

Rapport du groupe de travail relatif à l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium



Version de juillet 2022

Le présent rapport a fait l'objet d'un groupe de travail, qui s'est réuni de janvier 2017 à janvier 2022, composé de représentants de :

l'ASN (co-pilotage du GT)

- Dorothée Conte
- Sarah Mauroux
- Odile Palut-Laurent

la DGPR (co-pilotage du GT)

- Sandrine Busson
- Fabrice Candia
- Laurent Marie
- Tarik Oussalah

l'IRSN (secrétariat technique)

- Bruno Cessac
- Amélie de Hoyos
- Amandine Katz
- François Marsal

Orano Mining

- Philippe Crochon
- Guillaume Kern

Mines ParisTech

- Jean-Alain Fleurisson

Géoderis

- Isabelle Vuidart

BRGM

- Jacques Morel
- Philippe Sabourault

l'Andra

- Florence Espiet Subert
- Fanny Gérard

France Nature Environnement

- Dominique Boutin

RESUME

L'exploitation des mines d'uranium en France entre 1948 et 2001 a conduit à la production de plus de 50 millions de tonnes de résidus de traitement de minerais. Les résidus sont majoritairement constitués des minéraux du minerai, les radionucléides majoritairement présents dans ces résidus étant le radium et l'uranium. Ils sont assimilables à des déchets radioactifs de procédé (de très faible à faible activité) et sont stockés dans les 17 installations de stockage réglementées en tant qu'installations classées pour la protection de l'environnement, sous la responsabilité d'Orano Mining.

Certains de ces stockages mettent en jeu, pour confiner les résidus, des ouvrages dits « de ceinture » devant faire l'objet d'une analyse de stabilité à long terme¹.

Dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), un groupe de travail (GT) pluraliste intitulé « maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium », composé de représentants de différentes parties prenantes (experts techniques, exploitant, administrations et une association de protection de la nature et de l'environnement), a été mandaté par la DGPR et l'ASN une première fois en juillet 2014 puis en juillet 2018 (cf. Annexe 9.1), avec pour principale mission d'élaborer une méthodologie permettant d'éclairer les parties prenantes sur les enjeux liés à l'évaluation du maintien à long terme de ces ouvrages. Le présent rapport vise ainsi à proposer une démarche méthodologique d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium. Cette démarche prend en compte, notamment, les éléments de contexte suivants :

- compte tenu de la période radioactive des radionucléides présents dans les résidus miniers, les risques radiologiques et chimiques associés à leur stockage perdureront sur des échelles de temps de l'ordre de dizaines de milliers d'années sans commune mesure avec la durée de vie des installations industrielles classiques (de l'ordre de la centaine d'années). C'est donc sur ces échelles de temps bien plus importantes que celles classiquement considérées qu'il convient d'évaluer la tenue des ouvrages de ceinture. A cet égard, le GT estime qu'aucune disposition raisonnablement envisageable à la conception ou via des renforcements ne permet de garantir, en l'absence d'entretien, la tenue mécanique de ces ouvrages sur une durée supérieure à quelques centaines d'années, notamment pour pallier les effets de l'érosion naturelle. Aussi, le GT considère qu'il apparaît indispensable que ces ouvrages fassent l'objet d'une surveillance et d'une maintenance la plus longue possible ; la prolongation de cette contrainte sur les générations futures nécessite en outre de mettre en œuvre des dispositions visant à préserver la mémoire de ces stockages aussi longtemps que possible,
- la possibilité de rechercher dès la conception, ou le cas échéant via des renforcements, une tenue mécanique des ouvrages de ceinture sur une durée d'environ un millier d'années vis-à-vis d'aléas autres que l'érosion, en particulier vis-à-vis d'aléas naturels (pluviométrie, séisme) d'ampleur dite « exceptionnelle » en cohérence avec cette durée de vie, et/ou vis-à-vis des niveaux d'eau importants dans l'ouvrage qui résulteraient de l'absence de maintenance des systèmes de drainage. Dans cette optique, différentes situations d'évolution du stockage à la suite de la survenue d'un aléa naturel, de l'arrêt de la maintenance ou du cumul des deux, ont été envisagées. La stabilité des ouvrages doit ainsi être évaluée en conditions courantes (fonctionnement normal) ainsi que, dans les cas les plus défavorables, en considérant un niveau d'eau maximal dans l'ouvrage ainsi que la survenue d'une pluviométrie exceptionnelle ou d'un séisme exceptionnel,
- l'évaluation de la probabilité qu'une faille active provoque une rupture de sol en surface, en complément de l'analyse de l'aléa sismique, pour les sites présents dans des régions d'aléa sismique dits « modéré » ou « fort »,
- l'analyse des risques de liquéfaction, d'érosion interne et d'érosion externe, qui sont la plupart du temps engendrés par ces aléas naturels,

¹ A noter que plus de la moitié des installations de stockage mettent en jeu des ouvrages de ceinture pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de hauteur barrant d'anciennes mines à ciel ouvert ou des bassins dans lesquels les résidus ont été regroupés. Les résidus de traitement minier peuvent également être ceinturés par des merlons de hauteur plus faible, les travaux du GT ayant conduit pour ces derniers à considérer l'évaluation de la tenue à long terme comme moins prioritaire dans la mesure où leur rupture conduirait à des conséquences moindres.

- l'état des lieux des méthodes les plus pertinentes pour évaluer la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers qui a été établi par le GT. En particulier, une liste de paramètres à acquérir pour constituer le modèle géotechnique à la base des évaluations de stabilité est proposée ainsi que les critères permettant de vérifier la tenue des ouvrages aux différents niveaux de sollicitation précités. Lorsque les résultats des évaluations de stabilité des ouvrages montrent que leur tenue aux différentes situations analysées n'est pas garantie, il convient de présenter les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage en termes d'étendue de l'épandage des matériaux hors du stockage en s'appuyant au besoin sur une méthodologie de l'Ineris reprise par le présent GT.

Au-delà des aspects directement liés à l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les résidus de traitement de minerais d'uranium, ce rapport présente :

- la réglementation et les guides encadrant le domaine des ouvrages ceinturant les résidus miniers d'uranium,
- le retour d'expérience concernant les causes et conséquences de défaillances d'ouvrages de retenue à travers le monde².

Les résultats des évaluations, dont Orano Mining a la charge, constitueront un des éléments d'appréciation de l'impact à long terme des stockages de résidus miniers et pourront être utiles aux prises de décisions concernant les actions à mettre en œuvre sur ces différents stockages. Enfin, étant donné les durées en jeu, la résistance des ouvrages aux aléas nécessite une réévaluation régulière.

Il est utile de souligner que ce rapport va au-delà de la réglementation en vigueur sur certains points, et ceci afin de prendre en compte les spécificités de ces ouvrages sur le long terme. **Ce rapport n'a ainsi pas vocation à être utilisé par les inspecteurs de l'environnement pour l'application de leur pouvoir de police, la démarche méthodologique d'évaluation visant la tenue à long terme des ouvrages.**

² Celui-ci a d'ailleurs mis en évidence que les accidents sont principalement liés à des défauts de reconnaissance géologique et géotechnique, à des défauts de conception des ouvrages, à une insuffisance de maintenance ou de gestion des niveaux d'eau dans l'ouvrage, ou encore à des événements extrêmes telles que de fortes précipitations ou des séismes. Ces éléments confirment la nécessité d'évaluer la stabilité des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de minerais d'uranium en France en considérant la survenue de telles situations sur des échelles de temps pertinentes au regard des risques liés à ces installations.

SYNTHESE DES RECOMMANDATIONS

Dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), un sous-groupe de travail, associant l'ensemble des parties prenantes concernées par la problématique minière uranifère, a été chargé d'élaborer la doctrine d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium. Dans cette perspective, les membres du groupe de travail ont émis dix recommandations, qui sont détaillées dans ce rapport. L'objectif est de permettre à Orano Mining de réaliser les études concernant l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium suivant la méthodologie décrite dans ce rapport, et ainsi vérifier et garantir la robustesse de ces ouvrages à long terme.

Nota :

- Le terme « ouvrage » utilisé dans ce rapport désigne l'ouvrage de ceinture en lui-même, ses fondations et les installations annexes (évacuateurs de crues, collecteurs d'eaux, ...) concourant à son bon fonctionnement.
- Seule l'évaluation de la fonction de rétention mécanique des éléments contenus dans le stockage³, assurée par les ouvrages de ceinture, fait l'objet du présent rapport.

Situations et aléas du stockage à considérer

R1 – Pour évaluer la stabilité des ouvrages ceinturant les stockages de résidus à long terme, le groupe de travail recommande de considérer *a minima* cinq situations d'évolution possible du stockage, récapitulées dans le tableau ci-dessous. Ces situations tiennent compte de la présence ou non d'une maintenance effective de l'ouvrage, du niveau d'eau en son sein et des aléas naturels auxquels il est soumis.

Situation	Phase de vie du stockage	Niveau d'eau dans l'ouvrage	Aléas naturels
1	« Maintenance effective »	Normal (drains fonctionnels)	Sans aléa
2		Normal (drains fonctionnels)	Séisme associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)
3		Piézométrie importante (niveau d'eau élevé lié aux infiltrations très importantes)	Pluviométrie exceptionnelle débit de ruissellement, calculé à partir des pluies centennales, majoré d'un facteur 2
4	« Absence de maintenance »	Piézométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Sans aléa
5 (en sensibilité)		Piézométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Séisme associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)

³ Éléments contenus dans le stockage : des résidus de traitement minier, des stériles miniers et des boues de station de traitement des eaux (rubrique 1735), ainsi que, parfois, des déchets issus du démantèlement des activités minières... (cf. § 2.1)

Prise en compte de l'aléa sismique

R2 - Pour la prise en compte de l'aléa sismique, le groupe de travail recommande de prendre en compte des mouvements sismiques associés :

- soit à une période de retour de 10 000 ans ;
- soit à un ou des séismes déterministes (de préférence séisme majoré de sécurité ou paléoséisme),

et de justifier le choix de l'approche retenue en termes de données d'entrées et de prise en compte des incertitudes associées.

R3 - Pour la prise en compte de l'aléa sismique, le groupe de travail recommande d'évaluer, pour les sites de stockages situés en zone de sismicité au moins modérée, la probabilité d'une rupture du sol en surface liée le cas échéant à la réactivation d'une faille présente sur le site.

Prise en compte de l'aléa climatique

R4 - Pour la prise en compte de l'aléa climatique, le groupe de travail recommande que :

- pour l'évaluation relative à la phase de maintenance effective du stockage, l'exploitant retienne le niveau d'eau le plus élevé susceptible d'être atteint dans l'ouvrage compte tenu des capacités d'évacuation de ses dispositifs de drainage et des dispositifs d'alerte relatifs aux niveaux d'eau ;
- pour l'évaluation relative à la phase d'absence de maintenance, l'exploitant retienne le niveau piézométrique maximal dans l'ouvrage et au sein des résidus stockés.

R5 - Pour l'évaluation du risque d'érosion externe de l'ouvrage, le groupe de travail recommande de considérer un scénario de ruissellement résultant d'une pluie centennale sur le bassin versant situé en amont de l'ouvrage, en majorant le débit issu de cette pluie d'un facteur 2.

R6 - Au vu de l'évolution en cours de l'état de l'art concernant l'impact du changement climatique sur les pluies et débits extrêmes, le groupe de travail recommande que soit menée une veille scientifique afin de vérifier périodiquement que les pluies centennales et les débits considérés pour évaluer les risques d'érosion de l'ouvrage ne sont pas remis en cause par les effets du changement climatique.

Evaluation des conséquences en cas de rupture de l'ouvrage

R7 - Le groupe de travail recommande que lorsque les résultats des évaluations de stabilité des ouvrages montrent que leur tenue aux aléas sismiques et climatiques n'est pas garantie, notamment avec des valeurs de facteurs de sécurité insuffisantes, les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage soient présentées en termes d'étendue de l'épandage des matériaux hors du stockage.

R8 - Le groupe de travail recommande dans un second temps, sur la base des résultats de ces évaluations (cf. R7 ci-avant), d'évaluer les conséquences sanitaires et environnementales liées à cet épandage de matériaux, à la mise à nu des résidus et/ou à une contamination des cours d'eau et transferts de pollution qui pourraient en résulter, selon les scénarios d'évolution du stockage envisageables sur toute la durée de nocivité des résidus.

Éléments relatifs à la démarche de stabilité des ouvrages à long terme

R9 - le groupe de travail considère que les ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium doivent faire l'objet d'une surveillance et d'une maintenance régulière le plus longtemps possible, en sachant qu'aucune disposition constructive à la conception de ces stockages ou via des renforcements ne permet de garantir une tenue mécanique des ouvrages de ceinture supérieure à quelques centaines d'années en l'absence d'entretien,

R10 - le groupe de travail considère que la résistance des ouvrages aux aléas nécessite une réévaluation régulière.

SOMMAIRE

RESUME	3
SYNTHESE DES RECOMMANDATIONS	5
SOMMAIRE	7
FIGURES	10
TABLEAUX	10
PREAMBULE	11
1 INTRODUCTION	11
2 DOMAINE D'APPLICATION	13
2.1 Nature des produits constitutifs du stockage	13
2.1.1 Résidus de traitement de minerais d'uranium	13
2.1.2 Stériles miniers	14
2.1.3 Autres	14
2.2 Les différents types d'ouvrages de ceinture de stockage	14
2.2.1 Généralités	14
2.2.2 Stockages constitués d'anciennes mines à ciel ouvert avec ouvrages de ceinture	17
2.2.3 Stockages constitués de bassins clos par des ouvrages de ceinture	21
2.2.4 Stockages avec ouvrages de ceinture de faible hauteur	28
2.2.5 Stockages sans ouvrage de ceinture	30
3 RÉGLEMENTATION, DOCTRINE ET GUIDES ENCADRANT LE DOMAINE	32
3.1 Réglementation relative aux stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium	32
3.2 Réglementation applicable aux ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium	32
3.2.1 Réglementation relative aux déchets de l'industrie extractive	33
3.2.2 Réglementation relative aux critères de classification des installations de gestion de déchets	33
3.2.3 Réglementation relative à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées soumises à autorisation	34
3.2.4 Réglementation relative aux ouvrages ceinturant les résidus sous lame d'eau ou liquides soumis à la nomenclature IOTA	36
3.3 Doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium de mai 1999	38
3.4 Guides nationaux et internationaux applicables aux stockages de résidus miniers d'uranium	38
3.4.1 Guide méthodologique relatif à la réglementation de sécurité et de sûreté des barrages relevant de la loi sur l'eau	38
3.4.2 Document BREF « Gestion des déchets de l'industrie extractive » de décembre 2018	38
3.4.3 Guide du BRGM « Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues à stériles uranifères » de septembre 2001	39
4 RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT LES OUVRAGES DE RETENUE	40
4.1 Les grands ouvrages anciens toujours fonctionnels	40
4.2 Types et cinétiques de dégradation des grands ouvrages	42

4.2.1	Types de défaillances	42
4.2.2	Quelques cas de défaillances et conséquences.....	45
4.3	Synthèse	49
5	DEMARCHE D’EVALUATION DE LA TENUE DES OUVRAGES.....	50
5.1	Démarche d’évaluation	50
5.1.1	Objectifs généraux	50
5.1.2	Fonctions des composants ouvragés du stockage	50
5.1.3	Exigence de comportement des ouvrages de ceinture	51
5.2	Evolution des stockages dans le temps	51
5.3	Evaluation de la performance des ouvrages ceinturant les résidus miniers	53
5.3.1	Situations d’évolution d’un stockage à prendre en compte	53
5.3.2	Prise en compte de l’aléa sismique	55
5.3.3	Prise en compte de l’aléa climatique	55
5.3.4	Critère de vérification de la performance des ouvrages.....	57
5.4	Evaluation des conséquences en cas de rupture de l’ouvrage.....	57
5.5	Synthèse des éléments relatifs à la démarche d’évaluation.....	58
6	METHODOLOGIE D’EVALUATION DE LA TENUE DES OUVRAGES	60
6.1	Construction du modèle géotechnique	60
6.2	Données d’entrée.....	60
6.2.1	Caractérisation des matériaux constitutifs de l’ouvrage de ceinture, du sol de la fondation et des résidus stockés	60
6.2.2	Données piézométriques	61
6.3	Méthodes et critères pour la justification de la tenue des ouvrages	61
6.3.1	Stabilité statique au glissement.....	61
6.3.2	Stabilité sous sollicitation sismique	62
6.3.3	Evaluation du risque de rupture de sol en surface en cas de séisme.....	63
6.3.4	Evaluation du risque de liquéfaction.....	63
6.3.5	Evaluation du risque d’érosion externe.....	64
6.3.6	Evaluation du risque d’érosion interne	65
7	METHODOLOGIE D’EVALUATION DES CONSEQUENCES EN CAS DE RUPTURE	68
7.1	Généralités.....	68
7.2	Eléments de caractérisation d’une coulée	68
7.3	Evaluation de l’intensité et de la distance parcourue par la coulée.....	69
8	CONCLUSION.....	71
9	ANNEXES	72
9.1	Lettres de mission du GT	72
9.1.1	Lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2014-092 et CODEP-DRC-2014-032673 du 11 juillet 2014	72
9.1.2	Lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2018/079 et CODEP-DRC-2018-028825 du 23 juillet 2018	77

9.2	Bibliographie.....	81
9.3	Glossaire.....	85
9.4	Détails sur les ruptures des digues à stérile de Los Frailes et de Fundão	86

