

RUPTURES DE BARRAGES DE STERILES MINIERS AU BRESIL : LIEN ENTRE NIVEAU DE SURETE ET ENCADREMENT REGLEMENTAIRE

Mine tailings dam failures in Brazil: the link between safety levels and the regulatory framework

Jean-Pierre PERSON – EILAN Infra (ex CNR ; ex COYNE et BELLIER)

EILAN Infra, 129 bd de la Croix-Rousse – 69004 Lyon

jpperson@free.fr

MOTS CLEFS

Barrage, Stériles, Coefficients de sécurité, Brésil, Minas Gerais, sûreté, rupture, réglementation

KEY WORDS

Dam, Sterile, Safety coefficients, Brazil, Minas Gerais, safety, failure, regulation

RÉSUMÉ

Le Brésil a connu récemment deux tragédies majeures liées à une rupture de barrage : celui de la mine de Mariana (compagnie minière Samarco) en novembre 2015 (19 morts, 43 millions de mètres cubes de résidus déversés créant une pollution aux métaux lourds sur 660 kilomètres à l'aval) et celui de la mine de Brumadinho (compagnie minière VALE) en janvier 2019 (272 morts dont une majorité parmi le personnel de la mine, 12 millions de m³ de résidus déversés).

Ces deux barrages se situent dans l'Etat du Minas Gerais, qui compte 364 barrages de résidus miniers. Ils sont tous les deux construits en matériaux meubles selon la technique « amont », technique considérée comme la plus économique, mais très fragile (50 barrages de ce type dans l'Etat du Minas Gerais dont 27 en opération à l'époque).

Le barrage de Fundão (Mariana) avait 90 m de haut : il n'y avait pas de plan d'alerte pour le barrage.

Le barrage de Brumadinho avait 86 m de haut et était constitué de 7 bermes. Il était en cours de « désactivation » lors de sa rupture. Le consultant allemand TÜV Süd avait émis le certificat de stabilité en septembre 2018. Dans son rapport de 2021, la Police Fédérale conclut à la rupture du barrage par liquéfaction de la couche basse, enclenchée par des forages verticaux de reconnaissance.

Ces tragédies ont conduit les autorités brésiliennes à renforcer la réglementation : le Brésil estime que son retard législatif en termes de sécurité des barrages miniers par rapport aux autres pays comparables devrait être comblé vers 2035. Ainsi, la loi fédérale 23.291 de l'Etat du Minas Gerais (Política Estadual de Segurança de Barragens : PESB) de 2019 interdit la technique de construction du type « amont » et oblige à la désactivation des barrages existants de ce type avant février 2022. Depuis, une résolution de la tutelle fédérale ANM (Agência Nacional de Mineração) de février 2022 a étendu ce délai à 2027 (90% des barrages) et 2035 (100%). La réglementation est aujourd'hui couverte par la résolution 95/2022 de l'ANM qui exige un coefficient de sécurité minimum vis-à-vis de la stabilité du barrage de 1,3.

L'enjeu principal aujourd'hui est de traiter les barrages à risque élevé, sachant que le processus de désactivation est long et complexe (études, réalisation, surveillance). A ce jour, il n'y a toujours aucune condamnation pénale dans les deux cas.

ABSTRACT

Brazil has recently experienced two major tragedies linked to dam failures: that of the Mariana mine (Samarco mining company) in November 2015 (19 dead, 43 million cubic metres of tailings spilled, creating heavy metal pollution over a distance of 660 kilometres downstream) and that of the Brumadinho mine (VALE mining company) in January 2019 (272 dead, most of them mine staff, 12 million cubic metres of tailings spilled).

These two dams are located in the state of Minas Gerais, which has 364 tailings dams. They were both built from loose materials using the 'upstream' technique, considered to be the most economical, but very fragile (50 dams of this type in the state of Minas Gerais, 27 of which were in operation at the time).

The Fundão dam (Mariana) was 90 m high: there was no warning plan for the dam.

The Brumadinho dam was 86 m high and comprised 7 berms. It was in the process of being 'deactivated' when it broke. German consultant Tüv Süd had issued the stability certificate in September 2018. In its 2021 report, the Federal Police concluded that the dam had failed due to liquefaction of the lower layer, triggered by vertical exploratory drilling.

These tragedies have led the Brazilian authorities to tighten regulations: Brazil believes that its legislative gap in terms of mining dam safety compared with other comparable countries should be closed by around 2035. Federal Law 23.291 of 2019 of the State of Minas Gerais (Política Estadual de Segurança de Barragens: PESB) prohibits the 'upstream' construction technique and requires existing dams of this type to be deactivated by February 2022. Since then, a resolution passed by the ANM (Agência Nacional de Mineração) in February 2022 has extended this deadline to 2027 (90% of dams) and 2035 (100%). The regulations are now covered by ANM resolution 95/2022, which requires a minimum safety coefficient of 1.3 for dam stability.

