

(ID Modèle = 454913)

Ineris - 178736 - 1971292 - v2.0

12/04/2021

Ruptures de barrages de résidus miniers : retour d'expérience et évaluation du phénomène



PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol

Rédaction : FRANCK Christian

Vérification : DAUPLEY XAVIER

Approbation : BIGARRE PASCAL - le 12/04/2021

Relecture externe : l'auteur remercie vivement Isabelle VUIDART, GEODERIS, et, Yann GUNZBURGER, Géoressources, pour leur relecture précieuse tant sur le fond que sur la forme

Table des matières

1	Introduct	Introduction et problématique 10					
2	Quelque	s notions et définitions employées dans le rapport	. 12				
3	Cadre ré	glementaire en Europe et en France	. 13				
4	Les diffé	rentes typologies de barrages de résidus miniers	. 16				
	4.1	Géométrie et modes d'édification	. 16				
	4.2	Autres classifications	. 18				
	4.3	Nature et caractéristiques des matériaux constitutifs des barrages et des résidus min 19	iers				
	4.4	Phase de vie	. 22				
5	Retour d	expérience sur les ruptures de barrages de résidus miniers et leurs conséquences	. 24				
	5.1	Quelques statistiques sur les désordres des barrages hydrauliques dits « en rembl 24	ai »				
	5.2	Cas des barrages de résidus miniers : quelques éléments statistiques	. 25				
	5.2.1	Bases de données consultées et constituées	. 25				
	5.2.2	Répartition temporelle	. 26				
	5.2.3	Répartition géographique	. 26				
	5.2.4	Répartition selon le stade de vie du barrage	. 27				
	5.2.5	Répartition selon la hauteur du barrage	. 27				
	5.2.6	Répartition selon la méthode d'édification	. 28				
	5.2.7	Répartition selon les causes	. 29				
	5.2.8	Répartition selon les conséquences	. 30				
	5.3	Zooms sur quelques cas emblématiques	. 31				
	5.3.1	Rupture du barrage de résidus miniers de Stava, Italie, 1985	. 31				
	5.3.2	Rupture du barrage de résidus miniers de Fundao, Brésil, 2015	. 33				
	5.3.3	Rupture du barrage de résidus miniers de Brumadinho, Brésil, 2019	. 35				
6	Etat des	lieux en France	. 38				
	6.1	En France métropolitaine	. 38				
	6.2	En Guyane	. 41				
7	Recueil o	des connaissances sur l'évaluation du phénomène de type coulée	. 43				
	7.1 barrage de	Rappel succinct de la notion d'aléa et des mouvements de terrains pouvant affecter résidus miniers	' un . 43				
	7.2	Définition du phénomène de type coulée	. 44				
	7.3	Les principaux modes de défaillance d'un barrage de résidus miniers	. 45				
	7.3.1	Défaillance du sol d'assise de l'ouvrage	. 45				
	7.3.2	Défaillance du corps du barrage	. 46				
	7.3.3	Ruptures se développant dans le dépôt de résidus miniers	. 46				
	7.3.4	Défaillances liées à l'action érosive de l'eau	. 48				
	7.4	Les mécanismes de propagation	. 51				
	7.4.1	Conditions de post-rupture immédiates	. 51				
	7.4.2	Mode de comportement du mélange résidus-eau	. 51				
	7.4.3	Régime d'écoulement : laminaire ou turbulent ?	. 53				

7.4.4 et de la	Classification des coulées de débris en fonction des caractéristiques de la hauteur de l'écoulement	phase solide 54
7.5 approche	Estimation des paramètres d'intensité et d'extension géographique : les s 56	s différentes
7.5.1	Considérations générales	56
7.5.2	Les paramètres géométriques d'entrée	56
7.5.3	Modèles statistiques et formules empiriques liés aux retours d'expérience	57
7.5.4	Modèles de mécanique du solide déformable. Modèle de Lucia et al	62
7.5.5	Modèles de mécanique des fluides	64
7.6	Synthèse	68
8 Comme	ent évaluer le phénomène de type coulée	70
8.1	Un retour d'expérience limité dans le cadre de la post-exploitation	70
8.2	Eléments-guides pour évaluer le phénomène de type coulée	70
8.2.1	Les facteurs de prédisposition et de pertinence	70
8.2.2	Les facteurs d'intensité et d'extension géographique (cartographiques)	77
8.2.3	Eléments d'estimation de l'intensité et de l'extension géographique	
8.2.4	Proposition d'évaluation de l'aléa	79
9 Conclu	sions	81
10	Références	82
10.1	Documents consultés	82
10.2	Documents cités mais non consultés	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Catastrophe de Merriespruit, Harmony, Afrique du Sud, 1994, (ICME, [53]) 10
Figure 2 : Evolution du nombre de cas de ruptures « graves » (en bleu clair) et « très graves » (en bleu
foncé), entre 1958 et 2017, selon https://worldminetailingsfailures.org/, [105] 10
Figure 3 : Les différentes configurations ou dispositions de barrages (ICOLD, [41]) 16
Figure 4 : Les principales dispositions de barrages. La disposition en vallée est la plus largement
répandue17
Figure 5 : Coupe schématique d'un ouvrage de rétention industriel construit selon la méthode amont,
avec plage de déversement (d'après Vick, [100]) 17
Figure 6 : Les différentes méthodes d'élévation des barrages miniers 19
Figure 7 : fuseau granulométrique des résidus miniers (Hallman et al., [37])21
Figure 8 : Comparaison de fuseaux granulométriques des résidus de la mine de Lahanos (en rouge) et
d'autres mines (Ozcan et al., [81] et CANMET, [114]) 21
Figure 9 : Répartition en pourcentages des cas de détérioration et de rupture affectant la fondation et/ou
le corps du barrage en fonction de la hauteur de l'ouvrage (d'après ICOLD, [52])24
Figure 10 : Répartition en pourcentages des cas de détérioration et de rupture affectant la fondation
et/ou le corps du barrage en fonction de la période de vie de l'ouvrage (d'après ICOLD, [52])
Figure 11 : Pourcentage de rupture des barrages en fonction de leur âge et des principales causes. Le
graphique du bas représente les barrages en remblai (ICOLD, 1973, in Costa [23])25
Figure 12 : Rubriques du tableau des principaux accidents élaboré par l'Ineris (annexe 1) 26
Figure 13 : Nombre de ruptures de barrages de résidus miniers par décennies (Azam, Li [9])27
Figure 14 : Nombre de ruptures de barrages de résidus miniers par continent – sous-continent (d'après
Azam, Li [9])
Figure 15 : Comparaison du nombre de cas de rupture de barrages et de leur hauteur (d'après ICOLD,
[43])
Figure 16 : Comparaison du nombre de cas d'incidents de barrages et de leur méthode d'édification
(d'après ICOLD, [43])

Figure 17 : Comparaison du nombre de cas d'incidents (ruptures, accidents) de barrages et de la cause Figure 18 : Représentation du nombre de cas de ruptures de barrages au regard de la cause détaillée Figure 19 : Détail des deux bassins (1 : zone de séparation par cyclonage, 2 et 7 : dépôts de sable, 3 Figure 21 : Répercussions de l'accident de la mine Germano de Samarco d'après Roche et al. [90]. 34 Figure 22 : Conception du bassin de résidus de Fundao, constitué d'une zone tampon de sable Figure 23 : Extrait de l'animation relative aux causes de la rupture du barrage de Fundao. En lits orange boues de résidus au sein de la zone de sable, conduisant à la montée des eaux (ligne bleue) au sein de celle-ci au fur et à mesure de l'élévation, permettant des conditions de liquéfaction du sable (tache Figure 25 : Image extraite du film de la rupture. On voit nettement la rupture de la crête du barrage et le Figure 27 : Ancienne mine de Montmins, Echassières. Les quatre structures de retenue de résidus et Figure 28 : Schéma de principe d'une exploitation alluvionnaire en Guyane (DEAL Guyane, in Minefi, Figure 29 : Modelés des glissements profonds, circulaire (à droite) et plan (à gauche) (www.protection-Figure 38 : Fuseau granulométrique de sols potentiellement (tiretés) ou probablement (pointillés) liquéfiables, d'après Tsuchida, [132] et courbe granulométrique de résidus et de matériaux de digue Figure 41 : Classification des résidus liquéfiés, d'après le CIGB, 1995 [115]......52 Figure 43 : Positionnement des écoulements laminaires et turbulents en fonction du nombre de Reynolds critique et du nombre d'Hedstrom. Positionnement des résidus de phosphate et autres résidus Figure 45 : Abaque reliant la distance d'écoulement et le facteur de barrage, construit d'après Rico et al. [87]. La régression linéaire figure en bleu et la courbe enveloppe en orange. Les cas de rupture étudiés par Rico et al. sont regroupés peu ou prou en deux familles ajoutées sur cet abaque 59 Figure 46 : Graphiques en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxV_{mob}, H; Q) en fonction du type de barrages, ainsi que les droites de régressions linéaires obtenues Figure 47 : Coupe schématique montrant l'état initial et l'état final envisagés par Lucia et al. [66] (Ineris Figure 48 : Coupe type de l'état final de l'écoulement et notations des grandeurs géométriques (Ineris Figure 49 : Bilan des forces 2D sur la masse de résidus mobilisés dans l'état final de l'écoulement, selon Figure 50 : Exemple d'abaque, selon le modèle de Lucia et al. [66], donnant la distance parcourue en fonction de la contrainte de cisaillement S_u, du rapport du volume mobilisé sur le volume total. Dans le cas présent le volume de résidus stockés, rapporté en 2D, est 1000 m² (Ineris [44])......63

Figure 51 : Pente maximum de l'écoulement en fonction du temps après la rupture d'un barrage de 10 m de hauteur. En violet recherche du temps d'écoulement pour atteindre une pente de 1° pour le fluide newtonien (Ineris [44])65 Figure 52 : Application du temps retenu pour évaluer la distance parcourue par un fluide de hauteur 0,7 m (Ineris [44])65 Figure 53 : Abaques exprimant la vitesse et le déplacement en tête de coulée, en fonction de valeurs Figure 54 : Abaques expriment la distance parcourue x_f et du temps d'arrêt de la coulée t_f , en fonction des paramètres adimensionnels R et S, pour une pente aval nulle (d'après Jeyapalan et al. [56]) 67 Figure 56 : Graphique en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxVmob; D) du Tableau 20, la droite de régression linéaire en trait plein et la courbe enveloppe en trait Figure 57 : Graphique en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxV_{mob}; Q) en fonction du type de barrages, ainsi que les droites de régressions linéaires obtenues Figure 58 : Coupe schématique montrant l'état initial et l'état final envisagés par Lucia et al [66]..... 106 Figure 59 : Coupe type de l'état final de l'écoulement et notations des grandeurs géométriques, 106 Figure 60 : Bilan des forces 2D sur la masse de résidus mobilisés dans l'état final de l'écoulement, selon Figure 61 : Vues en plan d'une digue en barrage de vallée (à gauche) et d'une digue annulaire (à droite). Figure 62 : Abaque donnant la distance parcourue en fonction de la contrainte de cisaillement Su, du Figure 64 : Solutions de Ritter pour une digue de 10 m de hauteur (placée en x=0) à différents temps Figure 66 : Distance maximum parcourue par une vague de hauteur supérieure à 0,7 m en fonction du Figure 67 : Principe de modification du front d'onde......119 Figure 68 : Logigramme présentant la démarche proposée pour utiliser le modèle de Ritter...... 120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classement selon l'envergure du barrage, de l'US Army Corps of Engineers, extrait de ICOLD. [41]. Les valeurs sont transformées et arrondies dans le système métrique
Tableau 2 : Principales caractéristiques des résidus selon leur provenance (Vick, 1983, in Spence, [95])
Tableau 3 : Eléments de caractérisation des résidus miniers, issus de la littérature compulsée
Tableau 5 : Tableau des ruptures par niveau de gravite tel qu'établi par WMTF [105]
guide des aléas miniers de l'Ineris [49] 44 Tableau 8 : Estimation de l'état de compaction, du comportement et du potentiel de liquéfaction de résidus sableux au regard de leur densité relative (DR) – Espinace et al. [116], in Villavicencio et al. [103]
Tableau 9 : Paramètres d'écoulement de résidus miniers liquéfiés issus de Jeyapalan et al, 1983, [56], et de Jin et Fread, 1997,([121], in Pastor et al. [82])
est consideree constante et egale a 14 kN/m ³ , la densite des grains solides etant prise egale a 26,5 kN/m ³
1a qualite de l'estimation (mens, [44])

Tableau 13 : Expressions des courbes enveloppes proposées par Rico et al. [87], et évaluation de la qualité de l'estimation (Ineris, [44])
Tableau 14 : Comparaison des valeurs de débit de pointe estimées, selon les formules de différents
auteurs, pour la rupture d'un barrage de 60 m de haut, puis de 120 m de haut, le volume mobilisé
(résidus + eau) étant fixé à 23 M m3 (Martin et al. [73])
Tableau 15 : Retour d'expérience sur 14 cas et estimation de la pente finale et de la contrainte limite de
cisaillement des résidus après écoulement (S _{II}), d'après Lucia et al. [66]
Tableau 16 : Facteurs de prédisposition – Tableau de synthèse
Tableau 17 : Facteurs d'intensité – Tableau de synthèse
Tableau 18 : Estimation de l'intensité et de la distance parcourue - Synthèse des modèles évoqués
dans le rapport
Tableau 19 : Proposition de niveaux de l'aléa coulée 80
Tableau 20 : Liste des 29 cas de rupture de digues de rétention utilisés par Rico et al [88]
Tableau 21 : Relations proposées par Rico et al [88] obtenues à partir de régressions linéaires 99
Tableau 22 : Expressions des courbes enveloppes proposées par Rico et al [88]
Tableau 23 : Relations obtenues par régression linéaire proposées par Costa [23] 100
Tableau 24 : Expressions synthétiques pour l'estimation de la distance parcourue par l'onde de
submersion D et du débit maximum Q à partir des relations obtenues par Rico et al [88] et Costa [23]
Tableau 25 : Exemple d'application des relations synthétiques du Tableau 24 101
Tableau 26 : Liste des variables géométriques et mécaniques prises en compte par Lucia et al 107
Tableau 27 : Système d'équations à résoudre. 108
Tableau 28 : Variables d'entrée du modèle
Tableau 29 : Retour d'expérience sur 14 cas et estimation de la contrainte limite de cisaillement des
résidus après écoulement (S _u), d'après Lucia et al [66]109
Tableau 30 : Données d'entrée utilisées pour la création de l'abaque de la Figure 62 110

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 : Les barrages de résidus miniers superposés de Stava avant rupture
(http://www.fiemmefassa.com)
Photographie 2 : Clichés avant/après dans le village de Tesero (in Luino, De Graff [67])
Photographie 3 : Le barrage de Fundao avant et après rupture (Morgenstern et al. [78])
Photographie 4 : Brèche survenue le 1 ^{er} mars 2015 dans le bassin « Bellevue » de l'ancienne mine des
Montmins, commune d'Echassières, Allier (source Somival) 40
Photographie 5 : Digue du bassin n°2 de Malvési avant et après rupture
(http://www.criirad.org/actualites/dossiers2006/comurhex/rapportcomurhex_criirad_1.pdf)
Photographie 6 : Affouillement de parement créé par le batillage au sein d'un plan d'eau (Ineris) 49
Photographie 7 : Brèche créée par l'érosion interne au sein d'une levée (cliché Irstea, in
http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr)

Résumé

Il existe à travers le monde plus de vingt mille barrages de résidus miniers, ouvrages retenant des résidus issus de la valorisation, du traitement et du lavage du minerai.

La rupture de ces ouvrages est l'un des phénomènes de mouvement de terrain les plus recensés et destructeurs, tant sur le plan du nombre de victimes que sur celui de l'impact environnemental généré. On dénombre depuis le début du vingtième siècle plus de cent trente cas de rupture générant des victimes (près de 2800) et/ou des pollutions importantes voire majeures. Plus de cinquante cas de rupture sont recensés depuis le début du vingt et unième siècle.

Depuis les premiers travaux de construction, des progrès ont été accomplis pour maîtriser ce risque, notamment au regard des retours d'expériences d'accidents historiques. Il n'en demeure pas moins, que bon nombre de ces ouvrages ne présentent pas des garanties de sécurité suffisantes lorsque des événements exceptionnels ou anormaux (forte pluviométrie, séismes) ou des défaillances structurelles ou anthropiques (conception ou édification défaillante, dégradations ou ruptures d'ouvrages connexes, surveillance insuffisante) surviennent.

La maîtrise du risque pourrait toutefois être assurée lorsque la mine est en activité et gérée par un exploitant, notamment lorsque les meilleures techniques disponibles relatives à la conception, l'édification, la maintenance, la surveillance et le contrôle sont suivies.

En revanche, lorsque la mine est fermée puis abandonnée, restituée au milieu naturel, ces ouvrages subsistent et sont de nature à pouvoir être affectés par des ruptures, la plus destructive d'entre elles engendrant, selon certaines conditions, un phénomène de coulée pouvant impacter l'aval de l'ouvrage. Compte tenu de la date d'édification somme toute récente de la plupart des barrages de résidus miniers, le retour d'expérience sur leur évolution interne jusqu'à leur potentielle rupture après leur période fonctionnelle reste à ce jour limité.

Par ailleurs, l'évolution des conditions climatiques dans le futur constitue une somme de facteurs pouvant augmenter les conditions de rupture de l'ouvrage, dont l'environnement peut subir une anthropisation progressive augmentant le risque.

Le présent rapport s'inscrit donc dans l'évaluation de l'aléa de mouvement de terrain que peuvent générer ces barrages. Il s'agit plus particulièrement de proposer des grands principes et des outils d'évaluation du phénomène de type coulée lié à leur rupture. Il est basé en cela sur un retour d'expérience de l'accidentologie recensée, ainsi que sur une consultation de la bibliographie et des modèles de rupture et de propagation relatifs à ce sujet.

Un certain nombre de facteurs permettant d'évaluer le phénomène et de modèles simples sont proposés, dont l'objectif est d'accompagner le travail d'évaluation sur un site spécifique. Le document traduit notamment que l'évaluation de l'intensité du phénomène n'est pas aisée à déterminer, car elle combine de multiples facteurs relatifs aux résidus, à leur teneur en eau, à la rhéologie du phénomène et la morphologie du terrain en aval. Un site présentant un aléa potentiellement élevé avec des enjeux exposés doit être l'objet d'investigations spécifiques afin de parfaire l'évaluation du phénomène.

Abstract

There are over twenty thousand mine tailings dams around the world, structures retaining tailings from concentration, processing and washing of ore.

Failure of these tailing dams is one of the most recorded and destructive land movement phenomena, both in terms of the number of victims and the environmental impact generated. Since the beginning of the twentieth century, there have been more than one hundred and thirty cases of failure generating victims (nearly 2,800) and causing significant or major pollution. More than fifty cases of failure have been recorded since the beginning of the twenty-first century.

Since the first constructing works, progress has been made in controlling this risk, taking into account feedback from previous accidents. The fact remains that many of these dams do not present sufficient safety guarantees, when exceptional or abnormal events (heavy rainfall, earthquakes) or structural or anthropogenic causes (faulty design or construction, degradation or failure of other infrastructures, insufficient supervision) occur.

However, risk control could be ensured when the mine is in operation and managed by an operator, especially when the best available techniques relating to design, construction, maintenance, monitoring and control are followed.

On the other hand, when the mine is closed and then abandoned, returned to the natural environment, these structures remain and are likely to be affected by ruptures, the most destructive of them causing, under certain conditions, a mud flow phenomenon that can impact downstream of the dam. But, due to quite recent construction date of most tailings dams, experience feedback on their internal evolution until their potential failure after their operational period remains limited to this day.

The evolution of climatic conditions in the future constitutes a sum of factors that may increase the failure conditions of the dam, the environment of which may be subjected to progressive anthropization, increasing the risk.

This report deals with the evaluation of the hazard of ground movement that these dams can generate. It particularly proposes main principles and tools for evaluating the flow-type phenomenon which can be associated to their failure. It is based on this experience feedback from the identified accidentology, as well as a consultation of the bibliography and models of failure and propagation relating to this subject.

A number of criteria to assess the phenomenon, and simple models, are proposed, the objective of which is to accompany the assessment work on a specific dam site. The document shows in particular that the evaluation of the intensity of the phenomenon is not easy to determine, because it combines multiple factors relating to the residues, their water content, the rheology of the phenomenon and the morphology of the ground downstream. A dam site presenting a potentially high hazard with exposed stakes must be the subject of specific investigations in order to complete the assessment of the phenomenon.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 178736 - v2.0, 12/04/2021.

Mots-clés : Accident, aléa, barrage, coulée, mine, phénomène, résidus miniers, stabilité des pentes

1 Introduction et problématique

Il existe de par le monde plus de vingt mille barrages de résidus miniers, ouvrages délimitant des dépôts de résidus issus du lavage, du traitement et de la valorisation du minerai.

La rupture de ces ouvrages est l'un des phénomènes de mouvement de terrain les plus recensés et destructeurs, tant sur le plan du nombre de victimes que sur celui de son impact environnemental. On dénombre depuis le début du vingtième siècle plus de cent trente cas de rupture générant des victimes (près de 2 800 au total) et/ou des impacts environnementaux non négligeables. Plus de cinquante cas de rupture sont recensés depuis le début du vingt et unième siècle.



Figure 1 : Catastrophe de Merriespruit, Harmony, Afrique du Sud, 1994, (ICME, [53])

Rapporté au nombre d'ouvrages édifiés, le nombre de ruptures de barrages de résidus miniers tend à diminuer avec le temps (Bowker et Chambers, 2015, rapporté dans UNEP [98]), mais les ruptures majeures en termes de gravité ont augmenté, cette tendance se poursuivant depuis plusieurs décennies (Figure 2).



Figure 2 : Evolution du nombre de cas de ruptures « graves » (en bleu clair) et « très graves » (en bleu foncé), entre 1958 et 2017, selon https://worldminetailingsfailures.org/, [105]

Depuis les premiers travaux de construction, des progrès ont été accomplis pour maîtriser ce risque, notamment au regard des retours d'expériences d'évènements historiques. Il n'en demeure pas moins, et la catastrophe récente de Brumadinho, au Brésil, le 25 janvier 2019 (270 morts et personnes disparues), nous le rappelle, que bon nombre de ces ouvrages ne présentent pas des garanties de sécurité suffisantes lorsque des événements exceptionnels ou anormaux (forte pluviométrie, séismes) surviennent ou lorsque des défaillances structurelles ou anthropiques (conception ou édification défaillante, dégradations ou ruptures d'ouvrages connexes, surveillance insuffisante) sont en cause.

La maîtrise du risque pourrait toutefois être davantage assurée lorsque la mine est en activité et gérée par un exploitant, notamment lorsque les meilleures techniques disponibles relatives à la conception, l'édification, la maintenance, la surveillance et le contrôle sont mises en œuvre.

En revanche, lorsque la mine est fermée puis abandonnée, restituée au milieu naturel, ces ouvrages subsistent et peuvent être affectés par des ruptures, les plus destructrices d'entre elles engendrant, sous certaines conditions, un phénomène de coulée pouvant impacter l'aval de l'ouvrage. Compte tenu de la date d'édification somme toute récente de la plupart des barrages de résidus miniers, le retour d'expérience sur leur potentielle rupture après leur période fonctionnelle est limité.

Le présent rapport s'inscrit dans l'évaluation de l'aléa de type coulée que peuvent générer d'anciens barrages. Dans le prolongement du guide d'évaluation des aléas miniers établi par l'Ineris en 2018 [49], qui abordait de manière succincte ce type de mouvement de terrain, il s'agit plus particulièrement de proposer des grands principes et des outils d'évaluation du phénomène de type coulée lié à la rupture de ces ouvrages.

Il est basé en cela sur un retour d'expérience de l'accidentologie recensée, tant en termes de causes que de conséquences, ainsi que sur une consultation de la bibliographie établie à ce sujet¹.

Ce document présente les aspects géotechniques relatifs à ce phénomène. Le volet relatif à l'impact écologique a fait l'objet d'un rapport de recherche documentaire spécifique établi par l'Ineris [51].

¹ Les numéros renvoient aux références bibliographiques consultées ou citées, détaillées au chapitre 10

2 Quelques notions et définitions employées dans le rapport

Barrage : le barrage est un ouvrage destiné à retenir temporairement ou durablement une quantité d'eau plus ou moins grande pour différents usages (production d'énergie hydroélectrique ; alimentation en eau potable ; irrigation ; régulation des débits de cours d'eau ; activités touristiques...). Les ouvrages sont construits, le plus souvent, en travers d'un cours d'eau, mais certains d'entre eux sont construits en dehors du lit majeur d'un cours d'eau et alimentés en dérivant une partie du débit de cours d'eau proches ; c'est le cas des retenues collinaires et des barrages faisant partie de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) (source www.ecologie-solidaire.gouv.fr).

Barrage de résidus miniers : on emploiera ce terme dans le présent rapport, pour désigner toute structure anthropique retenant *a minima* un mélange de résidus miniers et d'eau. Le terme de **digue** est très souvent employé, par les exploitants miniers, et même au sein de textes réglementaires (directive 2006/21/CE, arrêté du 19 avril 2010). On retiendra toutefois que les barrages visent à retenir les effluents et sont très fréquemment transverses à un cours d'eau. Certains barrages peuvent retenir des stériles miniers et non des résidus (voir ci-après). Les digues n'ont pas de fonction de rétention mais doivent empêcher les effluents de déborder du lit du cours d'eau, elles sont en cela longitudinales à celui-ci dans la plupart des cas.

Bassin : dans le cadre de la problématique objet du rapport, site naturel ou aménagé destiné à recevoir les déchets à grains fins, en principe des résidus, et des quantités variables d'eau libre issue du traitement des ressources minières, ainsi que de l'épuration et du recyclage des eaux de traitement (texte repris de la directive 2006/21/CE [29]).

Coulée : mouvement de terrain où le matériau constitutif d'une pente est totalement déstructuré et remobilisé du fait d'une forte présence d'eau. Il se transforme alors en un fluide plus ou moins visqueux qui s'écoule à une vitesse généralement élevée. Cet écoulement est parfois composé de blocs de matériaux et de débris divers emportés ou arrachés.

Déchets d'extraction : au sens de la directive 2006/21/CE [29], ensemble de déchets issus de la prospection, de l'extraction, du traitement, du stockage des ressources exploitées par les mines et carrières. Les résidus miniers entrent dans cette catégorie.

Résidus miniers : ce terme désigne les déchets solides ou boueux subsistant après le traitement des minéraux par des procédés de séparation (par exemple, concassage, broyage, criblage, flottation et autres techniques physico-chimiques) destinés à extraire les minéraux de valeur de la roche.

Stériles miniers : ce terme désigne un mélange de roches foisonnées issues de l'extraction minière, considérées comme étant non valorisables économiquement par l'exploitant (absence ou teneur insuffisante en minerai), par conséquent non traitées, et mises en dépôt. Le terme anglais « waste » ou « waste rock » est souvent employé.

3 Cadre réglementaire en Europe et en France

Chaque pays possède sa propre réglementation pour encadrer l'activité minière ou propre aux industries extractives en matière de sécurité des barrages de résidus miniers. L'évolution des réglementations s'appuie notamment sur les connaissances et retours d'expérience locaux ou internationaux. En matière de thésaurisation des acquis scientifiques et techniques, on citera en premier lieu l'International Commission on Large Dams (ICOLD)², organisation internationale non gouvernementale destinée à favoriser l'échange des connaissances et de l'expérience dans le domaine de l'ingénierie des barrages.

La réglementation internationale étant vaste, nous nous sommes bornés ici à rappeler les principaux textes en Europe et en France concernant la thématique des barrages de résidus miniers.

La **Décision européenne 2000/532/CE du 3 mai 2000** [26] établit la liste des déchets, parmi lesquels ceux qui sont classés dangereux. En droit français, cette liste est définie et figure aux articles **R541-7 et R541-8 du code de l'environnement**. La catégorie 1 regroupe les « déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux » parmi lesquels figurent les déchets provenant de l'extraction et les stériles. Sont notamment classés dans tous les cas dangereux les stériles acidogènes provenant de la transformation de sulfure ou pouvant conduire à celle-ci, les stériles contenant des substances dangereuses, et les déchets contenant des substances dangereuses provenant de la transformation physique et chimique des minéraux, métallifères ou non. Les autres déchets peuvent être classés comme dangereux s'ils possèdent au moins une des quinze propriétés³ fixées au règlement UE1357/2014, remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE.

La **Directive européenne 2006/21/CE du 15 mars 2006** [29] concerne la gestion des déchets de l'industrie extractive. Elle s'applique aux déchets dits « d'extraction » résultant de « *la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales, ainsi que de l'exploitation de carrières* » (article 2), et « vise à prévenir ou réduire, autant que possible, les effets néfastes sur *l'environnement, en particulier l'eau, l'air, le sol, la faune et la flore et les paysages, ainsi que les risques pour la santé humaine résultant de la gestion des déchets des industries extractives » (article 1^{er}).*

L'article 5 de la directive demande aux Etats membres à veiller à ce que l'exploitant établisse un plan de gestion des déchets (PGD). Parmi les objectifs figure le fait de « *tenir compte, durant la phase de conception, de la gestion pendant l'exploitation et après la fermeture de l'installation de gestion de déchets, en choisissant une conception qui :*

i. requière un minimum et, si possible, à terme, pas de surveillance, de contrôle ni de gestion de l'installation de déchets fermée, …,

iii. assure la stabilité géotechnique à long terme des digues ou des terrils s'élevant au-dessus de la surface du sol préexistante. »

Il est défini à l'annexe III une catégorie A de déchets qui, outre la classification de dangerosité des déchets, substances ou préparations, inclut la condition suivante : « une défaillance ou une mauvaise exploitation, telle que l'effondrement d'un terril ou la rupture d'une digue, pourrait donner lieu à un accident majeur⁴, sur la base d'une évaluation du risque tenant compte de facteurs tels que la taille actuelle ou future, la localisation et l'incidence de l'installation sur l'environnement ».

Ainsi les notions de stabilité et de rupture de digue apparaissent de manière explicite dans la directive européenne.

² Ou CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages) en langue française

³ HP1 « Explosif », HP2 « Comburant », HP3 « Inflammable", HP4 "Irritant", HP5 « Toxicité spécifique pour un organe cible (STOT)/toxicité par aspiration », HP6 « Toxicité aigüe », HP7 « Cancérogène », HP8 « Corrosif », HP9 « Infectieux », HP10 « Toxique pour la reproduction », HP11 « Mutagène », HP12 « Dégagement d'un gaz à toxicité aigüe », HP13 « Sensibilisant », HP14 « Ecotoxique », HP15 « Déchet capable de présenter une des propriétés dangereuses susmentionnées que ne présente pas directement le déchet d'origine »

⁴ Défini à l'article 3 comme entraînant « un danger grave pour la santé humaine et/ou pour l'environnement, immédiatement ou à terme, sur le site ou en dehors du site »

Pour cette catégorie A, l'article 5 demande à ce que soit établi par l'exploitant « *un document prouvant qu'une politique de prévention des accidents majeurs, qu'un système de gestion de la sécurité destiné à la mettre en œuvre et qu'un plan d'urgence interne seront mis en œuvre »*.

Ce PGD est « réexaminé/modifié tous les cinq ans, le cas échéant, en cas de modifications substantielles de l'exploitation de l'installation ou des déchets déposés ».

L'article 6 est dédié à la « prévention des accidents majeurs et informations ». Les Etats membres doivent veiller à ce que les dangers d'accidents majeurs soient identifiés et que les mesures nécessaires soient prises du stade de conception jusqu'au suivi après fermeture de l'installation de déchets. L'exploitant doit définir une politique de prévention des accidents majeurs, mettre en place un système de gestion de la sécurité et un plan d'urgence interne en cas d'accident. L'autorité compétente établit un plan d'urgence externe relatif aux mesures en dehors du site en cas d'accident.

En 2018, en relation avec cette directive, la Commission Européenne a établi un rapport de référence relatif aux meilleures techniques disponibles (« BAT » ou Best Available Techniques) pour la gestion des déchets de l'industrie extractive [32].

Le **décret n° 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées** [27] introduit, dans le cadre de la transposition de la Directive européenne 2006/21/CE, la rubrique 2720 « *Installation de stockage de déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales ainsi que de l'exploitation de carrières (site choisi pour y accumuler ou déposer des déchets solides, liquides, en solution ou en suspension)* ». Les installations de stockage de déchets dangereux, ou de déchets non dangereux non inertes, sont soumis à autorisation.⁵

L'Arrêté du 19 avril 2010 [8] relatif à la gestion des déchets des industries extractives fixe, conformément aux exigences de la Directive européenne 2006/21/CE, les prescriptions générales applicables aux installations relevant de la rubrique 2720 de la nomenclature des installations classées. Il reprend notamment les dispositions relatives à la définition et à la classification des différents types de déchets, et la mise en œuvre d'un PGD.

Sont concernées par les dispositions de cet arrêté « les installations composées d'une digue ou d'une structure de retenue, de confinement ou de toute autre structure utile, les terrils, les haldes et les bassins, les verses, l'ensemble des stockages de stériles et, plus généralement, de déchets d'extraction, ainsi que les trous d'excavation dans lesquels les déchets sont replacés, après l'extraction du minéral, à des fins de remise en état et de construction » (article 1).

L'Arrêté stipule à l'article 5 que dans le PGD soit établie, entre autres – en lien avec la présente thématique –, « une description des mesures techniques … et des mesures d'organisation et de gestion pertinentes propres à réduire la probabilité et les effets des phénomènes dangereux … et à agir sur leur cinétique », « une étude de l'état du terrain susceptible de subir des dommages dus à l'installation de gestion des déchets », les procédures de contrôle et de surveillance tout au long de la vie de l'installation et après fermeture/remise en état.

L'Arrêté définit dans son annexe VII une catégorie A d'installation de gestion des déchets, dont les effets à court ou long termes liés à une défaillance (perte d'intégrité structurelle, défaillance de fonctionnement ou d'exploitation) peuvent entraîner *a/ des conséquences graves sur les personnes physiques b/ des dommages graves sur la santé humaine et l'environnement.* Trois critères de classement sont retenus par l'Arrêté : *le niveau de risque de perte d'intégrité des installations de stockage, la quantité de déchets dangereux présente dans les stockages, la quantité de substances et préparations dangereuses présente dans les bassins de résidus.*

A l'article 7, l'exploitant doit, dans le cadre d'une installation de catégorie A, définir une politique de prévention des risques majeurs, et les moyens dédiés à sa gestion et présenter une synthèse du système de gestion de la sécurité qu'il compte appliquer, annexée au PGD.

⁵ N'entrent pas dans le champ d'application de cette rubrique les installations de stockage de déchets d'extraction inertes ou de terres non polluées provenant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minières ou de carrières, ces installations étant gérées par connexité via le code minier pour les mines, ou encadrées par la réglementation de la rubrique 2510 pour les stockages de déchets inertes et de terres non polluées issus de l'exploitation des carrières

Le plan d'opération interne stipulé à l'article 9 est la transcription du plan d'urgence interne de la directive européenne. Il est annexé au PGD et mis à jour à chaque révision de ce dernier.

L'annexe VI de l'arrêté détaille les moyens et objectifs du système de gestion de la sécurité.

L'annexe VII, dans le point 3 relatif à l'évaluation du risque de perte d'intégrité des installations de stockage, stipule que, en cas de perte d'intégrité des bassins de résidus, « *les vies humaines sont considérées comme menacées lorsque les niveaux des eaux ou des boues se situent à soixante-dix centimètres au moins au-dessus du sol ou lorsque la vitesse des eaux ou des boues dépasse 50 centimètres/seconde* ».

Le **décret n° 2010-1394 du 12 novembre 2010** relatif aux prescriptions applicables à certaines exploitations de mines et aux installations de gestion de **déchets inertes** et **des terres non polluées** résultant de leur fonctionnement fixe les prescriptions techniques minimales que doivent respecter les industries extractives, afin de limiter l'impact de leurs déchets sur l'environnement et respecter les exigences de la directive 2006-21 du 15 mars 2006.

4 Les différentes typologies de barrages de résidus miniers

4.1 Géométrie et modes d'édification

Le mode d'édification des barrages de résidus miniers est grandement tributaire des contraintes topographiques du site d'extraction ou de process de traitement minier. Il existe ainsi plusieurs configurations (ICOLD⁶, [41]) :

- en travers de vallée. La plupart des barrages importants s'inscrivent dans cette configuration
- à flanc de coteau ;
- en sommet de coteau (le barrage n'est pas présent sur tout le pourtour) ;
- au sommet en empilement (le barrage est présent sur tout le pourtour).



Figure 3 : Les différentes configurations ou dispositions de barrages (ICOLD, [41])

⁶ International Commission On Large Dams, également dénommée en français « Commission Internationale des grands Barrages » (CIGB)



Figure 4 : Les principales dispositions de barrages. La disposition en vallée est la plus largement répandue

Les principales méthodes d'édification et de surélévation sont au nombre de quatre : la méthode amont, la méthode aval, la méthode centrale et la méthode conventionnelle.

Pour les trois premières méthodes, les résidus miniers peuvent être réutilisés pour une partie de l'ouvrage. Les matériaux sont alors traités par cyclonage, permettant de séparer la fraction sableuse, utilisée pour l'édification des barrages, et les boues, déversées dans la retenue (ICOLD, [42]).

La *méthode amont* est de loin la plus employée. Elle consiste tout d'abord en l'édification d'un remblai basal d'amorce, de faible hauteur. Puis les résidus miniers sont déversés soit par « spigotage » (percolation progressive des résidus à partir d'orifices percés dans la partie inférieure des tuyaux d'adduction), soit à partir de la crête du remblai d'amorce ou des remblais de surélévation. Pendant l'exploitation le barrage est surélevé au moyen de matériaux pris à proximité dans les résidus (lorsque leur fraction sableuse est importante) et/ou les stériles et reposant sur la surface des résidus de la couche inférieure, et ce cycle est ainsi répété, les remblais et l'axe de l'ouvrage se déplaçant ainsi vers l'amont (ICOLD, [42], Spence, [95]).



Figure 5 : Coupe schématique d'un ouvrage de rétention industriel construit selon la méthode amont, avec plage de déversement (d'après Vick, [100]).

Avant les années 1980, pratiquement tous les barrages de résidus miniers ont été construits selon cette méthode (ICOLD, [42]). En prenant l'exemple de la Chine, où l'on dénombre plus de 12 000 barrages de résidus miniers, 95 % d'entre eux sont construits selon cette méthode (Yin et al., [109]). Ces barrages sont en effet les plus économiques, dans la mesure où l'on réutilise les résidus pour les édifier, où les apports d'autres matériaux (roche locale ou importée, remblais, stériles miniers, ...) sont limités, et où les volumes nécessaires à la surélévation sont faibles. Par ailleurs, ils permettent une fonctionnalité rapide, car dès la constitution du remblai d'amorce les résidus peuvent être déversés à côté.

