, 2019. Association Canadienne des barrages/Canadian Dam Association (CDA). Technical bulletin: Application of Dam safety guidelines to mining dams.
- Adams, J., Halchuk, S., Allen, T. et Rogers, G. 2015. Canada's 5th Generation Seismic Hazard Model, as prepared for the 2015 National Building Code of Canada. Proc. 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Victoria, BC.
- Adams, J., Allen, T., Halchuk, S. et Kolaj, M. 2019. Canada's 6th Generation Seismic Hazard Model, as Prepared for the 2020 National Building Code of Canada. Proc. 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Québec, QC.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S. J., Wooddell, K. E., Graves, R. W., Kottke, A. R., Boore, D. M., Kishida, T. et Donahue, J. L. 2013. PEER NGA-West2 database. Pacific Earthquake Engineering Research Center. Berkeley, CA.
- Anthi, M. et Gerolymos, N. 2019. A calibration procedure for sand plasticity modeling in earthquake engineering: application to TA-GER, UBCSAND and PM4SAND. Proc. 7th Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy, pp. 17-20.
- Anterrieu, O., Chouteau, M. et Aubertin, M. 2010. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. Bull. Eng. Geol. Environ., 69, pp. 533–548.
- Archambault-Alwin, X. 2017. Évaluation du comportement dynamique et de la résistance cyclique des résidus miniers. Mémoire M.Sc.A. Département des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal.
- Asimaki, D. et Lavrentiadis, G. 2024. Reducing Uncertainty In Ground Motion Models, GeoStrata, GI-ASCE, Earquake Geotechnics, February/March 2024.
- Atkinson, G. M. 2009. Earthquake time histories compatible with the 2005 NBCC uniform hazard spectrum. Can. J. Civil Engineering, 36(6), pp. 991-1000.
- Atkinson, G. M. et Adams, J. 2013. Ground motion prediction equations for application to the 2015 Canadian national seismic hazard maps. Can. J. Civil Engineering, 40 (10), pp. 988-998.
- Aubertin, M. 2023. Pour une gestion environnementale responsable des rejets miniers. Mémoire sur le Thème 3 Encadrement de l'activité minière pour la protection de l'environnement et de la santé. Consultation. Développement harmonieux de l'activité minière. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec. Mai 2023, 19 pages.
- Aubertin, M. et Chapuis, R. P. 1991. Critères de conception pour les ouvrages de retenue des résidus miniers dans la région de l'Abitibi. Proc. 1st Canadian conference on environmental geotechnics. CGS, Montreal, pp. 113-127.
- Aubertin, M., Bussière, B. et Bernier, L. 2002a. Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur CD-ROM. Presses Internationales Polytechnique. Montréal.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jollette, D., Bussiere, B., Chapuis, R. P., James, M. et Riffon, O. 2002b. Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: Problèmes persistants et méthodes de contrôle. Défis & Perspectives : Symposium Environnement et mines, Rouyn-Noranda, CIM. CD-ROM, pp. 526-552.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E. M., Martin, V., Pépin, N., Mbonimpa, M. et 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, CDRom, 38 pages. (voir aussi Aubertin et al. 2013. Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique de retenue des résidus miniers. Parties 1 et 2, Déchets Sciences et Techniques, 64, pp. 28-50).
- Aubertin, M., James, M., Maknoon, M. et Bussière, B. 2013. Recommandations pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles. GeoMontreal 2013-Geosciences for Sustainability, Proc. 66th CGS Conference, 8 pages.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et Maqsoud, A. 2015. Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symp. Mines et Environnement, Rouyn-Noranda, CIM (CD Rom), 67 pages.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M. et Mbonimpa, M. 2016. Review of reclamation techniques for acid generating mine wastes upon closure of disposal sites. Keynote presentation. Geo-Chicago 2016: Sustainability, Energy and the Geoenvironment, ASCE, Geo-Institute, 8 pages.
- Aubertin, M., Jahanbakhshzadeh, A. et Yniesta, S. 2019. The effect of waste rock inclusions on the seismic stability of a tailings impoundment. Proc. 7th Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy., pp. 1220-1227.