The main challenge today is to deal with high-risk dams, bearing in mind that the deactivation process is long and complex (studies, construction, monitoring). To date, there have been no criminal convictions in either case.

1. LES FAITS

1.1. Contexte

Globalement, le secteur minier représente 4% du PIB brésilien. En 2021, ce secteur générait 80% du solde commercial du Brésil et 1 million d'emplois directs et indirects.

L'état du Minas Gerais (Brésil) compte plus de 300 mines : il produit 53% des minéraux métalliques du Brésil dont 180 mille tonnes de minéraux de fer par an. Il existe 364 barrages de résidus associés à ces mines.



Figure 1 : Implantation des barrages miniers dans le Minas Gerais

Source : site ANM (en jaune, les barrages inclus dans la PNSB : Politique Nationale de Sécurité des Barrages ; en rouge, les barrages non inclus ; localisation des 2 barrages incriminés par flèches)

Ces barrages sont exécutés à l'avancement en matériaux meubles selon 3 techniques de soutènement :

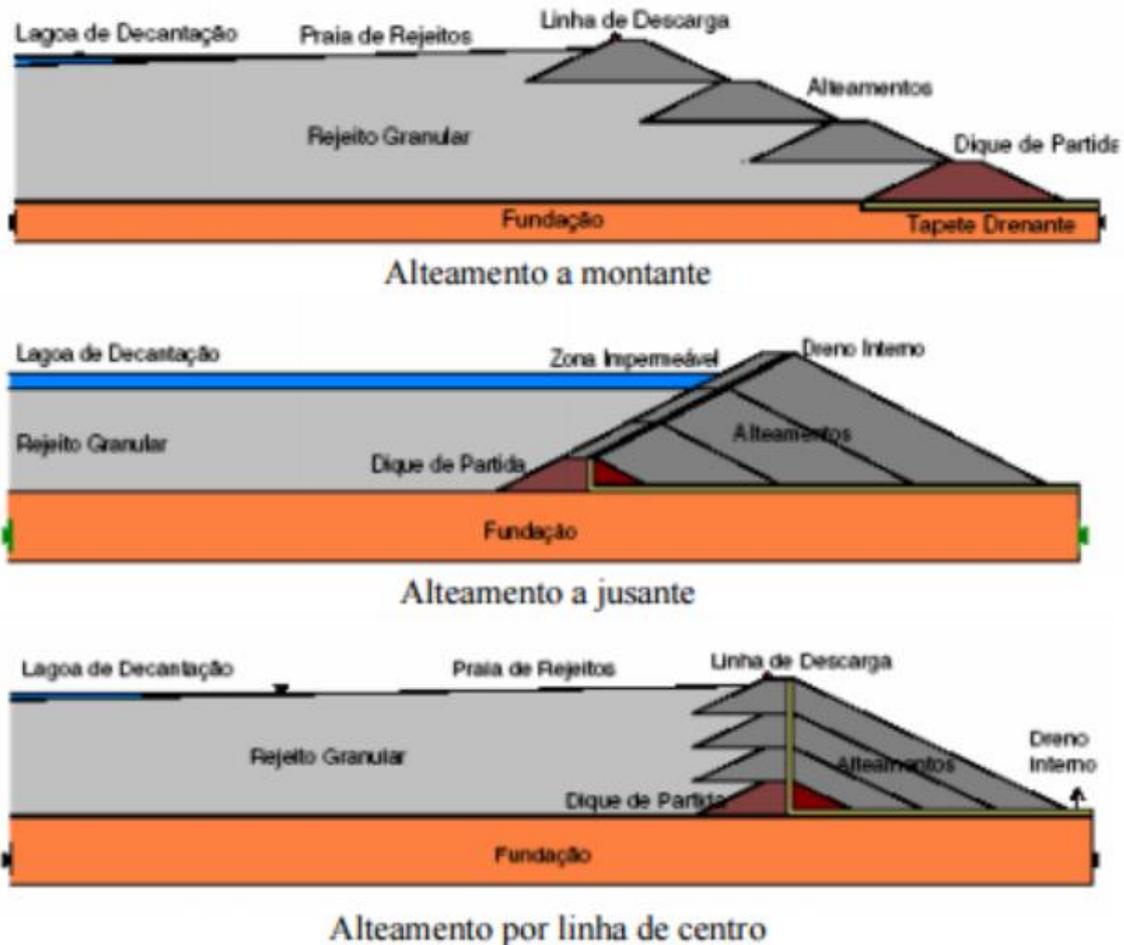


Figure 2: techniques de construction des barrages miniers

Source : Ajauro [6]

Ce type de barrage de résidus est délicat à dimensionner : il est soumis à des pressions amont variables suivant la densité du réservoir.