De tels barrages ont été utilisés avec succès sous les climats secs et arides où une quantité d'eau minimale est stockée dans la retenue. Ces méthodes ont été également utilisées avec succès lorsqu'un spigotage soigné combiné avec un drainage efficace étaient opérés dans des climats plus humides (ICOLD, [42]).

Les retours d'expérience montrent que la stabilité de ce type de barrage est inversement proportionnelle à sa hauteur (ICOLD, [41]), En effet plus celle-ci augmente, plus les zones de faiblesse potentielle peuvent apparaître (Jeyapalan et al., [56]).

Cette méthode est également la plus sujette aux ruptures liées à la surélévation et au manque de drainage de la nappe à l'intérieur des résidus, ou liées à une perméabilité trop importante des digues pouvant engendrer des ruptures des barrages de faible compacité, ou encore liées à la liquéfaction des matériaux saturés (ICOLD, [42]). Il est recommandé de ne pas édifier ce type de barrage à des vitesses supérieures à 5-10 m par an pour laisser le temps aux pressions interstitielles de se dissiper (Spence, [95]).

Enfin cette méthode n'est pas recommandée en région sismique, et est d'ailleurs interdite au Chili et au Pérou depuis les années 1990, (in Agurto-Detzel et al., [1]).

La *méthode* dite « *semi-aérienne* » est une variable de la méthode amont, la mise en place des stériles s'opérant par minces couches (10 à 15 cm, in Ginige, [36]) et par spigotage (ICOLD, [42]).

La *méthode aval*, consiste en l'édification d'un barrage dans la direction aval depuis le remblai d'amorce. Le barrage est donc construit sur des matériaux soigneusement préparés et compactés, par comparaison avec la méthode amont où le barrage s'établit progressivement sur les résidus. La réalisation de noyaux imperméables et de systèmes de drainage permet de maîtriser davantage le niveau de la nappe dans l'ouvrage (Spence, [95]). C'est une des méthodes les plus utilisées dans les zones à risque sismique élevé (ICOLD, [42]).

L'inconvénient est principalement d'ordre économique, puisqu'on utilise des volumes de matériau beaucoup plus importants pour édifier le barrage. Caldwell et Smith, 1985, ont calculé que le coût était 9 à 16 fois supérieur à la méthode amont (in Halmann et al., [37]).

La *méthode centrale* ou de l'axe central consiste à édifier un remblai d'amorce et à élever l'ouvrage selon un axe vertical, le remblai étant déversé à la fois en amont et à l'extérieur (ICOLD, [41]) – variante 1 de la Figure 6, ou davantage à l'extérieur pour utiliser moins de matériau (Spence, [95]) – variante 2 de la Figure 6. Cette dernière méthode est un compromis des deux méthodes précédentes, entre la maîtrise de la stabilité et de la teneur en eau, et le volume de matériau à mettre en œuvre.

La *méthode conventionnelle* consiste à ne pas utiliser des résidus, mais de mettre en place des matériaux d'emprunt, ou des stériles, de meilleure qualité géomécanique. Cette méthode est parfois utilisée lorsque les résidus sont très fins et que leur cadence de montée n'est pas compatible avec les trois méthodes d'édification précédentes. Le barrage peut dans ce cas être édifié à l'avance sur toute la hauteur voulue (ICOLD, [41]).

Quelles que soient les méthodes retenues, il est construit un remblai dit d'amorce, point de départ pour la construction du barrage définitif. Ce remblai d'amorce peut être étanche si on emploie la méthode amont, ou au contraire drainant si on emploie la méthode aval.

4.2 Autres classifications

De nombreuses classifications existent, notamment selon l'emmagasinement (volume d'effluent retenu) ou la hauteur du barrage.

 Tableau 1 : Classement selon l'envergure du barrage, de l'US Army Corps of Engineers, extrait de ICOLD, [41]. Les valeurs sont transformées et arrondies dans le système métrique

Dénomination	Capacité du bassin (m ³)	Hauteur (m)		
Petit	Entre 60 000 et 1, 2 M	Entre 7 et 12 m		
Moyen	Entre 1, 2 M et 62 M	Entre 12 et 30 m		
Grand	Supérieur à 62 M	Supérieure à 30 m		

Au sujet de la hauteur de l'édifice, Mei, [75], recense en Chine 26 barrages de hauteur supérieure à 100 m et 10 ouvrages de capacité de rétention supérieure à 100 millions de mètres cubes. Toujours en Chine, 80 % des dépôts concernent des barrages de moins de 30 m de haut (Mei [75], Ju et al., [60]).

Il existe également des classements relatifs au danger potentiel (pertes de vies et économiques, selon l'US Army Corps of Engineers (ICOLD, [41]).



Figure 6 : Les différentes méthodes d'élévation des barrages miniers

4.3 Nature et caractéristiques des matériaux constitutifs des barrages et des résidus miniers

Les **barrages** sont pour la plupart constitués de stériles miniers, la composition de ces derniers variant selon la substance extraite et sa gîtologie. Par exemple les stériles des mines de charbon ont une composante de schistes et grès silteux, les mines polymétalliques ont des matériaux riches en sulfures, les matériaux des mines d'or dépendent du mode d'extraction (alluvionnaire ou dans la masse rocheuse) mais peuvent également être riches en sulfures (ICOLD, [41]).

Les matériaux utilisés ont, de par leur fonction de stabilité intrinsèque et de rétention des effluents des barrages, une granulométrie étalée, allant des argiles et silts jusque, parfois, aux pierres voire aux blocs. D'une manière générale, les conditions de dépôt par couches conduisent à ce que la perméabilité horizontale soit dix à cent fois plus grande que la perméabilité verticale. L'angle de frottement des matériaux constitutifs des dépôts de stériles varie selon la nature de l'ouvrage : entre 22° et 32° pour les mines de charbon, entre 30° et 36° pour les autres exploitations (ICOLD, [41]).

Nous avons vu au chapitre 4.1 que les barrages peuvent être constitués pour partie de résidus miniers (notamment leur fraction sableuse).

Les **résidus miniers** retenus par les barrages sont d'une manière générale à dominante sablosilteuse, mis en place, généralement sous forme de boue, par méthode hydraulique gravitaire ou forcée de type hydro-cyclonage⁷ (Lucia et al., [66]). Les boues sont déchargées dans la zone de stockage, où les particules solides se déposent en suspension, et le fluide est pour sa part acheminé dans un bassin de stockage, où il est généralement renvoyé à l'usine de traitement (Ginige, [36]). Les particules sont angulaires et allongées, du fait des différents process, notamment celui lié au broyage de la roche (Spence, [95], Kossoff et al., [61]).

La taille des grains est très variable, mais on peut noter la prédominance de sables, puis de silts, au détriment des éléments plus grossiers (graviers) ou fins (argiles) (Sarsby, [125], cité dans Kossoff et al., [61]).

Selon les conditions de sédimentation de ces résidus miniers, il peut y avoir, ou non, une ségrégation par la taille des grains, les plus lourds d'entre eux se déposant plus vite, et donc plus en amont, que les plus fins.

Au sein des résidus, on constate une augmentation du poids volumique avec la profondeur, en raison de la compaction, la perte d'eau et la diagenèse chimique des matériaux (Sarsby, 2000 [125], cité dans Kossoff et al. [61]).

Category	General character				
Soft—rock tailings					
Fine coal refuse Trona insols Potash	Contain both sand and slime fractions, but slimes may dominate overall properties because of presence of clay.				
Hard—rock tailings					
Lead—zinc Copper Gold—silver Molybdenum Nickel (sulphide)	May contain both sand and slime fractions, but slimes are usually of low plasticity to nonplastic. Sands usually control overall properties for engineering purposes.				
Fine tailings					
Phosphatic clays Bauxite red muds Fine taconite tailings Slimes from tar sands tailings	Sand fraction generally small or absent. Behaviour of material, particularly sedimentation—consolidation characteristics, dominated by silt or clay sized particles and may pose disposal volume problems.				
Coarse tailings					
Tar sands tailings Uranium tailings Gypsum tailings Coarse taconite tailings Phosphate sand	Contain either principally sands or nonplastic silt sized particles exhibiting sand—like behaviour and generally favourable engineering characteristics.				

Tableau 2 : Principales caractéristiques des résidus selon leur provenance (Vick, 1983, in Spence, [95]).

⁷ Procédé qui emploie la force centrifuge pour séparer les particules plus lourdes que l'eau



Figure 7 : fuseau granulométrique des résidus miniers (Hallman et al., [37])

Ozcan et al, [81], présentent le fuseau granulométrique des résidus de la mine de cuivre-zinc de Lahanos en Turquie, et le comparent à des fuseaux d'autres mines.



Figure 8 : Comparaison de fuseaux granulométriques des résidus de la mine de Lahanos (en rouge) et d'autres mines (Ozcan et al., [81] et CANMET, [114])

Les résidus des mines de phosphate sont connus pour contenir une fraction argileuse beaucoup plus importante, voire majoritaire vis-à-vis de la composante silto-sableuse (Lucia et al., [66]).

Le Tableau 3 regroupe les caractéristiques des résidus relevées dans la littérature consultée, d'une manière générale et par substance exploitée.

4.4 Phase de vie

L'ICOLD (1989, [42]) suggère trois périodes successives distinctes :

- la phase d'exploitation, où l'exploitant assure la sécurité de l'édifice et satisfait aux exigences requises par les autorités de contrôle ;
- la phase dite « de restructuration », après exploitation, selon des procédures et travaux de facilitation soumis à l'approbation des autorités de contrôle. Durant cette phase, les caractéristiques des matériaux, résidus et effluents associés évoluent, atteignant une certaine condition d'équilibre mécanique, voire physico-chimique ;
- la phase à long terme, dépendant de la durée des réactions chimiques dans la masse des stériles et dans les effluents. Cette durée peut être très importante, dans certains cas plusieurs centaines d'années.

Tableau 3 : Eléments de caractérisation des résidus miniers, issus de la littérature compulsée

Mines	Granulométrie	Poids volumique sec (kN/ m ³⁾	Indice de vide	Degré de saturation (%)	Plasticité : limites d'Atterberg	Compressibilité	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement (°)	Perméabilité (m/s)
Général [37]	Voir Figure 7		0,6-1,0 1,0-1,6 pour les matériaux très fins de certaines mines						1. 10 ⁻⁵ pour les matériaux silto-sableux
Général [75]		19 pour les sables grossiers, 20 pour les sables fins, 19,5 pour les sables silteux, 14,6 pour les matériaux argileux					11 pour les sables grossiers, 9,8 pour les sables fins, 10,8 pour les sables silteux, 13,7 pour les matériaux argileux	32 pour les sables grossiers, 29 pour les sables fins, 28 pour les sables silteux, 26 pour les matériaux argileux	Perméabilité verticale : 6,4. 10 ³ pour les sables grossiers, 4,2. 10 ⁻³ pour les sables fins, 9,5. 10 ⁻⁴ pour les sables silteux, 1,6. 10 ⁻⁵ pour les matériaux argileux
Cuivre, Chili [103]		17,5-20,1 (moyennes)							
Cuivre, Chine [109]	D20 : 0,018-D80 : 0,125	19-20			W _P [13,8-15,7], W _L [21,3- 23,6], I _p [7,5-7,9]		6,5-11	28-31	Perméabilité verticale : 1,26. 10 ⁴ pour les sables grossiers, 3,3. 10 ⁻⁶ pour les matériaux les plus fins
Cuivre, plomb, zinc, Grèce [65]	39 à 60 % de sable, 31 à 53 % de silt, 8 à 9 % d'argile	17-17,7				Indice de compression [0,032-0,080] Indice de vide initial [0,522-0,57]	72-90	28-31	
Cuivre-zinc, Turquie [81]	D20 : 0,004 -D80 : 0,03				W _P [9,3-10,3], W _L [12,3- 14,6], I _P [2,9-4,3]		5	35	
Fluorine, France [14]	Fraction importante [0,1- 0,4 mm] CU = 5	15-18,1						32-37	1. 10 ⁻⁶ - 1. 10 ⁻⁵
Graphite, Chine [39]		15,9-17,0	0,71-1,87				0,3-5,1	7 (boues silteuses) -35	
Or, Chine		13,9-19,5	0,57-1,16				0	31,8	9. 10 ⁻⁶
Or, France [14]	90% < 0,21 mm, 70% < 0,1 mm								
Or, Zimbabwe [93]		13-16	0.63-1,05						
Phosphore, Chine [70] : caractéristiques du phosphogypse		16					0,3	30	5,6. 10 ^{.6}
Plomb zinc, France [14], données de trois sites	67% < 0,04 mm, 84% < 0,08 mm 38% < 0,04 mm, D50 = 0,08 mm	14,5							1. 10 ⁻⁶ - 1. 10 ⁻⁵
Plomb zinc, Italie [76]		16,9-18,4	0,61-1,09	86-100	W _p [13,9-17,3], W _L [17,2- 25,2], I _p [2,1-8,0]	Indice de compression [0,058-0,225] Coefficient de consolidation [3,2 10 ⁻² - 6,9 10- ³]cm ² /s	5-28	33-37	
Tungstène, France [14]		16,4-21,3						40-45	
Zinc, France [14]		15,4						34-37	1. 10 ⁻⁶

5 Retour d'expérience sur les ruptures de barrages de résidus miniers et leurs conséquences

5.1 Quelques statistiques sur les désordres des barrages hydrauliques dits « en remblai »

Il existe dans le monde une multitude de barrages hydrauliques dits « en remblai », c'est-à-dire constitués de matériaux meubles, pouvant être fins à très grossiers (enrochements). Cette famille d'ouvrages regroupe plusieurs catégories selon leur fonction, le type de matériau utilisé et la méthode employée pour assurer l'étanchéité (barrages homogènes, à noyau imperméable, à paroi centrale étanche, à masque amont, ...).

Les barrages de résidus miniers étant également constitués de matériaux meubles (c'est-à-dire constitués de résidus et stériles miniers et/ou de matériaux d'emprunts locaux), il est intéressant d'acquérir quelques éléments statistiques sur les désordres constatés ou enregistrés sur cette typologie d'ouvrage.

Davies, 2001 [24], indique que dans les trente dernières années, deux à cinq ruptures « majeures » par an sont recensées sur les barrages en remblai. En relation avec le nombre de barrages recensés à cette époque, cela conduit à une probabilité statistique de rupture de 1/1750 à 1/700, que l'on peut comparer à la probabilité de 1/10000 des barrages dits conventionnels.

L'ICOLD a établi des statistiques dans son rapport de 1983 [52]. A partir de 107 cas de rupture identifiés, les éléments suivants en sont extraits :

- 77% des ruptures de barrage affectent des ouvrages en remblai ;
- 89 % des ruptures de barrage en remblai se rapportent à des ouvrages en terre, 11% aux ouvrages en enrochement ;
- 33% des désordres de barrage en remblai sont liés au corps de l'ouvrage, 9% à sa fondation, 11% à la fois à la fondation et au corps. 47% des désordres sont liés aux ouvrages connexes.

Les quatre causes les plus fréquentes des ruptures des barrages dits « en remblai » (plusieurs causes pouvant être évoquées pour une rupture), liées à une défaillance du corps et/ou de la fondation, sont, par ordre de décroissance, l'érosion interne, la percolation, les mouvements différentiels et la défaillance des liaisons remblais/ouvrages.

Le pourcentage le plus élevé de rupture est recueilli pour des ouvrages dont la hauteur varie entre 15 m et 30 m (Figure 9). Par ailleurs, ces ruptures s'observent pour la plupart pendant la phase de remplissage et après cinq années de vie (Figure 10).



Figure 9 : Répartition en pourcentages des cas de détérioration et de rupture affectant la fondation et/ou le corps du barrage en fonction de la hauteur de l'ouvrage (d'après ICOLD, [52])



Figure 10 : Répartition en pourcentages des cas de détérioration et de rupture affectant la fondation et/ou le corps du barrage en fonction de la période de vie de l'ouvrage (d'après ICOLD, [52])

L'United States Department of the Interior Geological Survey, en 1985 (Costa, [23]), fait état, pour les ruptures de barrage en remblai, de causes liées à l'érosion interne pour 38% des cas, de débordement pour 35%, et de problèmes de fondation pour 21 % des cas. Ces derniers désordres apparaissent moins de dix ans après la construction du barrage, les autres causes s'étalant davantage dans le temps. Durant la période 1963-1983, aux Etats-Unis, les barrages de moins de 15 m de haut ont concentré 90% des sinistres, lié en partie, selon l'auteur, à l'absence de dispositif de surveillance et d'alarme.



Figure 11 : Pourcentage de rupture des barrages en fonction de leur âge et des principales causes. Le graphique du bas représente les barrages en remblai (ICOLD, 1973, in Costa [23])

5.2 Cas des barrages de résidus miniers : quelques éléments statistiques

5.2.1 Bases de données consultées et constituées

En premier lieu, nous précisons la terminologie employée par la suite : les *incidents* de barrage regroupent les *ruptures* et les *accidents* (mouvements et/ou dysfonctionnements importants relevés, sans qu'il y ait rupture de l'ouvrage).

A la date de 2007, une base de données dans le cadre d'un projet européen (*e-EcoRisk database – A Regional Enterprise Network Decision – Support System for Environmental Risk and Disaster Management of Large-Scale Industrial Spills*) incluant notamment les ruptures de barrages de résidus miniers recensait 250 cas, avec pour beaucoup d'entre eux peu d'informations [86].

A la fin de l'année 2009, il est recensé 218 cas de rupture de barrages de résidus miniers depuis le début du vingtième siècle, dont 147 cas qui possèdent suffisamment d'informations pour permettre une analyse (Azam et Li, [9]).

Le site internet <u>https://worldminetailingsfailures.org/</u>, (WMTF) établi par le Center for Science in Public Participation (CSP2), recense les ruptures depuis 1915. Il est régulièrement mis à jour (dernière mise à jour en date de mars 2019 lors de la rédaction de ce rapport). Le cœur de la base de données correspond aux travaux de l'ICOLD/UNEP⁸, publiés en 2001 dans son bulletin n°121 [43]. Elle est complétée par les données acquises par le site WISE ⁹, et par les données propres au CSP2. Cette base de données est très importante quantitativement et qualitativement, et elle a permis à cet organisme d'établir notamment des critères de gravité sur lesquels nous reviendrons ci-après.

L'Ineris a pour sa part élaboré un tableau des principaux accidents connus, basé sur celui du site WISE, auquel ont été rajoutées des données des documents et des sites internet consultés dans le cadre du présent rapport. Ce tableau consultable à l'annexe 1 est bâti selon les rubriques de la Figure 12.

Nom de l'accident 🚽	Continent	Ŧ	Pays, Région	Ŧ	Année 🖕	, †	Substance	Ŧ	Caractéristiques barrage	Ŧ	Caractéristiques dépôts	Ŧ	Caractéristiques aval	¥
Caractéristiques désordr	e r	- 0	Causes principales évoquées	Ŧ	Conséque	ience	s	•	Commentaires	Sou	rces consultées	Ŧ	Détails sur internet	¥

Figure 12 : Rubriques du tableau des principaux accidents élaboré par l'Ineris (annexe 1)

5.2.2 Répartition temporelle

Sur ces 218 cas de rupture de barrages recensés à la fin de l'année 2009, une majorité très nette se distingue durant les années 1960 (22 % des ruptures), 1970 (26%) et 1980 (23%). Ce pic est en lien avec la demande de métaux à la suite de la Deuxième Guerre Mondiale, mais également avec l'essor de l'exploitation minière des pays émergents. Les décennies 1990 (19 cas, 9%), et 2000 (20 cas, 9%) sont relativement similaires, traduisant une diminution du nombre de cas assez nette, en relation avec la mise en place de politiques de prévention et de sécurisation. En revanche il n'est pas noté une poursuite de la baisse sur les deux dernières décennies (Azam, Li [9]). Le tableau des principales ruptures de l'annexe 1 dénombre en effet 34 cas entre 2010 et juillet 2020.

5.2.3 Répartition géographique

En se basant également sur cet échantillon de 218 cas, la majeure partie des ruptures provient de l'Amérique du Nord (38 %), de l'Europe (27 %) et de l'Amérique du Sud (18 %). On notera que sur les 20 cas de la décennie de l'année 2000, 6 proviennent d'Europe et 6 d'Asie (Azam, Li [9]).

Le tableau des accidents de l'annexe 1 dénombre, entre 2010 et juillet 2020, 17 cas en Amérique (dont 6 au Brésil), 12cas en Asie, 3 cas en Europe (dont celui d'Echassières en France, abordé au chapitre 6.1), 1 cas en Afrique et 1 cas en Océanie (Australie).

Rico et al. [88] avaient par ailleurs établi en 2007 que, sur 147 cas suffisamment renseignés, 50 (34%) étaient relatifs à des pays ne disposant pas de polices ou lois environnementales contraignantes au sujet de la prévention des risques miniers.

⁸ United Nations Environment Program

⁹ World Information Service on Energy Uranium Project, <u>https://www.wise-uranium.org/</u>, [104]



Figure 13 : Nombre de ruptures de barrages de résidus miniers par décennies (Azam, Li [9])



Figure 14 : Nombre de ruptures de barrages de résidus miniers par continent – sous-continent (d'après Azam, Li [9])

5.2.4 Répartition selon le stade de vie du barrage

Selon Rico et al. [88], 83 % des ruptures concernent des ouvrages actifs lors de la rupture (en phase d'exploitation selon la terminologie de l'ICOLD, [42]), et 15 % des cas concernent des ouvrages dits inactifs (qui ne sont plus en phase d'exploitation et ne sont pas surveillés par l'exploitant) ou des ouvrages abandonnés (en phases de restructuration ou de long terme selon la terminologie de l'ICOLD, [42]). Les causes de cette dernière catégorie sont méconnues selon les auteurs.

En 2001, l'ICOLD [43] indique également que peu d'incidents de barrages (environ 25 cas recensés) s'opèrent durant leur stade dit « inactif » (après leur remplissage complet, ou lorsque l'activité générant des résidus s'arrête).

5.2.5 Répartition selon la hauteur du barrage

Rico et al. établissent une répartition des cas de rupture selon la hauteur du barrage, présentée dans le Tableau 4 [88]. On constate que la majorité des cas concerne des hauteurs de barrage inférieures à 15 m.

Tableau 4 : Répartition des cas de rupture de barrages de résidus miniers selon la hauteur du
barrage, dans le monde et en Europe (d'après Rico et al. [88])

Hauteur de barrage	Pourcentage de cas de rupture (monde)	Pourcentage de cas de rupture (Europe)
Inférieure à 15 m	44 %	52 %
15-30 m	33 %	42 %
Supérieure à 30 m	23 %	2 cas

L'ICOLD, 2001 [43], indique que près de 63% des cas de rupture correspondent à une hauteur de barrage inférieure à 20m.



Figure 15 : Comparaison du nombre de cas de rupture de barrages et de leur hauteur (d'après ICOLD, [43])

5.2.6 Répartition selon la méthode d'édification

Davies et al., 2000 [25] établissent un bilan des ruptures et montrent que **67% des cas (58 cas en 2000) concernent les barrages construits par la méthode amont**. Mais ces auteurs indiquent que ce sont par ailleurs les plus nombreux (environ 50% des 3500 barrages connus).

L'ICOLD, en 2001 [43], illustre par ailleurs la part des accidents et des ruptures pour chaque méthode d'édification, incluant les barrages de rétention d'eau, traduisant, toutes choses égales par ailleurs, une moindre maîtrise de l'édifice pour les barrages édifiés selon la méthode amont.



Figure 16 : Comparaison du nombre de cas d'incidents de barrages et de leur méthode d'édification (d'après ICOLD, [43])

Cette proportion est encore plus marquée en 2007 (Rico et al. [88]) après examen de 147 cas de rupture, puisque **76 % d'entre eux concernent des barrages édifiés selon la méthode amont**. Cette proportion est plus réduite pour les cas européens (47%).

5.2.7 Répartition selon les causes

Rapportés dans Davies et al., 2000 [25], les cas de rupture pour les barrages amont sont liés à la pente (34%) et à la sismicité (24%). Les autres cas sont répartis entre problèmes de fondation, débordement, percolation ou problèmes structuraux. Tous les cas de liquéfaction des matériaux concernent les barrages construits selon la méthode amont.

La cause principale de rupture des barrages non édifiés par la méthode amont est liée à des problèmes d'infiltration et notamment au mauvais dimensionnement des systèmes de drainage. Pour ces barrages, la cause sismique est beaucoup moins prégnante (Davies et al. [25]).

Rico et al [88] ont établis, sur la base des 147 cas de rupture identifiés, onze principales causes tant externes qu'internes. Il apparaît que 39 % d'entre eux ont des causes multiples. En se rapportant à la cause unique ou celle qui est jugée prépondérante dans le cas de causes multiples :

- 25% des cas mondiaux ont pour cause une pluviométrie anormale/exceptionnelle ;
- 14% des cas sont liés à une liquéfaction d'origine sismique (aucun cas de ce type n'est recensé en Europe);
- 18% des cas sont liés à des problèmes d'érosion interne, d'infiltration, de débordement ou de stabilité de talus. On notera que, puisqu'il n'est retenu qu'une cause prépondérante dans ces statistiques, ces facteurs internes peuvent être sous-estimés, car masqués par la cause externe initiale que constitue la forte pluviométrie ;
- 10 % des cas sont liés à une gestion humaine du site (rétention, drainage, élévation, surcharges, ...) insuffisante ou inadéquate ;
- 9% des cas sont liés à un problème d'ordre structurel, et 6% sont liés à un problème de fondation du barrage ;
- 15 % des cas ont une cause inconnue.

Davies et al., 2000 [25], indiquent que, pour les barrages dits « inactifs » (dont on pourrait supposer qu'ils regroupent également les ouvrages inactifs non surveillés par l'exploitant et les ouvrages abandonnés, ou, selon la dénomination de l'ICOLD [42], les ouvrages en phase de restructuration ou de long terme), le mode de rupture principal est dû, pour 50% des cas, au débordement. L'ICOLD [43] indique pour sa part que, pour les barrages inactifs, les principales causes d'incidents sont le débordement et la sismicité.

L'ICOLD [43] a croisé les principales causes d'incidents selon une classification quelque peu différente, brute (la cause météorique potentielle n'apparaît pas explicitement). On note que les causes de rupture principales sont le débordement, l'instabilité de pente et les séismes. On remarque également que les débordements et les séismes génèrent des incidents conduisant bien davantage à la rupture de l'édifice qu'aux accidents sans rupture.



Figure 17 : Comparaison du nombre de cas d'incidents (ruptures, accidents) de barrages et de la cause (d'après ICOLD, [43])

On retrouve cette part prépondérante des débordements, instabilités de pente et séismes dans la représentation de l'UNEP, 2017 [98] de la Figure 18, pour la période 1915-2016.



Figure 18 : Représentation du nombre de cas de ruptures de barrages au regard de la cause détaillée (Chambers, 2017, ICOLD, 2001 [43], in UNEP, 2017 [98])

Ma et al., 2012 [70], indiquent que selon des enquêtes en Chine et dans les autres pays, 40 % des cas de rupture sont en lien avec des problèmes d'infiltration.

Villavicencio et al., 2016 [103], indiquent, pour le Chili où 449 dépôts de résidus sont recensés, que la liquéfaction ayant pour origine un séisme est la cause de rupture pour 50 % des cas, sur des barrages construits selon la méthode amont et de hauteur allant de 5 m à 35 m.

5.2.8 Répartition selon les conséquences

En termes de **volume mobilisé**, Azam et Li, en 2010 [9], indiquent, sur un échantillon de 167 cas de rupture que, parmi les 72 cas renseignés sur le volume mobilisé, 70 % d'entre eux concernent un volume inférieur à 500 000 m³. 24 % des ruptures ont mobilisé plus de 1 million de mètres cubes. Une valeur de 1/5^{ème} du volume contenu qui est mobilisé est avancée, mais non étayée, dans cet article.

En termes de *pente finale* des effluents à l'équilibre après l'événement de rupture, les retours de cas indiquent que les pentes finales n'excèdent pas 5° (Lucia et al, 1981 [66]).

En termes de *gravité*, un codage selon quatre niveaux a été créé par WMTF [105], numérotés de 1 («très grave») à 4 («défaillance potentielle», ce qui signifie une condition observée qui, si elle n'est pas surveillée, pourrait évoluer vers une défaillance au fil du temps). Ce codage s'appuie principalement, mais non exclusivement, sur les trois variables de gravité que sont le volume libéré, la distance parcourue et le nombre de morts. Mais il s'appuie également sur les retours d'expérience des catastrophes par la communauté scientifique. Le site WMTF indique que seulement deux des classes, «très grave» et «grave», fonctionnent bien en analyse statistique.

Sur la base du Tableau 5, on peut constater que le nombre de ruptures très graves (au total 56 cas depuis 1908) est en augmentation (5 par décennie environ depuis 1908, plus de 8 par décennie depuis 1958, plus de 10 par décennie depuis 1988).

La somme des accidents graves et très graves (au total 119 cas depuis 1908) s'inscrit dans la même augmentation (près 11 par décennie depuis 1908, plus de 18 par décennie depuis 1958, plus de 23 par décennie depuis 1988).

Si l'on ne s'en tient qu'au nombre de morts, la décennie 1958-1967 se dégage très nettement avec plus de 1000 décès. Suivent la décennie 2008-2017 avec plus de 400 décès, ainsi que les décennies 1978-1987 et 1968-1977 avec plus de 300 décès. A noter que la catastrophe de Brumadinho du 25 janvier 2019, qui a engendré 270 décès et disparus, n'est pas comptabilisée dans ce tableau.

FIG 2 TSF DAM FAILURES BY DECADE FROM 1915 As Known 08/01/2018												
	count by severity code					count by severity indicators			facility descriptors			
Decade	Very Serious Failures	Serious Failures	Minor Failures	Potential Failure Condition	All Failures potential failures	Cumulative Release	Cumulative Runout (km)	Deaths	Avg Ht m	Avg Storage (M cum)	# w ht	#w stor cap
	1	2	3	4	count	M Cub m	km	count	m	M cub m		
2008-17	13	14	16	0	43	95,8	832	435	45	40 895 903	13	11
1998-07	10	9	13	0	32	20,9	326	52	22	14 298 571	5	7
1988-97	9	15	29	5	58	56,5	116	88	29	7 526 143	33	14
1978-87	6	9	28	3	46	22,3	60	347	25	9 761 640	36	25
1968-77	5	8	14	0	27	24,2	275	317	25	2 375 000	45	11
1958-67	7	4	16	2	29	25,6	98	1 053	18	1 775 864	30	11
1948-57	1	3	0	0	4	1,7			22	0	5	0
1938-47	1	1	2	0	4	0,2			15	0	2	0
1928-37	2	0	0	0	2	12,8	11	300	61	29 200 000	1	0
1918-27*	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
1908-17	2	0	0	0	2	4,0	0	0	61	0,0	1	0
									======			======
TOTAL/AVERAGE	56	63	118	10	247	263,8	1 718	2 157	66	5 697 143	171	79
									W	ORLD MINE TAI	LNGS FAIL	URES.ORG

Tableau 5 : Tableau des ruptures par niveau de gravité tel qu'établi par WMTF [105]

113 records with no information on release runouts or deaths are not given a classicication other than locus of failure as indicated by ICOLD assigned codes * no records for 1918-1927

5.3 Zooms sur quelques cas emblématiques

5.3.1 Rupture du barrage de résidus miniers de Stava, Italie, 1985

Principales sources : base Aria [3], Davies et al. [25], Luino, De Graff [67], Pirulli et al. [83], Rico et al. [88], WISE [104]

La rupture du barrage dit « de Stava », dans la province du Trentin-Haut-Adige, s'est produite le 19 juillet 1985, au sein de la mine de Prestavel. Celle-ci a exploité le plomb et l'argent depuis le seizième siècle, puis s'est orientée vers l'extraction de la fluorine à partir de 1934 [67].

En 1961, la compagnie minière Montecatini (groupe Montedison) décide de mettre en place un système de flottation permettant de produire de la fluorine pure à 97-98%. Ceci nécessite de l'eau en abondance ainsi que la mise en place de zones de décantation et de stockage des résidus.

Deux bassins à flanc de versant furent ainsi construits, en 1962 (bassin inférieur) et 1970 (bassin supérieur). En 1980, la concession fut reprise par Prealpi Mineraria, qui réutilisa les deux bassins à partir de 1982 [67].



Photographie 1 : Les barrages de résidus miniers superposés de Stava avant rupture (<u>http://www.fiemmefassa.com</u>)

Les bassins sont ceints du côté aval par des barrages de 25 m (bassin inférieur) à 34 m (bassin supérieur) de hauteur, de pente externe allant de 1,2 H à 1,5 H / 1 V (soit de 33° à 40°), édifiés selon la méthode amont.



Figure 19 : Détail des deux bassins (1 : zone de séparation par cyclonage, 2 et 7 : dépôts de sable, 3 et 8 : dépôts de silts, 9 : drainage du bassin supérieur) (Luino, De Graff [67])

Vers midi, le 19 juillet 1985, une vague d'environ 185 000 m³ de résidus liquéfiés contenant 95 % d'eau et dont la vitesse est estimée à 60 km/h déferle dans la vallée jusqu'à la rivière Avisio, engloutissant en quelques minutes les villages de Stava et de Tesero. 269 personnes sont tuées, 62 bâtiments et 8 ponts sont détruits. L'aval est dévasté sur plus de 4 km et l'épaisseur résiduelle de boue est de 20 à 40 cm. Les dommages sont estimés à 155 millions d'euros à l'époque.



Figure 20 : Trajet de la vague de boues empruntant la vallée de l'Avisio (Luino, De Graff [67])



Photographie 2 : Clichés avant/après dans le village de Tesero (in Luino, De Graff [67])

Une commission d'experts chargée par la justice d'établir les causes de l'accident étudie et écarte les hypothèses du déclenchement par un tremblement de terre ou un tir d'explosif dans l'une des nombreuses mines de la région.

En revanche, la commission met en évidence, au niveau du bassin supérieur, un affaissement ayant entraîné le détachement de l'extrémité d'une canalisation d'eau, au niveau d'une ancienne réparation. Cette canalisation assurait l'évacuation de l'eau collectée au centre du bassin et traversait le corps de l'enceinte de rétention. Cette défaillance du système de drainage n'a donc pas permis la bonne évacuation de l'eau et a entraîné une montée en charge hydraulique dans le corps du barrage d'enceinte supérieur, conduisant à son effondrement, puis au débordement et à la rupture du barrage inférieur.

Le défaut remontait probablement à plusieurs mois avant l'accident : une brèche s'était formée sur la paroi latérale du bassin supérieur en janvier 1985, entraînant une fuite réparée en mars. Les bassins avaient été entièrement vidés en mai pour travaux de réfection et remis en service le 15 juillet, soit 4 jours avant l'accident.

La pluviosité record cette année-là (+22 % par rapport aux 66 années précédentes), ainsi que les deux jours précédant la rupture, et l'enneigement très important de l'hiver précédent ont contribué au déclenchement de l'accident. Ils n'en constituent cependant pas la cause principale, des désordres ayant déjà été observés dès janvier, avant la fonte des neiges et les plus fortes précipitations.

L'enquête révèle également des erreurs de conception : pente trop importante des barrages (pouvant atteindre 40°), sol de fondation trop marécageux pour permettre un bon drainage et une consolidation des matériaux constitutifs du barrage supérieur. Un membre de la commission d'experts déclare que l'ouvrage « a été construit à la limite de sa capacité à rester stable. Il suffisait de la moindre perturbation pour qu'il s'effondre. [...] Il est même surprenant que le barrage n'ait pas cédé plus tôt. ». Aucun contrôle de stabilité n'avait été réalisé durant les vingt années précédant la catastrophe.

Suite à l'accident, la législation italienne sur les bassins de stériles a été durcie et la mine de Prestavel a été définitivement fermée.

5.3.2 Rupture du barrage de résidus miniers de Fundao, Brésil, 2015

Principales sources : Agurto-Detzel et al. [1], base Aria [4], Fundaoinvestigation [34], Morgenstern et al. [78], Roche et al. [90], WISE [104]

L'événement le plus marquant au Brésil avant la catastrophe de Brumadinho est la rupture du barrage de Fundão, au sein de la mine de fer de Germano, exploitée par Samarco, dans la région minière du Minas Gerais. Cette rupture survient le 5 novembre 2015, libérant environ 33 millions de mètres cubes de résidus saturés d'eau, engendrant la mort de 19 personnes et causant des dégâts environnementaux considérables, la pollution s'étant propagée au-delà de 650 km du lieu de rupture. Un rapport d'un comité d'experts sur les causes de l'accident a été publié en 2016 (Morgenstern et al. [78]) dont les conclusions qui suivent sont extraites.



Photographie 3 : Le barrage de Fundao avant et après rupture (Morgenstern et al. [78])



Figure 21 : Répercussions de l'accident de la mine Germano de Samarco d'après Roche et al. [90]

Le barrage de Fundão, de 500 m de long et de 90 m de hauteur, a été conçu entre 2004 et 2007 et édifié, selon la méthode amont, en 2008 et 2009. Le bassin de résidus se prévalait d'un concept particulier, à savoir la mise en place d'une zone tampon de sable non saturée entre les barrages unitaires et les résidus mis en place.

Cependant, des difficultés ont été rencontrées lors de la conception et des adaptations de construction ont été faites, pouvant conduire à des conditions saturées dans le sable.

Des témoins ont révélé que la rupture a débuté sur l'appui gauche du barrage, où, d'une part, celui-ci avait été mis en retrait de son alignement précédent, et où, d'autre part, des boues de résidus avaient envahi en de nombreuses occasions la zone tampon sableuse évoquée auparavant. Cette présence de boues de résidus a constitué une barrière au drainage et une zone de faiblesse potentielle. La mise en retrait de ce côté du barrage devait permettre la réparation d'un conduit défectueux à la base du dépôt et la construction de drains de couverture horizontaux supplémentaires pour permettre l'élévation

ultérieure de digues. Ce changement de géométrie a entraîné une surcharge importante sur cette partie de dépôts sableux contaminés par les boues.