- Aubertin, M., Jahanbakhshzadeh, A., Saleh Mbemba, F., Yniesta, S. et Pednault, C. 2021. General guidelines for the design and construction of waste rock inclusions in tailings impoundment. Proceedings of the 74th CGS Conference, GeoNiagara. 8 pages.
- Aubertin, M., Maknoon, M. et Ovalle, C. 2021. Waste rock pile design considerations to promote geotechnical and geochemical stability. Canadian Geotechnique -The CGS Magazine: Fall, 2(3), pp. 44-47.
- Azam, S. et Li, Q. 2010. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. Geotechnical news, 28(4), pp. 50-54.
- Beaty, M. H. et Byrne, P. M. 2011. UBCSAND constitutive model Version 904ar. Report UBCSAND Constitutive Model on Itasca UDM Web Site.
- Bentley 2020. Plaxis Bentley Systems, Incorporated, 2020 PLAXIS. Version 21.01. N DELFT, Netherlands.
- Blight, G. E. 2010. Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities. CRC Press, Taylor-Francis.
- Briaud, J. L. 2013. Geotechnical Engineering, Unsaturated and Saturated Soils. Wiley.
- Boulanger, R. W. et Idriss, I. M. 2014. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Center for Geotechnical Modelling, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, University of California, Davis. Report No. UCD/CGM-14/01, April 2014. 138 pages.
- Boulanger, R. W. et Montgomery, J. 2015. Nonlinear deformation analyses of an embankment dam on a spatially variable liquefiable deposit. In Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, 1-4 November 2015.
- Boulanger, R. W. et Beaty, M. H. 2016. Seismic deformation analyses of embankment dams: A reviewer's checklist. In Proceedings, Celebrating the Value of Dams and Levees – Yesterday, Today and Tomorrow, 36th USSD Annual Meeting and Conference, United States Society of Dams, Denver, CO. pp. 535-546.
- Boulanger, R. W. et Ziotopoulou, K. 2017. PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA. March, 112 pages.
- Boulanger, R. W. et Ziotopoulou, K. 2018, 2022. PM4Silt (Versions 1, 2): A silt plasticity model for earthquake engineering applications. Center for geotechnical modelling. Reports No

- UCD/CGM-18-01, UCD/CGM-22/03 [Revised February 2023], Dept. Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.
- Bray, J.D. et Travasarou, T. 2007. Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133, pp. 381-392.
- Bray, J. D. et Travasarou, T. 2009. Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(9), pp. 1336-1340.
- Bray, J. D. et Olaya, F. R. 2023. H. Bolton Seed Memorial Lecture 2022: Evaluating Liquefaction Effects. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 149(8), 03023002.
- Burland, J., Chapman, T., Skinner, H. et Brown, M. (Editors). 2012. *Institution of Civil Engineers (ICE) Manual of Geotechnical Engineering*.
- Bussière, B. 2007. Hydro-Geotechnical Properties of Hard Rock Tailings from Metal Mines and Emerging Geo-environmental Disposal Approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), pp. 1019-1052.
- Byrne, P. M., Naesgaard, E. et Seid-Karbasi, M. 2006. Analysis and design of earth structures to resist seismic soil liquefaction. *Proc., 59th Canadian Geotechnical Conf. and 7th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Specialty Conf.*, Canadian Geotechnical Society.
- CGS, 2023. *Canadian Foundation Engineering Manul*, 5th Edition; Kenyon, R. and Skafffeld K. Editors. Canadian Geotechnical Society (voir en particulier Chap. 18 Earthquake Resistant Design; Chap. 5 Site Investigations; Chap. 25 Geotechnical instrumentation and monitoring).
- Castonguay, V. 2020. *NorSand-aUL: une loi de comportement améliorée pour la modélisation des sables sous sollicitations statiques et cycliques*. Thèse de Doctorat, Université Laval.
- Chekired, M., Lemire, L., Karray, M., et Hussien, M. N. 2015. Experimental setup for simple shear test in a triaxial cell: TxSS. *Proc. GeoQuebec 2015*, Canadian Geotechnical Society. 7 pages.
- Cho, Y. et Rathje, E. M. 2022. Generic Predictive Model of Earthquake-Induced Slope Displacements Derived from Finite-Element Analysis. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148 (4).