FIGURES

Figure 1. Schéma de principe d'un stockage de résidus de traitement de minerais	13
Figure 2. Différents types de stockages de résidus miniers (Source : Orano)	15
Figure 3. Techniques de construction d'ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers [46] (modifié)	16
Figure 4. Photographie de la digue de Los Frailes après la rupture et représentation des différentes phases de la rupture de la digue (d'après [26]).....	45
Figure 5. Site de la digue Fundão et du réservoir a) avant et b) après rupture	46
Figure 6. Principales hypothèses et repères temporels de l'évolution des stockages	52
Figure 7. Illustration d'hypothèses de saturation de la digue (en pointillé bleu : le niveau d'eau)	61
Figure 8. Illustration des mécanismes d'initiation de l'érosion interne [68].....	66
Figure 9. Plan de la digue à résidu de la mine d'Aznalcollar et coupe représentative de la digue [57]..	86
Figure 10. Photographie de la digue après la rupture et représentation des différentes phases de la rupture de la digue (d'après [26])	87
Figure 11. Méthode de construction par la méthode amont	88
Figure 12. Site de la digue Fundão et du réservoir a) avant et b) après rupture.....	88

TABLEAUX

Tableau 1. Échelle de probabilité.....	35
Tableau 2. Échelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations.....	36
Tableau 3. Classes de barrage définies à l'article R. 214-112 du code de l'environnement	37
Tableau 4. Extraction du registre des grands barrages du CIGB de 2008.....	41
Tableau 5. Principales causes spécifiques de défaillance des ouvrages de retenue de résidus miniers [47]	43
Tableau 6. Causes de rupture ou de désordres graves les plus fréquentes pour des ouvrages de retenue de résidus miniers [53].....	44
Tableau 7. Principaux incidents sur les digues de retenue des résidus selon leur cause probable [47] (modifié)	44
Tableau 8. Cas de ruptures majeures de digues de stockage de résidus survenus entre les années 1992 et 2022	49
Tableau 9. Situations à considérer pour évaluer la stabilité des ouvrages ceinturant les résidus	54
Tableau 10. Les questions des six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe [66]	65
Tableau 11. Quelques éléments relatifs aux six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe [66].....	65
Tableau 12 : Paramètres nécessaires à l'évaluation de l'intensité de la coulée [24]	69
Tableau 13 : Modèles disponibles dans la littérature permettant d'évaluer l'intensité de la coulée et son extension géographique [24]	70

PREAMBULE

Un groupe de travail (GT) pluraliste intitulé « maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium », composé de représentants de différentes parties prenantes (experts techniques, exploitant, administrations et une association de protection de la nature et de l'environnement), a été mandaté par la DGPR et l'ASN par lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2014-092 et CODEP-DRC-2014-032673 du 11 juillet 2014 puis une seconde fois par lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2018/079 et CODEP-DRC-2018-028825 du 23 juillet 2018, avec pour principale mission d'élaborer **une démarche méthodologique d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium. Cette démarche, permettant d'éclairer les parties prenantes sur les enjeux liés à l'évaluation du maintien à long terme de ces ouvrages, s'inscrit dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR).**

Dans l'avis n°2021-AV-0374 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 4 février 2021 sur les études relatives à la gestion des résidus de traitement miniers d'uranium et des stériles miniers d'uranium remises en application du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018, en vue de l'élaboration du cinquième PNGMDR, l'ASN recommande que « *le sous-groupe de travail relatif au maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium poursuive ses travaux, sous l'égide de l'ASN et de la DGPR, et finalise la doctrine et la méthodologie d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement miniers. Le sous-groupe de travail associera à ses travaux les acteurs locaux intéressés. L'ASN recommande qu'Orano Mining prenne en compte, dans les études visant à vérifier et à garantir la robustesse de ses ouvrages à long terme, les recommandations relatives à la stabilité mécanique des ouvrages ceinturant les stockages de résidus, établies par le sous-groupe de travail précité.* »

Dans cette perspective, ce rapport émet des recommandations afin qu'Orano Mining soit en mesure de réaliser les études concernant l'évaluation de la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium afin de vérifier et de garantir la robustesse de ces ouvrages à long terme.

Il est utile de souligner que ce rapport va au-delà de la réglementation en vigueur sur certains points, et ceci afin de prendre en compte les spécificités de ces ouvrages sur le long terme. **Ce rapport n'a ainsi pas vocation à être utilisé par les inspecteurs de l'environnement pour l'application de leur pouvoir de police, la démarche méthodologique d'évaluation visant la tenue à long terme des ouvrages.**

1 INTRODUCTION

L'exploitation des mines d'uranium en France entre 1948 et 2001 a conduit à la production de plus de 50 millions de tonnes de résidus de traitement de minerai. Ces résidus sont désormais stockés au sein de 17 installations de stockage. Compte tenu des grandes quantités de résidus produits, la gestion actuelle retenue pour ces substances est une gestion *in situ*, incluant une vérification des dispositions mises en œuvre pour limiter l'impact actuel et à long terme aussi bas que raisonnablement possible. Les résidus de traitement de lixiviation étant assimilables à des déchets radioactifs de procédé de faible activité, les sites de stockage sont classés sous la rubrique 1735⁴ de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), à l'exception de celui de Teufelsloch, sous réglementation minière. Tous ces stockages sont sous la responsabilité d'Orano Mining.

Selon les principes réglementant les ICPE, le dimensionnement des composants ouvrages de ces stockages, comme les ouvrages de ceinture (digues ou merlons), doit leur permettre de résister à des niveaux d'aléas choisis en fonction des durées de vie classiquement associées aux installations industrielles, c'est-à-dire de l'ordre de la centaine d'années. **Compte tenu de la demi-vie des radionucléides présents dans les résidus miniers, les risques radiologiques et chimiques associés aux installations de stockage de ces résidus demeureront sur des échelles de temps significativement plus élevées (a minima 16 000 ans pour le radium 226, radioélément majoritaire).** C'est donc sur ces échelles de temps qu'il convient, dans un objectif d'optimisation de la protection de la population et de l'environnement vis-à-vis des risques radiologiques et chimiques encourus, d'évaluer la tenue des ouvrages sur lesquels repose le confinement des résidus. Dans cette perspective, le présent rapport formule des propositions sur la démarche à suivre et sur les méthodes les plus pertinentes à utiliser sur la base de l'état actuel de connaissance. Ces méthodes consistent notamment en la réalisation d'une

⁴ Dépôt, entreposage ou stockage de substances radioactives sous forme de résidus de traitement de minerais d'uranium

modélisation tenant compte de divers niveaux de sollicitations, définis à partir d'hypothèses d'évolutions de l'installation de stockage, qui incluent l'arrêt de la maintenance et la perte de mémoire du site.

Les résultats de cette modélisation constitueront un des éléments d'appréciation par Orano Mining de la sûreté à long terme de ses stockages. Croisé avec d'autres éléments, tel que l'impact sur l'homme et l'environnement associé à une rupture de la digue en cas d'enjeux présents autour des sites, ils permettront à Orano et aux autorités de juger de l'acceptabilité de la situation de chacun des sites et de décider le cas échéant des mesures compensatoires qu'il conviendrait de mettre en œuvre, notamment en termes de besoin de renforcements de ces ouvrages.

Ce rapport se base principalement sur :

- les études transmises par Orano Mining dans le cadre des différentes éditions du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) ainsi que les avis de l'ASN et de l'IRSN sur ces études ;
- la réglementation concernant les exigences associées aux ouvrages hydrauliques⁵ ;
- le retour d'expérience des organisations en charge de la gestion et du suivi des ouvrages dans le milieu conventionnel (barrage hydraulique...).

Les références des documents utilisés sont précisées en Annexe 9.2. Ce rapport précise, pour les ouvrages objet de l'évaluation :

- ce qui est attendu en termes de durée de vie de ces ouvrages,
- les fonctions et les objectifs associés à leur tenue,
- les données d'entrée qui devront être collectées par l'exploitant selon la méthodologie de son choix qu'il devra justifier,
- les situations à prendre en compte et la période de retour associée aux aléas naturels,
- les méthodes de calcul les plus appropriées et les critères associés pour vérifier la tenue des ouvrages à chacun de ces aléas sur la période de retour visée pendant leur durée de vie. Lorsque plusieurs méthodes sont appropriées, l'exploitant choisira celle qu'il appliquera.

⁵ Noter que la majorité des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers ne sont classiquement pas soumis à cette réglementation.

2 DOMAINE D'APPLICATION

L'exploitation minière d'uranium en France a conduit en une cinquantaine d'années à la production de 76 000 tonnes d'uranium. Les activités d'exploration (de simples travaux de reconnaissance à des chantiers de plus grande envergure), d'extraction et de traitement ont concerné en France environ 250 sites répartis sur 27 départements. La première étape de traitement du minerai pour extraire l'uranium, nécessaire à l'obtention du « *yellow cake* », a été réalisée dans huit usines de traitement de minerais afin d'extraire l'uranium qui ont produit de l'ordre de 50 millions de tonnes de résidus de traitements miniers, aujourd'hui répartis au sein de 17 sites de stockage. Cette exploitation minière a généré environ 170 millions de tonnes de stériles miniers dont une partie a été exploitée pour la construction des ouvrages de ceinture des stockages de résidus. La nature de ces produits ainsi que les différents types d'ouvrages de ceinture des stockages, qui fondent le domaine d'application du présent rapport, sont décrits ci-après. Ce rapport s'applique aux ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement miniers existants aujourd'hui en France. Il pourrait être appliqué, le cas échéant, à de futurs ouvrages d'installations existantes (renforcements) ou nouvelles.

2.1 Nature des produits constitutifs du stockage

Issus des installations de traitement de minerais d'uranium, les résidus de traitement (cf. § 2.1.1) ont été stockés principalement sur d'anciens sites miniers, à proximité de ces installations, avec des stériles miniers (cf. § 2.1.2) et autres matériaux issus de l'exploitation des mines (§ 2.1.3).

Les stockages de résidus consistent, de manière simplifiée, en une succession de couches de différents matériaux permettant d'assurer une protection mécanique et radiologique vis-à-vis des résidus de traitement à forte teneur, situés en partie basse (cf. figure 1). Ainsi, sur la plupart des sites, une couverture solide compactée formée de résidus de plus faible teneur et de stériles miniers a été mise en place au-dessus de ces résidus à forte teneur. Généralement, une couche de terre végétale a été étendue pour favoriser le développement de la végétation afin de limiter les phénomènes d'érosion et de permettre une meilleure intégration paysagère. Dans le cas particulier du site des Bois-Noirs, la couverture des résidus est assurée par une lame d'eau maintenue en place derrière un barrage.

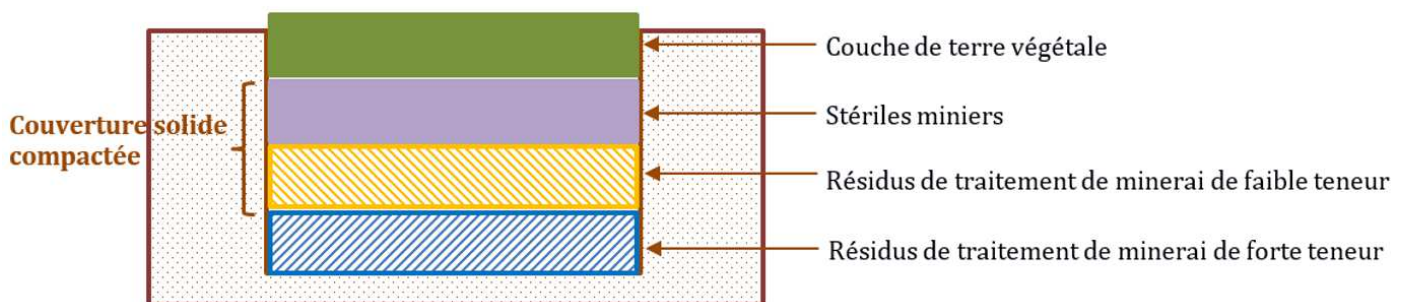


Figure 1. Schéma de principe d'un stockage de résidus de traitement de minerais

* Nota : Les résidus de traitement de faible teneur (issus de la lixiviation statique) ne sont pas présents sur tous les stockages.

2.1.1 Résidus de traitement de minerais d'uranium

Les résidus de traitement sont les produits restant après la première extraction de l'uranium contenu dans le minerai. Ainsi, ils renferment l'uranium résiduel et tous les descendants des chaînes de l'uranium, en particulier le radium. Deux procédés de lixiviation ont été utilisés pour extraire l'uranium, conduisant à la production de deux types de résidus de traitement du minerai caractérisés par leur activité massique.

Les résidus ont la même composition minéralogique que le minerai d'origine auxquels s'ajoutent différents précipités chimiques liés aux réactifs de traitement statique ou dynamique (par exemple des sulfates).

Résidus de traitement de minerais de faible teneur en uranium

La quantité de ces résidus, issus d'une lixiviation statique, est d'environ 20 millions de tonnes. Présents sous la forme de blocs rocheux de minerais de dimensions variables, leur activité massique moyenne totale est de l'ordre de 40 Bq/g, c'est à dire de très faible activité selon la classification des déchets radioactifs⁶. Ces résidus ont notamment été utilisés comme première couche de couverture des stockages de résidus de traitement de lixiviation dynamique.

⁶ <https://www.ecologie.gouv.fr/demantelement-et-gestion-des-dechets-radioactifs>

Résidus de traitement de minerais à forte teneur en uranium

Environ 30 millions de tonnes de résidus de traitement de minerais à forte teneur ont été produits par traitement dynamique durant les années de production française d'uranium. Ils se présentent sous la forme de sables argileux avec une activité massique moyenne totale de l'ordre de 300 Bq/g, c'est à dire de faible activité selon la classification des déchets radioactifs. Ces résidus de traitement dynamique ont subi une séparation en fin de traitement conduisant à la production de résidus fins, systématiquement mis en stockage, ou de sables cyclonnés⁷, réutilisés pour la construction des ouvrages de ceinture ou comme remblai hydraulique des travaux miniers souterrains (TMS).

2.1.2 Stériles miniers

L'extraction de minerais nécessite généralement l'extraction des roches environnantes, dites stériles. L'exploitation des mines d'uranium a produit environ 170 millions de tonnes de stériles en France, qui sont de deux types :

- les **stériles francs**, dont la teneur moyenne en uranium correspond à la teneur caractéristique du bruit de fond naturel ambiant (situé à titre d'exemple entre 0,0015 % et 0,01 % d'uranium dans le Limousin),
- les **stériles de sélectivité**, constitués par des roches minéralisées excavées lors de l'exploitation d'un gisement mais dont les teneurs étaient insuffisantes pour justifier d'un traitement sur le plan économique (teneurs entre 0,01 % et 0,04 % d'uranium⁸).

La majorité des stériles a été stockée sur les sites d'extraction sous forme de verses. Une petite partie de ces stériles a également été utilisée pour constituer la couverture solide des stockages de résidus, ainsi qu'évoqué *supra*.

2.1.3 Autres

Les **déchets issus du démantèlement des installations nécessaires à l'activité minière et/ou au procédé d'extraction de l'uranium** peuvent également être présents dans le stockage : il s'agit en particulier des équipements de l'usine et des bâtiments, susceptibles de contenir un très faible niveau de radioactivité.

Des **déchets ne provenant pas des sites miniers d'uranium français** sont stockés sur les sites de Bauzot (fûts de déchets contenant des résidus de traitement de minerais d'uranium et de thorium de Madagascar et déchets radioactifs en provenance de sites industriels du CEA, cf. § 2.2.4) et de Gueugnon (préconcentré d'uranium en provenance du Gabon).

Des **boues des stations de traitement des eaux issues des anciens sites miniers uranifères** peuvent également être stockées dans l'installation de stockage de certains sites. Le dépôt de ces boues est toujours effectif sur quelques sites.

2.2 Les différents types d'ouvrages de ceinture de stockage

2.2.1 Généralités

Ce rapport concerne tous les types d'ouvrage de ceinture dépassant le niveau naturel du sol. Ainsi, sur l'ensemble des 17 stockages existants, 12 sont concernés, à savoir :

- 4 anciennes mines à ciel ouvert (MCO) avec ouvrage de ceinture : Brugeaud, Montmassacrot, Le Bosc, Saint-Pierre du Cantal (cf. Figure 2, en haut à droite) ;
- 5 stockages constitués de bassins clos par des ouvrages de ceinture : Ecarpière, Bois-Noirs Limouzat, Bernardan, Bertholène, Lavaugrasse (cf. Figure 2, en bas à gauche) ;
- 3 stockages ceinturés par des merlons de terre (Gueugnon, Rophin) ou de stériles miniers (Bauzot) de quelques mètres de hauteur (cf. Figure 2, en bas à droite).