Figure 22 : Conception du bassin de résidus de Fundao, constitué d'une zone tampon de sable (Morgenstern et al. [78])

Les causes du déclenchement de cette rupture rapportées par les experts résultent donc de la conjugaison de plusieurs facteurs défavorables : 1) une zone tampon destinée au drainage imprégnée de résidus fins diminuant l'efficacité du drainage et occasionnant la saturation des matériaux, 2) une surcharge rapide de ces matériaux rendant les conditions de rupture et de liquéfaction possibles, 3) l'influence possible de tremblements de terre de faible magnitude (1,8 à 2,6), survenus juste avant l'effondrement. Les experts considèrent que ces événements sismiques dont les épicentres sont proches ont probablement accéléré le processus de défaillance qui était déjà bien avancé.



Figure 23 : Extrait de l'animation relative aux causes de la rupture du barrage de Fundao. En lits orange boues de résidus au sein de la zone de sable, conduisant à la montée des eaux (ligne bleue) au sein de celle-ci au fur et à mesure de l'élévation, permettant des conditions de liquéfaction du sable (tache noire) (site Fundaoinvestigation [34])

5.3.3 Rupture du barrage de résidus miniers de Brumadinho, Brésil, 2019

Principales sources : Robertson en al. [89], vale.com [99], WISE [104], WMTF [106]

Le vendredi 25 janvier 2019, le barrage 1 du complexe minier de Corrego de Feijao, à Brumadinho, dans le Minas Gerais, rompt, engendrant une coulée de boue dévastatrice de volume estimé, selon les sources médiatiques, à 12,7 millions de mètres cubes, faisant 270 morts et disparus.

Ce complexe minier exploitant le fer date de 1963 ; il est racheté par la compagnie minière Vale en 2001. Le barrage, édifié en 1976 selon la méthode amont, possède une hauteur de 87 m, une longueur de crête de 720 m. Il a été édifié selon 10 surélévations, la dernière datant de 2013.

Le barrage d'amorce, de 18 m de hauteur, a été construit à partir de minerai à grain fin à capacité de drainage importante, recouvert d'une couche de latérite de 4 m d'épaisseur sur le talus amont et de 1m d'épaisseur sur le talus aval.

La pente de l'ouvrage est de 33° en amont et 30° en aval. La pente côté aval bénéficiait d'une risberme intermédiaire de largeur 5 m. Il n'est pas mentionné l'existence de système de drainage interne.

Le volume de résidus miniers retenu est 11,7 millions de mètres cubes sur une surface de près de 25 hectares.

Le barrage aurait été conçu pour un facteur de sécurité de 1,3, valeur jugée raisonnable durant cette période d'édification.

Selon Vale [99], le barrage était inactif et ne faisait l'objet d'aucune activité opérationnelle. Un projet de déclassement de l'ouvrage était même en cours. Le barrage aurait été déclaré stable par la société TUV SUD, spécialisée dans la géotechnique, par des publications des 13 juin et 26 septembre 2018, dans le cadre des processus de révision périodique et d'inspection régulière de la sécurité des barrages. Ces deux publications attestent, toujours selon l'exploitant, de la sécurité physique et hydraulique du barrage.



Figure 24 : Vue aérienne du barrage 1 de Corrego de Feijao (in WMTF [106])

Vale signale par ailleurs que le barrage aurait été soumis à des inspections sur le terrain deux fois par semaine, toutes signalées à l'Agence Nationale des Mines (ANM). La dernière inspection enregistrée par l'ANM a été effectuée le 21 décembre 2018. Toutes les inspections n'ont détecté aucun changement dans l'état de la structure. Le barrage disposait de 94 piézomètres, dont 46 automatisés et 41 indicateurs de niveau d'eau pour surveiller son intégrité.

Toujours selon Vale, le barrage disposait d'un PAEBM (« Plan d'action d'urgence pour un barrage minier »), qui aurait défini la zone d'inondation en cas de rupture. En outre, le barrage disposait d'un système de surveillance vidéo, d'un système d'alerte par sirène, et d'un enregistrement de la population en aval. Une simulation aurait été réalisée le 16/06/2018, sous la coordination de la Défense Civile.

En décembre 2019, un panel d'experts a établi un rapport (Robertson et al. [89]) sur les circonstances de la catastrophe et la gestion du risque lié à cet ouvrage faite par Vale, dont les principaux éléments ci-après ont été extraits.

L'analyse de la défaillance a été facilitée par l'existence d'images vidéo de haute qualité, qui indiquent clairement une rupture à partir de la crête et s'étendant jusqu'à une zone juste au-dessus de risberme (correspondant au barrage d'amorce). La partie inférieure du barrage se bombe vers l'extérieur avant que la surface du barrage ne se brise.


Figure 25 : Image extraite du film de la rupture. On voit nettement la rupture de la crête du barrage et le bombement de sa partie inférieure (WMTF, [105])

La défaillance s'est étendue sur la quasi-totalité de la largeur du barrage, et l'effondrement de la structure s'est produite en moins de 10 secondes, libérant 9,7 millions de mètres cubes de matériau. Le matériau du barrage mobilisé montre un changement de comportement soudain, se transformant en liquide s'écoulant en aval à grande vitesse.



Figure 26 : Propagation de la rupture au sein du barrage (Robertson et al. [89])

La rupture initiale est relativement peu profonde et est suivie d'une série de glissements peu profonds à pentes raides dans les résidus. Sur la base de ces observations, les experts concluent que la rupture est le résultat de la liquéfaction (statique) des matériaux du barrage.

Un survol de l'ouvrage par drone sept jours auparavant ne montre, toujours selon les experts, aucun signe de défaillance. Le barrage était largement surveillé, notamment à l'aide d'inclinomètres, d'un radar au sol pour surveiller les déformations du parement, et de piézomètres. Aucune déformation ou variation significative n'a été enregistrée avant la rupture. Les analyses d'images satellitaires antérieures ont

indiqué que de petites déformations s'étaient produites sur la face du barrage dans l'année précédant la défaillance, avec une certaine accélération de la déformation pendant la saison des pluies. Dans la partie inférieure du barrage, les déformations mesurées au cours des 12 mois précédant la rupture ne dépassaient pas 30 mm. Selon les experts, de telles déformations sont compatibles avec un tassement lent et à long terme du barrage mais ne peuvent être considérées comme des signes précurseurs de défaillance.

L'association de ces facteurs a conduit, selon les experts, à la rupture de l'ouvrage :

- une pente trop raide de l'ouvrage ;
- une gestion du dépôt de résidus qui a parfois permis à l'eau des bassins de s'approcher de la crête du barrage et apporter des résidus non agrégés près de cette crête ;
- une édification des barrages supérieurs au-dessus de résidus fins de plus faibles caractéristiques ;
- un manque de drainage interne important qui a entraîné un niveau d'eau constamment élevé dans le barrage ;
- une forte teneur en fer au sein des résidus, les rendant potentiellement très fragiles en condition non drainée ;
- des précipitations régionales élevées et intenses qui ont empêché les matériaux insaturés audessus de la nappe de jouer un rôle drainant.

6 Etat des lieux en France

6.1 En France métropolitaine

En France métropolitaine, la quasi-totalité des titres miniers sont en situation de post-exploitation. La fermeture de la dernière mine de fer date de 1995 et l'ultime exploitation d'uranium a cessé en 2001. L'exploitation des Potasses d'Alsace a cessé en 2003 et la dernière taille de charbon s'est arrêtée en 2004. Les industries minières actives en France métropolitaine résultent désormais de l'extraction du sel, par mine souterraine ou par dissolution, de la bauxite, des exploitations d'hydrocarbures et des gîtes géothermiques (Ineris, Cerema, GEODERIS [48]).

A la fin des années 90, la survenue de différents phénomènes ou nuisances dans des zones d'anciennes exploitations a conduit l'état français à mettre en place des outils de gestion des conséquences de l'arrêt des activités minières dans une phase dite « d'après-mine ».

La directive européenne 2006/21/CE ([29]), par son article 20, a imposé aux Etats-membres de réaliser un inventaire des dépôts liés aux industries extractives. Dans le cadre spécifique des anciennes exploitations minières, cet inventaire sur la France métropolitaine a été établi par GEODERIS¹⁰. C'est sur la base du rapport de synthèse des résultats au niveau national (GEODERIS, 2012 [35]) que les éléments, notamment ceux relatifs aux anciens barrages miniers, sont rapportés ci-après.

Le rapport de GEODERIS distingue les dépôts de mines métalliques et ceux des mines de charbon. En termes de typologie de dépôt, le rapport distingue les dépôts, les bassins et les structures de retenue¹¹. On peut considérer que les barrages de résidus miniers s'inscrivent dans cette dernière catégorie, mais les bassins peuvent être ceints par des ouvrages d'enclôture¹² de typologie assez proche de celles des barrages.

Pour les *mines métalliques*, 380 des 2109 dépôts répertoriés sont constitués de résidus de traitement du minerai. La proportion augmente si on s'intéresse aux dépôts de plus de 100 000 m³, ainsi 53 dépôts sur les 93 recensés sont constitués de résidus de traitement. L'inventaire dénombre seulement 34 structures de retenue. 23 d'entre elles, soit près de 70 %, concernent quatre anciennes régions, le Languedoc-Roussillon, le Limousin, Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes (Tableau 6).

¹⁰ Groupement d'Intérêt Public (GIP), constitué par le ministère de la transition écologique et solidaire, le BRGM et l'INERIS, expert de l'état français (administrations centrales et services déconcentrés) en matière d'après-mine

¹¹ GEODERIS les définit comme étant des « structures construites linéaires, intervenant dans le stockage de déchets miniers (parmi ces entités se trouvent notamment l'essentiel des digues minières, au sens ICPE) ». Ces structures incluent donc les barrages de résidus miniers stricto sensu

¹² Ouvrages, généralement édifiés en remblais, délimitant sur son pourtour un bassin d'effluents miniers

GEODERIS, dans un objectif de hiérarchisation, à l'échelle nationale, des risques, classe ces structures de retenue en aléa de rupture de niveau fort pour 56% d'entre elles, et de niveau moyen pour 28% d'entre elles.

			Nomb	re d'objet	s		
Région	Dépôts	Bassins	Structures de retenue ⁷	Zones de dépôts	Enjeux	Points observés	Mesures
Alsace	69	4	0	38	92	46	15
Aquitaine	28	0	0	17	27	44	30
Auvergne	222	19	3	92	471	110	368
Basse-Normandie	3	0	1	3	10	3	0
Bourgogne	48	0	1	28	64	43	7
Bretagne	35	2	1	27	27	2	4
Centre	7	0	0	7	10	12	2
Champagne-Ardenne	2	0	0	2	2	4	1
Corse	72	4	0	26	39	145	213
Franche-Comté	26	0	0	14	33	39	0
Haute-Normandie		F	Région ne prése	entant pas	de dépôts	5	
Ile-de-France		F	Région ne prése	entant pas	de dépôts	5	
Languedoc-Roussillon	466	23	8	140	416	469	562
Limousin	51	1	5	48	46		
Lorraine	42	0	0	22	50	57	6
Midi-Pyrénées	355	19	5	145	419	572	201
Nord-Pas-de-Calais		F	Région ne prése	entant pas	de dépôts	5	
Pays-de-la- Loire	18	0	2	15	20	2	2
Picardie		F	Région ne prése	entant pas	de dépôts	5	
Poitou - Charentes	6	0	0	6	8	1	2
Provence-Alpes-Côte- D'azur	370	10	3	138	366	323	355
Rhône-Alpes	289	27	5	118	310	574	376

Tableau 6 : Répartition par région de la métropole française des dépôts des mines métalliques, suiteà l'inventaire établi par GEODERIS [35]

On retiendra notamment les sites suivants, d'après la hiérarchisation des risques établie par GEODERIS [35], selon des critères simples basés sur la caractéristique des ouvrages (dimensions, volume retenu). Il s'agissait d'identifier les structures de retenue pouvant nécessiter des études de stabilité *a posteriori* :

- en région Auvergne-Rhône-Alpes, les sites de Montmins (Allier), de Largentière (Ardèche) et de Barbecot-Roure (Puy-de-Dôme) ;
- en région Bretagne, le site de Huelgoat (Finistère) ;
- en région Nouvelle-Aquitaine, le secteur du Bourneix (Haute-Vienne) ;
- en région Occitanie, le site du Pic-de-la-Fourque (Ariège), le site de La Caunette (Aude), les sites de La Croix-de-Pallières, des Malines, de Saint-Sauveur, de Saint-Sébastien-d'Aigrefeuille (Gard), le site du Bleymard (Lozère), les sites de Noailhac et de Peyrebrune (Tarn) ;
- en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur, le site de Fontsante (Var).

Pour les *mines de charbon*, 1057 des 1274 dépôts répertoriés sont constitués de résidus de laverie, et 89 d'entre eux concernent des résidus fins de laverie (schlamms). L'inventaire dénombre seulement 14 dépôts concernés par la présence de structures de retenue. GEODERIS, toujours dans le cadre de la hiérarchisation des risques à l'échelle nationale, classe une de ces structures de retenue en aléa de rupture de niveau fort, et deux d'entre elles en aléa de niveau moyen.

Pour ce qui concerne les constats récents de rupture de barrage de résidus miniers, il n'a été distingué qu'un seul cas, celui des Montmins, sur la commune d'Echassières, dans l'Allier, survenu le 1^{er} mars 2015.

Sur cet ancien site minier, où a été extrait le tungstène jusqu'en 1962, le barrage d'un ancien bassin de décantation de résidus miniers s'est rompu, créant une brèche de 30 m de large sur 20 m de haut.

Ce bassin dit « Bellevue » fait partie d'un réseau de quatre structures de retenue de résidus, dont trois en amont et un en aval d'un même ruisseau, le Cotillon. L'intégralité du plan d'eau s'est vidée, entraînant remblais et sédiments contenant de l'arsenic et du tungstène, polluant la rivière la Bouble.



Figure 27 : Ancienne mine de Montmins, Echassières. Les quatre structures de retenue de résidus et la zone de rupture (source Somival)



Photographie 4 : Brèche survenue le 1^{er} mars 2015 dans le bassin « Bellevue » de l'ancienne mine des Montmins, commune d'Echassières, Allier (source Somival)

A la suite de l'évènement, les autres structures de retenue de résidus miniers furent vidangées afin de diminuer le risque de rupture en cascade des barrages.

Les causes qui sont attribuées à cette rupture sont une pluviométrie importante, un dimensionnement insuffisant des évacuateurs de crue, mais également la présence de terriers d'animaux fouisseurs, constatés lors d'une visite en 2013 au niveau de la zone de rupture, ayant probablement fragilisé la crête du barrage.

Une autre rupture, non relative à un barrage de résidus miniers mais à une digue d'enclôture d'un bassin industriel, mérite de s'y attarder, notamment au regard des causes évoquées. Il s'agit de la rupture

survenue le 20 mars 2004 au niveau d'une digue d'un bassin de lagunage et de décantation (bassin n°2) sur le site de l'usine de Malvési, produisant du tétrafluorure d'uranium, dans l'Aude. La rupture a engendré la création d'une brèche de 180 m de long et de 15 m de haut et la libération de la totalité du liquide retenu. 15 000 m³ d'eau de procédé et 10 000 m³ de boues riches en nitrates (ammonium, sodium, calcium) ont été mobilisés dans un champ de 10 hectares, engendrant sur cette surface un dépôt de 30 à 40 cm d'épaisseur, au pied des autres bassins 3, 5 et 6. Le canal du Tauran proche n'a pas été atteint par les effluents (base Aria [6]).

Avant accident

Après accident



Photographies des bassins B1-B2 avant et après accident (site Wise).

Photographie 5 : Digue du bassin n°2 de Malvési avant et après rupture (http://www.criirad.org/actualites/dossiers2006/comurhex/rapportcomurhex_criirad_1.pdf)

La présence de fuites latérales sur le corps de digue constitué de stériles d'une ancienne exploitation de souffre avait été observée dès 1980, donnant lieu à l'implantation d'un réseau de drains et de piézomètres.

La cause initiale de la rupture de la digue d'enclôture serait une fissuration profonde des boues de ce bassin due aux chaleurs intenses de l'été 2003. Les fortes pluies automnales qui ont suivi auraient conduit à l'infiltration des eaux du bassin dans le corps de la digue, entraînant sa saturation et l'élévation de la pression interstitielle, puis la rupture de l'ouvrage. L'exploitant avait constaté, cinq jours auparavant, l'apparition d'une fissure longitudinale de 15 m de long en crête de la digue.

6.2 En Guyane

Avec une production de 1,8 tonnes en 2014, l'extraction de l'or est la deuxième filière industrielle en Guyane française. Le minerai y est actuellement extrait majoritairement sous forme de gisements secondaires (déplacement de la concentration en minerai dans des matériaux alluvionnaires ou colluvionnaires), et parfois sous forme de gisements primaires (concentration au sein de la roche ayant subi de l'oxydation ou de l'altération, avec ou sans conservation de la structure originelle).

Au 31 décembre 2015, 39 titres miniers (concessions, permis d'exploitation et permis exclusifs de recherches) étaient valides en Guyane, dont 20% en nombre destinés à l'exploration. Une soixantaine d'autorisations d'exploitations (AEX), délivrées par le préfet, complètent le panel des extractions aurifères. Le rapport du Ministère de l'Economie et des finances, du BRGM et du réseau Mine & Société, établi en 2017 ([77]), duquel les données précédentes ont été extraites, fait état de l'existence d'une dizaine de sites d'exploration ou d'exploitation d'or primaire. Mais c'est la production alluvionnaire, au travers notamment des AEX, qui a permis la relance de l'activité dans les années 1990 et son maintien jusqu'à ce jour.

L'exploitation alluvionnaire s'opère selon le principe des « barranques », à savoir la mise en place d'excavations successives, de quelques mètres de profondeur, à proximité du lit d'une rivière, dénommée localement « crique ». Une fois que les matériaux valorisables ont été extraits, les barranques sont utilisées comme bassins de décantation et de stockage. Les stériles sont disposés sous forme de levées de terre de 3 à 4 m maximum permettant de séparer des bassins ou de se prémunir de débordements de la rivière (BRGM, 2012 [16]).



Figure 28 : Schéma de principe d'une exploitation alluvionnaire en Guyane (DEAL Guyane, in Minefi, BRGM, Mine & Société [77])

Le traitement du minerai par voie gravimétrique a été jusqu'à ce jour le seul procédé de récupération de l'or. Cette technique a été associée à l'emploi du mercure jusqu'à fin 2005.

Du fait des faibles performances de récupération de l'or dans les zones oxydées des gisements, par la simple gravimétrie centrifuge, il reste beaucoup d'or dans certains parcs à résidus, avec des teneurs pouvant varier de 2 à 20 g/t. Aussi, les nouveaux exploitants vont probablement reprendre ces anciens « stériles », pour en récupérer l'or par des procédés plus modernes et efficaces tels que la cyanuration. Dans cette optique d'amélioration du rendement de récupération, une usine de cyanuration a été autorisée en 2019 en Guyane [77].

L'ensemble de ces procédés nécessite une grande quantité d'eau, et les résidus de traitement sont stockés dans des « parcs » délimités par des barrages, les eaux claires étant récupérées et réutilisées pour le traitement.

Les résidus ont une composition inframillimétrique de sables, de silts et d'argiles. Le mode de dépôt s'effectue, selon les sites, par spigotage ou par cyclonage.

Au niveau des sorties des parcs à résidus, des ouvrages de décantation secondaire ou de stockage des eaux peuvent être composés d'un ou de plusieurs bassins successifs ; le bassin le plus en aval stockant les eaux claires permet de les réutiliser pour le traitement (BRGM [16]).

En Guyane, les barrages ou digues de ces parcs, bassins de décantation et de stockage de résidus miniers sont généralement constitués en remblais (BRGM [16]). De ce fait on peut considérer que la méthode centrale est la plus couramment employée. Les matériaux disponibles sur place étant limités, les barrages sont souvent constitués de saprolite, roche meuble provenant de l'altération chimique tropicale in situ de la roche saine, de latérite, sol ferralitique durci rougeâtre formant cuirasse, et d'alluvions. De par leurs caractéristiques, on confère généralement aux saprolites un rôle d'étanchéité, alors que les graves et graviers alluvionnaires ainsi que les latérites sont utilisés pour des ouvrages de drainage.

Un rapport du BRGM de 2012 [15] fait état d'un manque de conception sur la durée et d'un sousdimensionnement des parcs à résidus, conduisant les opérateurs miniers à des travaux réguliers de rehaussement des barrages « pas toujours bien maîtrisés ni réalisés dans les règles de l'art ».

A ce jour il existe environ une dizaine de barrages de résidus miniers en Guyane répartis sur quatre sites d'exploitation (source orale de la DEAL Guyane). Aucune rupture majeure n'a été enregistrée à ce jour.

7 Recueil des connaissances sur l'évaluation du phénomène de type coulée

Ce chapitre aborde dans un premier temps la notion d'aléa ainsi que les mouvements de terrain qui peuvent affecter les barrages miniers. Par la suite l'étude se concentre sur le phénomène de coulée, en abordant les modes de défaillance des barrages et les mécanismes de propagation des effluents mobilisés. Enfin il est abordé les approches statistiques et les modèles, issus de la littérature, permettant d'estimer ou aider à estimer l'intensité (la vitesse, la hauteur) et l'extension potentielle d'une coulée.

7.1 Rappel succinct de la notion d'aléa et des mouvements de terrains pouvant affecter un barrage de résidus miniers

L'*aléa* est un terme couramment employé en prévention des risques. Il correspond à la **probabilité** qu'un phénomène se produise sur un site, au cours d'une période de référence, en atteignant une **intensité qualifiable** ou **quantifiable**. La caractérisation d'un aléa repose classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

En matière de prévention des risques, on entend par période de référence une durée de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines d'années, pour fixer un ordre de grandeur. Il est donc nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des ouvrages.

L'*intensité* du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cela intègre une notion de grandeur des événements redoutés et de leurs potentiels effets sur les personnes et les biens.

La notion de **probabilité d'occurrence** traduit la sensibilité d'un site, d'un secteur ou d'un ouvrage à la survenue d'un phénomène. Quelle que soit la nature des événements d'origine minière redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs, expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner avec une approche probabiliste quantitative. On utilise donc une classification qualitative qui caractérise une **prédisposition** du site à être affecté par tel ou tel type de phénomène. C'est donc cette notion qui est retenue par la suite.

Les barrages de résidus miniers étant constitués dans une très grande majorité par des matériaux meubles, les phénomènes de mouvements de pente qui peuvent s'y produire sont les glissements, les mouvements superficiels et les coulées.

L'aléa de type coulée est la raison d'être du présent rapport, et sera davantage développé dans les chapitres qui suivent. Nous nous bornons ici à rappeler de manière succincte les autres types de mouvement, sur la base du guide d'évaluation des aléas miniers établi par l'Ineris [49].

Les *glissements* résultent du mouvement d'une masse de terrain le long d'une zone de rupture définie par une surface continue (dont la forme peut être circulaire, plane ou parfois complexe).

Les volumes concernés dépendent de la profondeur de la zone de rupture. Ainsi, on évoque le terme de *glissement profond* lorsque la surface de rupture se trouve à quelques dizaines de mètres de profondeur, et de *glissement superficiel* lorsque cette surface est sise à quelques mètres de profondeur.



Figure 29 : Modelés des glissements profonds, circulaire (à droite) et plan (à gauche) (www.protection-dangers-naturels.ch)

Les conséquences d'un glissement profond peuvent s'avérer importantes, celui-ci pouvant se répandre vers l'aval de la pente sous forme de cône d'épandage et être à l'origine de la dégradation des éventuels bâtis et ouvrages. Il peut également affecter d'éventuelles constructions et infrastructures sises en bordure sommitale de la pente, à proximité de la zone de départ (dénommée également « niche d'arrachement ») du glissement. Ainsi peut-on considérer que les glissements profonds ne peuvent affecter que des barrages de hauteur conséquente (plusieurs dizaines de mètres).

Les conséquences d'un glissement superficiel sont en revanche beaucoup plus limités, et ne concernent que la pente elle-même ou ses proches abords amont et aval. Ce phénomène est beaucoup plus fréquent en raison du très grand nombre de cas de pentes et versants miniers de hauteur limitée.

On regroupe dans le terme de *mouvements superficiels* des phénomènes qui ne sont pas associés à l'existence d'une surface de rupture bien définie : ce peut-être des reptations de sols ou matériaux par modification de leur comportement mécanique en présence d'eau, ou encore du ravinement d'une pente par l'eau.

 Tableau 7 : Mouvements de pente de matériaux meubles : typologies et classes d'intensité extraites

 du guide des aléas miniers de l'Ineris [49]

Classe d'intensité	Description	Paramètre et valeur seuil d'intensité
Très limitée	Reptations, ravinements	Volume de quelques m ³
Limitée	Glissements superficiels, ravinements importants	Volume de 10 à 100 m ³
	Glissements profonds	Volume de 100 à 5000 m ³
Modérée	Coulée capable de dégrader certains bâtiments et de mettre en danger la circulation	Hauteur de flux < 50 cm
ć, r	Glissements profonds majeurs	Volume > 5 000 m ³
Elevée	Coulée dévastatrice pour les personnes et les biens	Hauteur de flux > 50 cm

7.2 Définition du phénomène de type coulée

Les *coulées* sont des mouvements où le matériau de la pente est déstructuré et remobilisé du fait d'une forte présence d'eau. Il se transforme alors en un fluide visqueux (souvent dénommé « boue » ou « coulée boueuse ») qui s'écoule à une vitesse élevée (généralement entre 1 m/s et 7 m/s). Cet écoulement possède souvent un front, généralement à forte pente, composé de blocs de matériaux et de débris divers.

Dans le domaine des risques naturels en montagne on emploie souvent le terme de *lave torrentielle*. Ce terme regroupe les écoulements mêlant intimement l'eau et les matériaux de toutes tailles, de densité globale voisine de 2 (soit entre la densité d'un sol et celle d'une roche), qui les rendent capables de transporter des blocs en quasi-flottation. Les spécialistes distinguent généralement les laves torrentielles des coulées boueuses par :

- leur vitesse plus élevée ;
- leur mode de déplacement que l'on peut attribuer à l'écoulement d'un fluide. Certaines coulées peuvent en effet consister en des mouvements s'apparentant encore à la physique du solide, avec glissement et fracturation d'une masse plus ou moins compacte ;
- ou encore leur proportion de solide (au maximum 30% pour les laves torrentielles, au moins 50 % pour les coulées),

ces paramètres étant interdépendants.

Il est par ailleurs admis, de manière assez unanime, que la lave torrentielle suppose l'existence d'un chenal préexistant qu'empruntent les matériaux mobilisés.

La *coulée* étant un désordre de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents dans sa trajectoire, il n'est pas aisé d'identifier une grandeur caractéristique permettant de discriminer ses conséquences. Il a donc été retenu, dans le guide des aléas miniers de l'Ineris [49], la hauteur de

flux du fluide visqueux, la cinétique du phénomène étant élevée et non discriminante. La valeur de 50 cm a été retenue pour distinguer les classes d'intensité (élevée au-dessus de cette valeur, modérée en deçà).

7.3 Les principaux modes de défaillance d'un barrage de résidus miniers

Ces éléments sont largement repris du rapport « Document pédagogique pour l'établissement de prescriptions sur les bassins de rétention industriels » établi par l'Ineris pour le MEDDE en 2014 ([47]). Le champ de ce dernier rapport est l'ensemble des bassins de rétention industriels, mais les typologies de défaillance sont sensiblement identiques.

7.3.1 Défaillance du sol d'assise de l'ouvrage

Le sol d'assise est, avant travaux, dans un état d'équilibre qui va être perturbé par la réalisation de l'ouvrage. En effet, l'ouvrage va modifier l'état de contrainte du sol d'assise en apportant une charge supplémentaire. Cette modification peut conduire à un déséquilibre, généralement en phase de construction ou lors de la mise en exploitation (remplissage du bassin ou surélévation).

Les principales défaillances envisageables sont des ruptures par cisaillement mais aussi des déformations pouvant rendre l'ouvrage impropre à son utilisation.

Les ruptures par cisaillement s'observent de deux manières :

- glissement d'ensemble du remblai : tout le remblai glisse sur un terrain en pente par exemple ;
- poinçonnement : la charge apportée par le remblai est trop importante vis-à-vis de la capacité portante du sol en place.

Instabilité de pente des sols d'assise

Sur une pente de stabilité précaire, la mise en place d'un barrage peut provoquer un glissement (voire réactiver d'anciennes surfaces de rupture). Ce phénomène est fréquent sur les pentes argileuses recouvertes de colluvions (sol altéré sur plusieurs mètres pouvant provenir d'une altération sur place ou d'anciens glissements) ; ces sols sont souvent le siège de circulations d'eau. La translation du terrain naturel, parfois assez lente, parfois s'accélérant à l'occasion de périodes pluvieuses, provoque des fissures dans le remblai, puis sa dislocation.



Figure 30 - Rupture d'un barrage due au glissement d'une pente naturelle

Capacité portante insuffisante du sol d'assise

Lorsque le sol sur lequel repose le remblai ne possède pas une résistance mécanique suffisante, la mise en place du remblai peut provoquer soit le poinçonnement du sol en place, soit une rupture quasicirculaire (Figure 31 et Figure 32). Ces sols généralement argileux se rencontrent principalement dans le fond des vallées. De telles ruptures s'observent essentiellement dans la phase d'édification du remblai ou lors du remplissage du bassin. Après cette phase critique de construction, des tassements importants peuvent s'étaler dans le temps. Au voisinage du pied de remblai, un "fluage" horizontal du sol naturel peut provoquer des désordres sur les constructions existantes.



Figure 31 - Rupture par poinçonnement

Figure 32 - Rupture par cisaillement rotationnel

7.3.2 Défaillance du corps du barrage

Les ruptures au sein du corps du barrage peuvent aller du glissement superficiel régressif (Figure 33 - le corps du barrage diminue progressivement) au glissement de la base du corps (Figure 34). Avant les états ultimes de rupture en masse, des déformations importantes se produisent : bombements en pied de talus, fissurations, etc.

Les origines principales de ces ruptures sont :

- pour les ruptures de surface : la résistance au cisaillement du matériau trop faible pour la pente de talus choisie, le mauvais compactage des terrains lors de leur mise en place induisant une résistance au cisaillement trop faible, l'érosion, les écoulements mal drainés, une forte sensibilité au retrait du matériau de surface ;
- pour les ruptures dans la masse : la résistance au cisaillement trop faible pour la pente de talus choisie, des pressions interstitielles dues à des écoulements non pris en compte dans le dimensionnement, des pressions interstitielles dues à la mise en œuvre (par exemple : compactage d'un matériau trop humide).

Contrairement au cas précédent de rupture du sol d'assise, les désordres dans les corps de barrage peuvent se manifester bien après la construction. De plus, une action chimique à long terme de certains effluents sur les matériaux n'est pas à écarter. On peut également citer les sollicitations sismiques si le compactage du matériau est inadapté et la rupture du parement interne en cas de vidange rapide.



Figure 33 - Ruptures régressives de surface

Figure 34 - Rupture de la masse du barrage

7.3.3 Ruptures se développant dans le dépôt de résidus miniers

Les ruptures peuvent s'initier dans le dépôt de résidus miniers plutôt que dans le corps du barrage qui les retient. Dans l'exemple de la Figure 36, le remblai, constitué d'une succession de petites élévations dont chacune est stable par elle-même, peut avoir une stabilité globale insuffisante, avec une surface de rupture qui se développe principalement dans les résidus. La cause en est alors l'association d'une pente de talus donnée avec une résistance au cisaillement trop faible des résidus (ou une mise en charge de l'eau contenue dans les résidus qui provoque une diminution de la résistance au frottement).

De plus, des déformations dans les résidus miniers peuvent directement impacter le barrage. Dans l'exemple de la Figure 35, la compressibilité importante des résidus miniers va provoquer des tassements différentiels et des fissures dans les matériaux constitutifs du barrage ; ces tassements peuvent se dérouler sur un temps assez long (plusieurs années, voire davantage). Si les résidus sont constitués de matériaux peu perméables, la mise en place des niveaux successifs provoque la consolidation des matériaux sous-jacents avec apparition de surpressions d'eau importantes pouvant conduire à des ruptures d'ensemble résidus + barrage. Enfin, les résidus peuvent également subir le mécanisme de liquéfaction, sous l'effet d'un séisme par exemple.



Figure 35 - Déformations, tassements différentiels

Figure 36 - Rupture de l'ensemble barrage-résidus

Mécanisme de liquéfaction

Le mécanisme de liquéfaction consiste en la perte totale de résistance mécanique d'un matériau - dans le cas présent les résidus miniers comportant une certaine teneur en eau - subissant un chargement rapide, statique ou dynamique (séisme, vibrations). Cette sollicitation conduit à une augmentation rapide de la pression des pores (vides entre les grains) et la diminution de la contrainte normale au niveau des contacts entre grains, voire la perte de contact entre ceux-ci. Le matériau subit une perte totale et brutale de résistance au cisaillement, devient liquide et ainsi sujet aux écoulements et à la mobilisation (Lucia et al. [66]). Cette liquéfaction se traduit par une force de cisaillement supplémentaire brutale sur le barrage (ICOLD, [42]).



Figure 37 : Courbe contrainte-déformation typique d'un sable lâche (Lucia et al. [66])

Les résidus susceptibles de se liquéfier sont les matériaux peu plastiques, donc sans cohésion, et, à indice de vide équivalent, davantage silteux que sableux. La présence de matériaux plastiques (argiles) augmente la résistance à la liquéfaction (Hallman et Dorey, 1995, [37]).

A ce sujet, Tsushida, 1970, [132], a établi un fuseau granulométrique type à l'intérieur duquel le matériau est potentiellement liquéfiable, voire probablement liquéfiable (Figure 38).

Dans des configurations où les résidus sont composés de sables fins, l'estimation de la densité relative¹³ du matériau peut être un apport important pour juger de la pertinence du phénomène de liquéfaction. Cette évaluation peut être faite à coût relativement limité en effectuant des essais en laboratoire sur échantillons intacts. Au vu de la difficulté, pour ces matériaux sableux, de préserver les conditions in situ lors de leur transfert en laboratoire, on peut de manière avantageuse effectuer des sondages peu profonds au pénétromètre dynamique ou statique : il existe dans la littérature un certain nombre de corrélations entre la résistance de pointe et cette densité relative (Villaviciencio et al, [103], pour des stériles au Chili).

Toutes choses égales par ailleurs, le temps de dépôt augmente la résistance à la liquéfaction, du fait de la compaction progressive du matériau. Ainsi, Troncoso, 1990 [131], cité par Kossoff et al., 2014 [61], indique que cette résistance peut augmenter de 250% en trente années de dépôt.



Figure 38 : Fuseau granulométrique de sols potentiellement (tiretés) ou probablement (pointillés) liquéfiables, d'après Tsuchida, [132] et courbe granulométrique de résidus et de matériaux de digue d'amorce d'une mine d'or en Chine (Xu et Wang, [108])

Tableau 8 : Estimation de l'état de compaction, du comportement et du potentiel de liquéfaction de résidus sableux au regard de leur densité relative (DR) – Espinace et al. [116], in Villavicencio et al. [103]

qd _{N1}	(N ₁) ₆₀	DR%	State of compaction	Mechanical behaviour	Liquefaction potential
< 20	< 8	< 20	Very low	Contractant	Very high
20 - 48	8-15	20 - 45	Low	Contractant	High
48 –57	15 - 20	45 - 50	Compacted	Contractant	Equilibrium
57 - 81	20-30	50 - 65	Compacted to dense	Limit	Low
81-193	30 - 50	65 - 85	Dense	Dilatant	Very Low
>193		85 - 100	Very dense	Dilatant	Null

(N1)60: SPT blow count normalized to an overburden pressure of approximately 100 kPa and a hammer energy ratio or hammer efficiency of 60%

7.3.4 Défaillances liées à l'action érosive de l'eau

Certaines défaillances mettant en jeu l'eau contenue dans les matériaux (sol d'assise, résidus miniers, stériles miniers, remblais) ont été évoquées ci-avant. Il s'agit notamment des pressions interstitielles qui

¹³ $DR = \frac{emax - e}{emax - emin}$, e étant l'indice des vides du sol en place, emax cet indice à l'état le plus compact, emin ce même indice à l'état le plus lâche

se développent dans le sol d'assise ou de fondation, voire dans le corps de remblai ou des résidus en fonction du matériau, des conditions météorologiques lors de la mise en œuvre.

Les écoulements d'eau peuvent également conduire à éroder le matériau de remblai de manière superficielle ou jusqu'à constituer une brèche dans l'ouvrage. Ces défaillances peuvent se produire même longtemps après la mise en service de l'ouvrage, ou être dues à son exploitation.

L'érosion externe par ravinement

Ce phénomène, consécutif au ruissellement des eaux pluviales mal ou non canalisées, ou aux fuites de canalisations, affecte les deux parements¹⁴ du barrage.

L'érosion externe par affouillement

Ce phénomène, consécutif au batillage¹⁵ et provoqué par les vagues, n'affecte que le parement amont si celui-ci n'est pas étanché ou protégé.



Photographie 6 : Affouillement de parement créé par le batillage au sein d'un plan d'eau (Ineris)

L'érosion externe par surverse

Le passage du surnageant ou des effluents par-dessus la crête du barrage de résidus miniers peut avoir plusieurs origines.

Il peut être lié à une conjonction de phénomènes, d'exploitation et météorologiques, que l'on peut imaginer, par exemple, de la manière suivante :

- le niveau d'eau dans le bassin de résidus est déjà haut pour des raisons de surexploitation ou de dispositif de drainage insuffisant ;
- les conditions météorologiques sont défavorables, les précipitations fortes font monter le niveau dans le bassin qui récupère les eaux pluviales d'une partie du site ;

¹⁴ Faces externes du barrage. On distingue le parement amont (du côté des matériaux et effluents retenus) et le parement aval

¹⁵ Déferlement de vagues provoqué soit par la marche d'un bateau, soit par le vent et qui cause la dégradation des berges par action mécanique et variation fréquente de niveau de l'eau.

• l'action du vent peut jouer un rôle s'il souffle dans le sens de la plus grande dimension du bassin et engendre des vagues qui viennent déferler sur le parement, le submergent, le dégradent puis permettent l'écoulement en entraînant la crête et érodant le parement aval.

En fonction de l'importance de chacun de ces phénomènes et de leur conjonction, l'issue peut être un simple débordement comme un début de ruine de l'ouvrage.

L'autre aspect est mécanique et engendré par le tassement différentiel du barrage Le sol de fondation, hétérogène, se consolide localement avec une amplitude plus importante entraînant un point bas dans l'ouvrage qui peut devenir un point de surverse. Ce phénomène, plus lent, est facilement observable et il est possible de le traiter rapidement par rechargement.