- Cho, Y., Khosravikia, F. et Rathje, E. M. 2022. A comparison of artificial neural network and classical regression models for earthquake-induced slope displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 152, January 2022, 107024.
- Chowdhury, R., Flentje P. et Bhattacharya, G. 2010. *Geotechnical Slope Analysis*, CRC Press, Taylor & Francis. London.
- CGC 2022. Commission géologique du Canada. Earthquake zone in Eastern Canada. <https://www.seismescanada.rncan.gc.ca/zones/eastcan-en.php>.
- Contreras, C. A. 2013. *Comportement dynamique du sol pulvérulent « résidus miniers »* M.Sc.A. thesis, Civil, Geological and Mining Engineering Department, Polytechnique Montréal, Montréal, QC, Canada.
- Contreras, C. A. 2022. *Détermination de la stabilité sismique et post-sismique des parcs à résidus de roche dure avec et sans inclusions de roche stérile pour des aléas faibles, intermédiaires et élevés des régions minières de l'est du Canada*. Thèse Ph. D, Polytechnique Montréal.
- Contreras, C. A. et James, M. 2013. A laboratory investigation of the cyclic resistance of tailings. *In Proceedings of GeoMontreal*, 1-3 October 2013. Canadian Geotechnical Society.
- Contreras, C. A., Yniesta, S. et Aubertin, M. 2020. Seismic and post-seismic stability of tailings impoundments, considering the effect of reinforcement inclusions. *Proceedings of the 74th Canadian Geotechnical Society Conference*.

- Contreras, C. A., Yniesta, S. Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2023a. Calibration of the PM4Sand model for hard-rock mine tailings based on laboratory and field testing results. *Canadian Geotechnical Journal*. e-First <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0257>.
- Contreras, C., Yniesta, S. et Aubertin, M. 2023b. Improvement of tailings impoundment seismic and post-seismic stability using densification and waste rock inclusions. *Can. Geotech. J.*, 60(11), pp. 1629-1644.
- CSA 2019. Canadian Highway Bridge Design Code, CSA S6:19.
- Dafalias, Y. F. et Manzari, M. T. 2004. Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering mechanics*, 130(6), pp. 622-634.
- Daliri, F. 2013. The influence of dessication and stress history on the monotonic and cyclic shear response of thickened gold tailings. Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University. 442 pages.
- Daliri, F., Kim, H., Simms, P. et Sivathayalan, S. 2014. Impact of desiccation on monotonic and cyclic shear strength of thickened gold tailings. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140 (9).
- Davies, M. 2002. Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening? *Geotechnical News*, 20(3), pp. 31-36.
- Davis, T. 2022. *Geotechnical Testing, Observation, and Documentation*, 3rd Edition. ASCE.
- Day, R. W. 2009. *Foundation Engineering Handbook*. 2nd Edition, ASCE Press.
- De Rubertis, K. (Editor). 2018. *Monitoring dam performance-instrumentation and measurements*. Task Committee to Revise Guidelines for Dam Instrumentation of the Committee on Water Power of the Energy Division, ASCE, 442 pages.
- Desai, C. S. et Siriwardane, H. J. 1984. *Constitutive laws for engineering materials, with emphasis on geologic materials*. Prentice Hall.
- Dimech, A. 2018. *Imagerie de l'écoulement de l'eau dans une halde à stériles expérimentale par tomographie 3D de résistivité électrique*. Mémoire MScA. Polytechnique Montréal.
- Dimech, A., Chouteau, M., Aubertin, M., Bussière, B., Martin, V. et Plante, B. 2019. Three-dimensional time-lapse geoelectrical monitoring of water infiltration in an experimental mine waste rock pile. *Vadose Zone Journal*, 18(1), pp. 1-19.
- Duncan, J. M., Wright, S. et Brandon, T. L. 2014. *Soil Strength and Slope Stability*, 2nd Ed. Wiley.
- Dunnicliff, J. 1993. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley and Sons.
- Essayad, K. et Aubertin, M. 2020. Consolidation of hard rock tailings under positive and negative pore-water pressures: testing procedures and experimental results. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(1), pp. 49-65.