Au 1er coup d'œil, le schéma du haut montre la fragilité de la structure dans la construction du type « amont » (« a montante »). Pourtant, c'est la méthode de construction largement utilisée parce que plus économique. A partir d'une digue initiale, appelée digue de départ, les résidus sont déposés en amont de la crête sur les résidus précédemment déposés : une "plage" de résidus déjà sédimentés est formée, qui servira de base pour la construction de la levée suivante. Cette phase de sédimentation est essentielle. En 2020, il y avait 50 barrages du type « construction amont » dans l'Etat du Minas Gérais (73 dans tout le pays), dont 27 en opération et 23 « désactivés ».

Le schéma central montre la technique de construction du type « aval » (« a jusante ») : les résidus consolidés ne sont pas utilisés pour rehausser la digue. C'est la méthode la plus chère et la plus sûre.

Le schéma du bas montre une technique intermédiaire de construction du type « à axe central » (« por linha de centro ») : il s'agit d'un système intermédiaire en termes de coût, avec une disposition similaire à la méthode « amont ». Cependant, un drain accompagne l'élévation de la construction et les résidus sont évacués depuis la crête de la digue initiale.

En termes d'accidentologie, à la fin de l'année 2009, il est recensé 218 cas de rupture de barrages de résidus miniers dans le monde depuis le début du vingtième siècle ([2]). 67% des cas concernent les barrages construits par la méthode amont. Entre 2010 et juillet 2020, on dénombre 17 cas de rupture en Amérique (dont 6 au Brésil), 12 cas en Asie, 3 cas en Europe, 1 cas en Afrique et 1 cas en Océanie.

1.2. Barrage de Fundão (Mariana)

Le barrage de Fundão (Mariana) était exploité par la compagnie minière Samarco (filiale de Vale et BHP Billiton). Ses caractéristiques géométriques sont : 500 m de large en crête, 90 m de haut. Il a été conçu entre 2004 et 2007 et construit, selon la technique du type « amont » en 2008 et 2009.

Le 5 novembre 2015, le barrage rompt depuis la rive gauche : 19 morts ; plus de 40 millions de mètres cubes de résidus déversés dans le Rio Doce et ses affluents : la pollution aux métaux lourds s'étend sur 660 km à l'aval jusqu'à la mer. Il s'agit de la plus grande catastrophe environnementale jamais survenue au Brésil. La vidéo suivante montre bien le désastre :

<https://noticias.r7.com/minas-gerais/mg-record/videos/mpf-espera-condenacao-de-mineradoras-em-r-100-bilhoes-ainda-nesta-semana-30102023>

Le schéma ci-dessous détaille la cinétique de la libération de résidus, qui sont passés au-dessus du barrage aval de Santarém :