⁷ Fraction grossière des résidus (entre 150 et 500 µm) résultant de la séparation granulométrique lors de leur mise en dépôt

⁸ Soit entre 100 et 400 ppm d'uranium

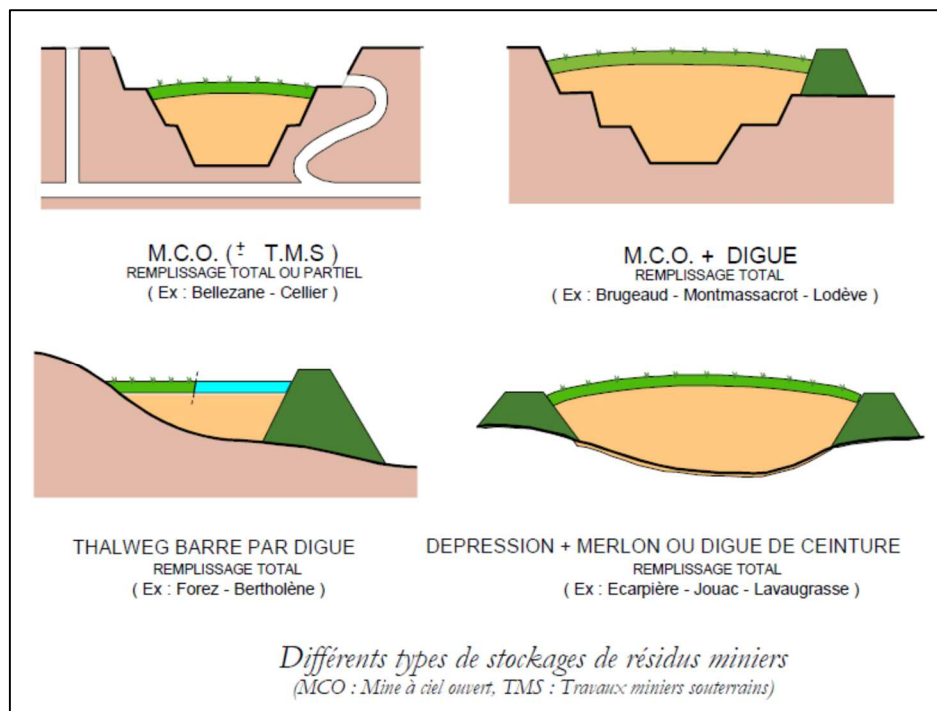


Figure 2. Différents types de stockages de résidus miniers (Source : Orano)

Dans la suite du document, le terme « **ouvrage** » désigne l'ouvrage de ceinture en lui-même, ses fondations et les installations annexes (évacuateurs de crues, collecteurs d'eaux...) concourant à son bon fonctionnement.

La construction des ouvrages ceinturant les stockages s'est déroulée sur deux périodes :

- 1958-1962, avec la mise en service des premières usines de traitement des minerais,
- 1978-1991, avec l'ouverture de nouvelles exploitations et la création de stockages supplémentaires.

Ces ouvrages ont ainsi été construits et leur stabilité dimensionnée selon les règles de l'art et la réglementation en vigueur à ces époques pour les stockages de résidus miniers.

Les stockages ont ensuite été réaménagés entre 1993 et 2003. Les travaux de réaménagement des anciens sites miniers ont consisté à :

- assécher les bassins (à l'exception du site des Bois Noirs Limouzat pour lequel les résidus sont stockés sous une lame d'eau) ;
- mettre en place une couverture afin d'assurer une protection mécanique et radiologique ;
- remodeler le parement aval des ouvrages de retenue pour améliorer leur stabilité et leur résistance à l'érosion et faciliter la mise en place d'une couverture de protection végétale de type herbeuse ;
- mettre en place un réseau de collecte des eaux météoriques et maintenir le réseau de collecte des eaux d'infiltration au sein des résidus.

La construction des ouvrages ceinturant les résidus de traitement de minerais d'uranium a été réalisée par phases, selon les trois méthodes principales suivantes (cf. Figure 3) :

- la *méthode ascendante ou amont* : les matériaux de construction de l'ouvrage sont déversés uniquement vers l'amont, si bien que l'emprise aval de l'ouvrage ne déborde pas de son emplacement primitif ;
- la *méthode descendant ou aval* : les matériaux de construction de l'ouvrage sont déversés uniquement sur le parement aval, si bien que la crête de la digue et le pied du talus se déplacent progressivement vers l'aval ;
- la *méthode longitudinale ou centrale, ou encore appelée verticale* : les matériaux de construction de l'ouvrage sont déversés de part et d'autre depuis le sommet de la digue, tandis que seul le talus aval s'étend vers l'extérieur ; de son côté, le talus amont repose en partie sur des résidus décantés.

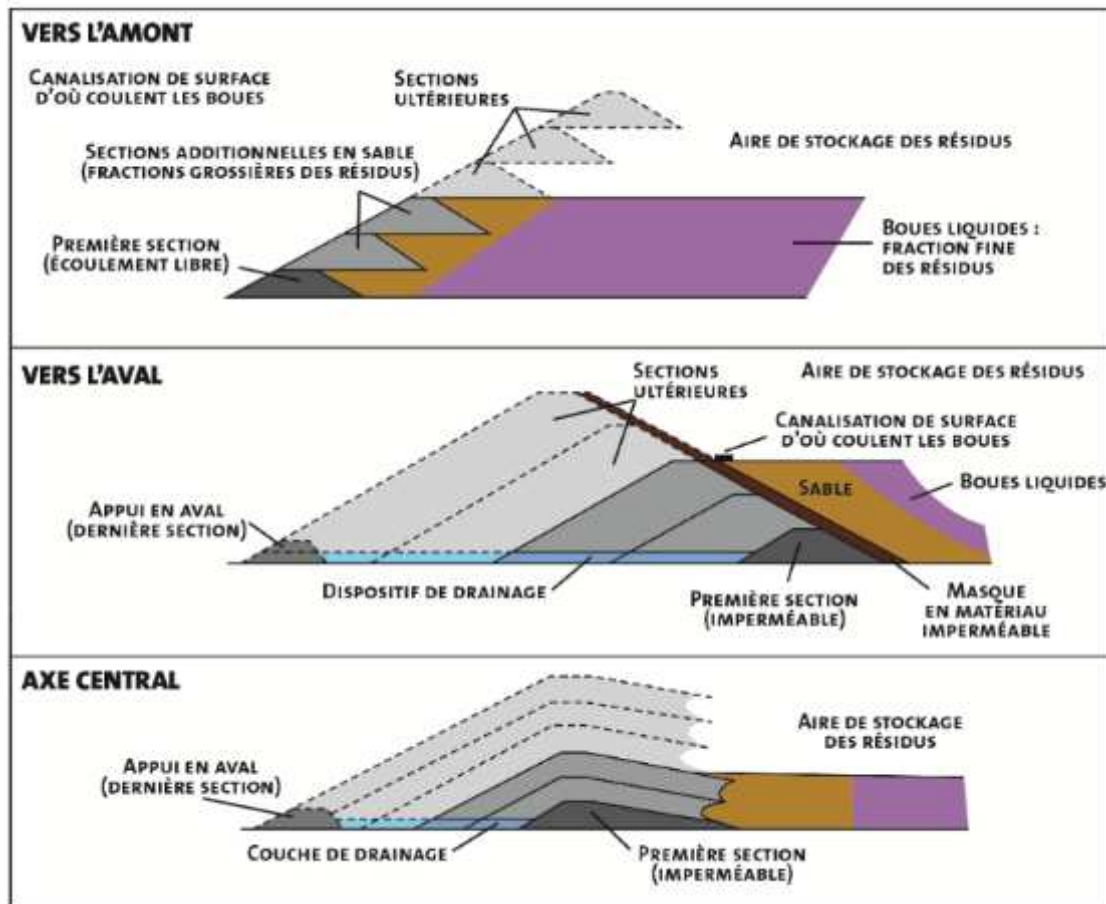


Figure 3. Techniques de construction d'ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers [46] (modifié)

La plupart des ouvrages de ceinture sont composés d'organes « annexes » pouvant avoir pour vocation de :

- maîtriser les eaux superficielles (e.g. évacuateurs de crue, ouvrages de maîtrise des eaux de ruissellement comme les fossés, systèmes de restitution des eaux via la canalisation des eaux de crues) ;
- permettre le drainage interne (e.g. tapis drainants, conduites enterrées, puits).

Les § 2.2.2 à 2.2.5 ci-après décrivent brièvement, selon leur type, chacun des 17 stockages de résidus miniers d'uranium. Des résultats issus de premières analyses de stabilité⁹ à long terme des ouvrages de ceinture, réalisées à l'issue de travaux de caractérisation des matériaux de ces ouvrages et incluant la prise en compte du risque sismique, suivant une réglementation qui n'est plus en vigueur (arrêté du 10 mai 1993¹⁰) pour 9 sites ou suivant le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 pour deux sites¹¹, sont présentés à titre d'information.

⁹ L'analyse de stabilité d'un ouvrage permet de contrôler sa sécurité au glissement. Elle est déterminée par un facteur de sécurité (Fs) correspondant au rapport des forces résistantes aux forces motrices le long d'une surface potentielle de rupture. Il est considéré, de manière classique dans les études de stabilité des pentes, qu'un massif est stable lorsque le Fs pour la surface potentielle de rupture la plus critique est supérieur à une valeur seuil qui doit être supérieure à 1 (cf. § 6.3.1).

¹⁰ Arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées.

¹¹ Les études réalisées pour les sites de l'Ecarpière et des Bois Noirs ont été réalisées suivant le décret n°2012-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français, qui fixe le périmètre d'application de la réglementation parasismique applicable aux bâtiments, et en considérant des recommandations d'une version projet de ce rapport de GT qui ont depuis été modifiées.

2.2.2 Stockages constitués d'anciennes mines à ciel ouvert avec ouvrages de ceinture

Stockage du Brugeaud

Ce stockage est localisé, avec le stockage de Lavaugrasse, sur le site industriel de la commune de Bessines sur Gartempe (Haute-Vienne). Le site du Brugeaud a été exploité par mine à ciel ouvert (MCO) et travaux miniers souterrains (TMS) de 1955 à 1972. Les minerais extraits, comme l'ensemble de ceux provenant du Limousin, ont été traités par l'usine de traitement de Bessines, de 1958 à 1993. Des installations de traitement statique des minerais étaient également présentes sur le site. Pour permettre l'exploitation et protéger la MCO contre une crue millénaire de la Gartempe, une dérivation de la rivière a été réalisée entre 1962 et 1964 par la construction de trois digues en remblai à noyau argileux. Les résidus ont été stockés entre 1978 et 1987.



© Orano

Caractéristiques du stockage		
Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
7,3 millions	12	stériles
Caractéristiques de l'ouvrage		
Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
500 m x 22 m	1978 à 1987	sables cyclonnés

Mode de construction

Méthode	méthode amont et méthode verticale sur les parties latérales. Le parement a été rechargé par 1,5 m de stériles miniers.
Pente	13°
Fondation	substratum ¹² granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
3 drains étagés longitudinaux reliés entre eux et débouchant dans un fossé périphérique	Collectées par des pistes drainantes sur le bassin et les risbermes et acheminées dans un fossé périphérique et un canal collecteur bétonné

Taille du bassin versant en amont de l'ouvrage

0,30 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien de l'ouvrage, suivi piézométrique et levés topographiques
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

F _s en conditions normales	F _s en cas de remontée de nappe	F _s en cas de séisme ¹³
2,07	1,53	1

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Projet de parc photovoltaïque

¹² Formation géologique sur laquelle reposent les terrains

¹³ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage de Montmassacrot

Ce stockage est localisé sur la commune de Bessines sur Gartempe (Haute-Vienne). L'exploitation minière a été réalisée par MCO et mine souterraine entre 1976 et 1981. Les résidus, en provenance de l'usine SIMO du site industriel de Bessines, ont été stockés entre 1987 et 1990 dans la MCO. Un ouvrage de retenue a été construit entre 1987 et 1989 pour rehausser le parement Sud-Ouest de la MCO. Le site a été réaménagé en 1995 ainsi qu'une zone près du bassin de réception en 2003.



Digue

Risberme

© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stockés (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
0,7 million	2,2	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
200 m x 20 m	1987 à 1989	sables cyclonés

Mode de construction

Méthode	méthode verticale avec adjonction d'un enrochement de protection
Pente	24° et 37° dans sa partie supérieure, entrecoupée par une risberme
Fondation	substratum constitué d'une arène granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
3 drains perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage	Collectées sur l'ouvrage par des pistes drainantes et la risberme et acheminées vers un fossé périphérique débouchant dans un bassin

Taille du bassin versant en amont de l'ouvrage

0,06 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien de l'ouvrage, suivi piézométrique et levés topographiques
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

F _s en conditions normales	F _s en cas de remontée de nappe	F _s en cas de séisme ¹⁴
1,69	1,5	1,02

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Projet de parc photovoltaïque

¹⁴ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage du Bosc

Ce stockage est localisé sur les communes du Bosc et de Soumont (Hérault). L'exploitation minière s'est déroulée entre 1978 et 1997 par MCO et TMS. L'usine de traitement des minerais était installée sur le site minier. Les résidus ont été stockés de 1981 à 1997 dans deux MCO. Les ouvrages de retenue des résidus de traitement ont été construits en stériles miniers pour rehausser les parements Ouest des MCO de « Faille Sud » et « Faille centrale ». Le réaménagement du site s'est achevé en 2000.



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
4,1 millions	27	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
400 m x 36 et 45 m	1987 à 1990	stériles

Mode de construction

Méthode	méthode verticale puis amont
Pente	20° à 22° dans sa partie supérieure, avec un maximum de 30°
Fondation	substratum rocheux de grès et pélites (argilites)

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
massif drainant avec 2 puits de pompage maintenant le niveau de l'eau sous le niveau du terrain naturel. Les eaux sont ensuite envoyées vers un bassin de collecte	Collectées par des pistes drainantes dont l'exutoire débouche dans la dérivation du ruisseau du Mas d'Alary.

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,43 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien de l'ouvrage, suivi piézométrique et levés topographiques
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2017

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

Fs en conditions normales	Fs en cas de remontée de nappe	Fs en cas de séisme ¹⁵
« Faille sud » : 1,58	« Faille sud » : 1,53	« Faille sud » : 1,14
« Faille centrale » : 1,81	« Faille centrale » : 1,57	« Faille centrale » : 1,30

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Projet de parc photovoltaïque

¹⁵ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage de Saint-Pierre du Cantal

Ce stockage est localisé sur la commune de St Pierre du Cantal (Cantal). Le site minier a été exploité par MCO de 1958 à 1982. L'usine de traitement des minerais en activité sur le site de 1977 à 1985 a généré des résidus fins (issus du traitement dynamique) stockés dans un bassin fermé dans sa bordure nord par un ouvrage de ceinture barrant un petit thalweg. Le site a été réaménagé avec une couverture en stériles miniers et terre végétale à partir de 1989 et le réaménagement s'est achevé fin 2010.



© Orano

Caractéristiques du stockage (partie ICPE)

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
0,07 million de résidus	3,9	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
140 m x 15 m	1976 à 1977	stériles

Mode de construction

Méthode	méthode verticale
Pente	11°, entrecoupée par une risberme
Fondation	sables grossiers, en argiles limoneuses et une arène granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage

Eaux de surface

tapis drainant en pied de digue, d'une largeur maximale de 20 m, relié à un exutoire à l'aval

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,48 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien et suivi piézométrique
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2017

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

Fs en conditions normales	Fs en cas de remontée de nappe	Fs en cas de séisme ¹⁶
3,17	2,70	1,86

Informations complémentaires

Cadre réglementaire ICPE 1735, surveillance décennale

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usage

¹⁶ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

2.2.3 Stockages constitués de bassins clos par des ouvrages de ceinture

Stockage des Bois-Noirs Limouzat

Ce stockage est localisé sur la commune de Saint Priest la Prugne (Loire) et dans le bassin versant de la Besbre. Le site minier a été exploité par MCO et TMS de 1957 à 1980. Une usine de traitement des minerais y était également implantée et exploitée de 1960 à 1980. Le réaménagement du site a débuté en 1982 et s'est achevé en 2007. L'ouvrage de ceinture du stockage consiste en un barrage type « digue homogène en terre ».



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
1,4 millions	21	lame d'eau (au moins 2m)

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x lmax x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
508 m x 170 m x 42 m	1958 à 1962	stériles

Mode de construction

Méthode	méthode verticale, en stériles miniers disposés en couches de 0,3 m compactés avec un enrochement de protection sur les parements
Pente aval	inclinée à 26°, entrecoupée de 3 risbermes ¹⁷
Fondation	substratum granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
massif filtrant en alluvions parafouille pour assurer l'étanchéité entre le substratum et le barrage drain principal dans l'axe de la vallée pour l'évacuation des eaux collectées par le massif filtrant 5 drains de collecte de sources	collectées par le canal de dérivation de la Besbre de 1083 m de long et le canal de Bellechasse. Ces eaux sont restituées en aval de l'ouvrage. Un évacuateur de crues collecte les eaux de surverse.

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

11,05 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections et entretien du barrage et des ouvrages annexes, levés topographiques de l'ouvrage, suivi piézométrique des niveaux d'eau dans l'ouvrage, suivi du débit des drains et de la qualité des eaux collectées
Par d'autres intervenants	visite annuelle d'un expert géomètre (contrôle des déplacements), inspections annuelles et décennales de la DREAL
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant lors de la visite annuelle d'octobre 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport (2017)¹⁸

F _s en conditions normales	F _s pour un séisme de période de retour de 3 000 ans	F _s pour un séisme de période de retour de 30 000 ans
1,6	1,29	1,12

Informations complémentaires

Cadre réglementaire spécifique	Ouvrage régi par la réglementation des barrages et ouvrages hydrauliques (ouvrage de classe A)
Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale

¹⁷ Ouvrage de consolidation

¹⁸ Calculs relatifs au risque sismique réalisés suivant le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010

Derniers travaux

Réfection du canal évacuateur des crues (2018) suite à la visite décennale de 2017 ;
réhabilitation de l'étanchéité du canal de dérivation de la Besbre ; mise en service
d'une nouvelle station de traitement des eaux et construction d'un seuil de contrôle et
d'un dallage sur la digue submersible en 2020 ; reprise de deux piézomètres de
contrôle (P1 et P8)

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usages

Stockage de Lavaugrassse

Le stockage de Lavaugrassse est localisé, comme le stockage du Brugeaud, sur le site industriel de la commune de Bessines sur Gartempe (Haute-Vienne). Le site minier a été exploité par MCO et TMS de 1955 à 1972. Les minerais extraits, comme l'ensemble de ceux provenant du Limousin, ont été traités par l'usine de Bessines, de 1958 à 1993. Des installations de traitement statique des minerais étaient également présentes sur le site. Les résidus de traitement dynamique et statique ont été stockés entre 1958 et 1978 dans un bassin implanté sur un coteau ceinturé par un ouvrage de retenue. Le bassin a ensuite été réaménagé avec une couverture.