- Farhadi, A. et Pezeshk, S. 2020. A referenced empirical ground-motion model for Arias intensity and cumulative absolute velocity based on the NGA-East database. *Bulletin of the seismological society of America*, 110, pp. 508-518.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. et Bell, G. 2005. *Geotechnical engineering of dams*. A. A. Balkema Publishers.
- Fenton, G. A. et Griffiths, D. V. 2008. *Risk Assessment n Geotechnical Engineering*. Wiley.
- Ferdosi, B. 2014. A numerical investigation of the seismic response of tailings impoundments reinforced with waste rock inclusions. Ph.D. Thesis, École Polytechnique de Montréal.
- Ferdosi, B., James, M. et Aubertin, M. 2015a. Effect of waste rock inclusions on the seismic stability of an upstream raised tailings impoundment: a numerical investigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), pp. 1930-1944.

- Ferdosi, B., James, M. et Aubertin, M. 2015b. Investigation of the effect of waste rock inclusions configuration on the seismic performance of a tailings impoundment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), pp. 1519-1537.
- Ferdosi, B., James, M. et Aubertin, M. 2015c. Numerical simulations of seismic and post-seismic behavior of tailings. *Canadian geotechnical journal*, 53(1), pp. 85-92.
- Filiatrault, A. 2002 (2nd Edition). *Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Presses Internationales Polytechnique.
- Finn, W. D. L. 2018 Performance based design in geotechnical earthquake engineering *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 114. pp. 326-332.
- Goulet, C. A., Kishida, T., Ancheta, T. D., Cramer, C. H., Darragh, R. B., Silva, W. J., Hashash, Y. M. A., Harmon, J., Stewart, J. P., Wooddell, K. E. et Youngs, R. R. 2014. PEER NGA-east database. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Green, R. A, Mitchell, J. K, et Polito, C. P. 2000. An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils. *Proc. John Booker Memorial Symposium*, AA Balkema Publishers.
- Grimard, L. P. 2018. Une étude en laboratoire sur la réponse des résidus miniers aux charges compressives non drainées et aux pertes de confinement avec caractérisation par vitesse des ondes de cisaillement. *Mémoire de maîtrise*, Polytechnique Montréal.
- Grimard, L. P., Karray, M., James, M. et Aubertin, M. 2021. Consolidation characteristics of hydraulically deposited tailings obtained from shear wave velocity (V_s) measurements in triaxial and oedometric cells with piezoelectric ring-actuator technique (P-RAT). *Canadian Geotechnical Journal*, 58(2), pp. 281-294.
- Harehdasht, S. A., Karray, M., Hussien, M. N., Chekired, M. et Chiaradonna, A. 2017. Laboratory-based assessment of liquefaction potential of sandy soils using TxSS and P-RAT data. *Proc. GeoOttawa 2017*, Canadian Geotechnical Society. 9 pages.
- Hawley, M. et Cuning, J. 2017. *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. CSIRO Publ.
- He, J. et Rathje, E. M. 2024. Seismic capacity models for earth dams and their use in developing fragility curves. *Earthquake Spectra*, 40(3), pp. 1986-2007.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. et Sheahan, T. C. 2010. *An introduction to geotechnical engineering (Second edition)*: Pearson.
- Hussien, M. N. et Sgaoula, J. 2024. Mine tailings' state and post-liquefaction strength based on SCPT and basic laboratory data. *Proc. GeoMontréal 2024*. CGS, 8 pages.
- Hustrulid, W. A., McCarter, M. K. et Van Zyl DJA. 2000. *Slope stability in surface mining*. Society for Mining Metallurgy.
- Iai, S. 2018 *Performance-Based Seismic Design of Geotechnical Structures*. Springer International Publishing AG. S. Iai (ed.), *Developments in Earthquake Geotechnics*, *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* 43, DOI 10.1007/978-3-319-62069.
- Idriss, I. M. et Boulanger, R. W. 2007. SPT-and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils. In *Earthquake geotechnical engineering* (pp. 1-22). Springer, Dordrecht.