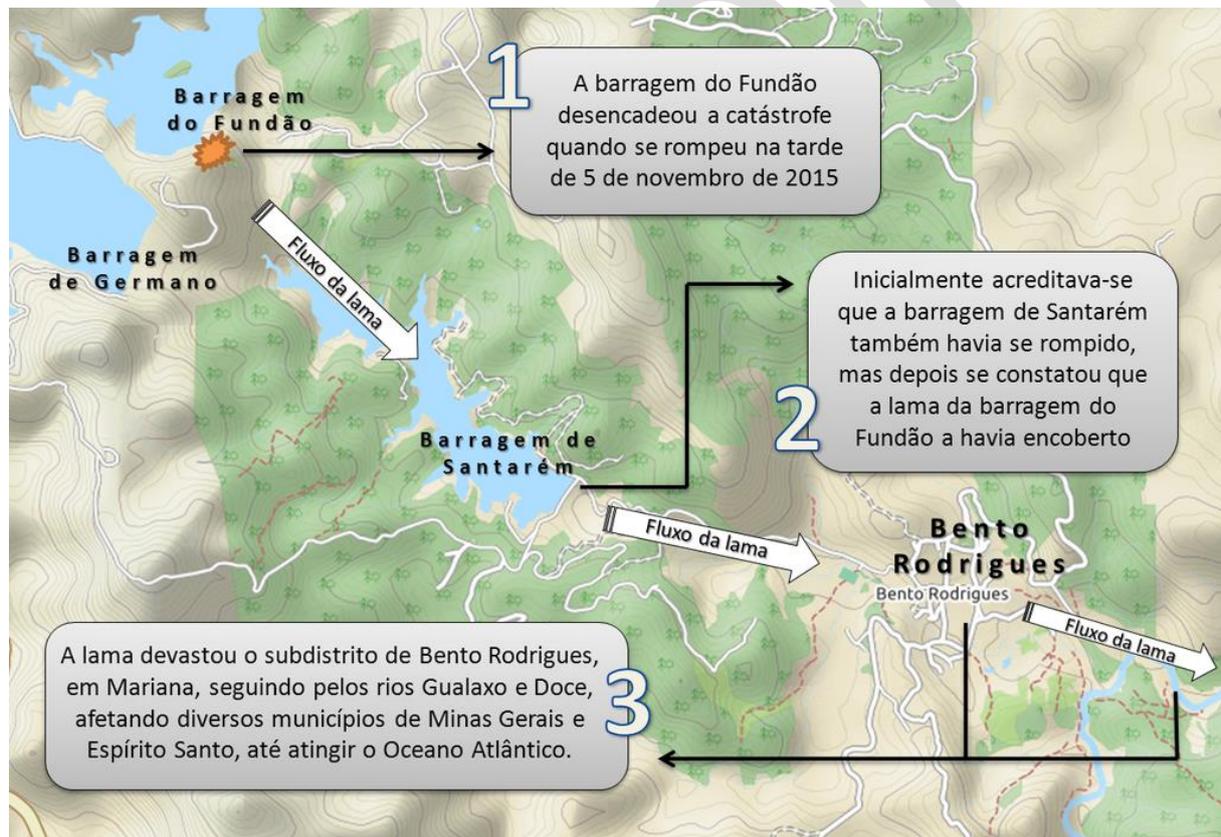


Figure 3 : cinétique de rupture du barrage de Mariana

Source : Wikipedia

[traduction DeepL.com: 1 : le barrage de Fundão a déclenché la catastrophe en se rompant dans l'après-midi du 5 novembre 2015. 2 : on a d'abord pensé que le barrage de Santarém s'était également rompu, mais on s'est ensuite rendu compte que les boues du barrage de Fundão l'avaient recouvert. 3 : la boue a dévasté le sous-district de Bento Rodrigues, à Mariana, en suivant les rivières Gualaxo et Doce, affectant plusieurs municipalités de Minas Gerais et Espírito Santo, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'océan Atlantique]

Le barrage présentait des problèmes de drainage depuis 2009. Des boues de résidus avaient envahi en de nombreuses occasions la zone tampon sableuse entre les barrages unitaires et les résidus mis en place, diminuant l'efficacité du drainage et occasionnant la saturation des matériaux ([9]). Une surcharge rapide de ces matériaux (élévation du barrage durant l'année 2015) a rendu les conditions de rupture et de liquéfaction possibles, accélérées par des événements sismiques proches de faible amplitude (tirs miniers). De plus, il n'existait pas de plan d'urgence pour le barrage (PAE), ce qui a amplifié les conséquences de la rupture.

1.3. Barrage B1 (Brumadinho)

Le barrage B1 de Brumadinho se situe dans la région métropolitaine de Belo Horizonte (à 60 km). Il fait partie du complexe minier (fer) Córrego do Feijão. Sa fin de construction date de 1976. Il a été racheté par VALE en 2001. Ses caractéristiques géométriques sont : 720 m de large en crête, 86 m de haut, 7 bermes (dont une faite dans les 10 dernières années).

Selon VALE, ce barrage était inactif depuis 2015 (arrêt des rejets miniers dans le réservoir en juin 2016, après la catastrophe de Mariana), avec un projet en cours de désactivation (« descaracterização » : voir définition au §.3.3).

En 2018, une série de longs drains horizontaux (100 m) ont été exécutés pour tenter de rabattre la nappe interne : en juin 2018, pendant le forage d'un de ces drains, le massif de la digue de départ a connu une fracturation hydraulique sous l'effet de la pression d'injection, ce qui a stoppé cette campagne (14 drains exécutés sur 29 prévus) ([2]).

En septembre 2018, la société allemande TÜV SÜD délivre le certificat de stabilité (DCE) en pointant des problèmes de drainage ([3]).

Le barrage de Brumadinho a rompu brusquement le 25/01/2019 à 12h28min heure locale : 272 morts dont plus de 90% parmi le personnel interne ou externe de la mine, 12 millions de m³ de résidus déversés. Les piézomètres, qui étaient relevés toutes les cinq minutes, ne montraient aucune anomalie lors du dernier relevé, effectué trois minutes avant la rupture.

La vidéo suivante, extraite du Journal National de TV Globo, montre la séquence de la tragédie depuis une caméra fixe sur le site : on voit bien le déclenchement de la rupture dans la partie basse du barrage :

<https://www.youtube.com/watch?v=xSmjaP1cUAK>



Figure 4: rupture du barrage de Brumadinho

Source : VALE

Sur cette image extraite de la caméra de surveillance du site, au premier plan, donc à l'aval du barrage, les installations de VALE dont le réfectoire.