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
7,5 millions	20	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
1400 m x 36 m	1958 et 1978	sables cyclonés

Mode de construction

Méthode	méthode verticale avec une amorce en stérile minier
Pente	inclinaison de 10 à 11, entrecoupée de risbermes
Fondation	substratum granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
massif drainant débouchant dans un bassin	collectées par des pistes drainantes sur le bassin et sur le parement et acheminées vers un canal collecteur bétonné

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,30 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien de l'ouvrage, suivi piézométrique et levés topographiques
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

F _s en conditions normales	F _s en cas de remontée de nappe	F _s en cas de séisme ¹⁹
2,76	1,94	1,34

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

- Projet de parc photovoltaïque
- Mise en place de l'Unité de Stockage de Lavaugrassse pour stocker les boues issues des stations de traitement des eaux de Haute-Vienne

¹⁹ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage de l'Ecarpière

Ce stockage, consistant en une dépression avec ouvrage de ceinture, est localisé sur la commune de Gétigné (Loire-Atlantique). Le site minier a été exploité par MCO et TMS de 1952 à 1990. L'usine de traitement présente sur le site recevait l'ensemble des minerais issus de l'Ouest de la France. Le réaménagement du site a débuté en 1992 et s'est achevé en 2010.



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
11,5 millions	72	stériles

Caractéristiques des ouvrages

Ouvrage principal

Dimensions (L x l x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
1 100 m x 250 m (à la base) x 60 m	1958 et 1983	sables cyclonés, résidus de lixiviation statique

Ouvrages de ceinture

Dimensions (L x Hmax /Hmini)	Période de construction	Matériaux de construction
2 000 m x 30 m/3m	1958	sables cyclonés et résidus de lixiviation statique

Mode de construction

Ouvrage principal

Méthode	méthode verticale puis méthode amont
Pente	entre 18 et 24°
Fondation	substratum constitué d'une arène granitique

Ouvrages secondaires

Méthode	méthode verticale puis méthode amont
Pente	22°
Fondation	substratum constitué d'une arène granitique

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage

massif drainant et drains accessibles par 3 puits bétonnés. Les eaux sont collectées dans un fossé de ceinture

Eaux de surface

topographie du réaménagement permettant une évacuation des eaux par pistes drainantes puis un acheminement vers le milieu naturel

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

1,0 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	entretien, topographie, piézométrie, mesures de débits
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans depuis 2002
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport (2017)²⁰

F _s en conditions normales	F _s en cas de remontée de nappe	F _s pour un séisme de période de retour de 5 000 ans	F _s pour un séisme de période de retour de 30 000 ans
2,6	1,3	1,32	1,05

²⁰ Calculs relatifs au risque sismique réalisés suivant le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010

Informations complémentaires

Résidus stockés	11,5 millions de tonnes de résidus stockés comprenant 7,5 millions de tonnes issus d'un traitement dynamique et 4 millions de tonnes issus d'un traitement statique
Ouvrage principal	barrage en argile sur un vallon d'un affluent de la Moine
Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usage

Stockage du Bernardan

Ce stockage, ceinturé au niveau de deux anciens talwegs, est localisé sur la commune de Jouac (Haute-Vienne). Le site minier a été exploité par MCO et TMS, entre 1978 et 2001. L'usine de traitement des minerais en activité était installée sur le site. Le réaménagement du site s'est achevé en 2003.



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
1,9 millions	36 (4 cellules)	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
1700 m x 22 m	1978 à 1983	stériles

Mode de construction

Méthode	méthode verticale avec adjonction d'un enrochement de protection
Pente	21° max
Fondation	granite altéré

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
2 drains puis collecte des eaux dans un fossé périphérique	pistes drainantes acheminant les eaux vers un fossé périphérique

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,42 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, entretien de l'ouvrage, suivi piézométrique et levés topographiques
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2020

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

Fs en conditions normales	Fs en cas de séisme ²¹
1,81	1,41

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Projet de parc photovoltaïque

²¹ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage de Bertholène

Ce stockage est localisé sur la commune de Bertholène (Aveyron). Le site minier a été exploité par MCO et TMS souterrains 1977 et 1994. Les installations de traitement statique de minerais en activité sur le site entre 1984 et 1995 ont généré des résidus de lixiviation statique qui ont été stockés derrière un ouvrage barrant le vallon des Balaures. Le réaménagement du site a été achevé en 1995.



© Orano

Caractéristiques du stockage

Volume de résidus stocké (t)	Superficie du stockage (ha)	Couverture
0,47 million	5,55	stériles

Caractéristiques de l'ouvrage

Dimensions (L x Hmax)	Période de construction	Matériaux de construction
110 m x 60 m	1985 à 1991	stériles

Mode de construction

Méthode	méthode verticale
Pente	18° avec 5 risbermes sur le parement aval
Fondation	stratum constitué de gneiss arénisés

Gestion des eaux

Drainage interne à l'ouvrage	Eaux de surface
masque en alluvions sablo graveleuses de 2 m d'épaisseur présent sur le parement amont, complété par un géotextile et tapis drainant en alluvions sous la digue débouchant sur un fossé bétonné renvoyant les eaux vers un bassin	entre 1979 et 1992, le ruisseau des Balaures a été dévié sur la rive gauche dans un canal de 1900 m dont 850 m sont bétonnés.

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

1,57 km²

Surveillance de l'ouvrage

Par les équipes d'Orano Mining	inspections, suivi piézométrique et mesures de débit
Par d'autres intervenants	visite d'un expert tous les 5 ans
Dernier avis de l'expert	l'état général de l'ouvrage de ceinture est jugé satisfaisant en 2017

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

Fs en conditions normales	Fs en cas de remontée de nappe	Fs en cas de séisme ²²
1,96	1,73	1,35

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usage

²² Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

2.2.4 Stockages avec ouvrages de ceinture de faible hauteur

Les stockages décrits ci-après comportent des ouvrages de ceinture dits de « faible hauteur », c'est à dire inférieure à 15 m.

Stockage de Bauzot



Ce stockage est localisé sur la commune d'Issy l'Evêque (Saône et Loire). Le site minier a été exploité par TMS entre 1950 et 1957 et par MCO de 1984 à 1985. Le site a été réaménagé en 1985 puis en 2002. Le stockage de résidus, comportant des talus constitués de stériles, contient des fûts de résidus de traitement de minerais d'uranium et de thorium en provenance de Madagascar et des fûts de déchets radioactifs en provenance de sites industriels du CEA. Ces déchets de très faible activité ont été stockés sur le site de 1958 à 1969.

Stockage de résidus

80 000 fûts (soit ~16 000 tonnes) de résidus stockés.

Les fûts ont été déposés par couches successives avec une intercalation de stériles miniers entre chaque niveau. Le stockage occupe une surface de **0,8 ha**.

Composition de la couverture

stériles miniers, arène granitique et couche de terre végétale

Ouvrages ceinturant le stockage de résidus

deux ouvrages sur les côtés Nord et Ouest :

- Hmax 12 m
- pente de 34°

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,03 km²

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

F_s en conditions normales

Ouvrage Nord : 1,12
Ouvrage Ouest : 1,25

F_s en cas de séisme²³

1,09

Informations complémentaires

Cadre réglementaire

ICPE 1735 (résidus) et 2797²⁴ (déchets radioactifs), surveillance décennale

Usages actuels en surface du stockage

Projet de réaménagement en cours d'étude : reprise de l'ouvrage de ceinture et de la couverture

²³ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

²⁴ Rubrique 2797 de la nomenclature des installations classées : « Gestion des déchets radioactifs mis en œuvre dans un établissement industriel ou commercial ».

Stockage de Gueugnon



Ce stockage, comportant un merlon de terre, est localisé sur la commune de Gueugnon (Saône et Loire). Il n'y a pas eu d'exploitation minière sur la commune, seule une usine de traitement des minerais y était en activité entre 1955 et 1980, de même que des installations de traitement statique entre 1961 et 1968. Ces installations ont été démantelées entre 1980 et 1981 et le site réaménagé entre 1994 et 1995.

Stockage de résidus

Le fonctionnement des installations de traitement a généré **0,168 million de tonnes de résidus de traitement de minerais français** qui ont été stockés, avec des préconcentrés d'uranium en provenance du Gabon, dans un bassin de **6 ha de surface**. Ce stockage est situé à proximité de la rivière Arroux dont les berges ont été confortées et rechargées.

Composition de la couverture	- stériles, matière imperméabilisante et couche de terre végétale
Ouvrages ceinturant le stockage de résidus	- Hmax 5 m

Taille du bassin versant amont de l'ouvrage

0,09 km²

Surveillance de l'ouvrage

Inspections, entretien, suivi piézométrique et levés topographiques

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

F _s en conditions normales	3,28
F _s en cas de séisme ²⁵	1,47

Informations complémentaires

Cadre réglementaire	ICPE 1735, surveillance décennale
---------------------	-----------------------------------

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usage

²⁵ Calcul suivant l'Arrêté du 10 mai 1993

Stockage de Rophin



Ce stockage, comportant un merlon de terre, est localisé sur la commune de Lachaux (Puy-de-Dôme). L'exploitation minière sur le site a été réalisée par TMS entre 1949 et 1955. Une laverie mécanique puis chimique y a été en activité entre 1948 et 1957. Le site a été réaménagé de 1982 à 1985 puis finalisé en 2002 et clôturé en 2010.

Stockage de résidus

0,03 million de tonnes de résidus stockés dans un bassin de **1 ha de surface entouré** par un merlon

Composition de la couverture

Stériles miniers

Ouvrages ceinturant le stockage de résidus

- L : 150 m
- H : 2 à 3 m

Taille du Bassin versant amont ouvrage

0,19 km²

Stabilité à long terme d'après calculs antérieurs à la méthodologie du présent rapport

Analyse non réalisée car ouvrage inférieur à 3 m

Informations complémentaires

Cadre réglementaire

ICPE 1735, surveillance décennale

Usages actuels en surface du stockage

Pas d'usage

2.2.5 Stockages sans ouvrage de ceinture

Des résidus de traitement ont pu être stockés dans certaines mines à ciel ouvert sans nécessiter la mise en place d'ouvrage de ceinture. C'est le cas des cinq sites ci-après.

Stockage de la Ribière

Ce stockage est localisé sur la commune de Domeyrot (Creuse). L'exploitation minière s'y est déroulée par MCO entre 1959 et 1985. Des installations de **traitement statique** des minerais étaient également présentes. Le site a été réaménagé avec une **couverture en stériles miniers** d'avril 1991 à mars 1992. Au total, **0,197 million de tonnes de résidus** y sont stockés.

Stockage de Bellezane

Ce stockage est localisé sur la commune de Bessines sur Gartempe (Haute-Vienne). L'exploitation minière s'y est déroulée par MCO et mine souterraine entre 1975 et 1992. Le site a été réaménagé avec **une couverture en stériles miniers** de 1992 à 2003. **1,5 millions de tonnes de résidus de traitement** y sont stockés.

Stockage du Cellier

Ce stockage est localisé sur la commune de Saint Jean de la Fouillouse (Lozère). L'exploitation minière s'y est déroulée par MCO et travaux miniers souterrains entre 1956 et 1991. Une usine de traitement des minerais et des installations de traitement statique étaient en activité sur le site. Le site a été réaménagé avec **une couverture en stériles miniers** d'avril 1990 à juin 1991. **1,7 millions de tonnes de résidus de lixiviation dynamique** y sont stockés, ainsi que **4,08 millions de tonnes de résidus de lixiviation statique**.

Stockage de la Commanderie

Ce stockage est localisé sur la commune de Treize Vents (Vendée). L'exploitation minière s'y est déroulée entre 1955 et 1991 par MCO et travaux miniers souterrains. Les minerais y ont été traités par lixiviation statique. **0,25 millions de tonnes de résidus de traitement statique** sont stockés dans la MCO, qui a été réaménagée de 1991 à 1993 avec **une couverture, composée d'un lit de calcaire et de stériles miniers, puis ennoyée**.

Stockage de Teufelsloch

Ce stockage est localisé sur la commune de St Hippolyte (Haut-Rhin). Des travaux miniers de recherche y ont été menés entre 1955 et 1958 ainsi que des essais de traitement de 1960 à 1963. Les derniers travaux de réaménagement ont eu lieu en 1994. **0,0014 million de tonnes de résidus** ont été ensevelis sur le site, sous une **couverture de stériles miniers**. Le stockage est soumis à la réglementation minière en tant que dépendance légale de la mine.

3 RÉGLEMENTATION, DOCTRINE ET GUIDES ENCADRANT LE DOMAINE

Ce chapitre présente une synthèse de la réglementation applicable aux stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium et aux ouvrages ceinturant ces stockages. La doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium est également introduite. Enfin, les principaux guides nationaux et internationaux d'intérêt pour les évaluations relatives aux stockages de résidus de traitement minier et aux grands barrages sont présentés. Ce chapitre 3 intègre ainsi des éléments qui dépassent le strict cadre de l'évaluation de la stabilité des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers d'uranium mais qui peuvent bénéficier à l'évaluation de ces stockages d'une manière générale.

3.1 Réglementation relative aux stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium

Les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium ou de thorium et des boues issues du traitement des eaux des mines d'uranium, pour lesquels la quantité totale est supérieure à 1 tonne, sont réglementés par la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et inscrits dans la nomenclature des installations classées sous la rubrique 1735²⁶.

L'exploitation des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium est réglementée par l'arrêté du 23 juin 2015 relatif aux installations mettant en œuvre des substances radioactives, déchets radioactifs ou résidus solides de minerai d'uranium, de thorium ou de radium soumises à autorisation au titre de la rubrique 1716, de la rubrique 1735 et de la rubrique 2797 de la nomenclature des installations classées. Cet arrêté a pour objectif de définir les règles techniques à mettre en œuvre lors de l'exploitation pour prévenir et réduire les risques de pollution ou d'accident. Il impose aux installations existantes la nécessité de réactualiser régulièrement l'étude d'impact de l'installation soumise à la rubrique 1735 de la nomenclature des installations classées (en l'occurrence tous les 15 ans pour les installations objet du présent rapport). Il demande à l'exploitant de définir et maintenir à jour une politique de prévention des accidents si un phénomène dangereux dans l'installation est susceptible d'entraîner une exposition supérieure à 10 mSv à l'extérieur du site, ce qui n'est pas le cas des stockages de résidus existants. L'arrêté prescrit également de clôturer le site et de disposer d'un gardiennage ou dispositif équivalent en dehors des heures ouvrées. L'exploitant doit également prendre les dispositions nécessaires pour qu'en fonctionnement normal l'exposition ajoutée du public soit aussi faible que raisonnablement possible sans dépasser 1 mSv/an (y compris le radon en extérieur) en application de l'article R. 1333-11 du code de la santé publique.

Les exploitants de stockages de résidus sont soumis à l'obligation de constituer des garanties financières dans la mesure où la rubrique 1735 est inscrite dans l'annexe I de l'arrêté du 31 mai 2012 fixant la liste des installations classées soumises à l'obligation de constitution de garanties financières en application du 5^o de l'article R. 516-1 du code de l'environnement. Ces garanties financières sont destinées à assurer la mise en sécurité du site de l'installation en application des dispositions mentionnées aux articles R.512-39-1 et R.512-46-25. Elles ne couvrent pas les indemnités dues par l'exploitant aux tiers qui pourraient subir un préjudice du fait de pollution ou d'accident causé par l'installation.

Les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium et leurs ouvrages de ceinture sont des installations classées soumises à la rubrique 1735.

Ils sont soumis à l'arrêté ministériel du 23 juin 2015 relatif aux installations mettant en œuvre des substances radioactives, déchets radioactifs ou résidus solides de minerai d'uranium, de thorium ou de radium soumises à autorisation au titre de la rubrique 1716, de la rubrique 1735 et de la rubrique 2797 de la nomenclature des installations classées, qui définit les règles techniques à mettre en œuvre par l'exploitant pour prévenir et réduire les risques de pollution ou d'accident.

3.2 Réglementation applicable aux ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium

Les ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium sont encadrés par la législation des installations classées lors de l'exploitation des stockages.

²⁶ Rubrique 1735 de la nomenclature des installations classées : « Substances radioactives (dépôt, entreposage ou stockage de) sous forme de résidus de traitement de minerais d'uranium ou de thorium contenant des radionucléides naturels des chaînes de l'uranium ou du thorium et boues issues du traitement des eaux d'exhaure, sans enrichissement en uranium 235 et dont la quantité totale est supérieure à 1 tonne ».