Figure 39 : Schéma d'érosion par surverse (d'après www.ddrm-reunion.re)

L'érosion interne

L'érosion interne est notamment liée à l'écoulement localisé au sein de la masse du remblai et/ou des résidus, engendrant le détachement et la mobilisation de particules fines de ces matériaux. La présence de canalisations au sein ou sous le dépôt ou les remblais, de conduits racinaires et l'action d'animaux fouisseurs peuvent l'aggraver. L'entraînement de particules peut aller jusqu'à la ruine de l'ouvrage, avec épandage du contenu vers l'aval. Le phénomène est d'autant plus brutal qu'il n'est pas anticipé : c'est le phénomène dit « de <u>renard »</u>.



Figure 40 : Schéma d'érosion interne de type « renard » (d'après <u>www.ddrm-reunion.re</u>)



Photographie 7 : Brèche créée par l'érosion interne au sein d'une levée (cliché Irstea, in http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr)

Les fuites peuvent apparaître quelques semaines après la première mise en eau, mais parfois aussi beaucoup plus tard. Pour les remblais constitués de sols à faible perméabilité, la progression de la ligne de saturation est très lente et les risques de phénomène de renard, liés essentiellement à la valeur du gradient hydraulique, se présentent lorsque l'écoulement à l'intérieur du remblai a atteint le régime permanent.

7.4 Les mécanismes de propagation

Ce chapitre intègre des éléments issus du rapport de l'Ineris « Appui technique pour l'élaboration et l'actualisation de la réglementation liée à la gestion des déchets. Transposition de la Directive 2006/21/CE relative à la gestion des déchets des industries extractives » du 19 octobre 2009 [44], auxquels sont ajoutés des éléments issus des documents compulsés.

7.4.1 Conditions de post-rupture immédiates

Les observations de rupture des barrages de résidus miniers permettent de constater, d'une manière générale, que se produit la succession de deux évènements (Martin et al. [73]) : immédiatement après la rupture, une vague contenant de l'eau associée aux résidus et au matériau du barrage, se propageant très rapidement voire violemment en aval, érodant et entraînant les matériaux rencontrés sur son parcours. Dans un deuxième temps, une partie du dépôt de résidus non mobilisée dans la première phase se déplace par la perte de confinement et l'accentuation locale des pentes créée par l'évènement initial.

Les interconnexions entre les vides dans les résidus non encore mobilisés sont limitées et ne permettent qu'une dissipation lente de la pression interstitielle. En revanche les vides dans un corps de matériau en mouvement changent continuellement d'emplacement et de géométrie à mesure que les grains solides se déplacent, permettant ainsi à la pression interstitielle de se dissiper en quelques secondes ou moins (Spence [95]).

7.4.2 Mode de comportement du mélange résidus-eau

Les modes d'écoulement du mélange résidus - remblai (le cas échéant) - eau sont régis par la mécanique des fluides.

Il est admis qu'on peut établir, à partir des équations d'écoulement (conservation de la masse et de la quantité de mouvement) pour un fluide non compressible à surface libre, l'approximation dite des milieux peu profonds (ou de Saint Venant, voir Thual [130] et annexe 4), adaptée pour les écoulements dont la profondeur (ou hauteur) est faible devant les autres dimensions.

Il est en revanche difficile de caractériser le comportement de ce mélange qui, selon sa teneur en eau au déclenchement, puis à sa vitesse d'écoulement une fois mobilisé, peut prendre tous les états entre un état diphasique solide-liquide et un écoulement homogène viscoplastique, comme indiqué en Figure 41.

On peut toutefois évoquer le fait qu'une contrainte minimum ou « seuil » de cisaillement doit être appliquée pour mettre en mouvement le fluide résidus-eau. Ce fluide n'est donc pas « newtonien »¹⁶ ; le considérer comme tel ne permet pas de décrire le comportement de ce fluide.

Les écoulements de tels fluides sont donc approchés par des lois de comportement viscoplastiques à seuil. Le modèle de Herschel-Bulkley relie ainsi la contrainte de cisaillement τ à la vitesse de déformation γ selon le modèle :

$$\tau = \tau_{seuil} + k \dot{\gamma}^n$$

où τ_{seuil} est la contrainte minimum ou « seuil » de cisaillement, k et n sont deux paramètres

¹⁶ Fluide dont la viscosité ne dépend pas des contraintes mécaniques qui lui sont appliquées. Celle-ci reste cependant soumise à la température



Figure 41 : Classification des résidus liquéfiés, d'après le CIGB, 1995 [115]

Pour décrire le comportement de ce type de fluide, on emploie fréquemment le modèle de Bingham, correspond au cas particulier de l'équation précédente où la puissance n est égale à 1, c'est-à-dire que le fluide a un comportement newtonien une fois atteint le seuil de cisaillement.

Le comportement d'un fluide de Bingham est donc caractérisé par deux constantes que sont ce seuil de cisaillement et la viscosité plastique, qui ne dépendent pas du niveau de contrainte ni du taux de déformation en cisaillement (Blight et al. [13], Pastor et al. [82]). Le fluide de Bingham se déforme élastiquement jusqu'à ce que la contrainte de cisaillement atteigne ce seuil, les déformations correspondantes étant négligeables. Une fois ce seuil atteint, la déformation augmente avec la contrainte de cisaillement. Si les forces externes décroissent, la vitesse va également décroître jusqu'à ce que la contrainte redescende sous le seuil, auquel cas l'écoulement plastique s'arrête. Ces fluides conduisent à l'apparition de zones où la vitesse est constante et où le taux de déformation est nul (Pastor et al. [82]).



(source : http://www.glossary.oilfield.slb.com/

Figure 42 : Différents modèles rhéologiques (http://hmf.enseeiht.fr)

Certains auteurs considèrent que, dès lors que les résidus possèdent une fraction argileuse supérieure à 10%, du fait de l'interactions entre particules, ce seuil de cisaillement apparaît, et un modèle viscoplastique tel que celui de Bingham ou de Herschel-Bulkley peut être considéré de manière préférentielle (Quecedo et al. [85]).

Le calibrage de ces lois de comportement ne peut être opéré qu'en confrontant les modèles prédictifs à des observations faites pour des configurations types.

7.4.3 Régime d'écoulement : laminaire ou turbulent ?

La plupart des développements scientifiques en dynamique de fluides, concernent les ruptures de barrages hydrauliques, retenant de l'eau, où l'onde de submersion générée est un écoulement turbulent.

Il n'est pas évident de définir *a priori* si l'écoulement du fluide résidus-eau sera laminaire¹⁷ ou turbulent à la suite de la rupture d'un barrage minier. Or cet aspect est important car un écoulement turbulent est susceptible de se déplacer à une vitesse bien plus élevée qu'un écoulement laminaire, et la vitesse est une des variables évidentes à apprécier pour évaluer la dangerosité.

Le régime d'écoulement d'un fluide est caractérisé par son nombre adimensionnel de Reynolds, calculé à partir de la masse volumique, de la vitesse d'un fluide et de sa viscosité, par la formule :

Re =
$$\gamma VL/\mu$$

où :

- γ est la masse volumique du fluide en kg/m³;
- V est la vitesse caractéristique du fluide en m/s ;
- L est une dimension caractéristique en m (par exemple la largeur du chenal d'écoulement) ;
- μ est la viscosité dynamique du fluide en Pa s.

Pour un fluide newtonien, le passage entre un écoulement laminaire et turbulent s'établit autour de Re = 2000 (Blight et al. [13], Jeyapalan et al. [56]).

Pour un fluide de Bingham, on peut déterminer si un écoulement sera laminaire ou turbulent à l'aide de Hanks et Pratt (1967, [117]) ou des critères de Takahashi (2007, [129]). Le nombre de Reynolds critique pour la transition de turbulent à laminaire est exprimée en termes de nombre d'Hedström¹⁸ (in Jeyapalan et al., [56], Figure 43)

Jeyapalan et al [56] différencient de cette manière les résidus de phosphates qui ont un comportement turbulent, contrairement aux autres résidus pour lesquels l'écoulement serait laminaire. Cette distinction est critiquée par Vick [101] qui estime qu'il n'est pas aisé de prévoir la nature du régime d'écoulement uniquement en fonction du type de résidus.

¹⁷ Un écoulement est dit laminaire lorsqu'il est régulier (qu'il ne présente pas trop de variations de vitesse spatiales ou temporelles), bien souvent stationnaire. Un écoulement est dit turbulent lorsqu'il est marqué par des variations de vitesse brusques et aléatoires en chaque point.

¹⁸ nombre sans dimension utilisé en rhéologie pour traiter l'écoulement des fluides non newtoniens, dits fluides de Bingham. Il sert à caractériser le type d'écoulement (laminaire ou turbulent) pour ces fluides. Ce nombre est fonction de la contrainte de cisaillement, de la viscosité dynamique et de la masse volumique du fluide.



Figure 43 : Positionnement des écoulements laminaires et turbulents en fonction du nombre de Reynolds critique et du nombre d'Hedstrom. Positionnement des résidus de phosphate et autres résidus selon Jeyapalan et al [56]

Tableau 9 : Paramètres d'écoulement de résidus miniers liquéfiés issus de Jeyapalan et al, 1983, [56],
et de Jin et Fread, 1997,([121], in Pastor et al. [82])

Source	Paramètre	Minimales	Maximales
[56]	Poids volumique	1400 kg/m3	1800 kg/m3
[121]	Poids volumique	1570 kg/m3	1764 kg/m3
[56]	Seuil de cisaillement	1 kPa	7 kPa
[121]	Seuil de cisaillement	38 Pa	4, 794 kPa
[56]	Viscosité plastique	0,1 kPa/s	5 kPa/s
[121]	Viscosité plastique	2,1 Pa/s	958 Pa/s
[56]	Hauteur d'écoulement	5 m	15 m
[56]	Vitesse d'écoulement	1,5 m/s	6 m/s
[56]	Nombre de Reynolds	10	300
[56]	Nombre d'Hedström	100	350

Il apparaît donc que les deux régimes d'écoulement doivent être envisagés et qu'il n'existe pas à notre connaissance de critères permettant de juger a priori du caractère turbulent ou laminaire du fluide résidus-eau. La teneur en eau du matériau stocké derrière le barrage devrait être un des paramètres ayant le plus d'influence dans la nature de l'écoulement, ainsi que le caractère brutal ou progressif de la rupture.

7.4.4 Classification des coulées de débris en fonction des caractéristiques de la phase solide et de la hauteur de l'écoulement

Pirulli, en 2017 [83], établit une présentation des différentes coulées de débris synthétisée ci-après.

Cette auteure cite Takahashi (2007, [129]) qui définit deux types principaux de coulées de débris : l'un est la coulée de débris quasi statique, où la contrainte de cisaillement entre particules solides, de type Coulomb, domine, et l'autre est le flux de débris dynamique.

La coulée quasi statique suppose que la concentration en solides (C) soit suffisamment importante pour garantir que les particules soient toujours en contact, même si leur position change continuellement. Bagnold (1966) a estimé que cette condition est remplie lorsque C'est supérieur à 0,51 pour un sable de plage, mais cette valeur dépend de la taille des particules. Dans ce cas de concentration en solides élevée, les contraintes autres que celles liées au contact deviennent négligeables.

Les flux de débris dynamiques peuvent être subdivisés en trois sous-classes :

- quand les forces de collision des grains dominent, la coulée de débris devient un écoulement de type pierreux ;
- lorsque les forces liées au régime turbulent dominent, la coulée devient un écoulement de type turbulent-boueux ;
- et, quand les forces liées à la viscosité du fluide dominent, on se trouve dans la sous-classe d'écoulement de type coulée visqueuse.

Passer d'un type de flux dynamique à un autre dépend :

- de la concentration en solides ;
- de la « hauteur relative » de l'écoulement, h / d (où h est la hauteur de l'écoulement et d est la taille des particules);
- du nombre adimensionnel de Bagnold¹⁹ (que l'on peut considérer comme étant le rapport des contraintes de cisaillement caractéristiques dues aux collisions entres grains et à la viscosité du liquide) et de celui de Reynolds. Quand le nombre de Bagnold est grand et que la profondeur relative est faible, une coulée de débris pierreux se produit. Quand les nombres de Bagnold et de Reynolds sont petits, un écoulement de type coulée visqueuse se produit. Quand la profondeur relative et le nombre de Reynolds sont élevés, il se produit une coulée de débris turbulente et boueuse.

Pendant l'écoulement il subsiste un contact entre particules et une résistance au cisaillement dite résiduelle, dépendant du type de matériau, de son poids volumique initial, et du débit de l'écoulement.

Les interconnexions entre les vides dans les résidus non encore mobilisés sont limitées et ne permettent qu'une dissipation lente de la pression interstitielle. En revanche les vides dans un corps de matériau en mouvement changent continuellement d'emplacement et de géométrie à mesure que les grains solides se déplacent, permettant ainsi à la pression interstitielle de se dissiper en quelques secondes ou moins (Spence, 1992, [95]).

$$Ba = \frac{3 \cdot C \cdot \rho_f \cdot v^2}{2}$$

$$Da = 4 \cdot d_p \cdot \rho_p \cdot g$$

¹⁹ Nombre utilisé pour caractériser l'écoulement de grains de sable. Il permet notamment de déterminer à partir de quelles conditions l'écoulement on passe d'un fluide à seuil à celui d'un fluide granulaire où l'énergie est dissipée par choc entre les grains et non plus par frottement. Il représente le rapport entre l'énergie cinétique dissipée et l'énergie dissipée par choc entre les grains de sable Lorsque le nombre de Bagnold est supérieur à 450, l'écoulement a un régime granulaire et lorsqu'il est inférieur à 40, le régime est visqueux. Le nombre de Bagnold peut s'exprimer de la manière suivante :

où C est une constante, ρ_f la masse volumique du fluide, v sa vitesse, d_p le diamètre des particules solides, ρ_p leur masse volumique et g l'accélération de la pesanteur



Figure 44 : Schéma d'une coulée de fluide granulaire (Davies, 1988, in Spence, [95])

7.5 Estimation des paramètres d'intensité et d'extension géographique : les différentes approches

7.5.1 Considérations générales

L'intensité d'une coulée, à savoir par extension son potentiel de danger et de destruction, est tributaire de sa hauteur en un point donné, en aval du barrage ayant rompu.

Cette intensité est également tributaire de la vitesse du flux, également en un point donné ; ce paramètre est complexe à appréhender, en fonction des nombreux paramètres intrinsèques et extrinsèques qui régissent les modes et régimes d'écoulement, tels qu'évoqués au chapitre précédent.

Du fait de cette complexité d'évaluation de la vitesse, et pour se placer du côté de la sécurité, le guide des aléas miniers de l'Ineris [49] ne retient que le paramètre hauteur pour évaluer l'intensité (Tableau 7). Lorsque cette hauteur est supérieure à 50 cm, quelle que soit la vitesse du flux, l'intensité est dite élevée.

L'extension géographique d'une coulée est importante à estimer pour pouvoir établir une cartographie des zones pouvant être impactées par la coulée, et notamment les zones d'intensité attendue élevée où des mesures de gestion du risque et d'aménagement doivent être prises, tant en phase d'exploitation du barrage qu'en phase d'après-mine.

Les chapitres suivants s'attachent à décrire d'une part les principaux paramètres géométriques d'entrée, base de l'évaluation de ces critères d'intensité, et d'autre part les outils d'évaluation qui ont été compulsés dans la littérature, sans viser l'exhaustivité, mais en précisant les intérêts et les limites des méthodes employées.

7.5.2 Les paramètres géométriques d'entrée

Le volume mobilisé

Sans avoir à considérer la typologie de rupture se produisant au sein du barrage de résidus miniers, la part de volume mobilisé au regard du volume total du dépôt de résidus est un paramètre d'entrée à apprécier et abordé par de nombreux auteurs. D'après le modèle statistique de Rico et al [87], basé sur des retours d'expérience de ruptures, ce volume peut être estimé à environ un tiers du volume total, cette approche étant utilisée assez couramment, au Canada par exemple. Martin et al., 2015 [73] ont établi une comparaison entre cette évaluation statistique et une approche basée sur le volume d'eau libre au sein du dépôt, le volume mobilisé étant considéré comme contenant, en masse, 65% de solide.

On constate que, à volume de résidus miniers égal, cette valeur mobilisée d'environ un tiers du volume total est dépassée dès lors que le volume d'eau libre dépasse 10% du volume de résidus. Par ailleurs nous avons vu au chapitre précédent que le volume d'eau stocké avait une influence considérable sur les mode et régime d'écoulement.

Tableau 10 : Evaluation en millions de mètres cubes du volume mobilisé après rupture, selon l'approche de Rico et al. [87], et celle liée au volume d'eau libre de Martin et al. [73]. La densité sèche des résidus est considérée constante et égale à 14 kN/m³, la densité des grains solides étant prise égale à 26,5 kN/m³

Volume of Free Water	Volume of Stored Tailings ⁽¹⁾	Total Impounded Volume	Outflow Volume ⁽¹⁾ (Rico et al. 2007)	Outflow Volume ⁽¹⁾ (65% Solids)
1	214	215	80 (37%)	5 (2%)
5	214	219	82 (37%)	23 (10%)
10	214	224	84 (37%)	45 (20%)
19	214	233	87 (37%)	87 (37%)
40	214	254	95 (37%)	181 (71%)

1. Volume of stored tailings and outflow volume include interstitial water.

La hauteur de la brèche dans le barrage

La hauteur de la brèche est un paramètre parfois employé pour estimer d'une part le volume mobilisable de résidus miniers situés en retrait, et pour établir d'autre part des abaques. L'évaluation de cette hauteur de brèche suppose que le mécanisme pressenti de rupture soit bien appréhendé, où que l'ouvrage ait avec certitude une assise stable, pour ne pas retenir la hauteur totale du barrage.

On notera ici que la *largeur de la brèche* au sein d'un barrage est un paramètre rarement explicitement considéré dans la littérature compulsée.

7.5.3 Modèles statistiques et formules empiriques liés aux retours d'expérience

Distance d'écoulement - modèle de Rico et al.

Rico et al. [87] ont établi des corrélations intéressantes basées sur le retour d'expérience de vingt-neuf cas de rupture (Tableau 11).

Une approche sur la qualité de la corrélation, présentée à l'annexe 2, a été établie par l'Ineris dans un rapport intitulé « Appui technique pour l'élaboration et l'actualisation de la réglementation liée à la gestion des déchets. Transposition de la Directive 2006/21/CE relative à la gestion des déchets des industries extractives » du 19 octobre 2009 [44].

Le graphique de la Figure 45 permet sur cette base d'apprécier, pour un site donné avec ses caractéristiques spécifiques, la distance d'écoulement potentielle D (en km dans ce qui suit), par régression linéaire et selon une courbe enveloppe, en fonction du « facteur de barrage » (produit de sa hauteur H, en m, et du volume mobilisable V_{mob}, en millions de m³).

Ref. no.	Name	Date of	Туре	Dam	Impoundment	Run-out	Dam factor	Released
	of the	failure	of dam	height	volume	distance	$(H \times V_{\rm F})$	volume
	dam	(year)		(m)	$(\times 10^{6} {\rm m}^{3})$	(km)		$(\times 10^6 {\rm m}^3)$
1	Arcturus (Zimbawe)	1978	RING	25	1.7-2.0 Mt	0.3	0.5	0.0211
2	Bafokeng (South Africa)	1974	RING	20	13	45	60	3
3	Baia Mare (Romania)	2000	UPS	7	0.8	0.18	0.7	0.1
4	Bellavista (Chile)	1965	RING	20	0.45	0.8	1.4	0.07
5	Buffalo Creek (USA)	1972	UPS	14-18	0.5	64.4	7-9	0.5
6	Cerro Negro No.3 (Chile)	1965	UPS	20	0.5	5	1.7	0.085
7	Cerro Negro No.4 (Chile)	1985	MXSQ	40	2	8	20	0.5
8	Churchrock (USA)	1979	WR	11	0.37	96.5-112.6	4.07	0.37
9	Cities Service (USA)	1971	WR	15	12.34	120	135	9
10	El Cobre Old Dam (Chile)	1965	UPS	35	4.25	12	66.5	1.9
11	Galena Mine (USA)	1974	UPS	9		0.61	0.034	0.0038
12	Gypsum Tailings Dam (USA)	1966	UPS	11	7 Mt	0.3	0.88-1.43	$2 \times 10^5 t$
13	Hokkaido (Japan)	1968	UPS	12	0.3	0.15	1.08	0.09
14	Itabirito (Brazil)	1986	Gravity	30		12	3	0.1
15	La Patagua New Dam (Chile)	1965	RING	15		5	0.525	0.035
16	Los Frailes (Spain)	1998	RING	27	15-20	41	53.51	4.6
17	Los Maquis (Chile)	1965	UPS	15	0.043	5	0.315	0.021
18	Merriespruit (South Africa)	1994	RING	31	7.04	2	18.6	2.5 Mt
19	Mochikoshi No.1 (Japan)	1978	UPS	28	0.48	8	2.24	0.08
20	Mochikoshi No.2 (Japan)	1978	UPS	19		0.15	0.057	0.003
21	Ollinghouse (USA)	1985	WR	5	0.12	1.5	0.125	0.025
22	Omai (Guyana)	1995	WR	44	5.25	80	184.8	4.2
23	Phelps-Dodge (USA)	1980	UPS	66	2.5	8	132	2
24	Sgurigrad (Bulgaria)	1966	UPS	45	1.52	6	9.9	0.22
25	Stancil (USA)	1989	UPS	9	0.074	0.1	0.342	0.038
26	Stava (Italy)	1985	RING	29.5	0.3	4.2	5.605	0.19
27	Tapo Canyon (USA)	1994	UPS	24		0.18		
28	Unidentified (USA)	1973	UPS	43	0.5	25	7.31	0.17
29	Veta del Agua Nº1 (Chile)	1985	MXSO	24	0.7	5	6.72	0.28

Tableau 11 : Liste des 29 cas de rupture de digues de rétention utilisés par Rico et al. [87]

RING: ring dyke; WR: water retention; UPS: dams subsequently raised upstream; MXSQ: dam comprising different raising typology (upstream, centreline and downstream); H: dam height; V_F: volume of tailings released.

L'analyse de ce modèle par l'Ineris ([44], annexe 2) a permis de montrer que des estimations pouvaient être réalisées à partir de ces modèles mais que la qualité de l'estimation était *a priori* faible.

Les résultats obtenus par ce modèle statistique ne concernent ni la hauteur, ni la vitesse de l'onde de submersion.

Néanmoins, l'attrait des expressions synthétiques reste indéniable du point de vue de la simplicité d'usage des expressions et de l'accessibilité des données d'entrée. Les expressions visant à estimer la distance parcourue par l'écoulement peuvent permettre de réaliser un premier tri parmi les barrages de rétention, en lien avec les enjeux situés dans le périmètre d'influence estimé.



Figure 45 : Abaque reliant la distance d'écoulement et le facteur de barrage, construit d'après Rico et al. [87]. La régression linéaire figure en bleu et la courbe enveloppe en orange. Les cas de rupture étudiés par Rico et al. sont regroupés peu ou prou en deux familles ajoutées sur cet abaque

Tableau 12 : Relations proposées par Rico et al. [87] à partir de régressions linéaires, et évaluation de la qualité de l'estimation (Ineris, [44])

N°	Expression obtenue à partir de la régression linéaire Coefficients de corrélation r et de détermination r ²	Nombre de cas utilisés Coefficient de Pearson à 95% de confiance	Qualité de l'estimation
1a	$D = 0.05 H^{1.41}$ r = 0.4 $r^2 = 0.16$	N= 29 C _p =0.367	Le coefficient de corrélation est à la limite du significatif. Le modèle linéaire proposé n'explique pas la dispersion des valeurs.
2a	$D = 14.45 V_{mob}^{0.76}$ r = 0.75 r ² = 0.56	N= 26 C _p =0.388	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 2a est faible.
3a	$D = 1.61 (HV_{mob})^{0.66}$ r = 0.75 r ² = 0.57	N= 27 C _p =0.381	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 3a est faible.
4a	$V_{mob} = 0.354 V^{1.01}$ r = 0.93 $r^2 = 0.86$	N= 21 C _p =0.433	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 4a est moyenne

N°	Expression de la courbe enveloppe	Qualité de l'estimation
1b	$D = 0.01 H^{3.23}$	Moyenne
2b	$D = 112.61 V_{mob}^{0.81}$	Moyenne
3b	$D = 12.46 \ (HV_{mob})^{0.79}$	Moyenne
4b	$V_{mob} = V$	Bonne

Tableau 13 : Expressions des courbes enveloppes proposées par Rico et al. [87], et évaluation de la qualité de l'estimation (Ineris, [44])

Estimation du débit de pointe à la rupture et à distance du barrage

Costa [23] a établi des abaques, liés au retour d'expérience de cas de rupture de barrages américains (hydrauliques, naturels), qui permettent de visualiser, en fonction de la hauteur du barrage, du volume de la retenue et du produit des 2, le débit d'écoulement des matériaux (Figure 46). Mais seul un cas minier, Buffalo Creek 1972, semble être recensé parmi les 31 cas étudiés



Figure 46 : Graphiques en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxV_{mob}, H; Q) en fonction du type de barrages, ainsi que les droites de régressions linéaires obtenues (Costa [23])

Basé sur les retours d'expérience de cas d'accidents collecté par le Yellow River Institute of Hydraulic Research of China, 1983 ([133], in Liu et al. [64]), et en considérant les équations de Saint-Venant simplifiées, le débit maximum au moment de la rupture (en m³/s) a été évalué par Singh, 1996 ([126], in Liu et al. [64]), selon la formule empirique suivante :

$$Q_{M} = \frac{8}{27} \sqrt{g(B/b)^{1/4}} b H^{3/2}$$

où g est l'accélération de la pesanteur, B est la longueur du barrage (en m), H est la hauteur de l'eau à proximité de la brèche lors de la rupture (en m), et b la largeur moyenne de la brèche (en m). Cette largeur b est elle-même évaluée selon la formule empirique suivante :

$$b = K \left(W^{\frac{1}{2}} B^{\frac{1}{2}} H \right)^{1/2}$$

où W est le volume d'eau à proximité de la brèche au moment de la rupture (en m³), et K un coefficient lié à la nature du barrage et à sa résistance, pris égal à 0,65 pour de l'argile et 1,3 pour du limon.

En se basant sur la théorie des écoulements instables, le débit de pointe à une distance aval L (en m) de la brèche est évaluée empiriquement par Li, 2006 ([122], in Liu et al. [64]) selon la formule :

$$Q_{LM} = \frac{W}{\frac{W}{Q_M} + \frac{L}{vk}}$$

où v est la vitesse maximum de l'écoulement, et k un coefficient empirique lié à la topographie (0,8-0,9 en plaine, 1 en zones collinaires, 1,1 à 1,5 en zones montagneuses).

Martin et al [73] comparent des valeurs de débit de pointe évaluées selon les formules empiriques de plusieurs auteurs (basées soit selon le « facteur de barrage » soit selon des régressions linéaires multiples) en considérant un barrage de 60 m de haut et de volume mobilisé de résidus et d'eau de 23 millions de m³, puis ce même volume de rétention pour un barrage de hauteur de 120 m. Les résultats sont reportés dans le Tableau 14. Les valeurs obtenues pour une hauteur de 60 m sont assez regroupées, celles pour 120 m sont beaucoup plus dispersées, cela s'expliquant notamment par le fait que les auteurs ont principalement travaillé sur des retours d'expérience de rupture d'ouvrages de moindre hauteur.

Tableau 14 : Comparaison des valeurs de débit de pointe estimées, selon les formules de différents auteurs, pour la rupture d'un barrage de 60 m de haut, puis de 120 m de haut, le volume mobilisé (résidus + eau) étant fixé à 23 M m3 (Martin et al, [73])

Methodology	Macdonald ^(1,2)	Froehlich ⁽³⁾	Pierce ^(4,5)	Rico, Costa ⁽⁶⁾
Dam Factor (V _w x H _w)	6,682	-	6,025	6,724
Multiple Regression	-	14,378	10,266	-
Envelope Equation	21,828	-	-	-
1. Macodnald & Langridge-Monopo	$Q_{I\!\!P} = 1.154 (V_{OUT} * H_w)^{0.412}$			
2. Macodnald & Langridge-Monopolis (1984) envelope equation (Source: Wahl 2004):			$Q_P = 3.85 (V_{OUT} * H_w)^{0.411}$	
3. Froehlich (1995a) multiple regression equation:		$Q_{P} = 0.607 (V_{OUT}^{0.295} * H_{w}^{1.24})$		
4. Pierce et al. (2010) dam factor equation:		$Q_{\text{P}} = 0.0176 (V_{\text{OUT}} * H_w)^{0.606}$		
5. Pierce et al.(2010) multiple regression equation: Qp			$Q_{P} = 0.038(V_{OUT}^{0.475} * H_{w}^{1.09})$	
6. Rico et al. (2007) and Costa (1985) dam factor equation for constructed dams:			$Q_{max} = 325[(V_{OUT}*10^{-6}) * H_w]$	0.42

Table 2: Peak Outflow Estimates for a 60 m High Dam (values shown in m³/s)

Table 3: Peak Outflow Estimates for a 120 m High Dam (values shown in m	3/s	5)
---	-----	----

Methodology	Macdonald ^(1,2)	Froehlich ⁽³⁾	Pierce ^(4,5)	Rico, Costa ⁽⁶⁾
$DamFactor~(V_w~x~H_w)$	8,890	-	9,170	8,996
Multiple Regression	-	33,960	21,853	-
Envelope Equation	29,022	-	-	-

7.5.4 Modèles de mécanique du solide déformable. Modèle de Lucia et al.

Lucia et al. [66] ont établi, sur la base des retours d'expérience de 25 cas de rupture, des abaques permettant de déterminer la pente finale et la longueur d'épanchement pour des pentes de terrain aval inférieures ou égales à 4°. On peut donc en tout point déterminer la hauteur finale de la coulée.

Le détail de cette approche, extrait du rapport de l'Ineris de 2009 [44], est présenté à l'annexe 3.

La coupe schématique du modèle est présentée à la Figure 47. Elle suppose l'existence d'un bourrelet de hauteur H_B à l'extrémité aval de la coulée, et une pente rectiligne formée par les résidus. Seules trois forces sont considérées et présentées en Figure 49 :

- le poids des résidus mobilisés ;
- la force de frottement à l'interface entre le terrain naturel et les résidus ;
- la force de poussée exercée par les résidus se trouvant à l'amont de l'axe vertical initial de la digue.

Parmi les données d'entrée figurent le volume mobilisé et la contrainte limite de cisaillement des résidus S_u. Cette grandeur, similaire à la contrainte seuil des lois rhéologiques comme le modèle de Bingham, est difficile à apprécier. Lucia et al. en proposent toutefois des valeurs, calculées à partir de cas réels, qui sont reproduites dans le Tableau 15.

La présentation peut se faire sous forme d'abaque de distance parcourue tel celui présenté à la Figure 50 extraite de [44]. Dans ce cas, les données d'entrée sont notamment une pente de terrain naturel de 2%, et un volume total de résidus stockés (rapporté, en 2D, à une surface) de 1000 m². Il a été paramétré, en abscisse, la contrainte limite de cisaillement, et quatre ratios de volume mobilisé sur le volume total (quatre courbes).



Figure 47 : Coupe schématique montrant l'état initial et l'état final envisagés par Lucia et al. [66] (Ineris [44])



Figure 48 : Coupe type de l'état final de l'écoulement et notations des grandeurs géométriques (Ineris [44])



Figure 49 : Bilan des forces 2D sur la masse de résidus mobilisés dans l'état final de l'écoulement, selon les hypothèses de Lucia et al. [66] (Ineris [44])

Tableau 15 : Retour d'expérience sur 14 cas et estimation de la pente finale et de la contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement (S_u), d'après Lucia et al. [66]

N°	Type de résidus	α (°)	S _u (kPa)
1	Résidus de traitement du cuivre	1,5	2,4
2	Résidus de traitement du platine	1,3	0,7
3	Stériles de gypse	1	1
4	Résidus de traitement de l'or	4 à 5	10,1
5	Stériles de charbon	12	18
6	Stériles de charbon	12	15,8
7	Stériles de charbon	12	21,6
8	Résidus de la fabrication de porcelaine	7	6,7
9	Résidus de la fabrication de porcelaine	7	16,3
10	Résidus de traitement de carbures	1,5	2,5
11	Argile-sable fin	2,5	12
12	Sable fin	4	1
13	Sable fin	4	1,2
14	Sable fin	4	1,7



Figure 50 : Exemple d'abaque, selon le modèle de Lucia et al. [66], donnant la distance parcourue en fonction de la contrainte de cisaillement S_u, du rapport du volume mobilisé sur le volume total. Dans le cas présent le volume de résidus stockés, rapporté en 2D, est 1000 m² (Ineris [44])

Limites d'utilisation

Les observations de coulées de résidus sur le terrain ont permis à Lucia et al. de conclure qu'un équilibre est difficile à envisager pour des pentes de terrains naturelles supérieures à 9°. Ainsi les auteurs proposent de n'utiliser leur modèle que pour des pentes naturelles inférieures à 4°.

D'emploi relativement aisé en intégrant les équations sous tableur, ce modèle permet d'apprécier la distance d'écoulement, et indirectement la hauteur résiduelle de la coulée en tout point entre la digue et le bourrelet terminal. Les fondements théoriques de ce modèle sont satisfaisants, même si certaines hypothèses pourraient être revues et améliorées, notamment le comportement mécanique intrinsèque des résidus (voir annexe 3).

En revanche, ce type de modèle ne s'intéresse pas au régime d'écoulement et ne permet pas d'avoir accès à la variable vitesse. Les distances peuvent être largement sous-estimées dès lors que la teneur en eau / la proportion d'eau libre dans les résidus est élevée, ce paramètre influant largement, comme nous l'avons vu, sur le ratio entre le volume mobilisé et le volume total. En d'autres termes, il est plus prudent de considérer les ratios peu élevés, tels que ceux observés par Rico et al. [88], pour l'utilisation de ces abaques. Ceux-ci peuvent permettre de réaliser un premier tri parmi les barrages où l'aléa de type coulée est pertinent, en appréciant les enjeux situés dans le périmètre d'influence ainsi délimité.

7.5.5 Modèles de mécanique des fluides

Les modèles issus de la mécanique des fluides deviennent vite complexes, du fait des nombreux paramètres régissant le comportement du mélange résidus/eaux, son mode d'écoulement, son interface avec le terrain lors de son parcours. Il ne semble pas exister de modèles simples permettant de calculer de manière satisfaisante l'onde de submersion du fluide générée par la rupture d'un barrage. Nous proposons ci-après quelques modèles permettant de donner des ordres de grandeur de valeurs recherchées.

Les solutions newtoniennes de Ritter et leur utilisation

Ce modèle est détaillé à l'annexe 4 issue des travaux de l'Ineris de 2009 [44]. Il considère l'écoulement d'un fluide newtonien dans un chenal sans frottement

Les solutions exactes, citées dans Chanson [20], de la vitesse U du fluide et de la hauteur h en fonction du temps t et de la distance x sont de la forme suivante :

$$h = \frac{H}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gH}} \right)^2$$
$$U = \frac{2\sqrt{gH}}{3} \left(1 + \frac{x}{t\sqrt{gD}} \right)$$
$$avec \ -1 \le \frac{x}{t\sqrt{gD}} \le 2$$

avec g la gravité et H la hauteur initiale de la digue.

Lorsque t tend vers l'infini :

- la vitesse U tend vers son minimum 2√gH/3 dans l'intervalle de définition. Un calcul basé sur cette valeur limite montre que toutes les digues dont la hauteur est supérieure à 5,7 cm sont susceptibles de générer une onde de submersion allant à une vitesse supérieure à 0,5 m.s⁻¹, qui est le seuil de vitesse utilisé dans le critère de dangerosité proposé par l'administration (Arrêté du 17 avril 2010, [8]) ;
- la hauteur h tend vers 4*H*/9 dans l'intervalle de définition. Un calcul basé sur cette valeur limite montre que toutes les digues dont la hauteur est supérieure à 1,6 m sont susceptibles de générer une onde de submersion de plus de 0,7 m de hauteur, seuil de l'arrêté de 2010. Ce résultat découle de deux hypothèses du modèle : d'une part le réservoir en amont du barrage est considéré infini et donc le volume susceptible de s'écouler est infini, et d'autre part le fluide est newtonien et donc la stabilité est obtenue lorsque la surface du fluide est horizontale.

Ces résultats traduisent le fait que les hypothèses d'un fluide newtonien dans un écoulement sans frottement sont particulièrement sécuritaires.

En faisant l'hypothèse forte que le fluide s'écoule de manière newtonienne mais se stabilise dans une position d'équilibre dès qu'un critère de pente est atteint (valeur inférieure à ce critère), il est possible, pour une configuration donnée, d'évaluer le temps d'écoulement pour atteindre cette pente, et la distance parcourue pour une hauteur de fluide recherchée. Les graphiques suivants en donnent un exemple, pour une hauteur de barrage de 10 m et la recherche d'une pente d'équilibre de 1° (on rappelle que Lucia et al. ont estimé des valeurs de pente dans le cadre du retour d'expérience de 14 cas, Tableau 15).



Figure 51 : Pente maximum de l'écoulement en fonction du temps après la rupture d'un barrage de 10 m de hauteur. En violet recherche du temps d'écoulement pour atteindre une pente de 1° pour le fluide newtonien (Ineris [44])



Figure 52 : Application du temps retenu pour évaluer la distance parcourue par un fluide de hauteur 0,7 m (Ineris [44])

Cette même approche peut également être réalisée pour une pente de terrain aval non nulle. Les équations sont reproduites à l'annexe 4. Par exemple, en reprenant l'exemple d'une digue de 10 m de hauteur, avec une pente naturelle de 2% et une pente d'équilibre de 2,5 %, le temps d'écoulement est de 75 secondes et la distance sur laquelle la vague est supérieure à 0,7 m est estimée à 1860 m.

Ces solutions sont pratiques et faciles d'utilisation, mais elles surestiment la vitesse et la hauteur. Dans le cas d'une pente nulle ou faible (rappelons que Lucia et al. [66] considèrent que l'équilibre ne peut pas être atteint si la pente naturelle excède 9°), ces équations peuvent néanmoins donner une estimation a priori sécuritaire de la zone où la hauteur du fluide résidus-eau risque d'être supérieure à une valeur jugée « à potentiel de danger », à savoir 0,5 m ou 0,7 m.

Modèle de Jeyapalan et al

Jeyapalan et al., 1983 [56], ont proposé, en travaillant sur le comportement laminaire d'un fluide de Bingham, des abaques (Figure 53) relatifs à la vitesse en tête de coulée (« tip velocity ») à son déplacement (« tip displacement ») en fonction du temps, pour différentes valeurs de deux paramètres de résistance adimensionnels liés à la viscosité (paramètre R) et à la résistance du fluide (paramètre

S) qui peuvent être calculés en connaissant la hauteur du barrage, le poids volumique, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du fluide²⁰.