Des explications d'un ingénieur brésilien sur le site brésilien Canal da Engenharia (site pédagogique animé par des ingénieurs) sur la technique de construction et ses risques :

https://www.youtube.com/watch?v=ZR8OeTzyDs&ab_channel=OCanaldaEngenharia

2. L'ANALYSE DE LA RUPTURE DU BARRAGE DE BRUMADINHO

Le rapport sur les causes de la tragédie a été présenté le 26/01/2019 par la police fédérale (PF) ([1]). Selon elle, la réalisation d'un forage vertical – débuté 5 jours avant la rupture - a été, par la pression d'eau ponctuelle induite, le déclencheur de la liquéfaction qui a provoqué la rupture du barrage. Ce forage était destiné à caractériser la partie inférieure de la structure composée d'un matériau plus fin, de faible capacité portante et, par conséquent, plus fragile et installer de nouveaux instruments de surveillance. Le 25 janvier, lorsque la rupture s'est produite, la perforation a atteint le point le plus fragile, à 68 mètres de profondeur : le schéma suivant la localise :

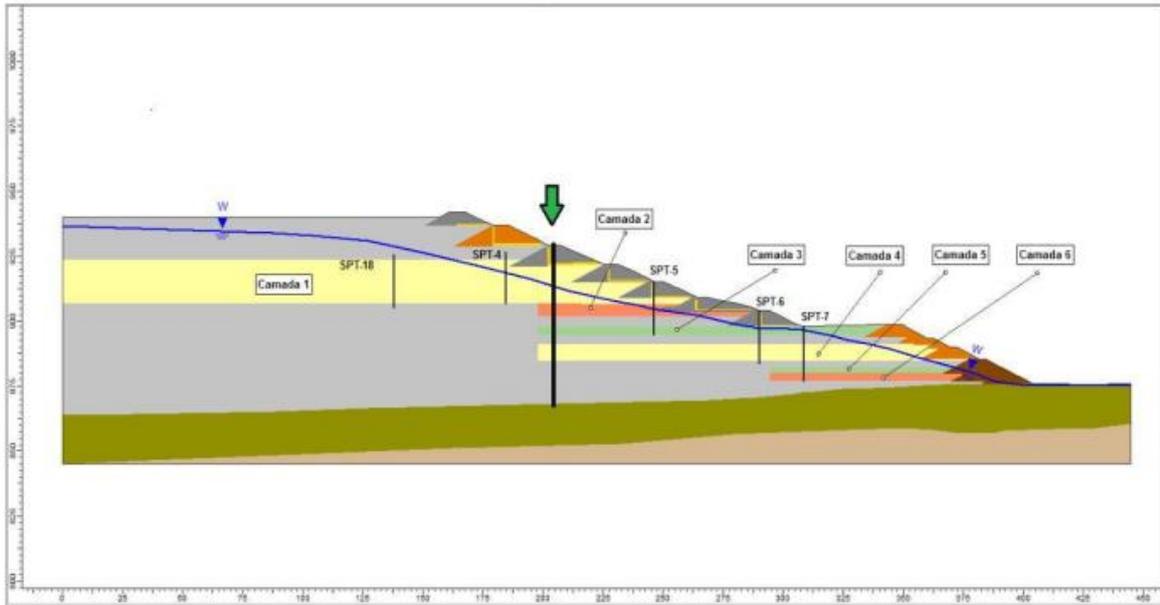


Figure 5: localisation de la perforation de déclenchement de la rupture du barrage de Brumadinho

Source : [2]

Cependant, le rapport PF indique que, pour des conditions de stabilité acceptables, une perforation ne serait pas suffisante pour provoquer la rupture : mais la structure elle-même était fragile, les conditions de stabilité étant en dessous de ce qui est stipulé par les normes internationales. L'état de stabilité du barrage a été étudié par les différents bureaux impliqués. Les analyses de stabilité en conditions non drainées ont été développées pour évaluer la rupture du barrage due à la liquéfaction. Les textes réglementaires brésiliens (norme NBR-13028 de 2017) ne fournissaient aucun coefficient de sécurité pour cette situation.

Dans son rapport de certificat de stabilité (DCE) ([3]), TÜV SÜD affiche un coefficient de sécurité en situation non drainée (avec une résistance maximale non drainée S_u/σ'_v) de 1,09. Il conclut à la stabilité en adoptant un coefficient de sécurité minimum de 1,05, en accord avec Leshchinsky and Ambauen (coefficient de 1 en situation exceptionnelle et coefficient de méthode de calcul à 1,05) ([4]). Par contre, il ne suit pas la méthodologie d'Olson ([5]) qui adopte une valeur minimale de 1,3. Il ne suit pas non plus la recommandation du panel d'experts PIESEM (Panel indépendant d'experts pour la sécurité et la gestion des risques des structures géotechniques) ([8]), organisé par Vale en décembre 2017, à savoir une valeur minimale de 1,3 en condition non drainée. Dans l'approche du risque monétarisé, la probabilité de rupture par liquéfaction a été estimée à 3×10^{-4} pour un coefficient de sécurité de 1,09 : le rapport PF indique que ce niveau de probabilité est inacceptable vis-à-vis du nombre de pertes humaines estimé (214).