3.2.1 Réglementation relative aux déchets de l'industrie extractive

La **directive 2006/21/CE** du parlement européen et du conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE précise dans son considérant 10 qu'elle couvre la gestion des déchets des industries extractives susceptibles d'être radioactifs mais sans traiter des aspects spécifiques à la radioactivité, qui font l'objet du traité instituant la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom). Elle s'applique donc aux stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium et à leurs ouvrages de ceinture pour les aspects qui ne sont pas liés à la radioactivité. Le considérant 22 de la directive indique qu'il est nécessaire de définir des procédures de surveillance pendant l'exploitation et de suivi après fermeture des installations de gestion des déchets. Le considérant 23 de la directive précise qu'il est nécessaire de définir quand et comment il convient de fermer une installation de gestion de déchets des industries extractives et de déterminer les obligations et les responsabilités de l'exploitant au cours de la période de suivi après fermeture. La fermeture (cessation d'activité) des installations de stockage des résidus de minerais d'uranium est traitée au § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Les dispositions relatives à la gestion des digues contenues dans la directive concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive ont été transposées par **l'arrêté du 19 avril 2010** pour les stockages de déchets d'extraction solides, liquides, en solution ou en suspension relevant de la rubrique 2720²⁷ de la nomenclature des installations classées mais il est possible de s'inspirer de ses prescriptions pour gérer des ouvrages ceinturant des stockages de résidus miniers uranifères. L'arrêté précise notamment les critères permettant de classer en catégorie A une installation (cf. §3.3.2 ci-après).

Cet arrêté indique que l'installation est conçue, réalisée et exploitée, en prenant en compte les performances des meilleures techniques disponibles économiquement acceptables (MTD) **au sens de la directive n° 2008/1/CE du 15 janvier 2008** relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution. Il prescrit la réalisation d'un plan de gestion des déchets qui prévoit notamment :

- une caractérisation des déchets ;
- une analyse des risques ;
- la détermination des mesures techniques et d'organisation pour réduire la probabilité et les effets des phénomènes dangereux ;
- un plan de fermeture comprenant la remise en état, des procédures de suivi et de surveillance.

L'article 17 de cet arrêté indique que « les zones de stockage de déchets sont exploitées de façon à assurer leur stabilité et en particulier à éviter les glissements profonds, les écroulements de parois, l'érosion par sappe du pied, les ravinements et la dégradation des ruisseaux couverts. L'exploitant surveille la stabilité des digues, terrils et remblais lors de la phase d'exploitation et, plus généralement, les mouvements que peuvent subir les déchets, en recueillant régulièrement les informations suivantes, fixées en fonction de l'étude de dangers :

- le niveau de l'eau ou de la boue dans le cas de digues de retenue ;
- la qualité et le volume des eaux de percolation dans le cas de digues de retenue ;
- la position de la nappe phréatique dans le cas de digues de retenue ;
- la pression interstitielle ;
- le mouvement des déchets, résidus et remblais susceptibles d'intervenir. »

3.2.2 Réglementation relative aux critères de classification des installations de gestion de déchets

La **décision n° 2009/337/CE du 20 avril 2009** relative à la définition des critères de classification des installations de gestion de déchets conformément à l'annexe III de la directive 2006/21/CE du Parlement européen et du Conseil concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive définit les installations de catégorie A. Il s'agit des installations pour lesquelles les conséquences prévues, à court ou à long terme, d'une défaillance due à une perte d'intégrité structurelle ou à la mauvaise exploitation d'une installation de gestion de déchets peuvent entraîner :

- a) un risque non négligeable de perte de vies humaines ;
- b) un grave danger pour la santé humaine ;

²⁷ 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).

c) un grave danger pour l'environnement.

Cette décision définit plusieurs notions dont le « risque de perte de vies humaines », le « danger pour la santé humaine » ou le « danger potentiel pour l'environnement peu important ». Le 1. de l'article 5 précise qu'en cas de perte d'intégrité structurelle des bassins de résidus, les vies humaines sont considérées comme menacées lorsque les niveaux des eaux ou des boues se situent à 0,7 mètre au moins au-dessus du sol ou lorsque la vitesse des eaux ou des boues dépasse 0,5 m/s.

Les ouvrages ceinturant les résidus actuellement soumis à la rubrique 1735 ne sont pas classés en catégorie A selon cette décision du 20 avril 2009, hormis celui du site de stockage des Bois-Noirs Limouzat (cf. § 3.2.4).

3.2.3 Réglementation relative à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées soumises à autorisation

Concernant la prévention des risques et notamment ceux liés aux séismes, les stockages de résidus et leurs installations connexes, notamment les ouvrages de ceinture, sont soumis aux dispositions de **l'arrêté du 4 octobre 2010** relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. Cet arrêté contient une partie relative à la prévention des risques sismiques. L'article 10 de cet arrêté prévoit que l'ensemble des installations classées soumises à autorisation respectent les dispositions prévues pour les bâtiments, équipements et installations de la catégorie dite « à risque normal » par les arrêtés pris en application de l'article R. 563-5 du code de l'environnement dans les délais et modalités prévus par ces arrêtés. Ces arrêtés s'appliquent directement aux ouvrages nouveaux mais peuvent être utilisés pour le calcul de la résistance des ouvrages ceinturant les résidus soumis à la rubrique 1735 de la nomenclature des installations classées.

L'article R. 563-5 renvoie vers **l'arrêté du 22 octobre 2010** relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » faisant référence aux « règles Eurocode 8 » relatives à la conception et au dimensionnement des structures pour leur dimensionnement aux séismes. L'article D. 563-8-1 du code de l'environnement permet de déterminer la zone de sismicité dans laquelle est implanté l'ouvrage.

Il convient également de noter que le dossier de demande d'autorisation environnementale d'une ICPE prévoit une **étude de dangers** conforme aux dispositions de **l'arrêté du 29 septembre 2005** relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Cet arrêté concerne les études de dangers réalisées après la parution de cet arrêté. De fait, les stockages de résidus étudiés dans ce rapport bénéficient de l'antériorité. Ils ne disposent donc pas systématiquement d'une étude de dangers qui peut cependant être exigée par le préfet conformément à l'article L. 181-14 du code de l'environnement. Pour la réalisation des études de dangers, l'article 10 de l'arrêté du 29 septembre 2005 précise que « la gravité des conséquences potentielles prévisibles d'un accident sur les personnes physiques, parmi les intérêts visés à l'article L. 511-1 du code de l'environnement, résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux, définie à l'article 9 du présent arrêté, et de la vulnérabilité des personnes potentiellement exposées à ces effets, en tenant compte, le cas échéant, des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et de la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident si la cinétique de l'accident le permet. [...] L'échelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident, à l'extérieur des installations » est présentée ci-dessous :

Classe de probabilité Type d'appréciation	E	D	C	B	A
qualitative ¹ (les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants) ²	« événement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations..</i>	« événement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« événement improbable » : <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.</i>	« événement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« événement courant » : <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.</i>
semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté				
Quantitative (par unité et par an)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	

Tableau 1. Échelle de probabilité

(1) Ces définitions sont conventionnelles et servent d'ordre de grandeur de la probabilité moyenne d'occurrence observable sur un grand nombre d'installations x années. Elles sont inappropriées pour qualifier des événements très rares dans des installations peu nombreuses ou faisant l'objet de modifications techniques ou organisationnelles. En outre, elles ne préjugent pas l'attribution d'une classe de probabilité pour un événement dans une installation particulière, qui découle de l'analyse de risque et peut être différent de l'ordre de grandeur moyen, pour tenir compte du contexte particulier ou de l'historique des installations ou de leur mode de gestion.

(2) Un retour d'expérience mesuré en nombre d'années x installations est dit suffisant s'il est statistiquement représentatif de la fréquence du phénomène (et pas seulement des événements ayant réellement conduit à des dommages) étudié dans le contexte de l'installation considérée, à condition que cette dernière soit semblable aux installations composant l'échantillon sur lequel ont été observées les données de retour d'expérience. Si le retour d'expérience est limité, les détails figurant en italique ne sont en général pas représentatifs de la probabilité réelle. L'évaluation de la probabilité doit être effectuée par d'autres moyens (études, expertises, essais) que le seul examen du retour d'expérience.

NIVEAU DE GRAVITÉ des conséquences	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets létaux significatifs	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets létaux	ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL des effets irréversibles sur la vie humaine
Déastreux.	Plus de 10 personnes exposées (1).	Plus de 100 personnes exposées.	Plus de 1 000 personnes exposées.
Catastrophique.	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes.	Entre 100 et 1 000 personnes exposées.
Important.	Au plus 1 personne exposée.	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.
Sérieux.	Aucune personne exposée.	Au plus 1 personne exposée.	Moins de 10 personnes exposées.
Modéré.	Pas de zone de létalité hors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne ».
(1) Personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.			

Tableau 2. Échelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations

3.2.4 Réglementation relative aux ouvrages ceinturant les résidus sous lame d'eau ou liquides soumis à la nomenclature IOTA

Un seul ouvrage ceinturant les résidus miniers uranifères est actuellement classé selon la nomenclature IOTA : il s'agit de la retenue du Bois-Noirs Limouzat qui est un barrage de classe A.

L'article L. 214-2 du code de l'environnement indique que « les installations, ouvrages, travaux et activités visés à l'article L. 214-1 sont définis dans une nomenclature, établie par décret en Conseil d'Etat après avis du Comité national de l'eau, et soumis à autorisation ou à déclaration suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques. » Il s'agit de la nomenclature définie à l'article R. 214-1 du code de l'environnement (nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités) comprenant notamment les barrages, digues, systèmes d'endiguement et ouvrages hydrauliques définis ci-après.

Les digues, systèmes d'endiguement ou ouvrages hydrauliques répondent à une problématique de protection contre les inondations et ne concernent donc pas les ouvrages ceinturant les résidus uranifères, qui ne sont pas abordés dans ce chapitre, hormis pour ce qui concerne l'ouvrage ceinturant le stockage des Bois-Noirs Limouzat. Les barrages sont des installations soumises à la rubrique 3.2.5.0 de la nomenclature IOTA. Ils sont destinés à retenir temporairement 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...). De fait, ils sont construits, le plus souvent, en travers d'un cours d'eau. L'ouvrage des Bois-Noirs Limouzat est soumis à cette rubrique mais diffère des autres ouvrages de cette rubrique par le fait que la retenue d'eau vise uniquement à assurer une protection radiologique vis-à-vis des résidus de traitement de minerais d'uranium présents derrière l'ouvrage. Les classes des barrages de retenue et des ouvrages assimilés, ci-après désignés « barrages », sont définies à l'article R. 214-112 du code de l'environnement selon le tableau ci-après. En cas de risque particulier ou d'enjeux importants, un barrage peut se voir attribuer une classe qui ne correspond pas à ses caractéristiques géométriques.

CLASSE de l'ouvrage	CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES
A	$H \geq 20$ et $H^2 \times V^{0,5} \geq 1\,500$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H \geq 10$ et $H^2 \times V^{0,5} \geq 200$
C	a) Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel $H \geq 5$ et $H^2 \times V^{0,5} \geq 20$ b) Ouvrage pour lequel les conditions prévues au a ne sont pas satisfaites mais qui répond aux conditions cumulatives ci-après : i) $H > 2$; ii) $V > 0,05$; iii) Il existe une ou plusieurs habitations à l'aval du barrage, jusqu'à une distance par rapport à celui-ci de 400 mètres.

Tableau 3. Classes de barrage définies à l'article R. 214-112 du code de l'environnement

« H » correspond à la hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande différence de cote entre le sommet de la crête de l'ouvrage et le terrain naturel au niveau du pied de l'ouvrage.

« V » correspond au volume retenu exprimé en millions de mètres cubes et défini comme le volume qui est retenu par le barrage à la cote de retenue normale. Dans le cas des remblais latéraux à un bief, le volume considéré est celui du bief situé entre deux écluses ou deux ouvrages vannés.

En application des articles R. 214-116 et R.214-117 du code de l'environnement, **l'étude de danger d'un barrage** est réalisée et actualisée tous les dix ans par un organisme agréé conformément aux dispositions des articles R.214-129 à R.214-132 et est notamment composée de :

- l'évaluation des risques liés aux crues, aux séismes, aux glissements de terrain, aux chutes de blocs et aux avalanches ainsi que les conséquences d'une rupture des ouvrages.
- la prise en compte des événements de gravité moindre mais de probabilité plus importante tels les accidents et incidents liés à l'exploitation de l'aménagement.
- un diagnostic exhaustif de l'état des ouvrages, réalisé conformément à une procédure adaptée à la situation des ouvrages et de la retenue.

L'annexe de l'arrêté du 12 juin 2008 modifié définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et en précisant le contenu définit le périmètre de l'étude de dangers qui inclut *a minima* le barrage et ses dispositifs de sécurité tels que les évacuateurs de crues, les vidanges de fond ou les systèmes de contrôle-commande. Ce périmètre comprend également les organes de prise d'eau et d'isolement, le dispositif d'auscultation, la retenue et ses berges et, s'il y a lieu, les canaux et les autres ouvrages ayant une incidence sur la sûreté du barrage. Cette annexe indique également que l'étude de dangers doit comporter une description de l'ouvrage et de son environnement ainsi qu'une analyse fonctionnelle interne et externe. Elle précise ce qui est attendu du diagnostic exhaustif de l'état et du bilan de conception, de comportement et d'état des ouvrages. Elle caractérise les aléas naturels, fait état de l'accidentologie et du retour d'expérience pour en déduire les risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets et de gravité des conséquences. Elle en déduit les actions à mener pour réduire ces risques le cas échéant.

L'article 2 de l'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages précise que :

« 1° Dans les conditions normales d'exploitation du barrage, les risques liés à son fonctionnement sont pleinement maîtrisés, en tenant compte des contraintes pouvant s'exercer naturellement sur l'ouvrage, venant notamment des actions de l'eau de la retenue ;

2° En cas d'événement naturel exceptionnel tel que lié à la crue du cours d'eau alimentant la retenue, le barrage conserve la disponibilité de tous ses organes de sécurité. En cas de séisme, le barrage n'est pas à l'origine d'une libération incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue ».

Une étude de dangers doit le démontrer pour les barrages existants. Si une étude de dangers ou un diagnostic démontre qu'un barrage existant n'est plus conforme aux exigences de sécurité, il fait l'objet de travaux de mise en conformité. Des annexes à cet arrêté précisent les contraintes qui s'exercent sur l'ouvrage (poussées hydrostatiques, pression hydrodynamique...), ce que l'on entend par conditions normales d'exploitation ainsi que les périodes de retour à considérer en cas de crue exceptionnelle ou de séisme. A titre d'exemple, la crue retenue pour un barrage de classe A en remblai, comme le site des Bois-Noirs Limouzat, correspond à une période de retour de 10 000 ans (crue décennale). Dans le cas des séismes, une évaluation des conséquences d'un séisme n'est exigée que dans les zones de sismicité 3. Elle peut être basée sur une approche forfaitaire, sur une approche déterministe ou probabiliste :

- l'approche forfaitaire dépend de la classe du barrage et de la zone de sismicité ;
- l'approche déterministe est basée sur la détermination des conséquences du séisme maximal historique vraisemblable (SMHV) ;
- l'approche probabiliste est basée sur la détermination des conséquences d'un séisme de période de retour de 3 000 ans.

3.3 Doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium de mai 1999

La note DPPR_NT IPSN 99-42, établie en 1999 par l'IPSN et la DPPR [29], préconise notamment que soit évalué l'impact à court et moyen terme des sites de stockage des résidus de traitement de minerais d'uranium après réaménagement, suivant des scénarios d'évolution normale du stockage et dans le cadre de situations hypothétiques liées à des événements aléatoires d'origine naturelle ou associées à des actions humaines. Elle préconise que l'évolution du stockage dans le temps tienne également compte de ses évolutions mécaniques minéralogiques, géochimiques et hydrogéologiques.

Cette note prévoit dans l'un de ses scénarios l'évaluation de l'impact radiologique associé à la perte d'intégrité des ouvrages de ceinture des stockages de résidus. Elle définit à cet égard une période d'efficacité démontrée de ces ouvrages d'une durée comprise entre 300 et 1 000 ans pendant laquelle la valeur de 1 mSv par an ne doit pas être dépassée. La note mentionne également la nécessité de tenir compte d'une période de surveillance passive pendant laquelle l'exploitant n'assure plus la maintenance mais le contrôle du stockage demeure assuré par l'administration. Des événements naturels d'intensité exceptionnelle sont alors à inclure dans les scénarios d'évaluation de l'impact radiologique, notamment la perte d'intégrité des ouvrages de ceinture. La note fait enfin état d'une période de surveillance non garantie pendant laquelle la mémoire de l'information est considérée comme perdue. De nombreux scénarios peuvent alors être envisagés, notamment l'utilisation des matériaux de la digue.

La doctrine de 1999 précise enfin que l'évaluation de l'impact radiologique futur résultant des relâchements éventuels de radioactivité dans l'environnement doit se fonder sur un niveau technologique et des modes de vie actuels dans des conditions climatiques européennes tempérées. Ceci est justifié par le fait que toute extrapolation des conditions de vie dans un avenir lointain aurait un caractère largement spéculatif. Pour finir, il est indiqué que les relâchements de radionucléides dans la biosphère ne devront supposer aucun traitement préalable des effluents.

3.4 Guides nationaux et internationaux applicables aux stockages de résidus miniers d'uranium

3.4.1 Guide méthodologique relatif à la réglementation de sécurité et de sûreté des barrages relevant de la loi sur l'eau

Il fixe les règles de conception des ouvrages, de réalisation de travaux et de mise en eau des ouvrages. Les études de conception, de dangers et de travaux du barrage doivent être réalisées par un organisme agréé.

Ce guide [8] s'applique au barrage des Bois-Noirs sur la commune de Saint Priest la Prugne. Il précise :

- les règles de classement des barrages et les éventuels changements de classe liés à l'évolution de la nomenclature eau ;
- les éléments à fournir dans le cadre d'une demande d'autorisation environnementale pour le barrage ou dans le cadre d'une demande de modification pour un barrage déjà autorisé.

Il fixe les règles de conception des ouvrages, de réalisation de travaux et de mise en eau des ouvrages et précise que les études de conception, de dangers et de travaux du barrage doivent être réalisées par un organisme agréé. Le guide rappelle enfin le contenu de l'étude de dangers comme indiqué dans le code de l'environnement ainsi que la surveillance à exercer sur les ouvrages.