- Idriss, I. M. et Boulanger, R. W. 2008. *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute. Publication No. MNO-12. ISBN #978-1-932884-36-4.
- Ishihara, K. 1993. Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique*, 43, pp. 351-451.
- Ishihara, K. 1996. *Soil behavior in earthquake geotechnics: Kenji Ishihara (vol. 45)*. Clarendon Press.

- Itasca 2016. FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua. Version 8.00. [computer software and user manual]. Itasca Consulting Group, Inc Minneapolis MN.
- Jahanbakhshzadeh, A., Aubertin, M., Yniesta, S. et Zafarani, A. 2019. On the seismic response of tailings dikes constructed with the upstream and center-line methods. Proc. 72nd Canadian Geotechnical Conference, Geo St. John's 2019, CGS, 7 pages.
- Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2020. The effect of waste rock inclusions on the slope stability of tailings dike. Proc. 73rd Canadian Geotechnical Society Conference, GeoVirtual 2020, CGS.
- Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2021. Effect of the configuration of waste rock inclusions on the static stability of tailings impoundments. In: Geosciences for sustainability, Proc. of the 74th Canadian Geotechnical conference, GeoNiagara 2021. CGS. 7 pages.
- Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2022. Main results from an extensive geotechnical characterization of hard rock tailings from an open pit gold mine. Geosciences for Sustainability, Proc. 75th Canadian Geotechnical Conference, GeoCalgary 2022. CGS, 8 pages.
- Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2023. Influence factors affecting the static stability of tailings impoundments with waste rock inclusions. Geosciences for Sustainability, Proc. 76th Canadian Geotechnical Conference, GeoSaskatoon 2023. CGS, 8 pages.
- Jahanbakhshzadeh, A. et Aubertin, M. 2024. Effective Stress Analyses to Assess the Stability of Progressively Raised Upstream Dikes for Tailings Impoundments with Waste Rock Inclusions, Geotech Geol Eng. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-0272>.
- James, M. 2009. The use of waste rock inclusions to control the effect of liquefaction in tailings impoundments. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Geological, and Mining Engineering, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC.
- James, M. et Aubertin, M. 2009. The use of waste rock inclusions in tailings impoundments to improve geotechnical and environmental performance. In Proceedings, Tailings and Mine Waste 2009, Banff, Alberta. pp. 233-245.
- James, M. 2024. The Evaluation of the Seismic Performance of Tailings Storage Facilities, Parts 1 and 2. Proc. GeoMontréal 2024. Canadian Geotechnical Society, 16 pages.
- James, M., Aubertin, M., Wijewickreme, D. and Wilson, G. W. 2011. A laboratory investigation of the dynamic properties of tailings. Canadian Geotechnical Journal, 48(11), pp. 1587-1600.
- James, M. et Aubertin, M. 2012. The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments. GeoCongress 2012, Okland, 22-25 March 2012. American Society of Civil Engineers, pp. 4166-4175.
- James, M., Aubertin, M. et Bussière, B. 2013. On the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, pp. 735-738.
- James, M., Aubertin, M., Bussière, B., Pednault, C., Pépin, N. et Limoges, M. 2017. A research project on the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments. Geo Ottawa, Ottawa, ON. 8 pages.
- James, M. et Aubertin, M., 2016. Comparison of numerical and analytical liquefaction analyses of tailings. Journal of Geotechnical and Geological Engineering (DOI: 10.1007/s10706-016-0103).
- Jefferies, M. et Been, K. 2015. Soil liquefaction: a critical state approach. CRC press.
- Jibson, R. W. 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes - A retrospective. Engineering Geology, 122, pp. 43-50.
- Karray, M., Romdhan, M. B., Hussien, M. N. et Ethier, Y. 2015. Measuring shear wave velocity of granular material using the piezoelectric ring-actuator technique (P-RAT). Canadian Geotechnical Journal, 52(9), pp. 1302–1317.

- Karray, M., Hussien, M. N. Delisle, M. C. et Ledoux, C. 2017a. Framework to assess pseudo-static approach for seismic stability of clayey slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 17 pages.