En termes d'exploitation, il a été mis en évidence le non-respect d'une largeur minimale de « plage » (150 m) entre le réservoir de décantation et la crête du barrage, ce qui a contribué à élever la ligne d'eau dans le corps du barrage. De plus, les règles de lancement des résidus dans le réservoir n'ont pas été toujours respectées (matériaux à grande granulométrie près du barrage, matériaux à plus petite granulométrie en amont), ce qui favorise la formation de nappes perchées ([2]). Ces éléments sont repris dans un rapport d'un panel d'experts en décembre 2019 ([10]).

En termes de surveillance, TÜV SÜD a noté que certains instruments de mesure (inclinomètres) n'étaient pas exploitables.

Dans le cadre du plan d'urgence, c'est un centre de contrôle (CCS) qui évalue la situation : même une sirène d'alerte ne peut être déclenchée sans que le CCS n'en soit préalablement informé. Le site de la mine de Brumadinho ne comportait pas de plan d'urgence spécifique ([2]).

3. LA REGLEMENTATION DES BARRAGES AU BRESIL

3.1. Autorités de régulation

La sécurité des barrages au Brésil dépend de 4 autorités fédérales, suivant leur destination :

- Barrages hydroélectriques : ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), l'autorité fédérale de régulation de l'énergie électrique
- Barrages de résidus miniers : ANM (Agência Nacional de Mineração)
- Barrages de résidus industriels : IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis)
- Barrages pour usages multiples hors hydroélectricité : ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), l'agence nationale des eaux ; de plus, elle est chargée de promouvoir la coordination entre les organismes d'inspection des barrages et gère le Système national d'information sur la sécurité des barrages (SNISB).

Au Brésil, la gestion des eaux est administrée en fonction des divisions politiques et non pas par bassin hydrographique. Il n'y a donc pas d'intégration des politiques le long d'un même cours d'eau et de ses affluents.

3.2. Règlementation antérieure aux tragédies

Avant les tragédies de Mariana et Brumadinho, c'était la Loi n° 12.334/2010 qui traitait de la Politique Nationale de Sécurité des Barrages (PNSB) pour les barrages (tous usages confondus):

- d'une hauteur supérieure ou égale à 15 m;
- dont le réservoir a une capacité supérieure ou égale à 3.000.000m³ ;
- dont le réservoir contient des résidus dangereux.

Elle stipulait un système national d'informations (SIGBM), des plans de sécurité de barrages (PSB), des inspections de sécurité, des révisions périodiques de sécurité et des plans d'urgence de barrages (PAEBM). Les plans de sécurité de barrages devaient inclure une identification et une évaluation des risques.

Les écarts entre cette loi et les pratiques sur le terrain sont en partie imputables à l'inertie des entrepreneurs et au manque de moyens de l'autorité de contrôle (en 2014, l'ANM comptait 1 022 postes vacants, soit la moitié de sa capacité, selon un audit du Contrôleur général de l'Union).

3.3. Règlementation postérieure aux tragédies

En préambule, lors du 10^{ème} congrès CBMINA (congrès brésilien des mines à ciel ouvert et souterraines) d'avril 2021, les parties prenantes brésiliennes ont exposé le positionnement du Brésil dans le paysage international réglementaire. Le schéma suivant, commenté par le bureau d'avocats Cescon Barriero, montre que le Brésil aurait un retard réglementaire de l'ordre de 20 ans sur les autres grands producteurs miniers qui serait comblé vers 2035 : ce retard est figuré sur le schéma (extension des double flèches), en considérant que les autres pays sont matures en termes de sécurité.

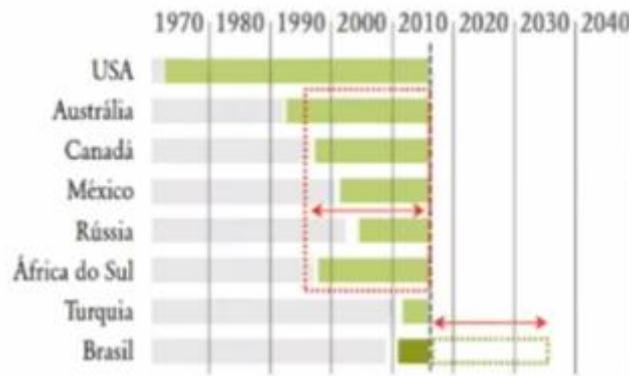


Figure 6: positionnement du Brésil dans le paysage international réglementaire des barrages miniers