3.4.2 Document BREF « Gestion des déchets de l'industrie extractive » de décembre 2018

La version de décembre 2018 du BREF²⁸ [4][5] constitue une révision du BREF de janvier 2009 [4]. Ce document décrit les différents types d'ouvrages de retenue, fréquemment utilisés pour stocker des déchets d'extraction de minerais, et précise que les déchets d'extraction de minerais sont souvent stockés pour une très longue durée. Il y est rappelé que l'objectif des ouvrages de retenue est d'éviter la contamination des sols et des eaux autour du

²⁸ Les documents BREF sont des rapports publiés par la commission européenne synthétisant les meilleures techniques disponibles dans un domaine donné.

site. Le document BREF précise que la tenue à long terme des ouvrages de retenue peut être de 1 000 ou 2 000 ans et qu'ils sont alors dimensionnés pour cela. Il précise qu'avec une tenue à long terme de 1 000 ans, la période de retour des événements exceptionnels associés est de 10 000 ans.

Pour les barrages construits à partir d'un cœur en matériaux imperméables sur lequel sont déposés des déchets de l'industrie extractive (cas du barrage des Bois-Noirs), le document prévoit une surveillance et une maintenance après la cessation d'activité tant que des risques subsistent.

Des préconisations sont données pour la tenue des ouvrages sur le long terme en tenant compte des aléas hydraulique et sismique.

Pour l'aléa hydraulique, il est préconisé que les ouvrages disposent d'un système d'évacuation de crues et de systèmes de drainage entretenus et qu'ils soient dimensionnés à partir du flux hydraulique maximal probable. Une analyse géotechnique doit ainsi être menée :

- sur la stabilité de la pente générale et de la structure de base ;
- sur la solidité sous charge et la stabilité des fondations ;
- sur la stabilité chimique et physique du déchet de l'industrie extractive ;
- sur la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface ;
- sur l'efficacité des systèmes de drainage, évacuation des eaux et notamment des évacuations d'urgence.

Pour l'aléa sismique, la tenue sur le long terme des grands barrages se doit de suivre le système SEE (Safety Evaluation Earthquake), qui est d'un niveau d'exigence équivalent à une période de retour du séisme de 10 000 ans ou à un séisme déterministe intitulé « Maximum Credible Earthquake²⁹ ». Il est précisé dans le BREF que des périodes de retour plus courtes peuvent être envisagées pour de plus petits barrages.

Enfin, le document introduit des facteurs de sécurité à retenir pour l'étude de stabilité globale de la structure du barrage et recommande d'appliquer l'Eurocode partie 7-1 pour la conception et notamment pour ce qui concerne les pentes du barrage et l'Eurocode partie 8 pour déterminer le risque de liquéfaction de ses constituants.

3.4.3 Guide du BRGM « Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues à stériles uranifères » de septembre 2001

Le guide du BRGM [31] présente un bilan synthétique des caractéristiques des ouvrages ceinturant les stockages de résidus uranifères sur la base d'une étude documentaire. La méthodologie déployée dans ce guide comprend les phases suivantes :

- recherche documentaire, interview de responsables et visites de site ;
- établissement de fiches signalétiques concernant les ouvrages ;
- estimation des évolutions possibles de l'ouvrage et des sollicitations extrêmes qu'il risque de subir ;
- vérification de la conception et calculs de stabilité, au vu des scénarios extrêmes envisagés ci-dessus, y compris en l'absence d'entretien.

Il est considéré dans ce guide, sur la base des hauteurs des ouvrages de retenue (cf. § 2.2), que 11 des 17 stockages de résidus miniers d'uranium en France disposent d'un ouvrage nécessitant des études de stabilité à long terme. Comparativement au guide du BRGM, le présent rapport retient également un douzième site, celui de Bauzot, pour lequel les résidus de traitement et les déchets stockés sont bordés par un ouvrage en stériles miniers (cf. § 2.2.4).

²⁹ Le « MCE » est le séisme de plus forte magnitude raisonnablement concevable qui semble possible le long d'une faille reconnue ou dans une province tectonique géographiquement définie, dans le contexte tectonique actuellement connu ou présumé. Les mouvements du sol associés à un « MCE » sont généralement définis comme une limite supérieure de l'intensité prévue du séisme sur le site du barrage en raison de ce séisme.³⁰ https://www.icold-cigb.org/FR/registre_des_barrages/synthese_generale.asp

4 RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT LES OUVRAGES DE RETENUE

4.1 *Les grands ouvrages anciens toujours fonctionnels*

Des digues ont été construites sur les rivières et les lacs depuis les temps anciens. Bien que la conception et la technologie de la construction de barrages se soient modifiées au fil des ans, le concept est ancien.

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) définit comme « grand barrage » tout barrage d'une hauteur (des fondations les plus basses à la crête) supérieure à 15 mètres, ou dont la hauteur est comprise entre 5 et 15 mètres et qui retient plus de 3 millions de mètres cubes d'eau³⁰. Lors du congrès de 2008 de la CIGB, le registre mondial des barrages dénombrait 88 grands ouvrages de plus de 200 ans toujours en activité (cf. extrait présenté dans le Tableau 4 ci-dessous). Le plus vieil ouvrage de retenue au monde toujours en fonctionnement a plus de 2 000 ans. Il s'agit du barrage de Quatinah sur le lac Homs en Syrie. Ce barrage aurait été conçu à des fins d'irrigation vers 1319-1304 av. J.C puis agrandi vers 284-305 av J.C. D'une capacité de 90 millions de m³, il était probablement le plus grand réservoir du Proche-Orient. Il s'agit d'un barrage-poids de deux kilomètres de long constitué d'un noyau en béton romain protégé par des blocs de basalte³¹. Chronologiquement, viendraient ensuite les digues de Proserpina et de Cornalvo en Espagne, deux barrages-poids en terre construits au I^{er} ou II^{ème} siècle. Ces barrages sont toujours utilisés et font partie d'un site du patrimoine mondial de l'UNESCO. Le barrage de Cornalvo mesure 24 m de hauteur et 194 m de longueur³², celui de Proserpina 425 mètres de long et 21 m de haut. En France, le plus vieil ouvrage est le barrage de St Ferréol mis en eau en 1675 dans le but d'alimenter le canal du Midi.

Pays	Barrage	Année	Pays	Barrage	Année
Rép. Tchèque	DEHTAR	1550	Espagne	PUNTES III	1791
Rép. Tchèque	DVORISTE	1363	Espagne	RELLEU	1776
Rép. Tchèque	HORUSICKY RYBNIK	1512	Espagne	TIBI	1594
Rép. Tchèque	JORDAN	1492	Espagne	VALDAJOS	1530
Rép. Tchèque	MACHOVO JEZERO	1272	Espagne	VALDEINFIERNO	1806
Rép. Tchèque	ROZMBERK	1590	Espagne	VEGAS ALTAS	1800
Rép. Tchèque	STANKOVSKY RYBNIK	1549	Espagne	ZALAMEA	1816
Rép. Tchèque	VELKA HOLNA	1500	Royaume Uni	COOMBS	1806
France	CAROMB	1766	Royaume Uni	CHELBURN LOWER	1800
France	COUZON	1811	Royaume Uni	SLAITHWAITE	1797
France	LAMPY	1782	Royaume Uni	CHELBURN UPPER	1800
France	SAINT FERREOL	1675	Royaume Uni	CHASEWATER	1819
Allemagne	KILIANSTEICH	1610	Royaume Uni	HILLENDA	1797
Allemagne	ODERTEICH	1721	États-Unis	CANYON LAKE LOWER DA	1800
Allemagne	TEUFELSTEICH	1696	États-Unis	HIDDEN VALLEY SUBDIV	1800
Allemagne	BALLENSTEDT	1749	États-Unis	SHAWME LAKE DAM	1700
Allemagne	FRANKENTEICH	1724	États-Unis	TURNER LAKE DAM	1800
Allemagne	DÖRNTHALER TEICH	1790	États-Unis	COOPER LAKE DAM AND WEST DIKE	1800
Allemagne	GROSSER SIESERSTEINTEICH	1793	États-Unis	OXOBOXO LAKE	1810
Hongrie	HAMORI	1810	Espagne	BERCIAL, EL	100
Inde	CUMBHUM	1500	Espagne	CASILLAS II	1565
Inde	THONNUR TANK	1000	Espagne	CORNALBO	100
Inde	DHAMAPUR	1800	Espagne	CHARCA ARROYO DE LA LUZ	1558
Inde	KALAPVIHIR	1800	Espagne	CHARCA DE LA GENERALA	1795
Inde	MUDANA	1800	Espagne	CHARCA DEL LUGAR	1737

³⁰ https://www.icold-cigb.org/FR/registre_des_barrages/synthese_generale.asp

³¹ <http://listamaze.com/10-oldest-dams-still-in-continuous-use/>

³² <https://fr.ripleybelieves.com/world-s-oldest-dams-still-in-operation-5714>

Inde	RUSHI	1800	Espagne	ELCHE	1640
Inde	RAJSAMAND	1671	Espagne	GARCIA (CACERES)	1794
Inde	JAI SAMAND	1730	Espagne	GRANJILLA 1	1660
Inde	BARWA SAGAR	1694	Espagne	GRANJILLA 2	1560
Inde	MAGARPUR	1694	Espagne	GREÑA, LA	1795
Inde	PACHWARA LAKE	1694	Espagne	MAR DE ONTIGOLA	1500
Japon	DAIMONIKE	1128	Espagne	MEZALOGHA	1728
Japon	YAKUSHIIKE	1600	Espagne	PIGNATELLI	1790
Japon	IRUKAIKE	1633	Espagne	PROSERPINA	100
Mexique	ÑADO *	1800	Espagne	ALBUERA CASABAYA	1693
Mexique	SAN ANTONIO	1765	Espagne	ALBUERA DE FERIA	1747
Mexique	SAUCILLO	1730	Espagne	ALBUERA SAN JORGE	1577
Slovaquie	ROZGRUND	1744	Espagne	ALMANSA	1384
Slovaquie	POCUVADLO	1780	Espagne	ARCE DE ARRIBA	1755
Slovaquie	VELKA RICHNAVA	1738	Espagne	ARGUIS	1704
Slovaquie	DOLNA HODRUSA	1736	Espagne	BARRUECO DE ABAJO	1800
Slovaquie	BANSKY STUDENEC	1746	Espagne	BARRUECO DE ARRIBA	1800
Slovaquie	VODARENSKA	1510	Slovénie	OVCJASKE KLAVZE	1812
Slovénie	BELCNE KLAVZE	1769	Slovénie	PUTRIHOVE KLAVZE	1779

Tableau 4. Extraction du registre des grands barrages du CIGB de 2008

Tous ces ouvrages font aujourd'hui l'objet d'une étroite surveillance, mais celle-ci est davantage liée aux risques induits par la présence même du barrage qu'à son âge. Pour autant, une attention particulière est portée à certains phénomènes qui peuvent évoluer dans le temps. C'est le cas par exemple de la dégradation au cours du temps des liants à l'intérieur des maçonneries. Les conditions et les modes de construction peuvent également être un sujet de préoccupation. Un exemple frappant est fourni par le barrage de St Ferréol, où lors de la construction, les habitants furent mis à contribution en apportant des matériaux provenant de leur propriété pour constituer le corps du barrage, le rendant particulièrement inhomogène.

Si la longévité de certains ouvrages est remarquable, ils ne doivent pas éclipser le nombre, bien plus grand, de barrages n'ayant pas résisté à l'épreuve du temps, et ce malgré des conceptions ou des surveillances de très bonnes qualités. Ces barrages anciens ont été conçus pour la plupart avec des méthodes empiriques reflétant l'état de l'art de l'époque, que ce soient les remblais ou les barrages poids. Cet empirisme a conduit dans certains cas à des sous-dimensionnements et des ruptures mais pour d'autres, à des conservatismes de surdimensionnement « par ignorance », qui peuvent expliquer leur longévité.

Tous ces ouvrages n'ont vraisemblablement pas bénéficié d'un suivi correspondant aux standards actuels durant toute leur durée de vie, la première réglementation sur le contrôle des barrages en France datant de la fin du XIX^{ème} siècle. Pour autant, on retrouve des traces anciennes de maintenance sur plusieurs de ces ouvrages, ce qui explique leur stabilité actuelle. En tout état de cause, il paraît difficile, voire impossible, de garantir qu'un ouvrage non entretenu, quel qu'il soit, se maintienne dans un état satisfaisant.

Concernant l'évolution à long terme de ces grands ouvrages, les travaux de Bjelkevik [51] se sont focalisés sur la stabilité des barrages et sur les facteurs et les processus affectant cette stabilité. Ainsi, selon les suédois et les scandinaves, aucun ouvrage ne survivra au-delà de la prochaine période glaciaire (attendue dans 10 000 ans environ). **Bjelkevik précise que des pays comme la Suède, le Canada, l'Australie et les Etats-Unis retiennent ainsi une durée maximale de tenue des ouvrages de 1 000 ans.**

Enfin, pour ce qui concerne plus spécifiquement les ouvrages de retenue de dépôt de résidus miniers, il en existerait d'après Davies et Lighthall (2001) [52] plus de 3 500 dans le monde.

4.2 Types et cinétiques de dégradation des grands ouvrages

4.2.1 Types de défaillances

Les types de défaillances retenues à la suite de l'étude bibliographique menée dans le cadre du présent GT ne prennent pas en compte la possibilité de phénomènes amont et/ou externe ou ne se situant pas immédiatement à l'aplomb de l'ensemble de l'ouvrage et de ses produits contenus, telles qu'une rupture de barrage amont pouvant submerger l'ouvrage d'une vague de submersion, un débordement de cours d'eau, une chute d'avion ou tout autre catastrophe externe pouvant occasionner des dommages sur l'ouvrage.

Les dégradations subies par les grands ouvrages peuvent conduire ou non à leur rupture. Cette dernière demeure toutefois un phénomène minoritaire par rapport à la dégradation générale de l'ouvrage.

Les dégradations des ouvrages apparaissent et se développent suivant deux principales cinétiques : lente (continue) et rapide (ponctuelle). Les phénomènes naturels courants, engendrant des variations régulières et continues dans le temps, avec souvent de faibles amplitudes, des conditions environnantes de l'ouvrage (température, degré hygrométrique, pluie, gel, vent, dessiccation/retrait, flore, faune...) modifient progressivement les caractéristiques (physico-chimiques, géotechniques...) de l'ouvrage et peuvent donc le dégrader. Les mouvements de terrain et la présence de travaux miniers souterrains sous le stockage (le cas échéant) contribuent également à dégrader ces ouvrages. Enfin, les variations ponctuelles et rares dans le temps, de grandes amplitudes, des conditions environnantes de l'ouvrage (séismes ou épisodes climatique extrêmes tels que les crues, tempêtes, chutes de neige inhabituelles, épisodes de grande sécheresse, ...) peuvent modifier brusquement les caractéristiques de l'ouvrage et ainsi le dégrader.

Les travaux miniers souterrains ou les mines à ciel ouvert peuvent être le siège de mouvements de terrain (effondrement localisé, affaissement, glissement ou éboulement de front de falaise...) impactant la surface et les ouvrages situés à l'aplomb ou à proximité (exemple de l'accident de la mine de charbon Martin County près d'Inez, dans le Kentucky le 11/10/2000).

Ces différentes situations peuvent conduire à trois grandes classes de mécanismes de dégradation :

- la submersion, l'érosion externe ;
- l'érosion interne, les percolations excessives ;
- le glissement des talus.

Enfin, les aléas naturels peuvent également créer des effets induits et ainsi accroître des phénomènes déjà présents (telle que l'érosion interne amorcée suite à une légère liquéfaction dans le corps de digue ou les terrains de fondation par exemple) ou en créer de nouveaux.

S'agissant plus particulièrement des **ouvrages de retenue de résidus miniers**, Aubertin *et al.* (2018) [47] résumant les principales causes spécifiques de défaillance suivant les types d'instabilité observée (cf. Tableau 5). Ces défaillances incluent « *la submersion de la crête par une crue des eaux excessives dans le bassin [cas susceptible de se transposer au stockage des Bois-Noirs Limouzat uniquement], l'érosion régressive du matériau du corps de digue ou de sa fondation causée par des pressions interstitielles trop élevées, l'érosion des surfaces due à l'entraînement des particules par l'eau ou le vent, le glissement de zones instables le long de plans de faiblesse attribuables aux sollicitations statiques ou dynamiques, la perte de portance telle que la liquéfaction de rejets lâches et saturés, et l'instabilité des sols de fondation face à un tassement excessif ou à une rupture par cisaillement* ».

Types d'instabilité	Causes
Débordement en crête	Mauvaise conception hydrologique ou hydraulique Tassement de la crête
Instabilité des talus	Contraintes excessives dans le sol de fondation Contraintes excessives dans le remblai du barrage Contrôle inadéquat des pressions d'eau
Érosion régressive	Mauvais contrôle des débits de percolation Mauvaise conception du filtre et du drain Mauvaise conception ou contrôle insuffisant des travaux de mise en place, conduisant à des fissures ou à des chemins de percolation (p.ex. à proximité des conduites)
Érosion externe	Mauvaise protection des talus, du pied et de la digue de retenue
Dommages d'origine sismique	Géométrie inadéquate (p.ex. pentes trop raides) Liquéfaction des rejets, des matériaux de la digue ou des sols de fondation
Dommages aux ouvrages de décantation	Tassements excessifs Attaque du béton ou de l'acier (dégradation des propriétés)

Tableau 5. Principales causes spécifiques de défaillance des ouvrages de retenue de résidus miniers [47]

Il ressort de l'analyse bibliographique que :

- **la majorité des cas de défaillance (82%) survient en période d'exploitation du stockage**, suite à une instabilité des pentes et des fondations, aux effets des séismes ou au débordement en crête [47][50] ;
- les débordements d'eau et les séismes sont les causes les plus fréquentes **en phase de post-fermeture** [47][50] ;
- **les digues construites par la méthode amont³³ (cf. Figure 3 au § 2.2.1) sont les plus vulnérables** (près de 90% des cas documentés) [47][49].