- Karray, M., Hussien, M. N., Souilem, M., Locat, P. et Mompon, R. 2017b. Adjustment of spectral pseudo-static approach to account for soil plasticity and zone seismicity. *Canadian Geotechnical Journal*, 14 pages.
- Khashila, M., Karray, M. Hussien, M. N., Ramirez, J. et Chekired, M. 2023. Validation of strain/energy-based pore pressure model in one-dimensional response analyses using centrifuge tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13 pages.
- Kolaj, M., Halchuk, S., Adams, J. et Allen, T.I. 2020. Sixth generation seismic hazard model for Canada: input filesto produce values proposed for the 2020 National Building Code of Canada. Geological Survey of Canada Open File 8630.
- Kokusho, T. 2020. Energy-based liquefaction potential evaluation recommended in practical design. *Jpn Geotech J.*, 15(1), pp. 1-13.
- Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*, New Jersey, Prentice Hall.
- Kramer, S. L. 2014. Performance-based design methodologies for geotechnical earthquake engineering. *Bull Earthquake Eng.*, 12:1049–1070, DOI 10.1007/s10518-013-9484-x.
- Kramer, S. L. et Mitchell, R. A. 2006. Ground motion intensity measures for liquefaction hazard evaluation. *Earthquake Spectra*, 22(2), pp. 413-438.
- Kramer, S. L. et Wang, C. H. 2015. Empirical model for estimation of the residual strength of liquefied soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9), 04015038.
- Kramer, S. L. 2023. Cross Canada Lecture Tour Presentations on Performance Based Seismic Design and Liquefaction Assessments. Canadian Geotechnical Society. (available to CGS members: www.cgs.ca).
- Lambe, T. W. et Whitman, R. V. 1979. *Soil Mechanics*, SI Version, John Wiley.
- Lee, J. et Green, R. A. 2010. An empirical Arias intensity relationship for rock sites in stable continental regions. *Proc. Int. Conference on earthquakes engineering*, Tokyo, Japan.
- Locat, J. 2011. La localisation et la magnitude du séisme du 5 février 1663 (Charlevoix) revues à l'aide des mouvements de terrain. *Canadian Geot. J.*, 48(8), pp. 1266-1286.
- LSTC 2015. *LS-DYNA Manuals*.
- Majdanishabestari, K. 2023. Slope stability analysis of high waste rock piles constructed by push/end dumping using 2D and 3D FEM simulations. Thèse de Doctorat, Polytechnique Montréal. 273 pages.
- Majdanishabestari, K., Girumugisha, G. Ovalle, C. Aubertin, M. et Sáez, E. 2022. Slope stability and safety distance for mine waste rock piles built by End/Push dumping, *Proc. GeoCalgary 2022*, CGS, 8 pages.
- Majdanishabestari, K., Ovalle, C. et Aubertin, M. 2024. Slope stability of high waste rock piles based on 2D and 3D FEM simulations. *Proc. GeoMontréal 2024*. Canadian Geotechnical Society. 9 pages.
- Maknoon, M. 2016. Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations. Thèse de Doctorat. École Polytechnique de Montréal.
- Maknoon, M. et Aubertin, M. 2021. On the Use of Bench Construction to Improve the Stability of Unsaturated Waste Rock Piles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), pp. 1425-1449.
- Malhotra, P. K. 2022. *Site-Specific Ground Motions for Seismic Design of Buildings and Other Structures*. ASCE Press.

- Martin, V., Aubertin, M. et McMullen, J. 2006. Surface disposal of paste tailings. Proc. 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics, Cardiff, UK, pp. 1471-1478.
- McCarthy, D. F. 2007. Essential of Soil Mechanics and Foundations – Basic Geotechnics, 7th Edition. Prentice Hall.
- MERN 2017. Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Direction de la restauration des sites miniers. N° de publication M08-03-1710.
- Mitchell, D., Tinawi, R. et Law, T. 1990. Damage caused by the November 25, 1988, Saguenay earthquake. Canadian Journal of Civil Engineering, 17(3), pp. 338-365.
- Mitchell, K. et Soga, K. 2005. Fundamentals of Soil Behavior. Toronto ON: John Wiley and Sons, Inc.