Source : Cescon Barrieu - 10^{ème} congrès CBMINA d'avril 2021

Suite à la tragédie de Brumadinho, la loi 23.291 de l'Etat du Minas Gerais (Política Estadual de Segurança de Barragens : PESB ; loi dite "Mar de Lama Nunca Mais") de 2019 oblige à la désactivation des barrages de stériles miniers de construction type « amont » avant février 2022 et interdit tout nouveau barrage de ce type. Depuis et suite aux réactions des entrepreneurs sur la complexité du processus, une résolution de la tutelle fédérale ANM (Agência Nacional de Mineração) de février 2022 a étendu ce délai à 2027 (90% des barrages concernés) et 2035 (100%). Cette loi renforce aussi le système d'alerte à l'aval. La loi stipule que la mise en œuvre du PESB doit se faire en conjonction avec les dispositions du PNSB.

Ce processus de désactivation (« descaracterização ») est expliqué dans les résolutions idoines : la fermeture des structures doit s'accompagner de l'enlèvement des infrastructures associées et, pour ce faire, certaines règles doivent être respectées. Il s'agit notamment d'éliminer ou de réduire l'entrée des eaux de surface et souterraines dans le réservoir et d'adopter des mesures garantissant la stabilité physique, chimique et biologique à long terme des structures qui restent en place. En outre, un suivi doit être assuré pendant la période nécessaire pour vérifier l'efficacité des mesures adoptées pour la mise hors service.

La PESB, en plus de déterminer la désactivation de tous les barrages élevés par la méthode amont, a augmenté les exigences pour la délivrance de nouvelles licences pour la construction d'un barrage de déchets ou de résidus. En outre, la nouvelle législation détermine la mise en œuvre de divers instruments de gestion visant à accroître la qualité et l'intensité de la surveillance exercée sur les barrages installés dans l'État. Elle stipule que les barrages qu'elle traite seront soumis à un audit technique de sécurité, sous la responsabilité de l'entrepreneur, à des intervalles définis en fonction du potentiel de dommages environnementaux.

En outre, elle établit que le rapport d'audit technique de sécurité du barrage (RTSB), accompagné des avis de responsabilité technique (ART) des professionnels responsables, doit être remis à l'organisme ou à l'entité compétente du système national de l'environnement et des ressources hydriques (SISEMA) avant le 1er septembre de l'année au cours de laquelle il a été élaboré, ainsi que la déclaration de l'état de stabilité (DCE). Si l'entrepreneur ne présente pas cette déclaration dans les délais impartis ou si l'auditeur indépendant ne conclut pas à la stabilité, l'organisme ou l'entité environnementale compétente ordonnera la suspension immédiate de l'exploitation de la structure jusqu'à ce que la situation soit régularisée.

Cette nouvelle réglementation est accompagnée d'un guide méthodologique émis par l'ANM pour améliorer l'évaluation et le traitement des risques ([7]).

Au niveau fédéral, la loi 14.066/2020 constitue la nouvelle Politique Nationale de Sécurité des Barrages (PNSB) : elle stipule l'enlèvement de toutes les installations administratives situées dans la zone d'auto-sauvetage (ZAS). Cette zone correspond au tronçon de la vallée en aval du barrage où l'on considère que l'alerte de la population (en cas d'accident, tel que la rupture d'un barrage) relève de la responsabilité du maître d'ouvrage, parce que les autorités compétentes n'ont pas le temps d'intervenir en cas d'urgence. La plus grande des distances suivantes doit être retenue pour sa délimitation : la distance qui correspond à un temps d'arrivée de l'onde de crue égal à 30 minutes ou à 10 km.

La résolution 95/2022 de l'ANM impose un classement des barrages miniers (élevé, moyen ou faible) en fonction de leur catégorie de risque (CRI) – en annexe de la résolution, matrice de classification à partir des caractéristiques techniques, de l'état de conservation et du plan de sécurité - et des dommages potentiels associés (DPA) – en annexe de la résolution, matrice de classification à partir du volume total du réservoir, de l'existence de population à l'aval, de l'impact environnemental et de l'impact socioéconomique. Elle impose un facteur de sécurité minimal de 1,3 en condition non drainée pour les analyses de stabilité et les études de sensibilité à la liquéfaction pour la résistance de pointe. Elle oblige l'entrepreneur à maintenir un système de surveillance automatisé d'instrumentation pour les barrages à DPA élevé.