La distance parcourue x_f et le temps mis par la coulée pour s'arrêter t_f, qui sont des paramètres adimensionnels²¹, sont également fournis par des abaques en fonction de R et S, tenant compte de la pente en aval de la zone de rupture. La Figure 54 représente ces abaques pour une pente aval nulle.

Des expérimentations en laboratoire ont été réalisées par Jeyapalan et al. [57] pour valider ces calculs analytiques. L'application de ces calculs à l'observation des coulées de dépôts gypseux au Texas, 1966, et de la catastrophe d'Aberfan au Pays de Galles, 1965, a été entreprise par ces mêmes auteurs. Elle montre une assez bonne corrélation, avec des calculs analytiques plutôt sécuritaires, la difficulté étant l'évaluation de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du fluide. Les calculs sont plus sécuritaires encore dans le cas de pente aval, sous-estimant probablement les effets du frottement d'une lame de boue peu épaisse sur un sol rugueux.



Figure 53 : Abaques exprimant la vitesse et le déplacement en tête de coulée, en fonction de valeurs identiques des paramètres adimensionnels R et S (d'après Jeyapalan et al. [56])

 $^{^{20}} R = 2\eta_p \frac{\sqrt{\frac{g}{H_0}}}{\gamma_{H_0}}, S = \frac{\tau_y}{\gamma_{H_0}}, H_0$ étant la hauteur initiale du barrage, g l'accélération de la pesanteur, γ , η_p , τ_y respectivement le poids volumique, la viscosité plastique, le seuil du cisaillement du fluide

²¹ Pour calculer la distance il convient de multiplier le paramètre x_f par la hauteur de barrage H₀, pour calculer le temps d'arrêt il convient de multiplier le paramètre t_f par $\sqrt{\frac{H_0}{a}}$



Figure 54 : Abaques exprimant la distance parcourue x_f et du temps d'arrêt de la coulée t_f, en fonction des paramètres adimensionnels R et S, pour une pente aval nulle (d'après Jeyapalan et al. [56])

La méthode est toutefois critiquée par Vick,1983 [101], qui évoque l'absence de prise en compte de la teneur en eau dans le matériau qui s'épanche, de sa composition, et de la nature de la rupture initiale, et qui demande plus d'investigations pour étayer l'analyse.

Modèle de Chanson

Chanson [20] a proposé des solutions analytiques implicites pour les écoulements turbulents et laminaires. Il a considéré un écoulement turbulent d'un fluide parfait du type de la solution de Ritter présentée ci-avant avec un traitement différent pour la zone de front comme illustré en Figure 55. Des hypothèses différentes sont faites au niveau du front d'onde selon que l'écoulement est supposé laminaire ou turbulent. Ces hypothèses sont intégrées dans le terme de frottement (voir annexe 4).



Figure 55 : Principe de modification du front d'onde (Ineris [44])

Autres modèles

Sans viser, loin s'en faut, l'exhaustivité (de très nombreux modèles 2D et 3D existant sur la base des équations des écoulements de Navier-Stokes et de Saint-Venant), on peut citer les travaux de Hungr, 1995 [40] établissant la corrélation entre le modèle DAN (Dynamic ANalysis) et le terrain concernant les ruptures de barrages miniers.

Pastor et al, 2002 [82], évoquent pour leur part le modèle de fluide frottant de Hungr, où la pression interstitielle joue un rôle important sur la contrainte de cisaillement à la base du fluide, et où il est introduit un angle de friction apparent :

$$(1 - r_u) \tan \emptyset'$$

 r_u constante dépendant de la pression interstitielle, ϕ ' angle de frottement effectif.

Par application de ce modèle et de celui de Hutchinson [118] sur le cas de la rupture du dépôt de gypse au Texas, en 1966 (East Texas), la corrélation entre le modèle et ce qui est observé est bonne hormis la distance qui est moindre dans le modèle. La rupture d'Aberfan, 1966, est également bien approchée par ce modèle en 1D.

7.6 Synthèse

Parmi les phénomènes affectant les barrages de résidus miniers, celui de coulée est le plus destructeur, mais également le plus méconnu en termes de propagation des boues mobilisées. Les causes de rupture exposées ci-avant sont diverses, celle-ci pouvant affecter d'emblée l'ensemble constitué par le barrage et les résidus et être relativement brutale (cas récent de Brumadinho au Brésil) soit être la conséquence de phénomènes d'érosion, de venues d'eau naturelles ou accidentelles, ou encore d'instabilités mécaniques initiées dans le corps ou la fondation du barrage, avec des vitesses très variables entre les premiers désordres et la rupture finale.

La mobilisation des résidus miniers par liquéfaction, pour peu que leur granulométrie soit sensible à ce phénomène, est à considérer. Il est provoqué par une saturation des matériaux (notamment en lien avec un afflux d'eau important et un drainage insuffisant ou défectueux des effluents) et/ou des sollicitations dynamiques.

Autant les critères de prédisposition au déclenchement peuvent être relativement aisément appréhendés, autant les critères d'intensité - hauteur et vitesse des boues - et d'extension géographique d'une coulée sont difficiles à évaluer. Des approches empiriques, statistiques et mécaniques - ces dernières en fonction du mode d'écoulement attendu - issues de la littérature et certainement non exhaustives, ont été exposées ci-avant, en guise d'aide à l'analyse sur un site donné. La limite d'utilisation et la mise en garde de la sous- ou de la sur-estimation de l'intensité ou de l'extension du phénomène sont abordées pour chacun des modes d'analyse.

On retiendra quatre paramètres prégnants permettant d'engager des calculs et analyses plus poussées de l'intensité et de l'extension : le volume de résidus miniers, le volume d'eau libre, la hauteur du barrage et la pente et la morphologie de l'aval. Même si ces paramètres peuvent apparaître triviaux de prime abord, c'est bien l'appréciation de leur combinaison et de leur poids respectif, en relation avec le mode de rupture, qui permettront de mieux apprécier le mode de propagation et ainsi orienter des modèles ciblés. L'acquisition de connaissance de ces quatre paramètres est abordée au chapitre 8.2.2.

8 Comment évaluer le phénomène de type coulée

8.1 Un retour d'expérience limité dans le cadre de la post-exploitation

Il convient de rappeler ici la spécificité du barrage de résidus miniers par rapport aux autres types de barrage.

Il s'agit de restituer dans un environnement naturel, après exploitation, un ouvrage retenant des produits solides et fluides potentiellement toxiques, et dont l'atténuation de la toxicité peut se poursuivre sur plusieurs dizaines voire centaines d'années. Ceci impose donc de raisonner sur le long terme au sujet de la fonction de rétention que doit assurer l'ouvrage. Ainsi les modes de défaillance potentiels, dont certains peuvent engendrer dans des cas particuliers des coulées, sont à apprécier et évaluer sur ce temps long.

Dans de nombreux cas les ouvrages ont nécessité l'utilisation de matériaux in situ, dont les stériles miniers, les résidus miniers et les sols d'emprunt locaux (remblai), avec des comportements géomécaniques variables, souvent médiocres, et souvent dépendants de leur teneur en eau. Durant l'exploitation, l'édification souvent progressive, en fonction de l'évolution du volume de mise en dépôt des résidus, a permis à l'exploitant minier de s'adapter en fonction du comportement de son ouvrage, le projet de barrage permettant ainsi une certaine flexibilité. Cette souplesse durant l'exploitation peut en revanche induire un déficit de contrôle de la qualité et de la surveillance de l'ouvrage problématique après la vie active du barrage (ICOLD, [42]).

On peut considérer toutefois, et d'une manière très générale, que les caractéristiques des matériaux s'améliorent avec le temps, notamment par compaction et diminution de la teneur en eau, et qu'ils sont, en dehors de perturbations majeures ou de défaillances dans l'environnement de l'ouvrage, moins sensibles aux variations de facteurs externes. Des contre-exemples existent toutefois, où la teneur en eau des ouvrages reste significative du fait des mauvaises conditions d'étanchéité ou de drainage.

Quoi qu'il en soit, il manque un certain recul sur le comportement de ces ouvrages. La plupart des barrages de résidus miniers, en tout cas les plus importants d'entre eux en termes de volume de rétention et de hauteur, ont été édifiés durant le vingtième siècle, et même, pour beaucoup d'entre eux, durant les dernières décennies. Nous ne disposons donc que d'un faible retour d'expérience sur la tenue à long terme de ces ouvrages, une fois la mine arrêtée ou abandonnée. C'est ce que souligne l'ICOLD en 2006 [119]:

"Experience regarding the long term behavior of tailings storage facilities (TSFs) is limited. Most are still in the phase of after care. Our knowledge is constantly increasing, but the closed and remediated tailings dams today are less than one or two decades old i.e. most experience of the long term stability of tailings dams after closure is still limited. In this case the long term is defined as 1000 years, or more."

En France, en incluant la Guyane, on dénombre une soixantaine de structures de retenue. Ce nombre est relativement faible au regard d'autres pays d'Asie ou d'Amérique, mais il n'est pas anodin.

8.2 Eléments-guides pour évaluer le phénomène de type coulée

8.2.1 Les facteurs de prédisposition et de pertinence

Pour qu'il puisse se produire une coulée au sein d'un barrage de résidus miniers, différents facteurs sont à considérer.

On peut ainsi distinguer les facteurs de prédisposition en quatre catégories :

- les facteurs liés à la potentialité de mobilisation, voire à la liquéfaction, du matériau constitutif du barrage et/ou des résidus stockés ;
- les facteurs liés à la potentialité naturelle d'accumulation d'eau à proximité du barrage ;
- les facteurs liés à la potentialité de défaillance de l'ouvrage ;
- enfin les facteurs de potentialité de conditions dégradées à proximité du barrage, en lien avec des facteurs externes pouvant être à l'origine du déclenchement du phénomène.

Les paragraphes ci-après présentent les facteurs les plus importants par catégorie, en indiquant leur degré d'importance, le cas échéant les sous-critères plus précis à rechercher, la facilité ou non d'acquisition des données dans le cadre d'un ouvrage post-exploitation, la possibilité d'acquérir des précisions sur ces critères par des investigations complémentaires, et, le cas échéant, le caractère

évolutif du facteur avec le temps. Un tableau de synthèse final (Tableau 16) regroupant l'ensemble des critères est par la suite présenté.

8.2.1.1 Potentialité de mobilisation

Nature des matériaux constitutifs du dépôt de résidus/du barrage

Nous avons pu constater que la nature des matériaux constitutifs du dépôt de résidus miniers et du barrage est un critère majeur de prédisposition à la mobilisation sous forme de coulée. Les matériaux à dominante de sables fins et de silts sont les plus sensibles à ce type de phénomène, c'est pourquoi la recherche de la composition granulométrique et sédimentométrique des résidus est importante voire fondamentale. Si le matériau est graveleux ou pierreux, ou au contraire très argileux, le mode de mobilisation n'est plus le même et la considération du phénomène de coulée n'est plus pertinente. L'aptitude à la liquéfaction d'un matériau s'inscrit peu ou prou dans la même catégorie de silts et de sables très fins, à ce titre les abaques de Tsushida ([132], visualisables à la Figure 38) sont intéressants à utiliser.

Nous avons vu également que l'estimation de la densité relative, dans le cas des sables fins, peut être un apport important pour juger de la pertinence du phénomène de liquéfaction (voir Tableau 8).

Si le matériau du barrage retenant les résidus est constitué des mêmes types de matériau, la prédisposition en est encore accrue.

Dans le cadre de l'analyse de barrages de résidus miniers en post-exploitation, sauf dans le cas où ces ouvrages sont récents, les données relatives à la constitution des résidus miniers constituant le dépôt ou des matériaux utilisés pour l'édification du barrage sont souvent absentes. On peut toutefois procéder à des prélèvements de matériaux par sondages ou fouilles à la pelle mécanique à des fins de caractérisation granulométrique et sédimentométrique. Pour les fouilles il conviendra de veiller à préserver les dispositifs de couverture et d'étanchéité s'ils existent, et à prendre des précautions si on est en présence de matériaux potentiellement pollués. L'évaluation de la densité relative peut être acquise en effectuant des essais en laboratoire sur échantillons intacts, ou à l'aide de sondages au pénétromètre dynamique ou statique.

Mode d'édification du barrage

Le mode d'édification du barrage de résidus miniers est également un critère important, et il est non indépendant du précédent. Nous avons vu que les barrages édifiés selon la méthode amont étaient les plus sensibles à la rupture, du fait de l'emploi des résidus miniers pour leur constitution et élévation, de leur appui sur des matériaux peu consolidés et de l'absence ou de la faible proportion de matériaux de granulométrie plus étalée et compactés lors du terrassement. *A contrario* les barrages de résidus miniers édifiés selon les méthodes aval ou central, ou conventionnelle, peuvent toutes choses égales par ailleurs conduire à une sensibilité moindre voire nulle à la rupture engendrant une coulée des résidus.

Cette donnée sur l'édification est relativement aisée à acquérir pour les ouvrages les plus récents, elle est en revanche plus difficile à apprécier pour les ouvrages les plus anciens. La caractérisation par sondages ou fouilles à la pelle des matériaux du barrage peut permettre de déterminer s'il est constitué de résidus miniers, de stériles miniers ou de matériaux d'emprunt locaux (remblai), et d'en apprécier la granulométrie.

Nature et état de consolidation des terrains d'assise

Ce critère est à considérer, bien qu'il soit de sensibilité moindre que les précédents. En effet on peut considérer que les défaillances liées à des problèmes d'assise ou de fondation d'un barrage surviennent de préférence durant la phase de conception et d'exploitation.

Toutefois, il convient de considérer, pour les matériaux d'assise de faibles caractéristiques (silts, sables, argiles), si des variations d'autres facteurs (remontée ou variation de nappe phréatique, ou sismicité, par exemple) ne sont pas de nature à pouvoir remobiliser ces terrains.

Il convient également de considérer la nature des terrains d'assise dans le cas de barrages à flancs de coteau. Du fait de l'existence d'une pente, ces terrains peuvent en effet être mobilisés par des phénomènes de glissement, de reptation ou d'érosion.

Ces données sur les terrains d'assise sont relativement difficiles à apprécier, notamment pour les ouvrages les plus anciens. La consultation des données géologiques locales et l'observation des affleurements à proximité permettent toutefois d'apprécier la nature et la constitution des terrains d'assise.

8.2.1.2 Potentialité d'accumulation de l'eau

Position topographique

La position topographique du barrage est un premier critère important pour apprécier la potentialité d'accumulation d'eau. Un barrage en fond de vallée est ainsi plus sensible qu'un barrage situé en sommet de coteau ou en plateau. Ce critère est très aisé à obtenir.

Surface et pente du bassin versant

La surface et la pente du bassin versant en amont du barrage sont également des critères importants. La *surface* du bassin versant permet d'évaluer le volume d'eau susceptible de s'accumuler derrière le barrage, en fonction du débit de fuite de l'ouvrage et des précipitations à considérer (orage, pluies décennales, centennales, etc.). Il est nécessaire d'évaluer les coefficients de ruissellement et d'apport des aires constitutives du bassin, en tenant compte de l'occupation du sol (prés, forêts, surfaces imperméabilisées par l'occupation humaine, ...). De nombreux guides existent et les calculs sont relativement simples, pour les cas complexes des bureaux d'études sont spécialisés dans ces domaines.

La pente du bassin influe pour sa part sur le temps mis par l'eau de pluie du bassin versant pour atteindre le barrage (on parle de temps de concentration). Plus le bassin versant est penté et plus ce temps est court, et donc la vitesse de l'eau devient importante, pouvant remobiliser des matériaux prédisposés (voir le chapitre précédent). Le calcul du temps de concentration est plus complexe et nécessite l'intervention de bureaux d'études spécialisés.

On notera que ces deux critères sont évolutifs dans le temps en fonction des modifications de l'occupation des sols : l'imperméabilisation des terrains en amont de barrages, selon l'accroissement de l'occupation humaine et/ou des infrastructures, engendre des volumes et vitesses d'eau plus importants.

Présence et position d'une nappe phréatique

Les barrages reposent sur un substratum et sont environnés de formations (alluvions en vallée, colluvions de pente) où une nappe phréatique peut être présente et proche des fondations et de la base de l'ouvrage minier. Les fluctuations de cette nappe peuvent conduire à ce que la base des résidus soit temporairement, voire durablement, saturée.

Certains barrages récents mais qui ne sont plus en exploitation font l'objet d'un suivi piézométrique au sein du dépôt de résidus miniers, et parfois au sein du substratum pour le suivi de la nappe phréatique. Toutefois, avec le temps, lorsque la maintenance ou l'entretien de ces ouvrages ne sont pas assurés, ces ouvrages peuvent se colmater, ou se détériorer, et mal ou ne plus assurer leur fonction.

Les barrages de résidus miniers les plus anciens ne font, pour la plupart, l'objet d'aucun suivi. Au mieux peut-on retrouver dans les archives, pour les barrages les plus imposants, des documents relatifs aux suivis piézométriques durant la phase d'exploitation.
En l'absence de données, l'acquisition de ce critère nécessite la réalisation de piézomètres foncés à proximité du barrage et hors dépôt. Le coût de tels ouvrages peu profonds est modéré, mais il convient que les dispositions visant à empêcher le colmatage soient prises si l'on souhaite suivre l'évolution de la nappe sur les moyen et long termes.

Ce critère est évolutif dans le temps en fonction d'une part de l'évolution climatique, qui peut conduire selon les régions à une baisse ou une hausse de la nappe, et d'autre part des travaux anthropiques pouvant modifier les conditions de drainage et de fluctuation de la nappe.

Présence de dispositifs de gestion des eaux et d'étanchéité

Les barrages de résidus miniers, notamment les plus récents, peuvent avoir été édifiés avec des dispositifs permettant d'évacuer les eaux vers l'aval du barrage (fossés périphériques, dispositifs de surverse, dispositifs de drainage au sein et/ou en périphérie du stockage de résidus et du barrage). En revanche, il est rare de trouver de tels dispositifs pour les barrages les plus anciens.

Par ailleurs, certains bassins à résidus ont fait l'objet de travaux visant à éviter que l'eau s'infiltre dans le dépôt. Une couverture, généralement constituée de matériaux imperméables (argile) a pu en effet être mise en place dans ces cas. De la même manière il est rare de trouver de tels dispositifs pour les dépôts de résidus les plus anciens.

Il est relativement aisé d'apprécier si de tels dispositifs en surface existent, mais il est difficile d'apprécier l'existence d'ouvrages souterrains sous le massif de résidus et le corps du barrage. Des travaux visant à confirmer ou infirmer leur présence sont nécessaires dans certains cas (méthodes géophysiques et/ou sondages).

8.2.1.3 Potentialité de défaillance

Age du barrage

L'âge du barrage de résidus miniers n'est pas en soi un critère susceptible d'accroître la potentialité de défaillance de manière systématique. Des barrages très anciens en bon état peuvent s'inscrire dans un environnement ayant retrouvé, toute chose égale par ailleurs, un équilibre naturel après la période d'exploitation minière. D'autres barrages anciens, en revanche, peuvent-être vétustes de par leurs éléments constitutifs qui se sont dégradés avec le temps. Un barrage récent peut contribuer à perturber le milieu environnant, et la moindre défaillance d'un des dispositifs qui le constituent peut engendrer une défaillance.

L'âge est donc un critère d'information, généralement facile à acquérir lorsque l'on consulte les documents d'archives, qui sous-entend de nombreux paramètres qui peuvent jouer en faveur ou en défaveur d'une défaillance.

Etat du barrage

On peut s'attarder davantage sur le critère d'état du barrage de résidus miniers, ensemble de données factuelles basé sur l'analyse de documents d'archive et l'observation voire l'auscultation précise de l'ouvrage.

L'état du barrage est relatif au corps de l'ouvrage même, ainsi qu'aux ouvrages connexes de gestion des eaux.

Sur le *corps de l'ouvrage*, en premier lieu, la prise de la végétation peut constituer un facteur de dégradation. Les racines des espèces arborées peuvent en effet s'enfoncer profondément dans le matériau et le déstructurer, en cas de fort vent, par mobilisation mécanique, ou lors de la mort des végétaux, le système racinaire n'assurant plus sa fonction de rétention. Les espèces arbustives ont des racines plus superficielles et ont l'avantage de limiter les infiltrations d'eau dans l'ouvrage.

Les animaux fouisseurs peuvent dégrader la partie superficielle du corps de l'ouvrage en y créant des cavités. Celles-ci sont autant de lieux d'accumulation d'eau qui peut se propager dans le corps de l'ouvrage et provoquer des mécanismes d'érosion interne.

Par ailleurs, des travaux (reprofilage, prise de matériau) ou des aménagements anthropiques (chemins, infrastructures, surcharges) peuvent fragiliser l'ouvrage ou constituer des zones d'accumulation ou d'infiltration d'eau.

L'état des *ouvrages connexes* de gestion des eaux est un point important pour juger de l'état du barrage. La mobilisation locale, la perte de continuité et d'étanchéité de ces ouvrages avec le temps peuvent favoriser l'infiltration à proximité ou dans le barrage des eaux qui y transitent, ou encore constituer des points d'accumulation d'eau qui n'est plus drainée.

L'existence d'un *dispositif de couverture* des résidus, et son état, sont également des points importants. Une détérioration de ce dispositif peut engendrer une infiltration ponctuelle des eaux dans les résidus.

Il est relativement aisé d'apprécier par l'observation l'état du corps de l'ouvrage (végétation, présence de cavités ou de prises de matériaux), l'état des fossés latéraux, évacuateurs de crue ou autres ouvrages superficiels, dispositifs de couverture, mais il est difficile d'apprécier l'état des ouvrages souterrains sous le massif de résidus et le corps du barrage. On notera de plus que les anciens barrages manquent souvent d'informations sur la localisation de ces ouvrages souterrains, même si on peut observer leur exutoire en aval de l'ouvrage. Des inspections par caméra dans les conduites sont généralement nécessaires pour connaître l'état de ces ouvrages profonds. Pour les ouvrages anciens, des travaux préalables de localisation sont nécessaires dans certains cas (méthodes géophysiques et/ou sondages).

Il va de soi que cet état est évolutif dans le temps du fait notamment de la détérioration progressive des ouvrages et dispositifs.

Gestion du barrage

Ce critère est corollaire du précédent. Un barrage de résidus miniers à haut potentiel de risque qui est l'objet d'une gestion régulière, même simple (observations à fréquence définie, inspection régulière des ouvrages souterrains, travaux de débroussaillage ou de renforcement localisés) est, toute chose égale par ailleurs, moins prédisposé à subir des défaillances ou ruptures qu'un ouvrage qui n'est pas pris en charge par une entité qui en a la responsabilité. Il peut toutefois être difficile de maintenir dans le temps cette prise en charge.

8.2.1.4 Facteurs de conditions dégradées dans l'environnement du barrage

Facteurs climatiques

Un épisode ponctuel de forte pluviométrie (orage), ou une période de forte pluviométrie, sont des facteurs climatiques susceptibles de provoquer la défaillance ou la rupture de l'ouvrage. A titre d'exemple français, on peut citer les épisodes méditerranéens (cévenols pour les plus marquants) ou l'équivalent de plusieurs mois de précipitations tombe en quelques jours voire quelques heures (plus de 200 mm en 24 heures). La saison des pluies et la période cyclonique en milieu tropical peuvent également engendrer des précipitations très importantes sur 24 h, à l'origine de nombreuses ruptures quand on considère la bibliographie des accidents.

Nous l'avons vu, la plupart des ouvrages hydrauliques récents sont dimensionnés pour faire face à une pluviométrie pour des périodes de retour de 10, 20, 30 ans, plus rarement 100 ans. Mais tel n'est pas le cas pour la plupart des barrages de résidus miniers, dont les plus anciens.

Par ailleurs, les projections, en lien avec le réchauffement climatique, considèrent, pour certaines zones du globe, un renforcement des précipitations extrêmes : tel est le cas en France métropolitaine pour la période 2071-2100, avec une forte variabilité selon les territoires (Jouzel, 2014, [59]).

Dans ce même rapport, il est également signalé pour la fin du 21^{ème} siècle, toujours sur le territoire métropolitain, une augmentation de vagues de chaleur et d'épisodes de sécheresse. L'alternance de ces épisodes secs et de fortes pluviométries consécutives favorise l'infiltration des eaux dans les cavités

et crevasses générées dans les résidus du fait de leur très faible teneur en eau, la rupture du bassin de Malvési évoquée dans ce rapport en est une illustration.

Ces données climatiques à proximité d'un ouvrage étudié peuvent être assez aisément acquises auprès d'un service météorologique national ou régional. Les projections climatiques sur le présent siècle peuvent également être obtenues, avec une résolution et un niveau de confiance variables selon les pays et les modèles prédictifs. En France, le portail Drias (<u>http://www.drias-climat.fr/</u>) permet de connaître les simulations régionalisées selon une résolution pouvant atteindre une valeur minimale de 12 km.

Séismes

Un des facteurs connus de déclenchement du mécanisme de liquéfaction de résidus sablo-silteux (voir à ce sujet le chapitre 7.3.3) puis de défaillance ou de rupture du barrage est la survenue d'un séisme à proximité de l'ouvrage.

Le seuil de liquéfaction, en termes de valeur d'accélération générée par le séisme, est semble-t-il mal connu, et il est également tributaire du ratio entre la contrainte de cisaillement générée par le séisme et la résistance au cisaillement cyclique du matériau (Javelaud, Serratrice, 2018, [55]).

Les zonages sismiques les plus utilisés dans le monde se réfèrent à la valeur de l'accélération particulaire maximale (« peak ground acceleration », PGA). Le zonage réglementaire sismique français mis en place depuis 2011, considérant une période de retour de référence de 475 ans, qualifie l'aléa sismique de modéré dans les zones où cette accélération est supérieure à 1,1 m/s², de moyen lorsque cette valeur dépasse 1,6 m/s² et d'élevé lorsque la valeur de 3 m/s² est dépassée.

On peut, en retenant ces valeurs, considérer que l'influence d'un potentiel séisme sur la prédisposition à la rupture doit être abordée pour une valeur d'accélération supérieure à 1,1 m/s² (ou 0,1 g, g étant l'accélération de la pesanteur) et doit être l'objet d'une étude détaillée dans les zones d'accélération supérieure à 3 m/s² (ou 0,3 g). Bien entendu, il y aura lieu de considérer en premier lieu l'aptitude à la liquéfaction des résidus miniers, abordée ci-avant. Il convient également de regarder si les terrains d'assise sur lesquels le barrage est édifié ne sont pas également propices à la liquéfaction.

Il va de soi que l'on profitera de ces études pour établir une analyse de stabilité du corps du barrage qui peut être constitué avec un autre matériau. On pourra notamment se référer à ce sujet au rapport du MEDDE sur le risque sismique et la sécurité des ouvrages hydrauliques établi en 2014 [134].

Présence de vides

Les barrages de résidus miniers peuvent avoir été édifiés à proximité de vides souterrains, miniers ou d'autre origine, dont l'instabilité pourrait engendrer une mobilisation du barrage et/ou des résidus. On peut évoquer ainsi les travaux miniers souterrains (panneaux et chambres d'exploitation), les infrastructures minières (puits de mine, descenderies et galeries, sondages ou puits d'exploitation d'hydrocarbures ou de sel), mais également les vides d'origine naturelle (karst, zones de dissolution du gypse) ou anthropiques (anciennes carrières souterraines, galeries ou cavités historiques ou liées à d'anciennes infrastructures).

Il convient d'établir un recensement le plus exhaustif possible de ces cavités à proximité du barrage et du bassin de résidus miniers, au moyen des documents et plans d'archives et des indices sur le terrain. Des sondages peuvent être réalisés pour apprécier l'état des cavités peu profondes. L'objectif assigné est de savoir si une rupture de ces cavités peut engendrer une mobilisation du barrage et des résidus.

Potentialité	Facteur de prédisposition	Poids du facteur	Facilité d' acquisition par la documentation / l'observation	Investigations complémentaires possibles	A rechercher	Facteur évolutif à long terme
Potentialité de mobilisation	Nature du matériau	Elevé	*	Prélèvements, sondages, pénétromètres, fouilles à la pelle mécanique, essais en laboratoire	Granulométrie, sédimentométrie Fraction sables/silts Fuseau granulométrique Densité relative (sables)	Non
	Mode d'édification	Elevé	*	Sondages, fouilles à la pelle mécanique)	Nature du matériau (résidus ou matériau compacté) Méthode amont ou autre	Non
	Nature et état de consolidation des terrains d'assise	Modéré	**	Sondages Eventuellement essais en laboratoire	Nature rocheuse ou meuble Classification des sols Présence d'éventuels remblais	Non
Potentialité d'accumulatio	Position topographique	Elevé	***	Non pertinentes	Barrage en fond de vallée, en coteau, autre	Non
n u eau	Surface et pente du bassin versant	Elevé	**	Calculs classiques d'hydrologie	Volume de rétention, temps de concentration, en fonction d'une pluie de période de retour donnée (100 ans)	Oui
	Présence et position d'une nappe phréatique	Elevé	*/ **	Piézomètres	Profondeur et fluctuation de la nappe. Position haute dans les résidus ?	Oui
	Présence ou absence de dispositifs de drainage/d'étanc héité	Elevé	*/ ***	Le cas échéant géophysique et sondages pour présence ou non d'ouvrages souterrains	Présence ou absence de ces dispositifs	Non
Potentialité de défaillance	Age du barrage	Limité	***	Non pertinentes	Voir « état du barrage »	Oui
	Etat du barrage	Elevé	*** (corps du barrage), */ ** (ouvrages de gestion des eaux)	Reconnaissance par sondage/auscultation/camé ra/ de l'état des dispositifs de drainage souterrain Le cas échéant géophysique et sondages pour localisation des ouvrages souterrains	Corps : état, présence de cavités (animaux fouisseurs), prises de matériaux, végétation pénalisante Etat, continuité, étanchéité, maintien de la pente (absence de points bas), absence d'obstacles	Oui
	Gestion du barrage	Modéré	***	Non pertinentes	Existe-t-il un gestionnaire de l'ouvrage ? Pérennité-fiabilité dans le temps de celui-ci ? Quelles sont les dispositions de maintenance et de surveillance prises, à quelle fréquence ?	Oui
Potentialité de conditions dégradées dans l'environneme nt du barrage	Facteurs climatiques	Elevé	**	Projections climatiques spécifiques selon la particularité du site	Bilans actuels et projections à 50- 100 ans : Pluviométrie mensuelle, journalière, voire à pas de temps plus réduit selon la spécificité du site Nombre de jours de sécheresse, corrélation entre périodes de sécheresse / périodes de forte pluviométrie	Ōui
	Séismes	Variable selon les régions (zonages sismiques)	***	Non pertinentes sauf cas très spécifique	Accélération du sol au rocher. Analyse du signal / Contrainte de cisaillement associée pour cas spécifiques complexes	Non
	Présence de vides	Elevé	**	Sondages de reconnaissance des vides	Distance, profondeur, volume et état des cavités. Le barrage/ le bassin de résidus est- il dans l'aire d'influence d'une rupture potentielle de ce (ces) vide(s) ?	Oui (évolution des cavités)

Tableau 16 : Facteurs de prédisposition – Tableau de synthèse

8.2.2 Les facteurs d'intensité et d'extension géographique (cartographiques)

Nous présentons ici les principaux facteurs entrant en jeu dans l'évaluation de l'intensité et de l'extension cartographique. Ces deux objectifs d'évaluation de l'intensité et de la distance de propagation étant intimement mêlés dans le cas du phénomène de coulée, ils ont été volontairement regroupés.

De la même manière que pour les facteurs de prédisposition, la facilité ou non d'acquisition des données dans le cadre d'un ouvrage post-exploitation, la possibilité d'acquérir des précisions sur ces critères par des investigations complémentaires, et, le cas échéant, le caractère évolutif du facteur avec le temps sont abordés. Un tableau de synthèse final (Tableau 17) regroupant l'ensemble des critères est par la suite présenté.

8.2.2.1 Volume de résidus miniers

Le volume de résidus miniers stockés en arrière du barrage et pouvant être libéré est, nous l'avons vu, un facteur prééminent de l'intensité. La part du volume mobilisable sur le volume total de résidus est difficile à évaluer, s'établissant selon les auteurs entre un tiers et 100% en fonction de la proportion d'eau libre. Le volume total de résidus est donc une donnée importante à acquérir.

Pour les plus anciens barrages, il est rare de disposer de ce renseignement dans les documents d'archives. Pour les plus récents ouvrages, cette donnée peut être davantage retrouvée.

L'examen de documents tels que les anciens fonds topographiques et les anciennes photographies aériennes peut permettre d'estimer l'emprise et la géométrie de surface du bassin de résidus. Cela peut être assez aisément corroboré par l'observation de terrain où la rupture de pente, la différence de matériaux affleurants, la différence de végétation sont autant d'indices permettant la délimitation entre le terrain naturel et les résidus miniers.

Si aucun élément ne l'indique dans les documents d'archives, la hauteur des résidus miniers sur l'emprise de ceux-ci est moins aisée à acquérir. Elle peut être estimée si on juge que la pente naturelle avant la mise en dépôt était relativement homogène, mais l'exercice est plus difficile si cette pente naturelle est accidentée. Des sondages peuvent alors être réalisés, répartis sur l'aire des résidus, jusqu'au substratum. Pour les grandes surfaces les profils géophysiques peuvent également être employés si le contraste attendu entre les résidus et le substratum est important (par exemple résidus / roche massive).

8.2.2.2 Volume de l'eau libre dans les résidus miniers

Le volume d'eau libre (c'est-à-dire non liée physiquement et chimiquement aux particules de sols/résidus) au sein des résidus miniers, et notamment à proximité du barrage, est également un facteur prééminent. Cela rejoint les considérations de potentialité d'accumulation de l'eau évoquées dans les facteurs de prédisposition, mais il s'agit bien ici de facteur d'intensité et d'extension dans le sens où une augmentation de la hauteur d'eau libre en retrait du barrage peut engendrer des vitesses et distances d'écoulement plus importantes.

Ce facteur évolutif dans le temps est difficile à apprécier en dehors d'investigations spécifiques. A ce titre les investigations permettant d'évaluer le volume d'eau afférant au barrage, d'une part, et la position et la fluctuation de la nappe dans les résidus miniers, d'autre part, abordées au chapitre 8.2.1.2, sont identiques. Il est recommandé de veiller à envisager des situations dégradées (pluie centennale pour le calcul du volume de rétention, plus hautes eaux possibles dans les résidus) pour évaluer ce volume d'eau libre.

On notera que ce facteur est évolutif au regard des projections climatiques abordées au chapitre 8.2.1.4.

8.2.2.3 Hauteur du barrage

Nous avons vu que de nombreux organismes et auteurs considéraient le produit entre le volume mobilisable et la hauteur du barrage (souvent dénommé facteur de barrage) comme un paramètre pertinent d'intensité.

On peut considérer que la hauteur du barrage a une influence non négligeable sur le volume mobilisable et sur la potentielle lame d'eau libre en retrait de l'ouvrage, c'est pourquoi ce facteur est également très important.

Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, un ouvrage de faible hauteur retenant des résidus miniers répartis sur une grande surface conduira à une intensité moindre qu'un ouvrage de grande hauteur retenant des résidus de faible extension en amont.

Cette donnée à l'avantage d'être aisée à acquérir par l'observation de terrain, sauf dans le cas d'ouvrages inaccessibles ou envahis par la végétation.

On notera qu'il n'a pas été pris en compte la longueur du barrage, facteur rarement retenu dans la littérature. L'évaluation de la largeur de brèche en cas de rupture est en effet très difficile, la quasiintégralité (cas de Brumadinho, Brésil) ou partie de l'ouvrage pouvant être mobilisée de manière instantanée ou par ruptures successives sur un temps restreint.

8.2.2.4 Pente et morphologie de l'aval

En aval du barrage de résidus miniers, la pente et la morphologie du terrain jouent un rôle indéniable à la fois sur l'intensité (hauteur, vitesse) et l'extension de la coulée. Les supports topographiques permettent d'avoir une idée globale de la topographie, mais l'échelle est trop petite pour apprécier les variations locales de pente, les obstacles, la végétation, les infrastructures et bâtiments. Aussi une observation détaillée de terrain est indispensable pour relever ces éléments.

Si l'on souhaite réaliser des modèles d'écoulement en 3D, lorsque la prédisposition à la rupture le justifie, on peut réaliser des Modèles Numériques de Terrain (MNT) précis. De nombreux outils permettent dorénavant d'obtenir une topographie et une photographie orthoréférencée détaillées : relevés classiques de géomètre, scan laser terrestre ou Lidar aéroporté (ces deux derniers nécessitant une faible végétalisation de la zone étudiée), ...

Ce facteur est évolutif, dans la mesure où les essences végétales peuvent se développer et varier, et où l'occupation anthropique (bâtiments, infrastructures) peut également être modifiée.

Facteur d'intensité	Poids du facteur	Facilité d' acquisition par la documentation / l'observation	Investigations complémentaires possibles	A rechercher	Facteur évolutif à long terme
Volume des résidus	Elevé	*	Sondages, profils géophysiques si le contraste est fort entre les résidus et le substratum Lien avec les critères « nature du matériau » et « mode d'édification » du Tableau 16	Hauteur de résidus en plusieurs points, maillage à adapter en fonction de la surface des résidus et la variabilité topographique attendue du terrain sous les résidus	Non
Volume d'eau libre	Elevé		Calculs classiques d'hydrologie Piézomètres (a minima un à proximité du barrage) Projections climatiques spécifiques selon la particularité du site Lien avec les critères « surface et pente du bassin versant », « présence et position d'une nappe phréatique » et « facteurs climatiques » du Tableau 16	Volume de rétention, temps de concentration, en fonction d'une pluie de période de retour donnée (100 ans) Profondeur et fluctuation de la nappe dans les résidus. Valeur de PHE dans les résidus Bilans actuels et projections à 50-100 ans : Pluviométrie mensuelle, journalière, voire à pas de temps plus réduit selon la spécificité du site	Oui
Hauteur du barrage	Elevé	***	Non pertinentes, sauf travaux permettant l'accès dans des zones particulières (lieu escarpé, végétation)	Hauteur, (largeur, longueur)	Non
Pente et morphologie de l'aval	Elevé	*	Relevés géomètres, scan laser terrestre, lidar aéroporté, établissement d'un MNT	Pente totale, pente par tronçons, morphologie, largeur, obstacles naturels ou anthropiques, nature du couvert végétal	Oui

Tableau 17 : Facteurs d'intensité – Tableau de synthèse

8.2.3 Eléments d'estimation de l'intensité et de l'extension géographique

Nous regroupons ici les éléments issus de la bibliographie compulsée permettant d'estimer l'intensité du phénomène et son extension géographique. Les chapitres précédents ont permis de montrer la

difficulté d'évaluation de ces paramètres, aussi nous insistons sur le fait que les modèles parcourus ne permettent que d'avoir une première idée de l'estimation de la propagation de la coulée.