- Motamed, R., Zeghal, M., Wilson, D. W., Madabhusi, S. C. et Elgamal, A. 2024. Scaling The Challenges Posed By Earthquakes - Advances in Geotechnical Earthquake Engineering Through Physical Modeling. Earthquake Geotechnics, GeoStrata, GI-ASCE, February-March 2024.
- Muir Wood, D. 1991. Soil Behavior and Critical Soil Mechanics, Cambridge Univ. Press.
- Muir Wood, D. 2004. Geotechnical Modelling. E&FN Spon.
- Narvaez, B., Aubertin, M. et Saleh-Mbemba, F. 2015. Determination of the tensile strength of unsaturated tailings using bending tests. Canadian Geotechnical Journal, 52(11), pp. 1874-1885.
- NASEM 2016. State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, The National Academies Press, Washington, DC. doi:1017226/23474.
- Newmark, N. M. 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. Géotechnique, 15(2), pp. 139-160.
- NIST 2017. GCR 17-917-45 Recommended Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Analysis in Support of Seismic Evaluation, Retrofit, and Design Prepared for U.S. Department of Commerce Engineering Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8600. 597 pages <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917-45>.
- NRCC 2020. National Building Code of Canada. National Research Council of Canada, Ottawa, ON.
- Olson, S. M. et Stark, T. D. 2002. Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. Canadian Geotechnical Journal, 39(3), pp. 629-647.
- PEER 2015. NGA-East: Median ground-motion models for the central and eastern North America region. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Report No. 2015/04.
- Pépin, N., Aubertin, M. et James, M. 2012. Seismic table investigation of the effect of inclusions on the cyclic behaviour of tailings. Canadian Geotechnical Journal, 49(4), pp. 416-426.
- Petersen, M. D., Shumway, A. M., Powers, P. M., Mueller, C. S., Moschetti, M. P., Frankel, A. D., Rezaeian, S., McNamara, D., Luco, N., Boyd, O. S., Rukstales, K. S., Jaiswal, K. S., Thompson, E. M., Hoover, S. M., Clayton, B., Field, N. et Zenget, Y. 2019. The 2018 update of the US National Seismic Hazard Model: Overview of model and implications. Earthquake Spectra, 36(1), pp .5-41.
- Phoon, K. W. 2023. What Geotechnical Engineers want to know about reliability. ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst. Part A. Civ. Eng., 9(2), 03123001, 29 pages.
- Poncelet, N. 2012. Élaboration et implémentation d'un protocole de laboratoire pour l'étude du potentiel de liquéfaction de résidus miniers. Mémoire M.Sc.A. École Polytechnique de Montréal.

- Potts, D. M. et Zdravkovic, L. 1999. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Theory. Ed. Thomas Telford.
- Potts, D. M. et Zdravkovic, L. 2001. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Application. Thomas Telford, London.
- Prakash, S. 1981. Soil Dynamics, McGrawHill.
- Rana, N. M., Ghahramani, N., Evans, S. G., McDougall, S., Small, A. et Take, W. A. 2021. Catastrophic mass flows resulting from tailings impoundment failures. Engineering Geology, 292, 106262.
- Rathje, E. M. 2024. Evaluating the seismic performance of slopes and earth dams. CGS Cross Canada Lecture Tour, Spring 2024. Canadian Geotechnical Society.
- Riemer, M. F., Macedo, J., Roman, O. et Paihuua, S. 2017. Effects of stress state on the cyclic response of mine tailings and its impact on expanding a tailings impoundment. Proc. PBD III, Performance Based Design Conference, Vancouver, 5 pages.
- Riveros, G. A., et Sadrekarimi, A. 2021. Static liquefaction behaviour of gold mine tailings. Canadian Geotechnical Journal, 58(6), pp. 889-901.
- Robertson, P. K. 2015. Comparing CPT and Vs liquefaction triggering methods. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(9). doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001338.
- Robertson, P. K. 2016. CPT-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), pp. 1910-1927.
- Robertson, P. K. 2022. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update. Canadian Geotechnical Journal, 59(4), pp. 620–624.
- Roche, C., Thygesen, K. et Baker, E. (Eds.). 2017. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident, A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.