4. LES ACTIONS EN COURS

4.1. Situation des barrages a risques

En juin 2024, parmi les 203 barrages miniers du Minas Gerais suivis dans le PNSB, 155 sont considérés comme à bas risque, 17 à risque moyen et 31 à risque élevé : dont 3 sont encore en niveau d'urgence 3 (risque imminent d'effondrement, selon les termes de l'ordonnance n° 70.389, du 17 mai 2017 - spécifique aux barrages miniers - de l'ANM) : ITATIAIUÇU (entreprise : ARCELORMITTAL BRAZIL), Forquilha III à OURO PRETO (entreprise : VALE) et Sul Superior à BARÃO DE COCAIS (entreprise : VALE).

Il est intéressant de noter que certaines déconstructions sont pilotées à distance dans un objectif de sécurité (à 2 :10 min de la vidéo suivante, en portugais) :

[Jornal Hoje | Eliminação das barragens à montante está atrasada | Globoplay](#)

4.2. Aspects judiciaires

A ce jour, aucune condamnation pénale n'a été prononcée pour ces deux tragédies.

4.2.1. Mariana

En 2019, la Cour fédérale régionale de la 1ère région a abandonné les charges de meurtre et de lésions corporelles contre tous les accusés. Les 19 décès causés par la tragédie ont été considérés par les tribunaux comme des conséquences de l'inondation causée par la rupture du barrage.

En 2024, la justice fédérale du Minas Gerais a condamné SAMARCO à une indemnisation socio-environnementale de 14,8 Milliards US\$.

Un procès est en cours au Royaume Uni (700000 plaignants), où se trouve le siège de BHP Billiton, actionnaire avec VALE de la mine de Mariana. En juillet 2024, Vale s'est retiré du procès, en laissant seule BHP Billiton pour la défense.

4.2.2. Brumadinho

En février 2021, un accord entre VALE et l'Etat de Minas Gerais aboutit à un montant des réparations socio-environnementales de 7,1 Milliards US\$ pour la tragédie de Brumadinho. Pour mémoire, une étude de 2017 du bureau Potamos évaluait le risque monétisé d'une rupture du barrage sans alerte préalable : 214 morts et 4,3 Milliards US\$ valeur 2015 (y compris la valorisation de pertes humaines : 2,6 Millions US\$/vie perdue) ([1]).

La Cour fédérale brésilienne a accepté l'acte d'accusation proposé par le ministère public fédéral (MPF) contre des employés de Vale et TÜV SÜD. En parallèle, un procès civil se tient à Munich contre TÜV SÜD (1400 plaignants).

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les tragédies de Mariana et Brumadinho constituent deux ruptures majeures dans le monde des barrages de stérile minier. Elles ont conduit les autorités brésiliennes à renforcer la réglementation en interdisant la technique de construction du type « amont », en obligeant à la désactivation des barrages existants de ce type,

et en exigeant un coefficient de sécurité minimum vis-à-vis de la stabilité du barrage de 1,3. Le Brésil espère ainsi combler le retard réglementaire de l'ordre de 20 ans sur les autres grands pays producteurs miniers.

L'enjeu principal aujourd'hui est de traiter les barrages à risque élevé, sachant que le processus de désactivation est long et complexe (études, réalisation, surveillance).

REMERCIEMENTS

Claudinei CRUZ, chef de la Division de la Sécurité des Barrages miniers du service de contrôle ANM du Minas Gerais.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] MJSP - POLÍCIA FEDERAL - SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL EM MINAS GERAIS - SETOR TÉCNICO-CIENTÍFICO LAUDO N° 1070/2019 – SETEC/SR/PF/MG
- [2] Ministério da Economia - Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais - Relatório de Análise de Acidente de Trabalho - Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019
- [3] REVISÃO PERIÓDICA DE SEGURANÇA DE BARRAGEM MINA CÓRREGO FEIJÃO – BARRAGEM I RELATÓRIO TÉCNICO - Documento TÜV SÜD BUREAU RC-SP-117/17, Revisão 4, de 24/08/2018
- [4] Leshchinsky, B. and Ambauen S. (2015). Limit Equilibrium and Limit Analysis: Comparison of Benchmark Slope - Stability Problems. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001347
- [5] OLSON, S.M. (2001). Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana– Champaign, Urbana, Ill
- [6] ARAUJO, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] AVALIAÇÃO DA MATURIDADE NA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS - F.ARAUJO, C.O.CRUIZ (2022)- DOI: 10.15628/holos.2022.12563
- [8] Relatório da 2a. Reunião do PIESEM-N (Versão Final), Belo Horizonte, 5 de julho de 2018 : « Relatório PIESEM-N_201806_Final.pdf »
- [9] Ineris - 178736 – 1971292 - 12/04/2021 - Ruptures de barrages de résidus miniers : retour d'expérience et évaluation du phénomène
- [10] Robertson, P.K., L.d. Melo, D.J. Williams, and G.W. Wilson. 2019. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I