Il s'agira de confronter ces estimations avec la présence, ou non, d'enjeux en aval du barrage (habitations, infrastructures, bâtis, zones et chemins touristiques, ...).

Tableau 18 : Estimation de l'intensité et de la distance parcourue – Synthèse des modèles évoqués dans le rapport

Paramètre estimé	Modèle	Chapitre et annexe	Articles	Commentaires
Hauteur de coulée	Lucia et al. Mécanique du solide déformable	7.5.4 Annexe 3	[66]	Estimation indirecte de la hauteur en fonction de la distance parcourue. Emploi simple (tableur Excel). Non valable pour des pentes aval supérieures à 9°. Utilisation avec prudence au-delà de 5° Sous-estimation de la distance → surestimation de la hauteur
	Ritter Mécanique des fluides newtoniens	7.5.5 Annexe 4		Solutions pratiques et faciles d'utilisation (intégration sous Tableur Excel) Non valable pour des pentes aval supérieures à 9°. Utilisation avec prudence au-delà de 5° Surestimation de la hauteur
Vitesse de coulée	Ritter Mécanique des fluides newtoniens	7.5.5 Annexe 4		Solutions pratiques et faciles d'utilisation (intégration sous Tableur Excel) Non valable pour des pentes aval supérieures à 9°. Utilisation avec prudence au-delà de 5° Surestimation de la vitesse
	Jeyapalan et al. Mécanique des fluides de type Bingham	7.5.5 Annexe 4	[56]	Données d'entrée peu aisées à acquérir (viscosité plastique, seuil de cisaillement). La pente aval peut être intégrée. Surestimation de la distance → sous-estimation possible de la hauteur
Distance parcourue par la coulée	Rico et al. Statistique	7.5.3 Annexe 2	[87]	Solutions pratiques et faciles d'utilisation (abaques). Nécessite d'évaluer le volume mobilisable de résidus (Tableau 10 chapitre 7.5.2) Coefficients de corrélation faibles dans le cadre d'une régression simple Courbe-enveloppe surestime la distance
	Jeyapalan et al. Mécanique des fluides de type Bingham	7.5.5 Annexe 4	[56]	Données d'entrée peu aisées à acquérir (viscosité plastique, seuil de cisaillement). La pente aval peut être intégrée. Surestimation de la distance

Des estimations empiriques de débit sont également abordées dans le corps du rapport. Ce paramètre étant non directement relié à une intensité, il n'est pas abordé dans ce tableau.

Nous rappelons qu'en cas de pente aval forte la plupart de ces modèles ne sont plus valables, les études spécifiques devenant inévitables.

8.2.4 Proposition d'évaluation de l'aléa

Le Tableau 19 propose des niveaux d'aléa « coulée » en fonction des classes de prédisposition et d'intensité, selon l'esprit et la nomenclature adoptée du guide des aléas miniers de l'Ineris [49]. Du fait du caractère potentiellement dommageable de ce phénomène, il n'est pas retenu d'aléa de niveau faible et d'intensité de classe limitée. L'analyse de facteurs de prédisposition tels que la nature des matériaux et le mode d'édification du barrage peuvent conduire à considérer une non-pertinence du phénomène, ceci est rappelé dans le tableau.

Bien entendu la non-pertinence de cet aléa n'exclut pas d'apprécier et d'évaluer les autres phénomènes de mouvement de terrain en lien avec ces ouvrages.

Il n'est pas donné ici de poids aux facteurs conduisant à telle classe de prédisposition ou d'intensité. L'analyse des facteurs des chapitres 8.2.1 et 8.2.2 doit permettre à l'expert en charge d'une étude sur un site spécifique d'en évaluer les classes.

Intensité Prédisposition	Modérée	Elevée	Commentaires sur la pertinence/prédisposition				
Non pertinent	١	Nul	Les facteurs tels que la nature du matériau et le mode d'édification du barrage peuvent être des facteurs de non-pertinence (matériau graveleux ou blocs, mode d'édification)				
Peu sensible	Moyen	Fort	L'analyse des facteurs du chapitre 8.2.1 doit permettre d'évaluer				
Sensible à très sensible	Fort	Fort	une classe de prédisposition				
Commentaires sur l'intensité	L'analyse des facteur permettre d'évaluer Conformément au gu compte tenu du ca dommageable de l'a pas tenu compte d'un	s du chapitre 8.2.2 doit une classe d'intensité. uide des aléas miniers, ractère potentiellement léa « coulée », il n'est le intensité limitée					

Tableau 19 : Proposition de niveaux de l'aléa coulée

9 Conclusions

Les barrages de résidus miniers en situation de post-exploitation peuvent générer des aléas dommageables de type coulée, dont les critères de pertinence, de prédisposition et d'intensité ont été exposés dans le présent rapport, sur la base d'une bibliographie et de retours d'expérience de la profession.

La difficulté provient du fait que la plupart des ouvrages sont somme toute relativement récents, et que leur tenue dans le temps est relativement mal connue. L'évolution des conditions climatiques est notamment un facteur pouvant augmenter les conditions de rupture et l'intensité du phénomène.

Par ailleurs, les zones à proximité des barrages peuvent être l'objet d'une anthropisation progressive, ou au contraire d'une végétalisation progressive conduisant à la perte de connaissance de leur existence.

Toutefois, les facteurs de prédisposition à la rupture sont relativement appréhendables lors d'une étude sur un site spécifique, même s'ils peuvent nécessiter des investigations complémentaires ; ces facteurs ont été regroupés dans ce rapport en quatre familles relatives à la potentialité de mobilisation des résidus, à la potentialité d'accumulation d'eau, à la potentialité de défaillance du barrage et à la potentialité de conditions dégradées dans son environnement.

La principale source de difficulté est l'évaluation de l'intensité du phénomène, c'est-à-dire la hauteur voire la vitesse des boues après rupture. Elle n'est pas aisée à déterminer, car elle combine de multiples facteurs relatifs aux résidus (teneur en eau, rhéologie du matériau, etc.) aux conditions de leur stockage (hauteur du barrage) et à la morphologie du terrain en aval. Le présent document s'est attaché à indiquer des modèles relativement simples permettant une première estimation de l'intensité afin de pouvoir, sur un site spécifique donné, évaluer si des enjeux peuvent être impactés.

Les outils exposés ici ne sont pas, loin s'en faut, une fin en soi : si sur un site il est évalué un aléa élevé avec des enjeux exposés, des investigations spécifiques et des modèles plus poussés doivent être réalisés.

Au vu de la multitude d'ouvrages parfois imposants qui ne sont plus exploités, ou pour lesquels l'exploitant n'est plus présent, se pose alors la question de l'inventaire des ouvrages où de tels risques peuvent survenir dans les prochaines années ou décennies. Ce risque est globalement maîtrisé en France métropolitaine où les ouvrages potentiellement dangereux ont été recensés, même s'ils nécessitent une certaine vigilance et une gestion appropriée (surveillance, maintenance), mais tel ne semble pas être le cas dans certains autres pays d'Europe et du monde.

Cette question de hiérarchisation des sites sensibles au regard de ruptures dangereuses et/ou à fort impact environnemental, permettant par la suite des analyses ciblées, doit être au cœur des préoccupations des pays où l'exploitation minière est prégnante, mais elle doit également se poser pour les pays où l'exploitation minière décline et où des accidents pourraient survenir dans le futur.

La gestion de ces ouvrages évolutifs dans le temps est également une préoccupation importante. Dans les situations où l'exploitant minier ne gère plus l'ouvrage et que celui-ci devient à charge, selon le cas local, de l'administration, de la collectivité, ou encore de propriétaires privés, des modalités de surveillance et d'entretien homogènes et partagées doivent être établies afin que les ouvrages ne soient pas oubliés et ne constituent pas une source de danger à retardement.

10 Références

10.1 Documents consultés

[1]. Agurto-Detzel H., et al., 2016. The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. Geophysical Research Letters 43(10): 4929-4936

[2]. Aires U. R. V., et al, 2018. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. Land Use Policy 70 (2018) : 63-70

[3]. <u>https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/39857/</u> (rupture du barrage de Stava, Italie)

[4]. <u>https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/47369/</u> (rupture du barrage de Fundao, Brésil)

[5]. <u>https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/46323/</u> (rupture du barrage des Montmins, Echassières, France)

[6]. https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/26764/ (rupture de la digue Malvési, Narbonne, France)

[7]. Atkinson G. M., 2016. Analysis of ground motions from Nov. 5, 2015 earthquake sequence neaur Fundao dam, Brazil

[8]. Arrêté du 19 avril 2010 relatif à la gestion des déchets des industries extractives

[9]. Azam S, Li Q., 2010. Tailings dam failures : a review of the last one hundred years

[10]. Banu, D. M., Mihai, S., 2016. The probabilistic modeling of safety factor for mining tailing ponds. 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, Sgem 2016: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Vol Ii. Sofia, Stef92 Technology Ltd: 921-928

[11]. Beebe R. R., 2001. Process considerations before and after failure of the Omai tailings dam, August 19 to 24, 1995. Warrendale, Minerals, Metals & Materials Soc

[12]. Bjelkevic A., Knutsson S, 2006. Failures and incidents at Swedish tailings dams – experiences and comparisons

[13]. Blight G. E., et al., 1983. The behavior of mine tailings during hydraulic deposition. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy

[14]. BRGM, 1980. Fiches signalétiques de digues à stériles concernant quelques exploitations minières françaises. 80 SGN 433 GEG

[15]. BRGM, 2012. Caractérisation des déchets miniers de quatre mines d'or de Guyane. RP-61027-FR

[16]. BRGM, 2012. Digues de barranques et de lagunes d'exploitations minières en Guyane : guide de bonnes pratiques. RP-61065-FR

[17]. Castro-Bolinaga C. F., Zavaleta E. R. Diplas P., 2014. A coupled modelling effort to study the fate of contaminated sediments downstream of the Comes Hill deposit, Virginia, USA. Sediment Dynamics from the Summit to the Sea. IAHS Publ. 367, 2014

[18]. Center for Science in Public Participation (CSP2), 2019. World mine tailings failures – from 1915. About the database. Fichier Excel associé "World-MineTailings-Failures-as-of-March-12019", https://worldminetailingsfailures.org/

[19]. Chambers D. M., Higman B., 2011. Long term risks of tailings dam failure

[20]. Chanson H, 2005. Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave

[21]. Code de l'environnement, articles R541-7 et R541-8

[22]. Commission Européenne, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 2009. Document de référence sur les meilleures techniques disponibles. Gestion des résidus et stériles des activités minières.

[23]. Costa, J. E., 1985. Floods for dam failures. United States Department of the Interior Geological Survey.

[24]. Davies, M. R, 2001. Impounded mine tailings: What are the failures telling us?" Cim Bulletin 94(1052): 53-59

[25]. Davies, M. P., T. E. Martin, et al, 2000. Upstream constructed tailings dams - A review of the basics. Leiden, A Balkema Publishers.

[26]. Décision n° 2000/532/CE du 03/05/00 remplaçant la décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en application de l'article 1er, point a), de la directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets et la décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en application de l'article 1er, paragraphe 4, de la directive 91/689/CEE du Conseil relative aux déchets dangereux

[27]. Décret 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées

[28]. Décret 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sureté des ouvrages hydrauliques

[29]. Directive 2006/21/CE du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE

[30]. Edraki, M., et al., 2014. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. Journal of Cleaner Production 84 : 411-420

[31]. Eriksson, N., Adamek, P., 2000. The tailings pond failure at the Aznalcollar mine, Spain. Enviironmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production

[32]. European Commission, JRC Science for Policy Report, 2018. Best available techniques (BAT) reference document for the management of waste from extractive industries, in accordance with directive 2006/21/EC

[33]. Franca, M. J., et al., 2008. The failure of the Fonte Santa mine tailing dam (Northeast Portugal). London, Taylor & Francis Ltd

[34]. http://fundaoinvestigation.com/ (rupture barrage Fundao, Germani Mine, Brésil)

[35]. GEODERIS, 2012. Inventaire des dépôts issus des exploitations minières selon l'article 20 de la directive 2006/21/CE. Synthèse des résultats. Rapport N2012/009DE – 12NAT2120

[36]. Ginige, T., 2002. Mining waste : the Aznalcollar tailings pond failure. European Environmental Law Review

[37]. Hallman, D. S., Dorey, R., 1995. Mine tailings deposition practices, liquefaction potential and stability implications. Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics

[38]. Hossain, M. S., Fourie, A., 2013. Stability of a strip foundation on a sand embankment over mine tailings. Geotechnique 63(8): 641-650

[39]. Huang., S., et al., 2014. Stability evaluation of fill dam in graphite mine tailings impoundment. Advanced materials Research Vols 1010-1012 (2014) pp 288-291

[40]. Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal

[41]. ICOLD, 1982. Manual on Tailing Dams and Dumps. Manuel des barrages et dépôts de stériles. Bulletin 45

[42]. ICOLD, 1989. Tailing Dams Safety. Guidelines. Barrages de stériles miniers. Recommandations. Bulletin 74

[43]. ICOLD, 2001. Tailngs Dams. Risk of Dangerous Occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121

[44]. Ineris, 2009. Appui technique pour l'élaboration et l'actualisation de la réglementation liée à la gestion des déchets. Transposition de la Directive 2006/21/CE relative à la gestion des déchets des industries extractives. Ineris-DRS-09-103738-08175A

[45]. Ineris, 2012. Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques concernant les ouvrages de rétention industriels de grande hauteur en matériau meuble. Ineris-DRS-10-110463-09795C

[46]. Ineris, 2013. Appui technique pour le suivi et le traitement géotechnique de la stabilité des retenues de Cotillon. Echassières (03). Ineris-DRS-13-138776-12132A

[47]. Ineris, 2014. Document pédagogique pour l'établissement de prescriptions sur les bassins de retention industriels. Version B. Ineris-DRS-13-133405-04385B

[48]. Ineris, Cerema, Geoderis, 2017. Guide de gestion du risque minier post-exploitation. INERIS-DRS-17-164640-01814A

[49]. Ineris, 2018. Guide d'évaluation des aléas miniers. Ineris 17-164640-01944A

[50]. Ineris, 2019. Eléments relatifs à la rupture du barrage minier du complexe de Corrego de Faijao, Brumadinho, Minas Gerais, Brésil. Ineris-DRS-19-178736-00915A

[51]. Ineris, 2020. Recherche documentaire sur les impacts écologiques liés aux ruptures de barrages miniers. Ineris - 200243 - 664453

[52]. International Commission on Large Dams, 1983. Deterioration of dams and reservoirs. Examples and their analyses

[53]. International Council on Metals and the Environment, 1998. Case studies on tailings management. ISBN 1-895720-29-X

[54]. Jamiolkowski, M., 2014. Soil mechanics and the observational method: challenges at the Zelazny Most copper tailings disposal facility. Geotechnique 64(8): 590-619

[55]. Javelaud, E., Serratrice, J.-F., 2018. La liquéfaction des sols sous l'effet des séismes. Techniques de l'Ingénieur

[56]. Jeyapalan, J.K., Duncan, J.M., Seed, H.B., 1983. Analyses of flow failures of mine tailings dams

[57]. Jeyapalan, J.K., Duncan, J.M., Seed, H.B., 1983. Investigation of flow failures of mine tailings dams

[58]. Johnson, A.M., 1984. Debris flow

[59]. Jouzel, 2014. Le climat de la France au XXXIème siècle. Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer

[60]. Ju, H. Y., et al., 2012. Analysis of Safety and Risk Factors about the Tailings Dam in the Metal Mines. Advances in Industrial and Civil Engineering, Pts 1-4. L. H. Wang and G. Xu. Durnten-Zurich, Trans Tech Publications Ltd. 594-597. 299

[61]. Kossoff D., et al, 2014. Mine tailings dams : characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry 51

[62]. Kourdey, A., 2002. Une approche mixte (numérique/équilibre limite) pour le calcul de stabilité des ouvrages en terre. Développement et application aux barrages et talus miniers. Mémoire de thèse de l'INPL

[63]. Li, Y., et al., 2013. The analysis of stability of mine's tailing dam based on the FLAC(3D). Advances in Civil and Industrial Engineering, Pts 1-4. L. Tian and H. Hou. Durnten-Zurich, Trans Tech Publications Ltd. 353-356. 650

[64]. Liu, R. et al, 2015. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings in Guanting reservoir watershed, Zhangjiakou City, China. International Journal of Environmental Research and Public Health

[65]. Loupasakis, C. and G. Konstantopoulou (2010). "Safety assessment of abandoned tailings ponds: an example from Kirki mines, Greece." Bulletin of Engineering Geology and the Environment 69(1): 63-69

[66]. Lucia, P.C., Duncan, J.M., Seed, H.B, 1981. Summary of research on case histories of flow failures of mine tailings impoundments. Technology Transfer Workshop on Mine Waste Disposal Techniques, Information Circular 8857, U.S. Bureau of Mines pp. 46-53

[67]. Luino, F., De Graff, J. V., 2012. The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy) : a disaster that effective regulation might have prevented. Natural Hazards and Earth System Sciences 12 : 1029-1044

[68]. Luminita, D. P., D. Stematiu, et al., 2014. STRUCTURAL SAFETY OF MINING TAILINGS REFLECTED IN NATIONAL AND EUROPEAN REGULATIONS. Geoconference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Sgem 2014, Vol Iii. Sofia, Stef92 Technology Ltd: 559-566.

[69]. Lv, S. R., Lv, S. J., 2011. The discussion about the safety management of the mine tailings pond near the mine stope. Ismsse 2011. X. He, H. Mitri, N. Azizet al. Amsterdam, Elsevier Science Bv. 26. Na

[70]. Ma, S. Q., et al., 2012. Seepage-Stability Analysis of a Mine Tailings Dam in Yunnan Province Based on ANSYS. Vibration, Structural Engineering and Measurement Ii, Pts 1-3. C. Zhang and P. P. Lin. Durnten-Zurich, Trans Tech Publications Ltd. 226-228. 1406

[71]. Macias, J. L., et al., 2015. The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacan, Mexico. Natural Hazards and Earth System Sciences 15(5): 1069-1085

[72]. Mara, S., et al, 2011. NATECH events at the tailing dams – risk, hazard and vulnerability assessment. IMWA 2011

[73]. Martin, V. et al, 2015. Challenges with conducting tailings dam breach studies. Proceedings Tailings and Mine Waste

[74]. MEDDE, 2015. Référentiel technique digues maritimes et fluviales

[75]. Mei, G., 2011. Quantitative assessment method study based on weakness theory of dam failure risks in tailings dam. First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering

[76]. Meriggi R., Del Fabbro M., Blasone E., Zilli E., 2008. Dynamic slope stability analysis of mine tailing deposits : the case of Raibl mine. AIP Conference Proceedings 1020

[77]. Ministère de l'Economie et des Finances, BRGM, Mine & Société, 2017. Exploration et exploitation minière en Guyane. Tome 8

[78]. Morgenstern N. R., Vick S. G., Viotti C. B., Watts B. D., 2016. Fundao talilings dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundao dam

[79]. Nimbalkar, S., et al, 2018. A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams. Journal of Rock Mechanics abd Geotechnical Engineering 10 (2018) : 1082-1090

[80]. Official Journal of the South African Coal Processing Society and the SA Flameproof Association. Tragedy at Merriespruit

[81]. Ozcan, N. T., et al., 2013. A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). Environmental Earth Sciences 69(6): 1871-1890

[82]. Pastor, M., et al., 2002. Modelling tailings dams and mine waste dumps failures. Géotechnique 52, No. 8, 579-591

[83]. Pirulli, M., et al, 2017. The failure of the Stava valley tailings dams (Northern Italy) : numerical analysis of the flow dynamics and rheological properties. Geoenvironemental Disasters

[84]. Psarropoulos, P. N., Y. Tsompanakis, N., 2008. Stability of tailings dams under static and seismic loading." Canadian Geotechnical Journal 45(5): 663-675.

[85]. Quecedo, M., et al., 2004. Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method. International Journal for Numerical Methods in Engineering 59(6) : 755-794.

[86]. Règlement (UE) n° 1357/2014 de la Commission du 18/12/14 remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives

[87]. Rico, M., Benito, G., Diez-Herero, A., 2007. Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials 154(1-3): 79-87

[88]. Rico, M., et al., 2007. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials 152(2) : 846-852

[89]. Robertson, P. K., De Melo, L., Williams, D. J., Ward Wilson, G., 2019. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I

[90]. Roche, C., K. Thygesen, Baker, E., 2017. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi and Arendal, United Nations Environment Programme and GRID-Arendal: 70.

[91]. Rudolph, T., Coldewey, W. G., 2009. Implications of earthquakes on the stability of tailing dams. Ostrava, Vsb-Tech Univ Ostrava

[92]. Santamarina J. C., Torres-Cruz L. A., Bachus R. C., 2019. Why coal ash and talings dam disasters occur. Science 364 (6440) : 526-528

[93]. Shakesby, R. A., Whitlow J. R., 1991. "Failure of a mine waste dump in Zimbabwe : causes and consequences. Environmental Geology and Water Sciences 18(2) : 143-153

[94]. Song, L., et al., 2012. On the Seepage Stability of a Tailing Dam in Wushan Copper Mine. Advances in Industrial and Civil Engineering, Pts 1-4. L. H. Wang and G. Xu. Durnten-Zurich, Trans Tech Publications Ltd. 594-597. 207

[95]. Spence, K.J., 1992. Investigation of flowsides from the failure of mining tailing dams. University of Sheffield

[96]. Sun, E. et al., 2012. Tailings dam flood overtopping failure evolution pattern. International Conference on Modern Hydraulic Engineering

[97]. Swidzinski, W., et al., 2016. Stability analysis of Zelazny most tailings dam loaded by mining-induced earthquakes. Dordrecht, Springer

[98]. United Nations Environment Program, 2017. Mine tailings storage : safety is no accident. A rapid response assessment.

[99]. http://www.vale.com/EN/aboutvale/news/Pages/Clarifications-regarding-Dam-I-of-the-Corrego-do-Feijao-Mine.aspx

[100]. Vick, S. G., 1983, 1990. Planning, design and analysis of tailings dams. ISBN 0-921095-12-0

[101]. Vick, S.G, 1983. Analyses of flow failures of mine tailings dams / Investigation of flow failures of tailing dams. Discussio

[102]. Vick, S.G., 1996. Failing of the Omai tailings dam. Geotechnical News

[103]. Villavicencio, G., et al., 2016. Liquefaction potential of sand tailings dams evaluated using a probabilistic interpretation of estimated in- situ relative density. Revista De La Construccion 15(2): 9-18

[104]. www.wise-uranium.org. Chronology of major tailings dam failures

[105]. <u>https://worldminetailingsfailures.org/</u>. World mine tailings failures – from 1915

[106]. <u>https://worldminetailingsfailures.org/corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/</u> (page spécifique rupture du barrage de Brumadinho)

[107]. Xin, Z., et al, 2011. Study on the risk assessment of the tailings dam break. First international Symposium of Mine Safety Science and Engineering

[108]. Xu, B., Wang, Y., 2015. Stability analysis of the Lingshan gold mine tailings dam under conditions of a raised dam height. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 74 (1): 151-161.

[109]. Yin, G. Z., G. Z. Li, et al., 2011. Stability analysis of a copper tailings dam via laboratory model tests: A Chinese case study. Minerals Engineering 24(2): 122-130

10.2 Documents cités mais non consultés

[110]. Blight, J. E., 1969. Shear stability of dumps and dams of gold mining waste. The Civil Engineering in South Africa, v. 11, p. 49-55

[111]. Breitenbach, A.J., 2010. Overview : tailings disposal and dam construction practices in the 21st century. International Conference on Talings & Mine Waste, vol 10, pp 49-57

[112]. Bryant S., Duncan J. M., Seed H. B., 1983. Application of tailing flow analyses to field conditions. US Department of Interior, Bureau of mines, Open-File Report 53-84

[113]. Caldwell J.-A., Smith A., 1985. Material considerations in the design of downstream embankments for tailing impoundments. Mining Science and Technology, Vol. 3, pp 35-49

[114]. CANMET, 1977. Pit slope manual, chapter 9 : waste embankments. Canada Centre for Mineral and Energy Technology Report 77-01, Canadian Government Publishing Centre, Ottawa

[115]. Commission Internationale des Grands Barrages, 1995. Dépôts de stériles. Transport, mise en place et décantation.

 [116]. Espinace, R., Villavicencio, G., Lemus, L., 2013. The PANDA technology applied to design and operation of tailings dams. Tailings 2013 : First International Seminar on Tailings Management, Santiago

[117]. Hanks, R. W., Pratt, D.R., 1967. On the flow of Bingham plastic slurries in pipes and between parallel plates. Journal of Society of Petroleum Engineers 7 : 342-346

[118]. Hutchinson, J. N., 1986. A sliding-consolidation model for flow slides. Can. Geotech. J. 23, 115-126

[119]. ICOLD, 2006. Improving Tailings Dam Safety, Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure, Bulletin 139, International Commission on Large Dams-United Nations Environmental Programme, Draft December 11, 2006

[120]. Iverson, R.M., LaHusen, R.G., 1993. Friction in debris flows : inferences from large-scale flume experiments. Proceedings Conference on Hydraulic Engineering, 1604-1609, San Francisco : ASCE

[121]. Jin, M., Fread, D.L., 1997. One-dimensional routing of mud/debris flows using NWS FLDWAW model. Debris-flow hazards mitigation : Mechanics, prediction and assessment, pp. 687-696. New York : American Society of Civil Engineers

[122]. Li, W., 2006. Hydraulics Reckoner, 2nd ed. China Water and Power Press, Beijing

[123]. Pells, S., Fell, R., 2003. Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping. Proceedings of the 21st internal congress on large dams, Montreal. ICOLD, Paris Q83-R17, pp 62-29

[124]. Rickenmann, D., et al, 2003. Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In Debris-flow hazards mitigations : mechanics, prediction, and assessment, ed. D. Rickenmann and c. Chen, 883-894

[125]. Sarsby, R.W., 2000. Environmental Geotechnics. Thomas Telford, London

[126]. Singh, V.P., 1996. Dam breach modeling technology. Springer Science & Business Media : Dordrecht, The Netherlands

[127]. Swaisgood, JR., 2003. Embankment dam deformations caused by earthquakes. Proceedings of the 2003 Pacific conference on earthquake engineering

[128]. Takahashi, T., et al, 1992. Routing debris flows with particle segregation. Journal of Hydraulic Engineering 118 (11): 1490-1507

[129]. Takahashi, T., 2007. Debris flows : Mechanics, predictions and countermeasures. Rotterdam : Monograph, Balkema

[130]. Thual, O., 2003. Dérivations des équations de Saint Venant. Cours Institut National Polytechnique de Toulouse.

[131]. Troncoso, J.H., 1990. Faliure risks of abandoned tailings dams. Proc. Int. Sump. On Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, Int. Commission on Large Dams, Paris, pp 82-89

[132]. Tsushida, H., 1970. Prediction and counter measure against the liquefaction in sand deposits. Seminar Abstract In : Port Harbour Research Institute, pp 3.1-3.33

[133]. Xu, Y.Y., Qiao, Y.A., 1983. Several problems on dam breach numerical calculation, Yellow River (in Chinese)

[134]. MEDDE, 2014. Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques

ANNEXES

- Annexe 1 : tableau des principales ruptures, établi par l'Ineris sur la base des données de <u>http://www.wise-uranium.org/mdaf.html</u>, complétées par les éléments des documents compulsés (classement par continent puis par année décroissante)
- Annexe 2 : modèles statistiques (extrait du rapport Ineris, 2009, [44])
- Annexe 3 : estimation de la pente et de la distance parcourue. Modèle de Lucia et al. [66] dans le cadre de la mécanique du solide déformable (extrait du rapport Ineris, 2009, [44])
- Annexe 4 : modèles élaborés dans le cadre de la mécanique des fluides (extrait du rapport Ineris, 2009, [44])

Annexe 1 : tableau des principales ruptures, établi par l'Ineris sur la base des données de <u>http://www.wise-uranium.org/mdaf.html</u>, complétées par les éléments des documents compulsés (classement par continent puis par année décroissante)

Nom 🚽	Continent 🖵	Pays, Région 🚽	Année 🖵	Substance 🚽	Caractéristiques barrage	Caractéristiques dépôts	Caractéristiques aval 🚽	Caractéristiques désordre	Causes principales évoquées	Conséquences 🛛 🚽	Commentaires 🚽	Sources consultées	Détails sur internet 🛛 🚽
Kokoya	AFR	Liberia	2017	Or				11500 m3 de résidus mobilisés	Rupture de géomembrane / débordement après fortes pluies	Rivière et ressource en eau contaminées		Wise-uranium.org	
Nchanga	AFR	Zambie	2006	Cuivre				Rupture d'un pipeline menant de l'usine à la décantation		Résidus très acides contaminant la rivière. Consommation d'eau interdite aux riverains aval		Wise-uranium.org	
Merriespruit	AFR	Afrique du Sud	1994	Or	Rétention circulaire, méthode amont, hauteur 31 m	7 M m3		Brèche 150 m de large, 600 000 m3 de résidus et 90 000 m3 d'eau mobilisés, Distance parcourue 2km, 400 m de largeur	Débordement suite à un orage, revanche insuffisante, instabilité de pente et liquéfaction	17 morts	Dépôt non actif	SA Mining World, Davies 2001, Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Arcturus	AFR	Zimbabwe	1978	Or	Rétention circulaire, Hauteur 25 m, pentes 38 à 42°	Montêe du dépôt 1,6 m∕an		Brèche de 55 m de large, 21000 m3/30 000 tonnes mobilisés, distance parcourue 300 m, pente moyenne 2°	Pluie intense excédant les capacités du drainage vertical, Drainage basal inadéquat nécessitant au préalable de foncer des tuyaux dans les digues. Relief de la base amenant les eaux en partie centrale de la retenue (partie la plus haute), pent e élévée des digues latérales, saturation de ces digues	1 mort		Shakesby, 1991, Rico et al, 2007	
Bakofeng	AFR	Afrique du Sud	1974	Platine	Rétention circulaire, hauteur 20 m, méthode amont	13 M m3	Pente 1°	3M m3 mobilisés, distance parcourue 600 m. Pente finale 1,3°	Erosion par percolation concentrée	12 morts, rivière atteinte et transport sur 45 km		Lucia et al 1981, Wise- uranium.org, Rico et al 2007	
Mufulira	AFR	Zambie	1970	Cuivre	Méthodeamont			Environ 1M t mobilisées	Liquéfaction de tailings	Mort de 89 mineurs		Wise-uranium.org	
San José de Los Manzanos	AME	M exique	2020	Plomb, zinc				6000 m3 mobilisés		Route, rivière atteintes, 8000 m2 se terrain impactés		Wise-uranium.org	
Corrego de Faijao, Brumadinho	AME	Brésil	2019	Fer	Hauteur 87 m surélevée à dix reprises, longueur en crête 720 m, méthode amont, construction 1976	11,7 millions de m3 stockés sur 249 500 m2		Rupture de la partie supérieure du barrage, bombement de la partie inférieure et perte de structure de l'ensemble de l'ouvrage	Pente trop raide de l'ouvrage, présence de résidus de faibles caractéristiques près de la crête, édification des barrages supérieurs au-dessus de résidus fins de plus faibles caractéristiques, manque de drainage interne important qui a entraîné un niveau d'eau constamment élevé dans le barrage, forte teneur en fer au sein des résidus, les rendant potentiellement très fragiles en condition non drainées, précipitations régionales élevées et intenses avant la rupture	249 morts, 21 disparus		Wise-uranium.org, Robertson et al 2019	http://www.vale.com/EN/ab outvale/news/Pages/Clarific ations-regarding-Dam-I-of- the-Corrego-do-Feijao- Mine.aspx https://worldminetailingsfail ures.org/corrego-do-feijao- tailings-failure-1-25-2019/
Machadinho d'Oeste	AME	Brésil	2019	Plomb					Fortepluviométrie	Sept ponts endommagés, 100 familles isolées	Barrageinactif	Wise-uranium.org	
Nossa Senhora do Livramento	AME	Brésil	2019	Or						Distance parcourue 1 à 2 km, ligne électrique atteinte		Wise-uranium.org	
Cobriza	AME	Pérou	2019	Cuivre				67188 m3 de résidus mobilisés		41574 m2 recouverts,		Wise-uranium.org	
Barcarena	AME	Brésil	2018	Bauxite					Débordement suite à fortes pluies	Ressource en eau		Wise-uranium.org	
Cieneguita	AME	Mexique	2018	Or, argent				249 000 m3 de résidus et 190 000 m3 de matériau de barrage mobilisés, 29 km parcourus		3 morts, 4 disparus		Wise-uranium.org	
Huancapati	AME	Pérou	2018					80 000 m3 de résidus mobilisés	Fortepluviométrie	Rivières contaminées		Wise-uranium.org	
New Wales plant, Mulberry	AME	USA, Floride	2016	Phosphate				phosphogypse où se sont engouffrés		Floride, ressource majeure		Wise-uranium.org	
Fundao, Germano mine, Bento Rodrigues	AME	Brésil	2015	Fer	Longueur 500 m, hauteur 90 m			32 M m3 mobilisés	Elévation, saturation et liquéfaction des sables contaminés par des résidus, près de la culée gauche du barrage, rupture et mobilisation de ceux-ci. Des séismes de magnitude faible ont pu participer à la cause (effets induits par ces séismes : détérioration/fissure préliminaire du barrage davantage envisagé que liquéfaction des résidus)	158 maisons détruites, 19 morts. Rivières contaminées sur 663 km cumulés. 15 km 2 de part et d'autre des rivières contaminés		Wise-uranium.org, Agurto- Detzel et al 2016, Morgenstern et al. 2016, Roche et al. 2017	http://fundaoinvestigation.c om/ https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/accident/47 369/
Herculano	AME	Bresil Canada, Colombie	2014	Fer				7,3 M m3 de résidus, 17 M m3 d'eau	Pupturo do la fondation	2 morts, 1 disparu		Wise-uranium.org	http://www.wise-
Buenavista del Cobre	AME	Britannique Mexique	2014	Cuivre				mobilisés 40 000 m3 de sulfates de cuivre mobilisés		Rivière contaminée sur 420 km, affectant directement		Wise-uranium.org	uranium.org/mdafmp.html
Dan River Steam	AME	USA, Caroline du Nord	2014	Charbon		Cendre de charbon		74 000 t de cendre et 100 000 m3 d'eau	Rupture d'un ancien tuyau de drainage	Rivière contaminée		Wise-uranium.org	
Obed Mountain	AME	Canada, Alberta	2013	Charbon				670 000 m3 d'eau et 90 000 t de		Rivières contaminées		Wise-uranium.org	
Gullbridge	AME	Canada, Terre-Neuve-et- Labrador	2012	Cuivre				Brèche de 50 m				Wise-uranium.org	
Huancavelica	AME	Pérou	2010					21420 m3 mobilisés		Rivières contaminées sur 110 km		Wise-uranium.org	
Barracena	AME	Brésil	2009	Bauxite					Débordement des dispositifs de drainage après une forte pluio			Wise-uranium.org	
Kingston fossil plant	AME	USA, Tennessee	2008	Charbon		Cendre de charbon		4,1Mm3 mobilisés	Rupture du mur de rétention	1,6 km2 recouverts (épaisseur 1,80 m). 12 habitations endommagées		Wise-uranium.org	
Mirai	AME	Brésil	2007	Bauxite				2 M m3 mobilisés	Forte pluviométrie	4000 habitants privés de logement. Alimentation en eau réduite pour certaines villes		Wise-uranium.org	
Bangs Lake	AME	USA, Mississipi	2005	Phosphate				64 350 m3 mobilisés	Augmentation trop rapide de la capacité de rétention, pluviométrie importante			Wise-uranium.org	
Pinchi Lake	AME	Canada, Colombie Britannique	2004	Mercure	Hauteur 12 m, Iongueur 100 m			6000 à 8000 m3 de boues mobilisés	Travaux de remise en état	Lac atteint			
Riverview Ineris - 178736 - 19	AME 71292 - v2.0	USA, Floride	2004	Phosphate	Hauteur 30 m	570 000 m3		227 000 m3 d'eau acide mobilisés	Ouragan Frances	Rivière et baie contaminées		Wise-uranium.org	