- Rotta, L. H. S., Alcantara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., et Mendes, T. S. G. 2020. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 90, 102119.
- Salam, S., Xiao, M., Khosravifar, A. et Ziotopoulou, K. 2021. Seismic stability of coal tailings dams with spatially variable and liquefiable coal tailings using pore pressure plasticity models. Computers and Geotechnics, 132, 104017.
- Saleh-Mbemba, F., Aubertin, M. et Boudrias, G. 2019. Drainage and consolidation of mine tailings near waste rock inclusions. In Proceedings of the 87th Annual Meeting Int. Commission of Large Dams – ICOLD-CIGB 2019, Ottawa, Ont., pp. 9-14.
- Séismes Canada 2021. Aléa sismique à faible probabilité et Code national du bâtiment du Canada. Ressources naturelles Canada (consulté le 5/21/2024) <https://www.seismescanada.rncan.gc.ca/hazard-alea>.
- Seed, H. B. 1983. Earthquake-Resistant Design of Earth Dams. Proceedings of the Symposium on Seismic Design of Embankments and Caverns, Philadelphia PA, USA, pp. 41-61. New York: ASCE.
- Seed, H. B. 1987. Design problems in soil liquefaction. Journal of Geotechnical Engineering, 113(8).
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., et Faris, A. 2003. Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A unified and Consistent Framework. 26th annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, pp. 1-71. Long Beach, CA.
- Stewart, J. P., Blake, T. F. et Hollingsworth, R. A. 2003. A screen analysis procedure for seismic slope stability. Earthquake Spectra, 19(3), pp. 697-712.

- Towhata, I. 2008. Geotechnical Earthquake Engineering. Springer.
- USACE 2016. Army Corps of Engineers Selection of Design Earthquakes and Associated Ground Motions, ECB 2016-12EM 1110-2-6000.
- USSD 2022. Analysis of Seismic Deformations of Embankment Dams, USSD Committee on Earthquakes Sub-Committee on Seismic Deformation Analysis of Embankment Dams. U.S. Society on Dams.
- Vaid, Y. P. et Sivathayalan, S. 2000. Fundamental Factors Affecting Liquefaction Susceptibility of Sands. Canadian Geotechnical Journal, 37, pp. 592-606.
- Verdugo, R., Peters, G., Valenzuela, L., Campaña, J., Valenzuela, L. et Bard, E. 2017. Evaluation of Tailings Dams Subjected to Large Earthquakes. Proc. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul.
- Verma, P., Seidalinova, A. et Wijewickreme, D. 2019. Equivalent number of uniform cycles versus earthquake magnitude relationships for fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 56(11), pp. 1596-1608.
- Verret, D. et Péroquin, E. 2017. Hydro-Québec's Embankment Dams Seismic Assessment Progressive Approach. Proc. ICOLD 14th Int. Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Stockholm, 10 pages.
- Vick, S. G. 1990. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. BiTech Pub.
- Wijewickreme, D., Sanin, M. V. et Greenaway, G. 2005. Cyclic shear response of fine-grained mine tailings. Canadian Geotechnical Journal, 42(5), pp. 1408-1421.
- Wijewickreme, D., Soysa, A. and Verma, P. 2017. Response of natural fine-grained soils for seismic design practice: a collection of research findings from British Columbia. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B. et Stokoe, K. H. II 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10), pp. 817-833.
- Yu, H. S. 2006. Plasticity and Geotechnique. Springer.
- Zafarani, A. 2022. Development of a seismic design procedure of tailings impoundments reinforced with waste rock inclusions. Ph.D Thesis, Polytechnique Montreal.
- Zafarani, A., Yniesta, S. et Aubertin, M. 2020. Effect of height and downstream slope on the seismic behavior of tailings impoundments reinforced with waste rock inclusions. Proc. 73rd Canadian Geotechnical Conference (GEOVirtual 2020), CGS, 8 pages.
- Zafarani, A., Yniesta, S. et Aubertin, M. 2021. On the selection of ground motion intensity measures to evaluate the seismic stability of tailings impoundments. Proc. 74th Canadian Geotechnical Conference, GeoNiagara 2021, CGS, 11 pages.