Contrairement aux grands barrages, la nature même des ouvrages de retenue construits par la méthode amont (ouvrages anciens surélevés successivement) les rend plus vulnérables du fait de l'évolution de leur géométrie, de la nature des matériaux, de l'absence d'informations sur l'ouvrage ou sur son mode de construction.

Une analyse statistique menée par le BRGM en 2001 [53], réalisée sur la base d'une enquête internationale portant sur des milliers de cas de rupture ou de désordres graves ayant affecté les ouvrages de retenue de résidus miniers d'uranium, a mis en évidence les éléments suivants :

- **la maîtrise des écoulements (superficiels et interstitiels) est le point-clé qui conditionne le plus souvent la pérennité à long terme des ouvrages de retenue ;**
- **les organes dit « annexes » à vocation hydraulique (filtres et drains, dispositifs d'étanchéité, rigoles anti-ruissellement, évacuateur de crues, canal de dérivation...) sont les parties les plus sensibles. Leur bon fonctionnement dépend de l'exécution et de l'entretien ;**
- **la stabilité du flanc aval vis-à-vis d'un glissement d'ensemble n'est qu'un des aspects de la pérennité des ouvrages.**

Le BRGM a montré que les causes de rupture peuvent statistiquement être classées de la manière suivante (Tableau 6) :

Cause de dégradation	Pourcentage
<i>Selon le mécanisme</i>	
• Submersion, érosion externe (dont évacuateur inadapté)	30%
• Erosion interne, percolations excessives	50%
• Glissement des talus (surtout aval) et autres causes	20%

³³ Les sables de cyclonage constituant les digues sont déversés uniquement vers l'amont, si bien qu'à l'aval, l'ouvrage ne déborde pas de son emplacement primitif. Cette méthode permet d'économiser les emprises mais elle est potentiellement plus dangereuse, car les surélévations successives de la digue sont entièrement situées à l'aplomb de boues plus ou moins bien consolidées (d'après [53])

<i>Selon la partie de l'ouvrage concerné</i>	
• Défaillance des ouvrages annexes	44%
• Mauvais comportement du corps de l'ouvrage	25%
• Défaillance des fondations	12%
<i>Selon l'origine des erreurs humaines</i>	
• Erreurs durant les essais et reconnaissances préalables	45 à 50%
• Erreurs de conception et de dimensionnement	20 à 30%
• Erreur de construction	20 à 25%
• Erreur d'exploitation et de surveillance	5%

Tableau 6. Causes de rupture ou de désordres graves les plus fréquentes pour des ouvrages de retenue de résidus miniers [53]

En outre, parmi les facteurs extérieurs aggravants, figure la présence éventuelle d'anciennes galeries minières sous les dépôts de résidus et/ou de la digue.

La CIGB a également réalisé un retour d'expérience sur les accidents liés aux ouvrages ceinturant les résidus, sur la base d'une analyse de 221 cas de ruptures et d'incidents dans le monde [56]. L'analyse met en lumière que les principales causes des ruptures et incidents répertoriées ont été : un manque de maîtrise du bilan hydrique, un mauvais contrôle de la construction et un défaut général de compréhension des principes dont dépend la sécurité des opérations. Un ou deux cas dus à des conditions climatiques exceptionnelles et à des séismes ont également été recensés.

La CIGB a entre autres proposé une classification des principaux incidents mondiaux selon la cause probable. Cette analyse a été adaptée par Aubertin *et al.*, 2018 [47] (cf. Tableau 7 ci-après) :

Cause Type d'Incident (instabilité partielle ou totale des digues de retenue pour résidus miniers)	Rupture digue active³⁴	Rupture digue inactive	Accident digue active	Accident digue inactive	Infiltrations dans la fondation	Total
Instabilité des pentes	29 (57%)	1 (2%)	20 (29%)	1 (2%)		51
Infiltration dans la digue	10 (48%)	0	11 (52%)	0		21
Fondation, capacité portante	12 (50%)	1 (4%)	11 (46%)	0		24
Débordement en crête	20 (64%)	8 (26%)	3 (10%)	0		31
Instabilité dans le corps de l'ouvrage	12 (64%)	0	6 (31%)	1 (5%)		19
Séisme	18 (55%)	0	5 (15%)	10 (30%)		33
Effondrement de la mine	3 (100%)	0	0	0		3
Erosion de surface ou interne	3 (50%)	0	2 (33%)	1 (17%)		6
Causes non rapportées	0	0	0	0	13 (100%)	13
Causes inconnues	15 (83%)	3 (17%)	0	0		18
TOTAL	122 (56%)	13 (6%)	58 (26%)	13 (6%)	13 (6%)	219

Tableau 7. Principaux incidents sur les digues de retenue des résidus selon leur cause probable [47] (modifié)

Enfin, Rico *et al.* 2007 [54] indiquent qu'en Europe, la cause principale de rupture de ces ouvrages est liée à une pluviométrie exceptionnelle. Fry (2013) [55] précise que parmi les mécanismes rares mais dangereux de rupture de digues figurent la fissuration (par retrait, déformabilité différentielle ou par claquage hydraulique), la liquéfaction dite statique (occurrence non liée au séisme) et l'exsolution (ou libération de gaz).

³⁴ La digue est considérée comme active pendant la phase d'exploitation

4.2.2 Quelques cas de défaillances et conséquences

Parmi les grandes défaillances d'ouvrages survenus dans le monde, deux ruptures catastrophiques de digues à stériles peuvent être citées : les ruptures des digues de Los Frailes en Espagne [57][58] en 1998 et celle de Bento Rodriguez au Brésil [59] en 2015, qui illustrent chacun deux types de rupture : une digue en enrochement construite selon les règles de l'art avec rupture du sol de fondation dans le premier cas, et rupture du corps de la digue construite par la méthode amont par liquéfaction dans le second. Ces deux exemples, présentés ci-après, sont davantage détaillés en Annexe 19.4.

La mine de Los Frailes en Andalousie produisait du zinc, du plomb et du cuivre à partir de minerai de pyrite. Les résidus de traitement étaient déversés dans un bassin derrière une digue de 30 m de hauteur construite avec des enrochements provenant de l'exploitation minière. Cette digue reposait sur une couche de sables et graviers alluvionnaires surmontant une couche de marne bleue. La rupture brutale de la digue s'est produite le 25 avril 1998 (Figure 4). Elle est liée à un glissement initial sur une distance de 1 m d'une plaque de 30 m de long et de 20 m de large du sol de fondation au niveau des marnes bleues (1). Sous l'effet combiné des effluents qui se sont engouffrés sous la digue et de la diminution de la résistance au cisaillement du sol d'assise, le déplacement de la digue s'est accentué sur plus de 60 m, puis a fini par se rompre sur une section de 50 m en déversant 5,5 millions de m³ d'eau très acide et environ 1,5 millions de m³ de résidus riches en métaux (Zn, Fe, Cu, Pb, As, S) dans la rivière Agrio (4). Ces effluents ont été transportés jusqu'à 13 km en aval. Le lit de la rivière s'est soulevé de 3 m, ce qui a modifié son cours. Une crue de 3,6 m a été mesurée 30 minutes après la rupture à une distance d'environ 7 km. Plus de 2 600 ha ont été recouverts de stériles sur une épaisseur atteignant 4 m près de la digue. La rupture du sol de fondation serait due à une fragilisation des marnes par les eaux acides et le développement de fortes pressions interstitielles exercées par l'eau conduisant à une diminution de la résistance au cisaillement des marnes.

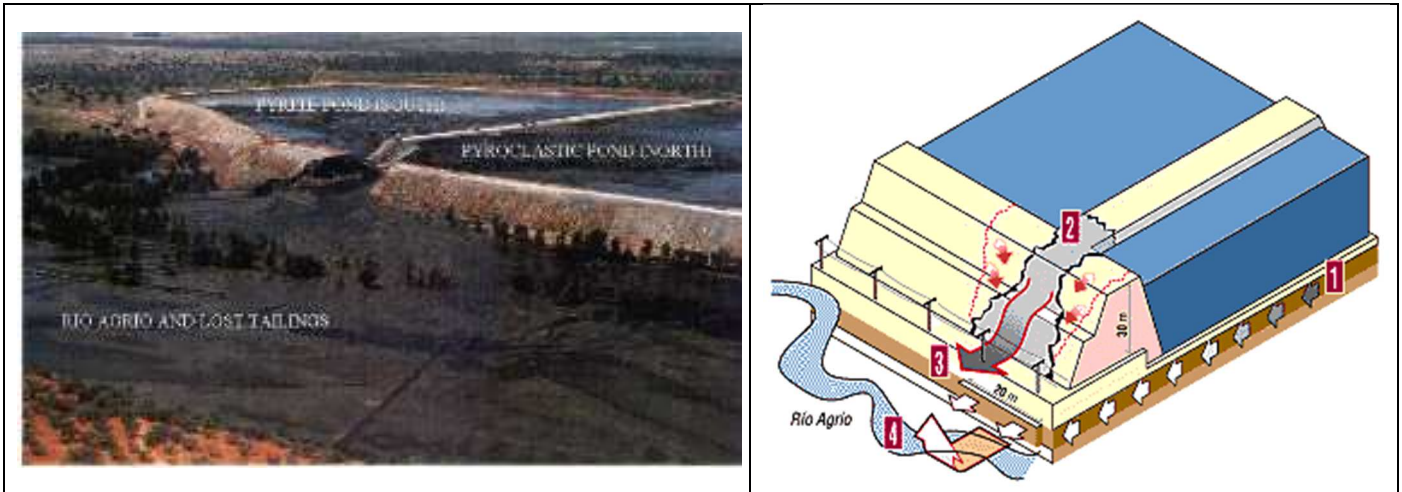


Figure 4. Photographie de la digue de Los Frailes après la rupture et représentation des différentes phases de la rupture de la digue (d'après [26])

La mine de fer de Samarco située à proximité de la ville de Bento Rodriguez au Brésil (état du Minas Gerais) extrayait de l'hématite à partir d'un gisement d'itabirite. Deux types de résidus, des « sables »³⁵ et des « schlamms »³⁶, étaient déversés séparément. Les sables étaient déposés derrière une première digue en terre puis utilisés pour surélever progressivement la digue (méthode amont) et les schlamms étaient déposés derrière ces dépôts successifs de sable. La rupture de la digue a eu lieu le 25 novembre 2015 (Figure 5) suite à un phénomène de liquéfaction des sables. La digue mesurait alors 110 m de haut. Les 60 millions de tonnes de résidus solides se sont transformés en une rivière de boue qui atteint et détruit la ville de Bento Rodriguez située en aval, provoquant 19 décès, puis emprunta le lit de la Rivière Doce pour atteindre la mer située à plusieurs dizaines de kilomètres. La rupture de la digue en forme d'un glissement-coulée est la conséquence d'une série d'incidents (phénomènes de renard³⁷ à la base de la digue, dysfonctionnement du système de drainage de base, mauvaise gestion des fines et de la boue) qui ont eu lieu au cours du développement de la digue. Ceux-ci ont conduit à un changement du design initial favorisant la saturation des sables et augmentant leur potentiel de liquéfaction, ainsi que le recul de la crête permettant le dépôt de schlamms à sa proximité. Ces

³⁵ Mélange de particules de la taille de sables et de silts, qui se drainent facilement

³⁶ Mélange constitué de particules fines de nature argileuse, présentant une faible perméabilité

³⁷ Phénomène d'érosion interne se produisant dans un ouvrage hydraulique de l'aval vers l'amont

schlamms ont ensuite été mis en charge par le dépôt de sables. Un mécanisme d'extrusion des schlamms s'est alors initié, entraînant un cisaillement des sables lâches et saturés qui se sont liquéfiés, conduisant à la rupture de la digue. Il est également possible que ce mouvement horizontal affectant les sables ait été amplifié par une série de trois petits chocs sismiques ayant eu lieu environ 90 minutes avant la rupture, même si leur action n'a pas été déterminante.



Figure 5. Site de la digue Fundão et du réservoir a) avant et b) après rupture

A une moindre échelle de dommages, l'exemple de l'ancienne digue Est du bassin B2 de l'entreposage de boues du *site Comurhex Malvésí* peut également être cité. Il s'agit de digues constituant la périphérie d'un bassin de décantation aménagé dans des stériles issus d'une ancienne mine de soufre [45]. Au fur et à mesure du remplissage du bassin de décantation, les digues ont été progressivement rehaussées pour accroître les volumes à stocker. Les digues ont également été consolidées à mesure que des désordres apparaissaient : réaménagement local (moindre pente), renforcements en partie externe par apport de matériaux de carrière placés en risberme et parfois pose de drains. Lors de la rupture de la digue Est survenue en mars 2004, les digues périphériques atteignaient une hauteur comprise entre 12 et 15 m avec une structure classique dite en « sapin », les derniers apports reposant partiellement sur les boues de décantation. Cette rupture a conduit à l'épandage de 15 000 m³ de boues dans un champ d'une dizaine d'hectares, dans le périmètre du site de Malvésí (la majeure partie des boues épandues occupait une surface de 4 ha sur une épaisseur de 30 à 40 cm au pied des bassins B3, B5 et B6). La conjonction de plusieurs causes est à l'origine de cette défaillance : présence permanente d'eau dans le bassin, mauvaise constitution de la digue au regard de l'état de l'art, colmatage des drains en pied de digue par précipitation de gypse, présence d'une couche de sol vasard dans les terrains de fondation. De fortes pluies à l'issue d'une longue période de canicule (été 2003) sont le facteur déclenchant.

Concernant la **France métropolitaine** dans sa globalité, un peu plus d'une trentaine d'ouvrages de retenue de résidus miniers de tous types (hors stockages objets de ce rapport) ont été recensés par GEODERIS lors de l'inventaire des dépôts de résidus miniers mené à la demande du Ministère chargé de l'Environnement en application de la Directive européenne sur les déchets issus de l'industrie extractive. Ces ouvrages sont pour la plupart anciens et de dimensions restreintes. Hormis l'accident de Malvesi, qui concerne des résidus uranifères, un seul cas a été recensé ces trente dernières années, d'ampleur modeste comparativement aux grands accidents ayant affecté les ouvrages de retenue à travers le monde et présentés au Tableau 8 *infra*. Il s'agit de la rupture partielle d'un ouvrage de retenue consécutivement à un épisode pluvieux important, entraînant le départ de plusieurs dizaines de m³ de résidus. La bibliographie relate des incidents survenus sur certains de ces ouvrages mais les informations sont souvent succinctes. **Il faut retenir que dans la plupart des cas, un mauvais dimensionnement, un rehaussement non prévu initialement ou un défaut d'entretien en sont à l'origine.**

Pour ce qui est de **l'échelle mondiale**, un tableau édité par WISE Uranium Project [26] recense la chronologie des grandes défaillances de ce type d'ouvrages ceinturant des résidus dans le monde depuis 1960 ; il est régulièrement mis à jour au fur et à mesure des ruptures d'ouvrages. L'accident majeur le plus récent concerne le stockage de résidus de la mine de fer de Córrego de Feijão de Brumadinho au Brésil (région du Minas Gerais), dont la digue a rompu le 25 janvier 2019, entraînant des rejets de boues sur environ 7 km avant de rejoindre le fleuve Paraopeba, qui entraîna la pollution plus loin encore. 216 personnes furent tuées, 91 personnes portées disparues. Le Tableau 8 ci-dessous extrait du tableau WISE décrit sommairement 36 événements majeurs survenus entre les années 1992 et 2022.