Nom 🚽	Continent 🖵	Pays, Région	Année 🚚	Substance 🚽	Caractéristiques barrage	Caractéristiques dépôts	Caractéristiques aval 🚽	Caractéristiques désordre	Causes principales évoquées 🚽 👻	Conséquences 🚽 👻	Commentaires 🚽	Sources consultées	Détails sur internet 🚽
Cerro Negro	AME	Chili	2003	Cuivre				50 000 tonnes mobilisées, 20 km parcourus	Rupture de barrage	Rivière contaminée		Wise-uranium.org	
Sebastiao das Aguas Claras	AME	Brésil	2001	Fer						6 km parcourus par les résidus, 2 morts, 3 disparus		Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafsa.html
Inez	AME	USA, Kentucky	2000	Charbon				950 000 m3 de boue de résidus de charbon déversés, 120 km parcourus	Rupture de travaux miniers souterrains sous le dépôt	Rivières contaminées		Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafin.html
Pinto Valley	AME	USA, Arizona	1997	Cuivre				230 000 m3 mobilisés		16 hectares recouverts		Wise-uranium.org	
Mulberry Phosphate	AME	USA, Floride	1997	Phosphate		Stock de phosphogypse		200 000 m3 d'eau de process mobilisés	5	Biotope de la rivière éliminé		Wise-uranium.org	
El Porco	AME	Bolivie	1996	Zinc, plomb, argent				400 000 tonnes mobilisées	Brèche après forte pluie	300 km de rivière contaminés		Wise-uranium.org, Kossoff et al 2014	
Amatista	AME	Pérou	1996		Méthodeamont			Plus de 300 000 m3 de résidus mobilisés, distance parcourue 600 m	Liquéfaction liée à un séisme	Rivière atteinte		Wise-uranium.org	
Omai	АМЕ	Guyana	1995	Or	Hauteur 45 m, méthode amont			4,2 M m3 mobilisés dont 2,9 ayant atteints la rivière, 4,5 m3/s	Rupture d'un ancien tuyau de remplissage en base du barrage, cavités créées et intrusion d'eau. Montée du niveau de la nappe et mobilisation brutale d'un filtre sableux puis du reste du barrage	Pollution rivière sur 80 km		Wise-uranium.org, Vick, 1996, Beebe, 2001	http://www.wise- uranium.org/mdgr.html
Tapo Canyon	AME	USA, Californie	1994		Méthode amont, hauteur 24 m			Brèche de 60 m, distance parcourue 180 m	Séisme magnitude 6,7			Rico et al 2007, Rudolph et al 2009	
Fort Meade	AME	USA, Floride	1994	Phosphate				76 000 m3 d'eau		Rivière atteinte		Wise-uranium.org	
Hopewell Mine	AME	USA, Floride	1994	Phosphate				1,9 Mm3 d'eau mobilisés		Rivière atteinte		Wise-uranium.org	
IMC-Agrico	AME	USA, Floride	1994	Phosphate					Fontis dans phosphogypse			Wise-uranium.org	
Payne Creek Mine	AME	USA, Floride	1994	Phosphate				6,8 M m3 d'eau mobilisés		500 000 m3 atteignant une rivière		Wise-uranium.org	
Marsa	AME	Pérou	1993	Or	Méthodeamont				Débordement	6 victimes		Davies 2001, Wise- uranium.org	
Gibsonton	AME	USA, Floride	1993	Phosphate								Wise-uranium.org	
Fording Greenhills	AME	Canada, Colombie Britannique	1992					200 000 m3 mobilisés, distance parcourue 700 m	Fonte des neiges, couches sablo- graveleuses en pied de faible perméabilité, qui se sont mal drainées et se sont liquéfiées			Pastor et al 2002	
Sullivan	AME	Canada, Colombie Britannique	1991	Plomb, zinc	Hauteur 21 m, méthode amont, pentes 2,5H/1V à 3H/1V			Hauteur 12 m, longueur 300 m, 75000 m3 de matériaux mobilisés. Déplacement du pied de 15 à 45 m. Distance parcourue 100 m	Liquéfaction de la fondation. Surcharges dynamiques liées au chantier de surélévation			Davies 2000, Wise- uranium.org	
Stancil	AME	USA, Californie	1989	Sable et gravier	Méthode amont, hauteur 9 m	74 000 m3		38 000 m3 mobilisés, distance parcourue 100 m	Saturation du réservoir après des fortes pluies			Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Riverview	AME	USA, Floride	1988	Phosphate					Déversement acide			Wise-uranium.org	
Tennessee Consolidated n°1	AME	USA, Tennessee	1988	Charbon				250 000 m3 mobilisés	Rupture tuyau d'évacuation et érosion interne			Wise-uranium.org	
Montcoal nº7	AME	USA, Virginie	1987	Charbon				87 000 m3, distance parcourue 80 km	Rupture du tuyau d'évacuation			Wise-uranium.org	
ltabirito	AME	Brésil	1986		Méthode gravitaire, hauteur 30 m			100 000 m3 mobilisés, distance parcourue 12 km	Rupture du parement du barrage?			Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Cerro Negro nº 4	AME	Chili	1985	Cuivre	Multiméthodes, hauteur 40 m	2 M m3		500 000 m3, 8 km de distance parcourue	Liquéfaction liée à un séisme			Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Veta del Agua nº 1	AME	Chili	1985	Cuivre	Multiméthodes, hauteur 24 m	700 000 m3		280 000 m3 mobilisés, distance parcourue 5 km				Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Olinghouse	AME	USA, Nevada	1985	Or				25000 m3 mobilisés, distance parcourue 1,5 km	Rupture par saturation du barrage			Wise-uranium.org	
Ages	AME	USA, Kentucky	1981	Charbon				96 000 m3 de "boue de charbon", distance parcourue 1,3 km	Pluie importante	1 mort, 33 maisons détruites ou endommagées		Wise-uranium.org	
Phelps-Dodge	AME	USA, Nouveau Mexique	1980	Cuivre	Hauteur 66 m, méthode amont	2,5 M m3		2 M m3 mobilisés, 8 km parcourus	Edification rapide du barrage, pression interstitielle importante, brèche créée			Rico et al 2007, Wise- uranium.org	
Sans no m	AME	Canada, Colombie Britannique	1979					40 000 m3 d'eau	Phénomène de renard			Wise-uranium.org	
Church Rock	AME	USA, Nouveau Mexique	1979	Uranium				400 000 m3 de résidus mobilisés	Tassement différentiel de la fondation	Eau radioactive, Contamination d'une rivière sur 110 km		Wise-uranium.org, Kossoff et al 2014	
Homestake	AME	USA, Nouveau Mexique	1977	Uranium				30 000 m3 mobilisés	Rupture d'un pipeline de résidus			Wise-uranium.org	

Nom 🚽	Continent 🖵	Pays, Région 🥥	¦Année _→ ↓	Substance 👻	Caractéristiques barrage	Caractéristiques dépôts	Caractéristiques aval 👻	Caractéristiques désordre	Causes principales évoquées 🚽 👻	Conséquences 🚽 👻	Commentaires 👻	Sources consultées	🖌 Détails sur internet 🛛 👻
Silverton	AME	USA, Colorado	1975					116 000 tonnes mobilisées		Rivière atteinte et pollution		Wise-uranium.org	
Mike Horse	AME	USA. Montana	1975	Plomb, zinc				150 000 m3 mobilisés	Pluie intense	SUF 160 KM		Wise-uranium.org	
Deneen Mica	AME	USA, Caroline du Nord	1974	Mica				38 000 m3 mobilisés	Pluie intense	Rivière atteinte		Wise-uranium.org	
Galena M ine	AME	USA, Idaho	1974		Méthode amont, hauteur 9 m			3800 m3 mobilisés, 610 m parcourus				Rico et al 2007	
Sans nom	AME	USA, "Sud-Ouest"	1973	Cuivre	Méthode amont, hauteur 43 m	500 000 m3		170 000 m3 mobilisés, distance parcourue 25 km		Transport des résidus sur 25 km	5	Wise-uranium.org	
Buffalo Creek	AME	USA, Virginie	1972	Charbon	Trois barrages, hauteur 14-18 m, méthode amont	Quantité massive d'eau 500 000 m3 retenus		Rupture progressive de trois barrages. 500 000 m3 mobilisés. Ecoulement turbulent. Débit 1,4 m3/s. Distance parcourue 64 km	Déversement	125 morts, 500 maisons sinistrées		Wahler et al [in Costa 1988 Jeyapalan et al 1983, Rico e al 2007, Wise-uranium.org], at
Chungar	AME	Pérou	1971						Séisme magnitude 4,8, glissement de terrain et torrent de boue	Boue ravageant le carreau et s'introduisant dans les puits de mine. Seuls 25 mineurs survécurent		Rudolph et al 2009	
Fort Meade	AME	USA, Floride	1971	Phosphate	Hauteur 4 m			8 Mt mobilisées	Cause inconnue	Pollution d'une rivière jusqu'à 120 km du site		Lucia, Wise-uranium.org	
Fort Meade	AME	USA, Floride	1967	Phosphate				250 000 m3, 1,8 M m3 d'eau		Pollution d'une rivière		Wise-uranium.org	
East Texas	AME	USA, Texas	1966	Gypse	Hauteur 11 m	7 Mt, silt non plastique, D50 de 0,07 mm, teneur en eau moyenne 30%	Pente nulle	Environ 100000 m3/200 000 tonnes mobilisés, 300 m de distance parcourue en 60-120 s, vitesse 2,5 - 5 m/s. Pente finale 1°	e Instabilité et non étanchéité des collecteurs, Infiltration			Kleiner 1976, Lucia et al 198 Jeyapalan et al 1983, Rico e al 2007	1, et
Bellavista	AME	Chili	1965	Cuivre	Rétention circulaire, hauteur 20 m	450 000 m3		70 000 m3, 800 m de distance parcourue	Séisme			Wise-uranium.org, Rico et a 2007	al
Cerro Negro nº 3	AME	Chili	1965	Cuivre	Méthode amont, hauteur 20 m	500 000 m3		85000 m3,5 km de distance parcourue	Séisme			Wise-uranium.org, Rico et a 2007	al
El Cobre New Dam	AME	Chili	1965	Cuivre				350 000 m3, 12 km de distance parcourue	Séisme, liquéfaction			Wise-uranium.org	
El Cobre Old Dam	AME	Chili	1965	Cuivre	Méthode amont, hauteur 35 m	4,25 M m3		1,9 M m3, 12 km de distance parcourue	Séisme magnitude 7,1, liquéfaction	Plus de 300 morts		Wise-uranium.org, Rico et a 2007, Rudolph et al 2009	al
La Patagua New Dam	AME	Chili	1965	Cuivre	Rétention circulaire, hauteur 15 m			35000 m3, 5 km de distance parcourue	Séisme, liquéfaction			Wise-uranium.org, Rico et a 2007	al
Los Maquis	AME	Chili	1965	Cuivre	Méthode amont, hauteur 15 m	43 000 m3		21000 m3, 5 km de distance parcourue	Séisme, liquéfaction			Wise-uranium.org, Rico et a	al
Almivirca	AME	Pérou	1962		ndatour io m				Pluie intense, séisme, liquéfaction			Wise-uranium.org	
Dos Estrellas, Tlalpujahua	AME	Mexique	1937	Or	Murenbois. Méthodeamont	Silts argileux (7-10% d'argile) et sableux (7- 38%de sable fin)		Estimation de 2,5 M m3 mobilisés (matériau et eau), vitesse estimée à 20- 25 m/s, débit maximal estimé 8000 m3/s. Distance supérieure à 11 km	Evènement pluvieux exceptionnel, tailngs saturés, et rupture du barrage	300 morts		Davies, 2001, Macias et al, 2015	
Barahona	AME	Chili	1928	Cuivre	Hauteur [61,65] m		Pente 9°	Ouverture 500 m de large, 2,8 M m3 mobilisés	Liquéfaction due à un séisme magnitude 8,3 ?	54 morts		Lucia et al 1981, Rudolph et al 2009	
San Ildfonso, Potosi	AME	Bolivie	1626	Argent, mercure						Environ 4000 morts		Kossoff et al, 2014	
Tieli	ASI	Chine	2020	Molybdène				2,53 millions de m3 mobilisés	Défaillance de la tour de décantation libération de l'eau et des résidus par un tunnel de drainage	Rivière atteinte au bout de 3 km. Propagation de la pollution atteint 208 km (4/04/2020). M enace sur la ressource en eau potable de 68 000 personnes		Wise-uranium.org	
Hpakant	ASI	M yanmar	2020	Jade				Résidus mobilisés dans un lac, créant une vague de boue	Pluie importante	126 morts (travailleurs)		Wise-uranium.org	
Hpakant	ASI	M yanmar	2020	Jade				Rupture de déchets dans un lac engendrant une vague de boue	Pluviométrie importante	126 morts (personnel)		Wise-uranium.org	
M uri	ASI	Inde	2019	Bauxite						Ligne de chemin de fer atteinte, nombre de victimes inconnue		Wise-uranium.org	
Hpakant	ASI	M yanmar	2019	Jade						3 travailleurs tués, 54 disparus		Wise-uranium.org	
Tonglvshan	ASI	Chine	2017	Cuivre, or, argent, fer				Brèche/crevasse de 200 m, 200 000 m de résidus mobilisés	3	2 morts, une personne disparue		Wise-uranium.org	
Mishor Rotem	ASI	Israël	2017	Pho sp hat e				Rupture barrage phosphogypse, 100 000 m3 d'eau acide mobilisés		Rivière asséchée contaminée sur 20 km		Wise-uranium.org	
DahegouVillage	ASI	Chine	2016	Bauxite				2 M m3 de boues rouges mobilisés		Village submergé, 300 habitants évacués		Wise-uranium.org	
Antamok	ASI	Philippines	2016	Or				50 000 tonnes de résidus mobilisés	Présence de tunnel ou ouvrages miniers souterrains dans lesquels les résidus se sont déversés	Rivières atteintes	M ine inactive	Wise-uranium.org	
Hpakant	ASI	Myanmar	2015	Jade						Aumoins 113 morts		Wise-uranium.org	

Nom 🚽	Continent	Pays, Région	 Année 🖵	Substance 🚽	Caractéristiques barrage	Caractéristiques dépôts	Caractéristiques aval 🚽	Caractéristiques désordre 🚽 🚽	Causes principales évoquées 🚽 🚽	Conséquences 🚽 🚽	Commentaires 🚽	Sources consultées	Détails sur internet 🛛 🚽
Zangezur	ASI	Arménie	2013	Cuivre,					Pipeline endommagé	Rivière contaminée		Wise-uranium.org	
Padcal Mine	ASI	Philippines	 2012	molybdene Cuivre, Or				20.6 Mt mobilisées	Forte pluviométrie	Rivières contaminées		Wise-uranium.org	
Mianyang City	ASI	Chine	2011	Manganèse					Glissements de terrain dus à des pluies importantes	M aisons résidentielles endommagées, 272 personnes évacuées, rivière contaminée, 200 000 personnes sans alimentation en eau		Wise-uranium.org	
Huayuan County	ASI	Chine	2009	Manganèse	Capacité 50 000 m3					3 morts		Wise-uranium.org	
Taoshi, Xiangfen County	ASI	Chine	2008	Fer				190 000 m3 mobilisés, 2,5 km parcourus, 36 hectares submergés	Fortepluviométrie	277 morts, nombreuses maisons et infrastructures ensevelies	M ine illégale	Wise-uranium.org, Mei 2011, Ju et al 2012	
Western Group	ASI	Chine	2007					540 000 m3 mobilisés	Rupture de barrage	13 morts		Ju et al 2012	
Miliang, Zhenan	ASI	Chine	2006	Or	M étho de amont				Rupture durant la sixième élévation du barrage	enterrés, 130 personnes évacuées, rivière contaminée sur 5 km		Wise-uranium.org, Yin et al 2011	
San M arcelino	ASI	Philippines	2002		Deux barrages				Débordement et rupture du déversoir suite à une forte pluviométrie	Rivières contaminées. Villages évacués	Barrages abandonnés	Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafsm.html
Dachang, Nandan	ASI	Chine	2000	Etain	M éthode amont				Rupture de barrage	29 morts, 100 disparus. Plus de 100 maisons détruites		Wise-uranium.org, Yin et al 2011, Ju et al 2012	
Placer	ASI	Philippines	 1999	Or				700 000 tonnes de résidus cyanurés	Buse béton endommqgée, entraînement des résidus	17 maisons ensevelies		Wise-uranium.org	
Marcopper	ASI	Philippines	 1996	Cuivre	Fosse			1, 6 M m3 mobilisés	M obilisation des stériles dans des anciens tunnels de drainage	18 km de rivière atteints par les résidus		Wise-uranium.org	
Surigao del Norte	ASI	Philippines	1995	Or	M étho de amont			50 000 m3 mobilisés	Seisme magnitude 6,2 endommageant la structure interne du barrage. Rupture de la fondation	12 morts, pollution côtière		Wise-uranium.org, Davies, 2001, Rudolph et al 2009	
Longjiaoshan	ASI	Chine	 1994	Fer	M éthode amont				Orage Punturo par débordoment	28 morts		Yin et al 2011, Ju et al 2012	
Xiniye	AGI	Chine	1994	Cuivie						20 monts			
YongFu	ASI	Chine	1994	Etain					Creusement dans le sable sous le barrage	13 morts		Ju et al 2012	
Padcal n°2	ASI	Philippines	 1992	Cuivre				80 Mt mobilisées	Rupture de fondation			Wise-uranium.org	
Jinduicheng	ASI	Chine	1988	Molybdène	M éthode amont			700 000 m3 mobilisés	débordement	Environ 20 victimes		uranium.org	
Huangmeishan	ASI	Chine	1986	Fer	M éthode amont			840 000 m3 de résidus et d'eau	Infiltration/instabilité de pente	19 victimes		Davies 2001, Ju et al 2012,	
Dongpo	ASI	Chine	 1985					mobilises	Rupture par débordement	46 morts		Ju et al 2012	
Niujiaolong	ASI	Chine	1985	Cuivre	M éthode amont				Rupture par débordement	49 morts		Yin et al, 2011	
Sipalay	ASI	Philippines	 1982	Cuivre				28 Mt mobilisés	Instabilité de la fondation argileuse			Wise-uranium.org	
Mochikoshi n⁰1et 2	ASI	Japon	1978	Or	M éthode amont, trois petits barrages, hauteurs 28 m et 19 m		Pente 20°	Rupture de deux des trois barrages. 83 000 m3 mobilisés, 8 km parcourus. Pente finale 1,5°	Instabilité des talus, séisme ?	1 mort, pollution d'une rivière et d'une baie jusqu'à 30 km du site		Lucia et al 1981, Rico et al 2007, Wise-uranium.org	
Hokkaido	ASI	Japon	 1968		Méthode amont, hauteur 12 m	300 000 m3		90 000 m3, distance parcourue 150 m	Séisme, liquéfaction			Wise-uranium.org, Rico et al 2007	
Huogudu	ASI	Chine	 1962	Etain	M éthode amont			3,3 M m3 de résidus et 380 000 m3 d'eau mobilisés		171 morts, 13970 personnes concernées		Yin et al 2011, Ju et al 2012	
Echassières	EUR	France, Allier	2015	Tungstène				Brèche de 30 m de large sur 15 m de haut. Intégralité du plan d'eau se vide		Cours d'eau atteint	Contexte d'après- mine	Base ARIA	ment- durable.gouv.fr/accident/46 323/
Sotkamo	EUR	Finlande	 2012	Nickel				Fuite d'un bassin de gypse au travers d'un trou en forme d'entonnoir		Rivière contaminée		Wise-uranium.org	
Kolontar	EUR	Hongrie	2010	Bauxite				700 000 m3 de boues rouges mobilisés	Rupture par cisaillement due à une augmentation de la pression interstitielle	Plusieurs villes atteintes, 10 personnes tuées		Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafko.html https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/fiche_detaill ee/39047/
Karamken	EUR	Russie	2009	Or				Plus de 1 M m3 d'eau, 155 000 m3 de résidus et 55 000 m3 de matériaux du barrage mobilisés	Fortepluie	Aumoins un mort, 11 maisons emportées		Wise-uranium.org	http://www.sric.org/enr/doc s/2009-09- 07_KaramkenDamBreak.pdf
Fonte Santa	EUR	Portugal	2006		Hauteur 25 m, volume 4500 m3, édifié en matériau " tout venant "	D50 = 0,0186 mm, 12,5 M m3 de résidu	Vallée très étroite sur 350 m	80-90%du barrage emporté. 230 000 m3 d'eau mobilisée, 1600 m 3 de boue. Hauteur d'eau maximale 5,5 m à proximité du barrage. Erosion des berges jusqu'à 380 m du barrage. Distance globale d'impact 2500 m	Pluie exceptionnelle, obstruction du déversoir, débordement et création de brèche. Prise de matériau au pied du barrage pour besoin local de construction		Complexe minier abandonné depuis plus de 30 ans avant la rupture	Franca et al 2008	
M alvési	EUR	France, Aude	2004	Uranium		Bassin de décantation et d'évaporation d'une usine de traitement		30 000 m3 de liquide mobilisés	Pluviométrie importante	Concentration élevée en nitrates dans un canal proche pendant plusieurs semaines		Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafma.html https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/accident/26 764/

Nom 🚽	Continent 🖵	Pays, Région	Année 🚚	Substance 🚽	Caractéristiques barrage	Caractéristiques dépôts	Caractéristiques aval 🚽	Caractéristiques désordre 🗸 👻	Causes principales évoquées 🚽 👻	Conséquences 🚽 👻	Commentaires 🚽	Sources consultées	Détails sur internet 🚽
Partizansk	EUR	Russie	2004	Charbon	Barrage d'enclôture	20 M m3 de cendre de charbon		Ouverture de 50 m dans le barrage, 160 000 m3 de cendres mobilisés		Rivière contaminée		Wise-uranium.org	http://www.sric.org/mining/ docs/Partizansk%20Coal%2 0Ash%20Dam%20Break%20 and%20Spill.pdf
Aurul	EUR	Roumanie	2000	Or					Débordement dû à pluviométrie abondante	Rivière à une distance de 5,2 km atteinte, puis confluent		Davies 2001	
Baia Mare	EUR	Roumanie	2000	Or	M éthode amont, hauteur 7 m	800 000 m3		100 000 m3 mobilisés, 180 m parcourus	Rupture partie sommitale suite à forte pluvio/nivométrie	Rivière et eau potable contaminées (2 M de hongrois concernés)		Wise-uranium.org, Rico et al 2007	https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/fiche_detaill ee/17265/ http://www.wise- uranium.org/mdafbm.html
Borsa	EUR	Roumanie	2000					22 000 t de résidus riches en métaux lourds mobilisées	Fortepluviométrie	Rivières contaminées		Wise-uranium.org	
Aitik	EUR	Suède	2000	Cuivre					Perméabilité insuffisante du drain	2,5 M m3 déversés dans le bassin de décantation, par la suite pour raisons de maintien de stabilité de la digue déversement de 1,5 M m3 dans l'environnement		Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/mdafai.html https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/accident/219 70/
Aznalcollar	EUR	Espagne	1998	Zinc, plomb, cuivre, argent	Rétention circulaire, méthode aval, hauteur 27 m	15 M m3 à la date de l'accident		1,3 M m3 mobilisés	Fracture dans l'assise marneuse créée par surpression interstitielle	Pollution rivière et sols. Coût nettoyage 25 M USD, fermeture des résidus non mobilisés 37 M USD, achat récolte de fruits 10 M USD		Eriksson 2000, Rico et al 2007, Kossoff et al 2014	http://www.wise- uranium.org/mdaflf.html
Huelva	EUR	Espagne	1998	Phosphate				50 000 m3 d'eau acide disséminés	Orage			Wise-uranium.org	http://www.wise- uranium.org/ptail.html#HUEL VA
Maritsa Istok 1	EUR	Bulgarie	1992	Cendre				500 000 m3 mobilisés	Inondation de la plage de décantation			Wise-uranium.org	
Stava	EUR	Italie	1985	Fluorine	M éthode amont, hauteur 25m et 34 m, deux barrages superposés, pente externe 1,2 à 1,5 H/ 1/	300 000 m3	Pente moyenne 10°	185 000 m3 de résidus liquéfiés mobilisés, dont 47,6 %de particules solides. Vitesse atteinte 60 km/h. Aval dévasté sur 4,2 km et 43,5 ha, épaisseur de boue 20 à 40 cm.	Tassement engendrant une fuite de canalisation et mise en charge du barrage supérieur. Instabilité de pente du barrage supérieur, débordement et rupture du barrage inférieur. Pluviométrie importante enregistrée deux jours avant la rupture ainsi que tout l'hiver précédant (facteur aggravant mais non déclenchant)	269 victimes, 62 bâtiments détruits, 8 ponts détruits	Aucun contrôle de stabilité durant les vingt années précédentes	Davies 2001, Rico et al 2007, Pirulli et al 2017, Luino 2012, Wise-uranium.org	https://www.aria.developpe ment- durable.gouv.fr/accident/39 857/ http://www.wise- uranium.org/mdafst.html
Balka Chuficheva	EUR	Russie	1981	Fer				3,5 M m3 mobilisés, 1,3 km parcourus				Wise-uranium.org	
Zlevoto	EUR	Yougoslavie	1976	Plomb, zinc				300 000 m3 mobilisés	Hauteur de nappe et percolation dans le barrage	Rivière proche atteinte		Wise-uranium.org	
Madjarevo	EUR	Bulgarie	1975	Plomb, zinc, or				250 000 m3 mobilisés	Surcharge sur ouvrages de décantation/drainage due à une hauteur de barrage supérieure au projet			Wise-uranium.org	
Brunita	EUR	Espagne	1972	Zinc, plomb				70 000 m3 mobilisés	Pluie intense	1 mort		Wise-uranium.org	
Bilbao	EUR	Espagne	1969					115 000 m3	Pluie intense, liquéfaction			Wise-uranium.org	
Sans nom	EUR	Royaume-Uni	1967	Charbon Plomb, zinc,	Méthode amont,	152 Mm3		4 hectares recouverts [220 000, 450 000] m3, 6-8 km de	Pluie intense, augmentation niveau eau	488 morts		Wise-uranium.org Wise-uranium.org, Rico et al	
Goisipg/Erzgobirgo		République Démocratique	1066	cuivre, argent	hauteur 45 m	,020		distance parcourue	et/ou rupture canal dérivation Effondrement tunnel de dérivation sous	Pollution d'une rivière		2007 Wise uranium org	
Geising/Erzgebinge	LOIX	Allemande	1500	Ltan				10 000 115	lebarrage	jusqu'àl'Elbeet Hambourg		wise-drandm.org	
Derbyshire Aberfan	EUR	Royaume-Uni Royaume-Uni	1966 1966	Charbon Charbon	Hauteur 37 m-67 m ?		Pente 12°	30 000 m3, distance parcourue 100 m 162 000 m3, 190 000 tonnes mobilisées distance parcourue 600 m en 120 s, vitesse 4,5 à 9 m/s	Rupture de la fondation Pluie intense, liquéfaction en pied, érosion de surface	144 morts		Wise-uranium.org [32, Jeyapalan], Lucia, Wise- uranium.org, www.nuff.ox.ac.uk/politics/a berfan/home.htm, Pastor et al. 2002	https://www.nuff.ox.ac.uk/p olitics/aberfan/home.htm
Tymawr	EUR	Royaume-Uni	1965	Charbon				Distance parcourue 700 m	Rupture par débordement			Wise-uranium.org	
Tymawr	EUR	Royaume-Uni	1961	Charbon				Distance parcourue 800 m				Wise-uranium.org	
Aberfan	EUR	Royaume-Uni	1944	Charbon	Hauteur 46 m		Pente 12°	Distance parcourue 610m, épaisseur finale 4 m				Lucia	
Abercynon	EUR	Royaume-Uni	1939	Charbon	Hauteur 37 m		Pente 12°	180 000 tonnes mobilisées, distance parcourue 610m, épaisseur finale 6 m				Lucia	
Cadia	OCE	Australie	2018	Or, cuivre					Deux séismes magnitude 2,7 un jour auparavant ?			Wise-uranium.org	
Golden Cross	OCE	Nouvelle-Zélande	1995	Or		3 M tonnes contenues						Wise-uranium.org	
Olympic Dam	OCE	Australie	1994	Cuivre, uranium				Fuite de résidus durant plus de deux ans	3			Wise-uranium.org	

Annexe 2 : Modèles statistiques (extrait du rapport Ineris, 2009, [44]) La première catégorie de modèles présentée est celle utilisant les outils de la description et de la prévision statistique. Dans le cas de l'onde de submersion générée à la suite de la rupture d'une digue de rétention, les variables aléatoires du problème statistique sont autant les caractéristiques connues de la digue que celles recherchées de l'onde de submersion. Dans ce cadre, les modèles statistiques consistent en des relations entre les différentes variables aléatoires, obtenues en analysant des échantillons de valeurs de ces variables.

En théorie, les échantillons devraient être obtenus par la répétition d'une même expérience (ruptures répétées d'une digue témoin dans un environnement standard), où les variables aléatoires seraient modifiées et mesurées tandis que les autres caractéristiques resteraient constantes. En pratique, les échantillons sont composés à partir de cas historiques d'accidents et l'exigence théorique conduit à faire l'hypothèse que toutes les digues de rétention ayant servi à l'élaboration de l'échantillon sont comparables et qu'elles ne diffèrent qu'au travers des variables aléatoires répertoriées. Cette hypothèse est très forte puisqu'elle implique de déterminer a priori les variables prépondérantes afin de les référencer. Ces variables prépondérantes, tout comme les variables participant au critère de dangerosité doivent également être disponibles dans les historiques. De manière générale, il semble que :

- les variables géométriques, la hauteur initiale de la digue, le volume de résidus stockés, la distance parcourue par l'onde de submersion ou encore la pente du terrain naturel, sont des données souvent disponibles puisqu'elles caractérisent des configurations au repos et sont facilement mesurables;
- les variables comme le débit et la vitesse sont difficilement accessibles puisqu'elles caractérisent le phénomène transitoire qui n'a pas forcément été observé ni mesuré ;
- les variables caractérisant les propriétés physiques des résidus, comme la teneur en eau ou la granulométrie, devraient être assez facilement accessibles si l'ouvrage était instrumenté. Néanmoins, elles n'interviennent pas dans les modèles statistiques présentés.

D'autre part, les modèles statistiques sont d'autant plus fiables et précis que le nombre d'observations composant l'échantillon est important. En pratique, les cas référencés de ruptures de digues de rétention sont rares.

Néanmoins, en faisant abstraction de la faible précision attendue et des hypothèses fortes nécessaires à un fondement théorique robuste, les modèles statistiques présentent l'avantage certain d'être le plus souvent simples d'utilisation. En effet, les relations proposées entre les variables sont classiquement de types affine, logarithmique ou exponentielle et ne nécessitent donc pas de moyens de calcul très importants.

Dans cette partie, les modèles statistiques de Rico et al [88] et de Costa [23] sont présentés et trois relations pratiques sont explicitées à partir des deux modèles.

Présentation du modèle proposé par Rico et al.

Rico et al ont analysé un échantillon constitué de 29 ruptures de digues de rétention de résidus ou d'eau, listées dans le Tableau 20, pour lesquelles les paramètres géométriques suivants ont été répertoriés :

- la hauteur de la digue H (en m);
- le volume total de résidus et/ou d'eau contenu dans le réservoir V (en 10⁶ m³);
- le volume de résidus et/ou d'eau mobilisé par l'écoulement V_{mob} (en 10⁶ m³);
- la distance parcourue par l'onde de submersion *D* (*en km*).

Dans le tableau, une information intéressante est la conception des digues, selon qu'il s'agisse d'une digue annulaire ou montée selon les méthodes amont, centrale ou aval. Cette information n'a pas été utilisée dans l'analyse de Rico et al [88].

Tableau 20 : Liste des 29 cas de rupture de	le digues de rétention utilisés par Rico et al [88]
---	---

Ref. no.	Name of the dam	Date of failure (year)	Type of dam	Dam height (m)	Impoundment volume $(\times 10^6 \text{ m}^3)$	Run-out distance (km)	Dam factor $(H \times V_{\rm F})$	Released volume $(\times 10^6 \text{ m}^3)$
1	Arcturus (Zimbawe)	1978	RING	25	1.7-2.0 Mt	0.3	0.5	0.0211
2	Bafokeng (South Africa)	1974	RING	20	13	45	60	3
3	Baia Mare (Romania)	2000	UPS	7	0.8	0.18	0.7	0.1
4	Bellavista (Chile)	1965	RING	20	0.45	0.8	1.4	0.07
5	Buffalo Creek (USA)	1972	UPS	14-18	0.5	64.4	7-9	0.5
6	Cerro Negro No.3 (Chile)	1965	UPS	20	0.5	5	1.7	0.085
7	Cerro Negro No.4 (Chile)	1985	MXSQ	40	2	8	20	0.5
8	Churchrock (USA)	1979	WR	11	0.37	96.5-112.6	4.07	0.37
9	Cities Service (USA)	1971	WR	15	12.34	120	135	9
10	El Cobre Old Dam (Chile)	1965	UPS	35	4.25	12	66.5	1.9
11	Galena Mine (USA)	1974	UPS	9		0.61	0.034	0.0038
12	Gypsum Tailings Dam (USA)	1966	UPS	11	7 Mt	0.3	0.88-1.43	2×10^{5} t
13	Hokkaido (Japan)	1968	UPS	12	0.3	0.15	1.08	0.09
14	Itabirito (Brazil)	1986	Gravity	30		12	3	0.1
15	La Patagua New Dam (Chile)	1965	RING	15		5	0.525	0.035
16	Los Frailes (Spain)	1998	RING	27	15-20	41	53.51	4.6
17	Los Maquis (Chile)	1965	UPS	15	0.043	5	0.315	0.021
18	Merriespruit (South Africa)	1994	RING	31	7.04	2	18.6	2.5 Mt
19	Mochikoshi No.1 (Japan)	1978	UPS	28	0.48	8	2.24	0.08
20	Mochikoshi No.2 (Japan)	1978	UPS	19		0.15	0.057	0.003
21	Ollinghouse (USA)	1985	WR	5	0.12	1.5	0.125	0.025
22	Omai (Guyana)	1995	WR	44	5.25	80	184.8	4.2
23	Phelps-Dodge (USA)	1980	UPS	66	2.5	8	132	2
24	Sgurigrad (Bulgaria)	1966	UPS	45	1.52	6	9.9	0.22
25	Stancil (USA)	1989	UPS	9	0.074	0.1	0.342	0.038
26	Stava (Italy)	1985	RING	29.5	0.3	4.2	5.605	0.19
27	Tapo Canyon (USA)	1994	UPS	24		0.18		
28	Unidentified (USA)	1973	UPS	43	0.5	25	7.31	0.17
29	Veta del Agua Nº1 (Chile)	1985	MXSO	24	0.7	5	6.72	0.28

Historical tailings dam failures used in the correlation analysis

RING: ring dyke; WR: water retention; UPS: dams subsequently raised upstream; MXSQ: dam comprising different raising typology (upstream, centreline and downstream); H: dam height; V_F: volume of tailings released.

Rico et al [88] ont uniquement recherché des expressions reliant les variables deux à deux. Pour chaque couple, la démarche a consisté à réaliser une régression linéaire entre les logarithmes népériens des variables. Cette démarche est explicitée dans la section suivante.

Application de l'approche sur un exemple

Dans cette section, la démarche de Rico et al [88] est expliquée pour le couple distance parcourue par l'onde de submersion D (en km) / hauteur de la digue x volume de résidus mobilisé HxV_{mob} (en km. 10⁶ m^3).

Obtention des expressions

Les différents couples de valeurs (HxV_{mob} ; D) ont été reportés sur le graphique de la Figure 56 en échelles logarithmiques.

La droite de régression est tracée en trait plein et a pour équation :

$$\ln(D) = 0.66 \ln(HV_{mob}) + 0.476$$

La fonction exponentielle est ensuite appliquée à l'équation et la relation suivante est déterminée entre les variables :

$$D = 1.61 (HV_{mob})^{0.66}$$

Rico et al [88] ont également tracé en pointillé sur le graphique une droite majorante de l'ensemble des points (en ne tenant pas compte des points correspondant à des barrages hydrauliques). En appliquant de la même manière la fonction exponentielle, Rico et al [88] proposent une courbe enveloppe d'équation :

$$D = 12.46 (HV_{mob})^{0.79}$$



Figure 56 : Graphique en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxV_{mob}; D) du Tableau 20, la droite de régression linéaire en trait plein et la courbe enveloppe en trait pointillé, (Rico et al [88]

Qualité de l'estimation

La qualité de l'estimation réalisée à partir des deux expressions n'est pas discutée par Rico et al [88] mais nous l'avons évaluée en prenant en considération plusieurs éléments importants.

Pour l'expression issue d'une régression linéaire, destinée à estimer une valeur moyenne, les coefficients de régression r et le coefficient de détermination r² liés à la droite de régression linéaire sont :

$$r = 0.75 \ et \ r^2 = 0.57$$

La régression est basé sur 27 cas tirés de la liste initiale et le nombre de degrés de liberté est donc 25. Dans ce cas, pour un niveau de confiance de 95%, le coefficient de Pearson est égal à 0,381. Le coefficient de régression r est supérieur à cette valeur et est donc significatif. En d'autres termes, l'hypothèse d'une corrélation linéaire entre ln(HxV_{mob}) et ln(D) est valide sur l'échantillon. Néanmoins, la dispersion des points autour de la droite est importante et la variance n'est expliquée qu'à 57% (valeur de r²) par le modèle de régression linéaire. Concrètement, ceci induit que l'on peut estimer la distance à partir de l'expression mais que l'incertitude peut être importante. D'autre part, étant donné que la fonction exponentielle est appliquée à la relation linéaire, les écarts seront d'autant plus importants. Pour ces raisons, nous avons jugé de faible la qualité de l'estimation en utilisant cette expression.

Pour l'expression issue d'une droite majorante, destinée à estimer une valeur maximum, on peut s'attendre à obtenir des valeurs enveloppes très importantes en appliquant cette formule car la fonction exponentielle est appliquée à la relation linéaire. Nous avons finalement jugé de moyenne la qualité de l'estimation en utilisant cette expression.

Synthèse des relations proposées par Rico et al

En appliquant une démarche similaire à celle explicitée auparavant, Rico et al [88] ont proposé quatre relations et quatre courbes enveloppes pour les couples de paramètres suivants :

- 1. distance parcourue par l'onde de submersion D (en km) / hauteur de la digue H (en m);
- 2. distance parcourue par l'onde de submersion D(en km) / volume de résidus mobilisé V_{mob} (en $10^6 m^3$);
- distance parcourue par l'onde de submersion D (en km) / hauteur de la digue x volume de résidus mobilisé HxV_{mob} (en km. 10⁶ m³);
- volume de résidus mobilisé V_{mob} en (10⁶ m³) / volume total de résidus contenu dans le réservoir V en (10⁶ m³).

Les expressions des quatre courbes sont données dans le Tableau 21. Pour le couple volume de résidus mobilisé V_{mob} en $(10^6 m^3)$ / volume total de résidus contenu dans le réservoir V en $(10^6 m^3)$, la courbe enveloppe n'est pas définie à partir d'un graphique. Rico et al [88] ont plutôt proposé dans leur article de considérer que V_{mob} était au maximum égal à V. Nous avons évalué la qualité de chaque expression en tant que modèle de prévision selon la méthode présentée auparavant.

	Expression obtenue à partir de la	Nombre de cas utilisés	
NI®	régression linéaire	Coefficient de Pearson	Qualité de l'estimation
IN	Coefficients de corrélation r et de	à 95% de confiance	
	détermination r ²		
			Le coefficient de corrélation est à la limite du
10	$D = 0.05 H^{212}$ $r = 0.4$ $r^2 = 0.16$	N= 29	significatif.
1a		C _p =0.367	Le modèle linéaire proposé n'explique pas la
			dispersion des valeurs.
	$D = 14.45 V_{mab}^{0.76}$	N= 26	Le coefficient de corrélation est significatif.
2a	r = 0.75 $r^2 = 0.56$	N= 26 C _p =0.388	La qualité attendue des estimations à partir de
			l'équation 2a est faible.
	$D = 1.61 (HV_{moh})^{0.66}$	N 27	Le coefficient de corrélation est significatif.
3a	r = 0.75	N= 27	La qualité attendue des estimations à partir de
	$r^2 = 0.57$	Cp=0.381	l'équation 3a est faible.
	$V_{mob} = 0.354 V^{1.01}$	N= 21	Le coefficient de corrélation est significatif.
4a	r = 0.93	N = 21	La qualité attendue des estimations à partir de
	$r^2 = 0.86$	Cp=0.433	l'équation 4a est moyenne

Tableau 22 : Expressions des courbes enveloppes proposées par Rico et al [88]

N°	Expression de la courbe enveloppe	Qualité de l'estimation
1b	$D = 0.01 H^{3.23}$	Moyenne
2b	$D = 112.61 V_{mob}^{0.81}$	Moyenne
3b	$D = 12.46 \ (HV_{mob})^{0.79}$	Moyenne
4b	$V_{mob} = V$	Bonne

Présentation du modèle de Costa

Costa [23] a étudié des échantillons de ruptures de barrages construits et de barrages naturels formés lors de glissements de terrains ou par des glaciers. Les variables répertoriées sont :

- 1. la hauteur du barrage H (en m);
- 2. le volume total d'eau contenu dans le réservoir V (en 10⁶ m³);
- 3. le débit maximum mesuré Q (en m³.s⁻¹).

Pour chaque type de barrage, Costa [23] a proposé trois relations entre les couples de paramètres suivants, selon une méthode similaire à celle utilisée par Rico et al [88] :

- 1. débit maximum Q (en $m^3.s^{-1}$) / hauteur du barrage H (en m);
- 2. débit maximum Q (en m^3 .s⁻¹) / volume du réservoir V_{tot} (en 10⁶ m³);
- 3. débit maximum Q (en $m^3.s^{-1}$) / hauteur du barrage x volume de résidus mobilisé $Hx V_{tot}$ (en $km.10^6 m^3$) (voir illustration Figure 57).



Figure 57 : Graphique en échelles logarithmiques où sont reportés les différents couples de valeurs (HxV_{mob}; Q) en fonction du type de barrages, ainsi que les droites de régressions linéaires obtenues (Costa [23])

Rico et al [88] ont comparé deux ruptures de digues de rétention aux droites de régression obtenues par Costa [23]. Les deux cas s'inscrivaient préférentiellement dans le cas des barrages construits et de ceux créés à la suite de glissements de terrains. L'échantillon de barrages construits est plus riche puisqu'il est constitué de 31 cas, par rapport aux 10 cas relatifs aux barrages créés à la suite de glissements de régression réalisées à partir des cas de barrages construits majorent celles obtenues pour les barrages naturels. Nous avons donc choisi de reproduire dans le

Tableau 23 les trois expressions relatives aux barrages construits obtenues par Costa [23]. Nous avons évalué la qualité de chaque expression en tant que modèle de prévision selon la méthode présentée dans cette annexe.

N°	Expression obtenue à partir de la régression linéaire Coefficients de corrélation r et de détermination r ²	Nombre de cas utilisés Coefficient de Pearson à 95% de confiance	Qualité de l'estimation
5	$Q = 10.5 H^{1.87}$ r = 0.89 $r^2 = 0.80$	N= 31 C _p =0.355	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 5 est moyenne.
6	$Q = 961 V^{0.48}$ r = 0.81 $r^2 = 0.65$	N= 29 C _p =0.367	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 6 est faible.
7	$Q = 325 (HV)^{0.42}$ r = 0.86 $r^2 = 0.75$	N= 29 C _p =0.367	Le coefficient de corrélation est significatif. La qualité attendue des estimations à partir de l'équation 7 est moyenne.

Tableau 23 : Relations obtenues par régression linéaire proposées par Costa [23]

Utilisation pratique des relations proposées par Rico et Costa

Nous proposons d'utiliser les relations décrites précédemment afin de réaliser une estimation des deux variables suivantes :

- la distance parcourue par l'onde de submersion *D* (*en km*), à l'aide des expressions du
- Tableau 21 et du Tableau 22 ;
- le débit maximum Q (en m^3s^{-1}) à l'aide des expressions du

• Tableau 23.

Ces deux variables sont des maximas physiques mais en tant que variables aléatoires elles ont une plage de variation qu'il est important d'estimer.

Etablissement de relations synthétiques

Les relations proposées par Rico et al [88] peuvent être utilisées pour estimer une valeur moyenne de la distance et les courbes enveloppes peuvent être utilisées pour estimer une valeur haute. En définitive, nous avons choisi d'estimer la distance parcourue par l'onde de submersion à travers :

- l'estimation d'une valeur moyenne de D grâce aux expressions 2a, 3a et 4a. Nous avons choisi de garder la moyenne arithmétique des expressions 2a et 3a après injection de l'expression 4a²² pour avoir comme donnée d'entrée le volume total de résidus stockés et non le volume de résidus mobilisé ;
- l'estimation d'une valeur haute de D grâce aux équations 2b, 3b et 4b. Nous avons choisi de garder le maximum des expressions 2b et 3b après injection de l'expression 4b.

Les considérations relatives à la précision des estimations énoncées dans cette annexe ne permettent pas d'espérer une estimation de bonne qualité.

Les relations proposées par Costa [23] peuvent être utilisées pour estimer une valeur moyenne du débit maximum Q. Seules les expressions 5 et 7 ont été retenues et la moyenne arithmétique de ces deux expressions a été considérée. Les considérations relatives à la précision des estimations énoncées dans cette annexe ne permettent pas d'espérer une estimation de bonne qualité.

Les trois relations synthétiques obtenues, notées 8, 9 et 10, sont synthétisées dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Expressions synthétiques pour l'estimation de la distance parcourue par l'onde de submersion D et du débit maximum Q à partir des relations obtenues par Rico et al [88] et Costa [23]

N°	Objet de l'estimation	Expression	Qualité de
-			restimation
8	Valeur haute de D en km	max $(112.61 V^{0.81}; 12.46 (HV)^{0.79})$	Faible
9	Valeur moyenne de D en km	$3.28 V^{0.76} + 0.40 (HV)^{0.66}$	Moyenne
10	Valeur moyenne de Q en m³s-1	5.25 H ^{1.87} + 162.50 (HV) ^{0.42}	Faible
H est la hauteur de la digue de rétention en m et V est le volume total du dépôt en 10 ⁶ m ³			

Exemple d'application des formules synthétiques

Le Tableau 25 présente les résultats obtenus en appliquant les formules du Tableau 24 dans le cas d'une digue de rétention de 10 m de hauteur derrière laquelle sont stockés 20000 m³ de résidus.

Tableau 25 : Exemple	d'application des	s relations synthéti	ques du Tableau 24
		, <u>,</u>	1

H	V	Valeur haute de D	Valeur moyenne de D	Valeur moyenne de Q
en m	en 10 ⁶ m³	en km	en km	en m ³ .s ⁻¹
10	0,02	4,7	0,3	472

 $^{^{22}}$ La relation 4a a été approximée à la relation affine : $V_{mob}=0.354\,V$

Conclusions sur les modèles statistiques présentés

Les modèles statistiques proposés par Rico et al et Costa sont des modèles simples basés sur des régressions linéaires entre deux variables. L'analyse de ces modèles a permis de montrer que des estimations pouvaient être réalisées à partir de ces modèles mais que la qualité de l'estimation était a priori faible.

Des modèles plus complexes pourraient être envisagés pour prendre en compte plusieurs variables (régression multiple par exemple) mais la construction des modèles serait a priori limitée par les historiques de valeurs disponibles. En effet, il est nécessaire qu'un recueil de valeurs sur les variables aléatoires prépondérantes du phénomène d'écoulement soit effectué en aval de l'analyse statistique. Sans cette étape préalable, les améliorations apportées par des modèles plus complexes ne seront probablement pas significatives.

D'autre part, les résultats obtenus par les modèles statistiques présentés ne sont pas satisfaisants puisqu'ils ne concernent ni la hauteur, ni la vitesse de l'onde de submersion. Pour pouvoir intégrer ces variables aléatoires dans les modèles statistiques, il serait donc nécessaire de recueillir ces valeurs, ce qui peut se révéler difficile.

Néanmoins, l'attrait des expressions synthétiques présentées dans le Tableau 24 reste indéniable du point de vue de la simplicité d'usage des expressions et de l'accessibilité des données d'entrée. Les expressions 7 et 8, conduisant à une estimation de la distance parcourue par l'écoulement, pourraient permettre de réaliser un premier tri parmi les digues de rétention, en lien avec les enjeux situés dans le périmètre d'influence estimé.

Annexe 3 : Estimation de la pente et de la distance parcourue. Modèle de Lucia et al. [66] dans le cadre de la mécanique du solide déformable (extrait du rapport Ineris, 2009, [44]) Cette partie aborde les fondements du modèle décrit par Lucia et al [66], à savoir les hypothèses générales et la mise en équation. De manière générale, la démarche permettant de construire le modèle n'est pas explicitée en détail. Nous avons donc choisi de la reprendre totalement, en établissant les différentes hypothèses formulées ou sous-entendues par Lucia et al [66] et d'expliciter clairement le système d'équations à résoudre.

Hypothèses générales du modèle

Lucia et al ont proposé un modèle élaboré dans le cadre de la mécanique du solide déformable dans lequel ils considèrent l'équilibre final en deux dimensions (Figure 58).

La configuration géométrique proposée pour l'état final de l'écoulement constitue la première hypothèse générale du modèle. La coupe schématique est représentée sur la Figure 59. Un front (ou bourrelet) est considéré à l'extrémité aval de la coulée. D'autre part, la pente formée par les résidus est supposée rectiligne. Le bilan des forces en deux dimensions sur le milieu considéré dans la configuration finale constitue le deuxième élément du modèle. Le bilan des forces en deux dimensions envisagé par Lucia et al est schématisé en Figure 60. Seules trois forces sont envisagées :

- le poids des résidus mobilisés ;
- la force de frottement à l'interface entre le terrain naturel et les résidus ;
- la force de poussée exercée par les résidus se trouvant à l'amont de l'axe vertical initial de la digue.







Figure 59 : Coupe type de l'état final de l'écoulement et notations des grandeurs géométriques



Figure 60 : Bilan des forces 2D sur la masse de résidus mobilisés dans l'état final de l'écoulement, selon les hypothèses de Lucia et al [66]

Les variables géométriques et mécaniques prises en compte sont listées dans le Tableau 26 où il est également précisé s'il s'agit de données d'entrée ou au contraire de résultats du modèle. Les variables géométriques sont repérées sur le dessin de la Figure 59.

Variable	Description	Donnée	Désultat
		d'entrée	Resultat
	Paramètres géométriques		
β	Pente du terrain naturel	Х	
V _{MOB}	Volume de résidus mobilisés dans l'écoulement (en réalité une	v	
	surface en 2D)	^	
α	Pente de l'écoulement dans l'équilibre statique final		Х
Нв	Hauteur du bourrelet en aval de l'écoulement		Х
H _R	Hauteur de résidus à l'emplacement initial de la digue		Х
D	Distance parcourue par l'écoulement (en réalité il s'agit de la		v
	projection de cette distance dans le plan horizontal)		^
Paramètres mécaniques			
γ	Poids volumique des résidus	Х	
Su	Contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement	Х	
Ko	Coefficient de poussée des terres au repos	Х	

Tableau 26 : Liste des variables géométriques et mécaniques prises en compte par Lucia et al

Mise en équation

Le problème comporte quatre inconnues (α , H_B, H_R et D) listées dans le Tableau 26, qui peuvent être reliées par le système de quatre équations présenté dans le Tableau 27 :

- l'équation 1 provient de l'expression de V_{MOB} en fonction des inconnues H_R , H_B et α ;
- l'équation 2 est l'expression de D en fonction des inconnues H_R , H_B et α ;
- l'équation 3 est la projection du bilan des forces sur l'axe de la pente ;
- l'équation 4 est une condition aux limites sur la stabilité du bourrelet aval.

Les équations 1 et 2 proviennent de considérations géométriques et ne se fondent pas sur des hypothèses particulières. Au contraire, des hypothèses sont posées concernant la force de poussée exercée par les résidus situés en amont de l'axe initial de la digue et la force de frottement à l'interface :

 la force de frottement est explicitée en considérant que S_u est la contrainte limite entre le terrain naturel et les résidus à l'interface entre les deux. Cette hypothèse est moyennement satisfaisante puisque S_u est défini comme étant une caractéristique interne du matériau « résidu » ; la force de poussée est supposée horizontale et comprend deux composantes, dont l'une correspond à la poussée d'un sol pulvérulent et l'autre est une force de cohésion de nouveau exprimée avec S_u. Cette dernière hypothèse est moyennement satisfaisante puisque S_u est une contrainte de cisaillement et non de traction.

De même, la condition aux limites sur la stabilité du bourrelet aval fait de nouveau intervenir S_u comme la contrainte limite entre le terrain naturel et les résidus à l'interface entre les deux. Des améliorations pourraient être envisagées pour clarifier le rôle de la variable S_u.

N°	Equation		
1	$H_R = \sqrt{{H_B}^2 + 2 \times V_{MOB}(\tan \alpha - \tan \beta)}$		
2	$D = \frac{H_R - H_B}{\tan \alpha - \tan \beta}$		
3	$V_{MOB} \gamma \sin \beta - \frac{D \times S_u}{\cos \beta} + \frac{1}{2} K_0 \gamma H_R^2 \cos \beta - H_R \times S_u \cos \beta = 0$		
4	$H_B = \frac{2S_u}{\gamma}$		
L'annexe A précise certains points de calcul intermédiaires.			



Les observations de coulées de résidus sur le terrain ont permis à Lucia et al de conclure qu'un équilibre est difficile à envisager pour des pentes de terrains naturelles supérieures à 9°. Au niveau du domaine de validité du modèle, Lucia et al proposent de n'utiliser leur modèle que pour des pentes naturelles inférieures à 4°.

Utilisation du modèle de Lucia

La résolution analytique du système n'est a priori pas aisée compte tenu de la présence de relations non linéaires. Lucia et al ont proposé une utilisation pratique de leur méthode à partir d'un graphique. Nous avons préféré résoudre le système d'équations de manière numérique en Visual Basic pour pouvoir fonctionner sur Excel.

Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle sont présentées dans le Tableau 28. Parmi ces données d'entrée, le volume mobilisé V_{MOB} et la contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement S_u semblent être les deux variables les plus difficiles à estimer.

Variable	Description	Paramètre du
		résultat
β	Pente du terrain naturel	
V _{MOB}	Volume de résidus mobilisés dans l'écoulement (en réalité une surface en 2D)	Х
γ	Poids volumique des résidus	
Su	Contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement	Х
Ko	Coefficient de poussée des terres au repos	

Tableau 28 : Variables d'entrée du modèle.
Volume mobilisé V_{MOB}

Le volume mobilisé V_{MOB} peut être défini en fonction du volume total V_{TOT} qui est une donnée d'entrée plus simple à calibrer. D'après le modèle statistique de Rico et al [88], V_{MOB} peut être estimé à environ un tiers de V_{TOT} mais il nous semble préférable de garder le rapport V_{MOB} / V_{TOT} comme un paramètre du résultat. La donnée d'entrée V_{TOT} devient donc la nouvelle donnée d'entrée à renseigner. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour estimer V_{TOT} qui est une grandeur en m² dans le modèle géométrique en deux dimensions, en considérant les deux configurations de la Figure 61 :

- dans le cas d'une digue en barrage de vallée, V_{TOT} peut être estimé par V/I ou par H x L_{max}. Cette dernière estimation est plus sécuritaire ;
- dans le cas d'une digue annulaire, VTOT peut être estimé par V/Dmax.



Le volume total de résidus en m³ est noté V

La hauteur de la digue en m est notée H

Figure 61 : Vues en plan d'une digue en barrage de vallée (à gauche) et d'une digue annulaire (à droite).

Contrainte limite de cisaillement Su

La contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement S_u est une grandeur difficile à apprécier, d'autant plus que son usage est multiple dans les équations. Lucia et al ont proposé des valeurs, calculées à partir de cas réels, qui sont reproduites dans le Tableau 29. La définition de S_u permet également de considérer ce paramètre comme similaire à la contrainte seuil des lois rhéologiques comme le modèle de Bingham. Il nous est néanmoins apparu préférable de considérer S_u comme un paramètre du résultat.

N°	Type de résidus	α (°)	Su (kPa)
1	Résidus de traitement du cuivre	1,5	2,4
2	Résidus de traitement du platine	1,3	0,7
3	Stériles de gypse	1	1
4	Résidus de traitement de l'or	4 à 5	10,1
5	Stériles de charbon	12	18
6	Stériles de charbon	12	15,8
7	Stériles de charbon	12	21,6
8	Résidus de la fabrication de porcelaine	7	6,7
9	Résidus de la fabrication de porcelaine	7	16,3
10	Résidus de traitement de carbures	1,5	2,5
11	Argile-sable fin	2,5	12
12	Sable fin	4	1
13	Sable fin	4	1,2
14	Sable fin	4	1,7

Tableau 29 : Retour	d'expérience s	sur 14 c	as et es	stimation	de la	contrainte	limite de	cisaillement	des
	résidus aprè	ès écou	lement	(S _u), d'ap	orès L	ucia et al [66]		

Exemple de présentation des résultats

Cette section expose les résultats obtenus en utilisant le modèle avec les données d'entrée présentées dans le Tableau 30.

Variable	Description	Valeur	
β	Pente du terrain naturel	2°	
γ	Poids volumique des résidus	20 kN.m ⁻³	
K ₀	Coefficient de poussée des terres au repos	0.5	
N.	Volume total de résidus stockés derrière la digue	$1000 m^2$	
V TOT	(une surface en 2D)	1000 111	

Tableau 30 : Données d'entrée utilisées pour la création de l'abaque de la Figure 62.

Le résultat est fourni sous la forme d'un abaque donné en Figure 62, sur lequel il est possible de déterminer une valeur de la distance parcourue par l'écoulement en fonction de la contrainte limite de cisaillement des résidus après écoulement et du rapport entre le volume mobilisé par l'écoulement et le volume total.



Figure 62 : Abaque donnant la distance parcourue en fonction de la contrainte de cisaillement S_u, du rapport du volume mobilisé sur le volume total et des variables d'entrée du Tableau 30.

<u>Conclusions quant aux modèles élaborés dans le cadre de la mécanique</u> du solide déformable

Le modèle présenté, basé sur le travail de Lucia et al, permet d'estimer la distance maximum parcourue par l'onde de submersion. Les fondements théoriques de ce modèle sont satisfaisants même si certaines hypothèses pourraient être revues et améliorées. En particulier, la définition des paramètres concernant le comportement mécanique des résidus est importante et ne peut pas être considérée comme aboutie. Les diverses améliorations possibles amèneraient probablement à des résultats plus justes, même si cette approche macroscopique reste très grossière.

L'utilisation du modèle peut être rendue simple grâce à une implémentation sur Excel par exemple avec un appel à une macro en Visual Basic.

Cependant, les produits de sortie du modèle présenté ne sont pas entièrement satisfaisants puisqu'ils ne renseignent que sur la distance parcourue et la hauteur finale des résidus. Comme déjà évoqué auparavant, ce type de modèle ne permet pas d'avoir accès aux variables utilisées dans le critère de dangerosité puisqu'il ne s'intéresse pas au régime transitoire. Il s'agit d'une limite inhérente au modèle qui à la manière des modèles statistiques présentées au chapitre précédent pourrait néanmoins permettre de réaliser un premier tri parmi les digues de rétention, selon les enjeux situés dans le périmètre d'influence ainsi délimité.

Annexe 4 : Modèles élaborés dans le cadre de la mécanique des fluides (extrait du rapport Ineris, 2009, [44])

La troisième catégorie de modèles présentée utilise le cadre de la mécanique des fluides. Les résidus en mouvement, mélangés à l'eau initialement présente, peuvent en effet sous certaines hypothèses être assimilés à un fluide dont l'écoulement est régi par les équations de Navier-Stokes. Ces équations décrivent l'écoulement en tout point de l'espace et du temps et permettent donc d'avoir accès aux variables utilisées dans le critère de dangerosité. Contrairement aux méthodes présentées précédemment, la mise en équation correcte du problème fait appel à des concepts plus complexes. Les aspects théoriques sont rappelés dans le texte.

Tout d'abord, le mélange résidus-eau est complexe et ne peut pas être considéré comme un fluide newtonien. Dans le cadre d'une onde de submersion liée à une rupture de digue, son régime d'écoulement n'est pas non plus connu a priori. Ces concepts physiques sont évoqués et discutés ciaprès.

Ensuite, l'onde de submersion attendue est un écoulement à surface libre qui présente a priori une faible épaisseur par rapport aux autres dimensions. L'approximation des milieux peu profonds, bien connue en hydraulique, peut être employée. Les équations qui en découlent sont rappelées dans cette annexe dans le cas d'un écoulement en deux dimensions.

Enfin, les équations obtenues peuvent être à nouveau simplifiées pour ne plus avoir comme seules variables que le temps et l'abscisse en intégrant sur la verticale. Cette démarche implique de nouvelles hypothèses qui sont différentes selon que le fluide soit newtonien ou pas et que le régime d'écoulement soit laminaire ou turbulent. Plusieurs auteurs ont finalement proposé des modèles intégrés sur la verticale à partir d'hypothèses qui constituent la spécificité de leur modèle et qui sont présentés dans cette annexe

Modèles de comportement et caractérisation de l'écoulement du mélange résidus-eau

Les deux points abordés dans cette section sont les modèles de comportement utilisés pour caractériser le mélange résidus-eau et le caractère laminaire ou turbulent des écoulements.

Modèle de comportement du mélange résidus-eau

Il est relativement difficile de caractériser le comportement du mélange résidus-eau qui, selon la vitesse d'écoulement, peut prendre tous les états entre un état diphasique solide-liquide et un écoulement homogène viscoplastique, comme indiqué en Figure 63. Le schéma est spécifique au transport des résidus par conduite et dans le cas d'un écoulement libre, l'hypothèse d'un écoulement homogène ou pseudo homogène paraît pertinent. Dans la suite du rapport, on utilisera donc préférentiellement le terme fluide résidus-eau.

D'autre part, il est nécessaire de prendre en compte le fait qu'une contrainte minimum de cisaillement doit être appliquée pour mettre en mouvement le fluide résidus-eau. L'approximation newtonienne ne décrit donc pas bien ce fluide et des lois de comportement viscoplastiques à seuil sont donc principalement utilisées pour le décrire. Le modèle de Herschel-Bulkley relie ainsi la contrainte de cisaillement τ à la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ selon le modèle :

$\tau = \tau_{seuil} + \; k \dot{\gamma}^n$

où τ_{seuil} , k et n sont trois paramètres. Le modèle de Bingham correspond au cas particulier où la puissance n est égale à 1, c'est-à-dire que le fluide a un comportement Newtonien après le seuil. Il est certain que ces lois doivent être calibrées dans des configurations types et que par exemple la teneur en eau du mélange influe probablement sur les paramètres du modèle.



Figure 63 : Classification des résidus liquéfiés, d'après CIGB [115].

Ecoulement laminaire ou turbulent

Il n'est pas évident de définir a priori si l'écoulement du fluide résidus-eau sera laminaire ou turbulent à la suite de la rupture de la digue. Les différentes observations de coulées et les connaissances actuelles ont conduit certains auteurs à considérer les écoulements des résidus comme laminaires même si des régimes turbulents ont également été observés. Ainsi, Jeyapalan et al [56] différencient de cette manière les résidus de phosphates qui contrairement aux autres résidus pour lesquels l'écoulement serait turbulent. Cette distinction est critiquée par Vick [101] qui estime qu'il n'est pas simple de prévoir la nature du régime d'écoulement en fonction du type de résidus. La teneur en eau est par exemple un paramètre à prendre en compte et dont l'influence pourrait être plus importante que celle liée au type de résidus. Cet aspect est essentiel car un écoulement turbulent est susceptible de se déplacer à une vitesse bien plus élevée qu'un écoulement laminaire, or la vitesse est une des variables utilisées dans le critère de dangerosité. Enfin, il est important de noter que la plupart des développements scientifiques en dynamique de fluides, concernent les ruptures de barrages hydrauliques et que dans le cas de l'eau, l'onde de submersion générée est un écoulement turbulent.

Pour conclure cette section, il apparaît donc que les deux types d'écoulement doivent être envisagés et qu'il n'existe pas à notre connaissance de critères permettant de juger a priori du caractère turbulent ou laminaire du fluide résidus-eau. La teneur en eau du matériau stocké derrière la digue devrait être un des paramètres ayant le plus d'influence dans la nature de l'écoulement, ainsi que le caractère brutal ou progressif de la rupture.

Approximations des milieux peu profonds

Dans le cas des écoulements présentant une surface libre, l'approximation des milieux peu profonds (ou de Saint Venant, voir Thual [130]) est adaptée pour les écoulements dont la profondeur est faible devant les autres dimensions. En considérant un problème en deux dimensions défini à l'aide des variables z sur la verticale et x sur l'horizontale, et l'approximation de Saint Venant, les équations de Navier Stokes pour un fluide incompressible deviennent :

conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \cos \beta \frac{\partial h}{\partial x} + g \sin \beta + v^* \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

où u et w sont les vitesses selon x et z respectivement, g est la pesanteur et β est la pente du terrain. Le paramètre v^{*} est différent selon que le type d'écoulement étudié est laminaire ou turbulent. Dans le cas d'un écoulement turbulent, v^{*} est la viscosité turbulente, non physique et bien plus élevée que la viscosité cinématique du fluide. L'introduction de cette viscosité artificielle intègre la viscosité induite par les tourbillons et permet d'envisager un profil de vitesse homogène sur une verticale pour modéliser l'écoulement turbulent. Cette viscosité turbulente permet une résolution plus aisée des équations en régime turbulent. Dans le cas laminaire, le paramètre v^{*} représente la viscosité cinématique.

Intégration des équations sur la verticale

Le but de l'intégration sur la verticale est de ne plus avoir que deux variables, l'abscisse (x) et le temps (t) dans les équations. Les solutions recherchées sont U la vitesse moyenne sur la verticale et h la hauteur de fluide. Dans un premier temps, nous présenterons le cas particulier de l'eau, puis nous nous intéresserons au cas particulier du fluide résidus-eau et aux différences induites sur les équations intégrées sur la verticale.

Cas de l'eau, écoulement en régime turbulent d'un fluide Newtonien

Dans le cas de l'eau, l'intégration sur la verticale des équations simplifiées de Navier Stokes selon l'approximation des milieux peu profonds donne les équations dites de Saint Venant 1D (voir Thual [130]) :

conservation de la masse

$$\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \cos \beta \frac{\partial h}{\partial x} = g \sin \beta - \frac{C_f}{2} \frac{U|U|}{h}$$

où U est la vitesse moyenne sur la verticale à une abscisse x et C_f est un coefficient dépendant des variables U et h. Les deux hypothèses suivantes sont nécessaires pour vérifier la loi de conservation de la quantité de mouvement :

- 1. la première hypothèse consiste à considérer que la vitesse d'écoulement u est constante sur la verticale et que l'on peut donc raisonner avec U moyen (U=u) qui ne dépend plus de z ;
- la deuxième hypothèse concerne le terme de frottement dans lequel intervient initialement la viscosité. Dans le cas de l'eau, en écoulement turbulent, c'est la viscosité turbulente qui est utilisée. Plutôt que de déterminer cet artefact de calcul, il est introduit dans le coefficient Cf. Plusieurs expressions de ce coefficient sont décrites dans la littérature.

La résolution analytique de ces équations n'est pas aisée notamment à cause du terme de frottement faisant intervenir le carré de la vitesse moyenne. Néanmoins, des relations implicites entre les paramètres peuvent être établies, si l'expression choisie pour le coefficient C_f n'est pas trop compliquée.

Avant d'examiner les différences impliquées par la prise en compte d'un fluide non Newtonien, il est intéressant de rappeler que des solutions analytiques explicites existent dans le cas simple de l'écoulement turbulent d'un fluide Newtonien dans un chenal **sans frottement**. Ces solutions, appelées solutions de Ritter, sont présentées dans les deux sections suivantes.

Modèle de Ritter pour une pente nulle

Les solutions exactes, citées dans Chanson [20], de la vitesse U et de la hauteur h sont de la forme suivante :

$$h = \frac{H}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gH}} \right)^2$$
$$U = \frac{2\sqrt{gH}}{3} \left(1 + \frac{x}{t\sqrt{gD}} \right)$$

avec
$$-1 \le \frac{x}{t\sqrt{gD}} \le 2$$

avec g la gravité et H la hauteur initiale de la digue.

Lorsque t tend vers l'infini, la fonction U(x,t) tend vers $2\sqrt{gH}/3$ dans l'intervalle de définition. Cette valeur constitue de plus le minimum de la fonction U(x,t) pour t supérieur à 1 seconde. Un calcul basé sur cette valeur limite montre que toutes les digues dont la hauteur est supérieure à 5,7 cm sont donc susceptibles de générer une onde de submersion allant à une vitesse supérieure à 0,5 m.s⁻¹ qui est le seuil de vitesse utilisé dans le critère de dangerosité proposé par l'administration. Ce résultat traduit le fait que les hypothèses d'un fluide Newtonien dans un écoulement sans frottement sont particulièrement sécuritaires.

Lorsque t tend vers l'infini, la fonction h(x,t) tend vers 4H/9 dans l'intervalle de définition. Un calcul basé sur cette valeur limite montre que toutes les digues dont la hauteur est supérieure à 1,6 m sont donc susceptibles de générer une onde de submersion de plus de 0,7 m de hauteur, qui est le seuil de hauteur utilisé dans le critère de dangerosité proposé par l'administration. Ce résultat découle de deux hypothèses du modèle :

- le réservoir en amont du barrage est considéré infini et donc le volume susceptible de s'écouler est infini ;
- le fluide est Newtonien et donc la stabilité est obtenue lorsque la surface du fluide est horizontale.

Ces deux limitations sont illustrées ci-après dans le cas d'une digue de 10 m de hauteur dont le réservoir fait 100 m de longueur (perpendiculairement à la digue). La solution de Ritter pour cette digue à différents temps après la rupture est reportée sur la Figure 64. On remarque que 10 secondes après la rupture, le bord amont du réservoir est déjà atteint et la solution de Ritter n'est donc plus adéquate après. Ce temps pendant laquelle la solution est valable est notée t_v et les distances et les hauteurs seront a priori surestimées pour des temps supérieurs à t_v.



Figure 64 : Solutions de Ritter pour une digue de 10 m de hauteur (placée en x=0) à différents temps après la rupture.

Le caractère parfait du fluide implique un état d'équilibre final horizontal. Dans le cas du fluide eaurésidus, il est envisageable qu'un équilibre se forme à partir d'une certaine pente et d'un certain temps. Lucia et al [66] ont par exemple recensé plusieurs valeurs de pente, reportées dans le Tableau 15 dans le corps de rapport, qui ont été observées sur des coulées de résidus. Sur la base des valeurs recensées, une pente d'équilibre de 1° peut être considérée comme un minimum.

Nous allons faire dans la suite l'hypothèse très forte que le fluide résidus-eau s'écoulera tout d'abord comme de l'eau mais se stabilisera dans une position d'équilibre dès que le critère de pente de 1° sera

dépassé²³. Le graphique de la Figure 65 trace la pente maximum en fonction du temps pour une configuration géométrique identique à celle de la Figure 64, c'est à dire une digue de 10 m de hauteur et de 100 m de longueur. La recherche de la pente maximum de l'écoulement se fait sur l'intervalle [-100, infini] et le temps t_e où l'équilibre est supposé peut être estimé à 30 secondes dans l'exemple.



Figure 65 : Pente maximum de l'écoulement en fonction du temps après la rupture.

Il est alors possible de déterminer pour t_e quelle distance est parcourue par une vague de plus de 0,7 m de hauteur, afin de prendre en compte le critère de dangerosité. Dans l'exemple, cette distance peut être lue sur le graphique de la Figure 66, soit 358 m pour t_e égal à 30 secondes.



Figure 66 : Distance maximum parcourue par une vague de hauteur supérieure à 0,7 m en fonction du temps.

En conclusion, si l'on considère une digue de rétention sur terrain naturel horizontal, la solution de Ritter peut être utilisée pour appliquer le critère de dangerosité concernant la hauteur d'eau. Même si au bout d'un temps très court (10 secondes, dans l'exemple traité), la solution n'est plus valable car le bord amont est déjà atteint, elle est a priori majorante pour la suite. Contrairement à un fluide parfait, il est possible d'utiliser pour le fluide résidus-eau un critère d'arrêt relatif à la pente maximale du dépôt. Ce critère permet d'estimer le délai d'arrêt (30 secondes dans l'exemple pour une pente d'équilibre de 1°). La distance parcourue par une vague de plus de 0,7 m de hauteur peut alors être déterminée.

²³ Cette hypothèse est critiquable car la pente découle directement de la forme de l'écoulement qui sera probablement différente dans le cas d'un fluide non-newtonien par rapport à un fluide newtonien.

Cependant, il n'est pas possible d'utiliser l'approche de Ritter pour l'évaluation du critère de dangerosité basé sur la vitesse du fluide puisque les hypothèses d'un fluide parfait sur un sol sans frottement entraînent directement une vitesse trop élevée pour des hauteurs réalistes de digues.

Enfin, une autre limitation de l'approche concerne ici la pente du terrain naturel dont l'influence peut s'avérer importante. Lucia et al [66] considèrent ainsi que la stabilité ne peut pas être atteinte si la pente naturelle excède 9°. Les solutions de Ritter pour une pente non nulle sont données dans la section suivante.

Modèle de Ritter pour une pente non nulle

Les solutions, avec les hypothèses de Ritter déjà évoquées dans les sections précédentes et pour une pente moyenne d'angle β sont (Chanson [20]) :

$$h = \frac{H}{9} \left(2 - \frac{x}{t\sqrt{gH}} + \frac{1}{2} \sin \beta \sqrt{\frac{g}{D}} t \right)^2$$
$$U = \frac{2\sqrt{gH}}{3} \left(1 + \frac{x}{t\sqrt{gD}} + \sin \beta \sqrt{\frac{g}{D}} t \right)$$
$$avec - 1 + \frac{1}{2} \sin \beta \sqrt{\frac{g}{D}} \le \frac{x}{t\sqrt{gD}} \le 2 + \frac{1}{2} \sin \beta \sqrt{\frac{g}{D}} t$$

La méthode proposée dans la section précédente en utilisant un critère d'équilibre relatif à la pente des résidus peut également être envisagée. En reprenant l'exemple d'une digue de 10 m de hauteur, avec une pente naturelle de 2% et une pente d'équilibre de 2,5 %, le temps critique t_e est de 75 secondes et la distance sur laquelle la vague est supérieure à 0,7 m est estimée à 1860 m.

Cas du fluide résidus-eau, écoulement en régime laminaire ou turbulent d'un fluide non-newtonien

Les équations de Navier-Stokes ainsi que celles obtenues avec l'approximation des milieux peu profonds sont également valables pour le fluide résidus-eau. Des hypothèses différentes sont cependant nécessaires pour intégrer correctement sur la verticale :

- dans le cas d'un écoulement turbulent, l'hypothèse d'une vitesse d'écoulement constante sur la verticale est maintenue. Par contre, dans le cas d'un écoulement laminaire le profil des vitesses est parabolique et même si il est toujours possible de raisonner avec la vitesse moyenne U, ce changement a des conséquences dans l'expression mathématique du problème ;
- dans le cas d'un fluide non-newtonien, la viscosité n'est pas constante et il est donc nécessaire de prendre en compte ces variations au niveau du coefficient C_f qui intègre la notion de viscosité.

En définitive, des équations différentes sont susceptibles d'être obtenues en intégrant sur la verticale. Les différents modèles se singularisent par les différences faites au niveau de ces hypothèses.

Modèle de Jeyapalan et al

Jeyapalan et al [56] et [57] ont intégré dans le terme de frottement un modèle de Bingham de type :

$$\tau = \tau_B + \nu_B \dot{\gamma}$$

où τ_B et ν_B sont des paramètres.

La démarche utilise le coefficient de frottement de Fanning (voire de Darcy) pour finalement exprimer le terme de frottement en fonction de U, h et des paramètres du modèle de Bingham, τ_B et ν_B , selon l'expression suivante :

$$\frac{C_f}{2}\frac{U|U|}{h} = g(\frac{2\nu_B U}{\gamma h^2} + \frac{\tau_B}{\gamma h})$$

Même si les auteurs présentent leur démarche pour un cas d'écoulement laminaire, les équations 1D utilisées sont celles d'un cas turbulent. Les solutions de ces équations sont analytiques mais les auteurs ne les considèrent pas valables pour le front d'onde et en définissent des spécifiques. De plus, à partir du moment où la vitesse maximale est située en amont de l'axe de la digue, les auteurs considèrent

que le fluide résidus-eau se solidifie. Au final, la solution proposée n'est pas explicite et difficilement utilisable de manière simple. Jeyapalan et al [56] et [57] ont tracé des abaques permettant d'avoir accès à la distance parcourue par l'onde de submersion.

D'autre part, un des problèmes rencontrés par les auteurs est la détermination des paramètres du modèle de Bingham. Une formule est proposée reliant la teneur en eau à v_B et le terme τ_B est déterminé à partir d'une analyse de stabilité de pente.

Modèle de Chanson

Chanson [20] a proposé des solutions analytiques implicites pour les écoulements turbulents et laminaires. Il a considéré un écoulement turbulent d'un fluide parfait du type de la solution de Ritter avec un traitement différent pour la zone de front comme illustré en Figure 67. Des hypothèses différentes sont faites au niveau du front d'onde selon que l'écoulement est supposé laminaire ou turbulent. Ces hypothèses sont intégrées dans le terme de frottement.



Figure 67 : Principe de modification du front d'onde.

Conclusion quant aux modèles élaborés dans le cadre de la mécanique des fluides

A notre connaissance, il ne semble pas exister de modèle simple permettant de prévoir de manière satisfaisante l'onde de submersion du fluide résidus-eau générée par la rupture d'une digue de rétention. Les solutions de Ritter, qui s'appliquent au cas d'un fluide newtonien, en négligeant les frottements, sont faciles et pratiques d'utilisation mais surestiment la vitesse et la hauteur. Dans le cas d'une pente nulle ou faible, ces équations peuvent néanmoins donner une estimation a priori sécuritaire de la zone où la hauteur du fluide résidus-eau risque d'être supérieure à 0,7 m. La démarche générale pour aboutir à ce résultat est donnée sur le logigramme de la Figure 68. D'autre part, les valeurs de vitesse calculées à l'aide de ce modèle sont plus grandes que la valeur de 0,5 m.s⁻¹ proposée dans le critère de dangerosité, quel que soit la hauteur de digue considérée. Ce résultat est induit par l'hypothèse d'un fluide Newtonien en régime turbulent et le fait que les frottements ne sont pas pris en compte.

Des pistes de réflexions ont été proposées par différents auteurs pour prendre en compte le régime laminaire et le caractère non-newtonien du fluide de manière simple, ainsi que la forme du front d'onde. Ces pistes n'ont pas abouti à des modèles robustes et simples d'utilisation.



Figure 68 : Logigramme présentant la démarche proposée pour utiliser le modèle de Ritter.