Date	Lieu	Minerai	Type d'incident et impact
20 janvier 2022	Banjhiberana village, district, Odisha, India	Fer	Brèche dans un mur d'un bassin de résidus contenant la boue de minerai de fer générée par l'usine d'enrichissement Au moins 8 à 12 hectares de terres agricoles ont été submergés sous la boue de minerai de fer, deux étangs ont été contaminés ; un agent de sécurité est porté disparu
24 décembre 2021	Ulundi, KwaZulu-Natal, Afrique du Sud	Charbon	Rupture d'une digue à résidus de traitement de charbon 1500 m ³ de résidus contenant des métaux lourds et des composants chimiques tels que du mercure, du manganèse, de l'arsenic, du cuivre et du plomb se sont déversés dans le système des rivières Black Umfolozi et White Umfolozi, traversant les communautés rurales et les réserves fauniques de Hluhluwe-iMfolozi et iSimangaliso, suscitant des inquiétudes quant à la santé des personnes, des animaux et de l'environnement au sens large exposé aux déchets toxiques et acides.
26 novembre 2021	San Antonio de María mine, Ananea, San Antonio de Putina province, Puno, Peru	Or	Rupture d'une digue à résidu après de fortes pluies La vague de résidus a détruit environ 400 mètres de la route nationale qui va au centre-ville de La Rinconada et s'est déversée dans trois zones résidentielles
18 novembre 2021	Village de Yedikardes et de Sebinkarahisar district de Giresun, Turquie	Plomb, zinc, cuivre	Rupture de la digue à stériles n°2 Plus de 4 500 tonnes de résidus se sont déversés dans le barrage n° 1, puis dans le ruisseau Darabul et ont atteint le barrage de Kiliçkaya à 5 km en aval
27 juillet 2021	Catoca mine, Saurimo, Lunda Sul, Angola	Diamant	Une brèche dans le conduit de l'évacuateur de crues a entraîné un déversement massif de résidus. La rivière Lova a été polluée à 100 km en aval ; la pollution de la rivière Tchicapa a rendu l'eau potable impropre à la consommation dans le quartier de Muatova dans la ville de Lucapa
2 juillet 2020	Hpakant, Kachin state, Myanmar	Jade	Rupture d'un terril après de fortes pluies qui s'est effondré dans un lac, déclenchant une vague de boue et d'eau qui a enseveli de nombreux travailleurs ; au moins 126 personnes ont été tuées
1er mai 2020	San José de Los Manzanos, Canelas, Durango, Mexique	Plomb, zinc	Rupture de la digue à stériles ; 6 000 m ³ de résidus se sont déversés sur une route voisine et sur 8 000 m ² de terrain, atteignant le ruisseau San Bernabé après 5 km et la ville du même nom
28 mars 2020	Tieli, Yichun City, Heilongjiang Province, Chine	Molybdène	Rejet d'eau surnageante et de résidus par un tunnel de drainage d'une digue à résidu 2,5 millions de m ³ d'eau et de résidus ont traversé la zone environnante, atteignant la rivière Yijimi après 3 km, menaçant les ressources en eau potable de 68 000 personnes dans la ville de Tieli ; le 4 avril, la pollution atteignait 208 km en aval
1er octobre 2019	Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso, Brésil	Or	Rupture de la digue à stériles ; les résidus se sont écoulés sur 1 à 2 km, perturbant ainsi une ligne électrique
10 juillet 2019	Mine de Cobriza, district de San Pedro de Coris, province de Churcampa, région de Huancavelica, Pérou	Cuivre	Rupture de la digue à stériles ; plus de 67 000 m ³ de résidu ont couvert une superficie de 41 574 m ² et ont atteint la rivière Mantaro
29 mars 2019	Machadinho d'Oeste, Oriente Novo, Rondônia, Brésil	Etain	Rupture d'une digue à stériles inactive après de fortes pluies ; le déversement de résidus a endommagé sept ponts, laissant 100 familles isolées ; aucun décès ni blessé signalé
25 janvier 2019	Brumadinho, Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil	Fer	Rupture de la digue à résidus n°1. 12 millions de m ³ de résidus sont relâchés, détruisant le site minier et rejoignant 7 km en aval le Rio Paraopeba. 216 personnes tuées et 91 personnes portées disparues. La vitesse de la vague a été estimée à 120 km/h.

4 juin 2018	Urique, Chihuahua, Mexico	Or et argent	Une rupture de la digue à résidus entraîne le rejet de 249 000 m ³ de résidus et 190 000 m ³ de matériaux de remblai sur 29 km en aval, le long de la rivière Cañitas. 3 morts, 4 disparus.
9 mars 2028	Cadia, New South Wales, Australie	Or et cuivre	Rupture de la digue à résidus nord de la mine principalement due à la présence d'une couche de fondation de faible densité. 1,33 millions de m ³ de résidus se sont échappés et ont été stoppés par la digue à résidus sud.
12 mars 2017	Tonglvshan Mine, Hubei province, China	Cuivre, or, argent et fer	Rupture partielle de la digue à résidus, créant une brèche d'environ 200 m. Environ 200 000 m ³ de résidus sont rejetés, contaminant un étang à poissons d'environ 27 ha. 2 tués et 1 personne disparue
27 août 2016	Mulberry, Polk County, Florida, USA	Phosphate	Un fontis de 14 m de diamètre est apparu dans un tas de phosphogypse, ouvrant un chemin pour le liquide contaminé vers l'aquifère de Floride qui constitue une ressource majeure en eau potable. 840 000 m ³ de liquide contaminé ont été relâchés.
25 novembre 2015	Samarco, Minas Geiras, Brésil	Fer	Rupture de la digue à stérile de Fundão en forme d'un glissement-coulée par liquéfaction à la suite d'une série d'incidents ayant eu lieu lors du développement de la digue modifiant son design initial. 60 Mt de résidus de résidus s'échappe, détruisant la ville de Bento Rodriges (19 morts) et contaminant la rivière Doce avant d'atteindre la mer.
4 août 2014	Mount Polley mine, near Likely, British Columbia, Canada	Cuivre et or	La rupture de la digue à résidu due à une rupture du sol de fondation a provoqué le déversement de 7,3 millions de m ³ de résidus, 10 millions de m ³ d'eau et de 4,5 millions de m ³ de sable fin dans le lac Polley, avec un écoulement sur le réseau hydrographique local jusqu'à sa confluence avec la rivière Frazer.
1 août 2012	Padcal mine, Itogon, Benguet province, Philippines	Cuivre et or	Apparition d'une brèche dans la digue n°3 durant de fortes pluies. 20,6 millions de tonnes de résidus se sont déversés dans la Balog River
4 octobre 2010	Kolontar, Hongrie	Bauxite	Rupture d'une digue de stockage des boues issues du traitement de la bauxite. 1 million de m ³ contaminent les rivières Torna et Marcal sur presque 100 km, jusqu'au Danube. 10 morts, 286 blessés. 284 maisons détruites. Un millier d'hectares de sol contaminés
29 août 2009	Karamken, région de Magadan, Russia	Or	Rupture de la digue à résidus après 3 jours de fortes pluies. Plus de 1 million m ³ d'eau, 150 000 m ³ de résidus et 55 000 m ³ de matériaux issus de la digue ont généré une coulée boueuse qui a détruit 11 maisons et tué au moins une personne.
8 septembre 2008	Taoshi, Linfen City, Xiangfen county, Shanxi province, China	Fer	Rupture d'un bassin de résidus dans une mine illégale durant de fortes précipitations. Une coulée de boue de plusieurs mètres de haut a coulé sur 2,5 km en aval, enfouissant un marché, plusieurs maisons et un bâtiment de trois étages. 277 personnes sont tuées et 33 blessées.
10 janvier 2007	Mirai, Minas Gerais, Brazil	Bauxite	Rupture d'une digue à résidus après de fortes pluies. 2 millions de m ³ de boues rouges déversés, impactant 4 000 habitants des villes de Mirai et Muriaé.
20 mars 2004	Malvésí, Aude, France	Usine de conversion d'uranium	À la suite de fortes pluies, une digue du bassin B2 se rompt, entraînant l'écoulement de 30 000 m ³ de boues nitrates sur douze hectares.
11 septembre 2002	San Marcelino, Philippines	Cuivre	Débordement de deux bassins à résidus à la suite de pluies intenses. Mille familles évacuées. Les conséquences restent limitées, des moyens de pompes ayant été mis en œuvre pour évacuer l'eau des bassins.
22 juin 2001	Sebastião das Águas Claras, Minas Gerais, Brésil	Fer	Rupture de digue ; transport de résidus sur plus de 6 km ; au moins 2 victimes, et 3 mineurs disparus.

11 octobre 2000	Inez, Martin County, Kentucky, USA	Charbon	Rupture de digue à la suite de l'effondrement d'une mine souterraine sous le parc à résidus ; 950 000 m ³ de résidus rejetés dans les rivières environnantes ; environ 120 km de rivière contaminée, causant la mort de poissons le long du fleuve Big Sandy et de certains de ses affluents ; fermeture des systèmes d'alimentation en eau potable des villes environnantes.
8 septembre 2000	Aitik mine, Gällivare, Suède	Cuivre	Rupture de digue à la suite d'une surcharge des filtres de drainage de la digue ; 1,5 millions de m ³ d'eau contenant des résidus rejetés dans l'environnement.
30 janvier 2000	Baia Mare, Roumanie	Or	Rupture de la crête d'une digue après un débordement causé par de fortes pluies et par la fonte de la neige ; 100 000 m ³ d'eaux contaminées au cyanure déversées dans la nature; contamination de la rivière Somes / Szamos, affluent du fleuve de Tisza; mort de tonnes de poissons; empoisonnement de l'eau potable de plus de 2 millions de personnes en Hongrie.
25 avril 1998	Los Frailes, Aznalcóllar, Espagne	Plomb, zinc, cuivre et argent	Rupture d'une digue suite à une rupture dans l'argile de fondation ; déversement de 5,5 millions de m ³ d'eau acide et riche en métaux et d'environ 1,5 millions de m ³ de résidus, contamination des rives des rivières Los Frailes, Agrio et Guadamar sur plus de 40 km, près de
22 octobre 1997	Pinto Valley, Arizona, USA	Cuivre	Rupture d'une digue ; 230 000 m ³ de résidus déversés sur 16 hectares.
12 novembre 1996	Nazca, Pérou		Rupture d'une digue suite à un séisme ; plus de 300 000 m ³ de résidus déversés dans une rivière.
19 août 1995	Omai, Guyana	Or	Rupture d'une digue suite à l'érosion interne ; 2 millions de m ³ de résidus cyanurés ; 80 km du fleuve Essequibo contaminé.
19 nov. 1994	Mine Hopewell, Hillsborough County, Florida, USA	Phosphate	Rupture d'une digue ; environ 1,9 millions de m ³ d'eau du bassin de décantation d'argile rejetés dans l'environnement et dans le fleuve Alafia ; Keyville inondée.
22 février 1994	Harmony, Merriespruit, Afrique du Sud	Or	Rupture d'une digue après de fortes pluies; 600 000 m ³ de résidus déversés sur 4 km en aval ; 17 personnes tuées; vastes dommages à une banlieue résidentielle.
1 mars 1992	Maritsa Istok 1, Stara Zagora, Bulgarie	Cendre	Rupture d'une digue suite à une inondation de la plage de dépôt ; 500 000 m ³ de résidus déversés.

Tableau 8. Cas de ruptures majeures de digues de stockage de résidus survenus entre les années 1992 et 2022

4.3 Synthèse

Les éléments présentés ci-avant montrent que les accidents survenus dans le monde au niveau des grands ouvrages de retenue de résidus miniers sont principalement liés à des défauts de reconnaissance géologique et géotechnique ou de conception des ouvrages, à une insuffisance de maintenance ou de gestion des niveaux d'eau conduisant à des pressions d'eau trop importantes dans la retenue ou à l'intérieur du corps de la digue suite à des événements extrêmes comme des fortes précipitations ou des séismes.

5 DEMARCHE D'ÉVALUATION DE LA TENUE DES OUVRAGES

Le présent chapitre présente les grands principes retenus permettant d'encadrer l'évaluation des performances des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium.

Pour rappel, le terme « ouvrage » utilisé dans ce rapport désigne l'ouvrage de ceinture en lui-même, ses fondations et les installations annexes (évacuateurs de crues, collecteurs d'eaux, ...) concourant à son bon fonctionnement.

5.1 Démarche d'évaluation

5.1.1 Objectifs généraux

La gestion des risques liés aux stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium vise à protéger l'homme et l'environnement vis-à-vis des risques d'exposition aux substances radioactives et chimiques qu'ils contiennent. L'évaluation de la tenue des ouvrages et des conséquences en cas de rupture est également à proportionner aux enjeux humains et environnementaux de ces sites, y compris sur le long terme.

Le Ministère chargé de l'environnement a élaboré en 2012 une doctrine [13] visant à faire respecter le principe ERC (Eviter, Réduire et Compenser les impacts sur le milieu naturel) dans l'objectif que tout aménagement n'engendre pas d'impact négatif sur son environnement. Toutefois, la situation historique des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium (construits entre 1958 et 1991 selon les règles de l'art et la réglementation de l'époque, cf. chapitre 2) fait qu'il n'est pas possible pour ceux-ci de prendre en compte les séquences relatives à l'évitement et à la compensation. Ainsi, les objectifs de protection à court, moyen et long termes visent avant tout le principe de réduction des impacts. Le GT propose de les décliner suivant les trois axes suivants :

- la limitation de l'exposition du public aux substances chimiques et radioactives contenues dans les résidus ;
- la limitation de l'impact chimique et radiologique de ces substances sur l'environnement ;
- la garantie de la sécurité des personnes et des biens présents dans l'environnement du stockage vis-à-vis des risques de dispersion massive des produits présents dans le stockage.

La démonstration du respect de ces objectifs permet d'assurer que ces stockages ont été dimensionnés de façon suffisante ou d'identifier si des renforcements sont nécessaires. Cette démonstration doit tenir compte de la période radioactive des radionucléides contenus dans les résidus. La durée communément retenue pour les déchets présents dans les installations nucléaires de stockage en surface correspond à 10 fois la période radioactive des radionucléides concernés, temps au bout duquel l'activité initiale a décru d'un facteur 1 000 environ. Le radium ^{226}Ra , radionucléide naturel majoritairement présent au sein des résidus parmi ceux susceptibles d'induire un impact radiologique (c'est donc ce radionucléide qui est pris en compte pour les résidus miniers d'uranium), a une période de 1 600 ans, soit une durée à considérer de 16 000 ans. Cette durée diffère de celle de 300 ans retenue pour les stockages de déchets à vie courte situés à la surface du sol, dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période inférieure ou égale à 31 ans.

La conception ne pouvant pas être garantie sur des périodes de temps aussi longues, la démonstration du respect de ces objectifs devra donc être assurée sur la plus longue durée raisonnablement possible. Cette démonstration doit prendre en compte aussi bien les événements certains ou très probables susceptibles d'affecter le stockage, que les événements moins probables pouvant survenir à court, moyen ou long terme, et en particulier les aléas naturels. Dans la mesure où la sûreté du stockage repose principalement sur des composants ouvrages tels que les ouvrages de ceinture et la couverture des stockages, la démonstration doit être faite que ces composants assurent la fonction pour laquelle ils ont été conçus, quels que soient les types d'événements considérés.

5.1.2 Fonctions des composants ouvrages du stockage

Pour la couverture, les fonctions attendues correspondent aux protections physique (anti-intrusion), mécanique (anti dispersion des produits stockés), hydraulique (limitation de l'infiltration des eaux de pluie vers les résidus dans le cas d'une couverture solide) et radiologique (réduction des flux de rayonnement gamma et d'exhalation du radon à la surface du sol).

³⁸ Le radium-226 est en équilibre avec ses descendants de la chaîne de l'uranium mais ces descendants ont des périodes radioactives inférieures à celle du radium-226.

Pour les ouvrages de ceinture, la fonction considérée est la rétention mécanique des éléments contenus dans le stockage (résidus de traitement miniers, boues des stations de traitement des eaux) et de ceux constitutifs des ouvrages eux-mêmes (stériles miniers, ...). Sont considérés ici les ouvrages de ceinture au sens large, c'est-à-dire incluant les installations annexes (drains, évacuateurs de crues, collecteurs d'eaux, ...) dont la défaillance pourrait concourir à une perte de la fonction globale de l'ouvrage.

Seule l'évaluation de la fonction de rétention mécanique des éléments contenus dans le stockage, assurée par les ouvrages de ceinture, fait l'objet du présent document.

5.1.3 Exigence de comportement des ouvrages de ceinture

Le maintien de la fonction de rétention mécanique des ouvrages ceinturant le stockage requiert que les propriétés de stabilité mécanique de l'ouvrage soient maintenues dans le temps. Par **stabilité mécanique, il faut entendre la capacité d'une structure à supporter des forces instantanées ou sur une longue durée sans connaître de déformation significative qui pourrait conduire à la rupture de la structure**. Cette stabilité dépend du dimensionnement de l'ouvrage mais aussi des propriétés des produits stockés³⁹.

La stabilité mécanique de l'ouvrage est elle-même subordonnée au maintien, d'une part des capacités de drainage des eaux infiltrées, assurées par les organes annexes de l'ouvrage (évacuateurs de crues, collecteurs d'eaux, ...), d'autre part de la limitation de l'infiltration des eaux météoriques du fait de la faible perméabilité de la couverture du stockage.

5.2 Evolution des stockages dans le temps

L'évolution d'un stockage suit une chronologie dépendant de la présence, dans une première phase, d'une **surveillance et d'une maintenance des ouvrages de ceinture et de la couverture qui ne sont garanties que lorsque le stockage se trouve sous une gestion administrative spécifique**, puis dans une seconde phase, de son vieillissement naturel. En effet, sans que l'on puisse a priori prévoir ce phasage de manière détaillée, la surveillance et les servitudes ou restrictions d'usage prendront fin et à terme la mémoire du site s'effacera. Il est donc considéré deux phases principales d'un stockage avec des repères temporels synthétisés sur la Figure 6 :

- pendant la première phase, les ouvrages ceinturant les résidus de traitement assurent pleinement leur fonction de rétention mécanique. Les dispositifs de maîtrise des transferts à l'environnement, comme par exemple les drains, sont considérés comme faisant l'objet de maintenance et sont donc fonctionnels. Cette phase correspond à la phase actuelle de tous les stockages de résidus ;
- pendant la seconde phase, soit après l'arrêt de la maintenance des stockages, en particulier des ouvrages de ceinture, les drains ne sont plus considérés comme fonctionnels. En outre, les mécanismes naturels tels que le développement de la végétation et l'érosion conduisent à une dégradation progressive des ouvrages engendrant une diminution de leur stabilité mécanique. Ceci peut, à terme, découler sur la perte de la fonction de rétention mécanique des ouvrages du fait d'une rupture, qu'elle soit franche ou progressive. Par conservatisme, il est considéré dès le début de cette seconde phase que la tenue des ouvrages n'est plus garantie.

Ainsi qu'indiqué supra, l'exploitant est tenu de démontrer que pendant la première phase, les dispositions en place, **complétées par l'introduction de mesures de renforcement le cas échéant**, permettent d'assurer que l'ouvrage **reste stable en dépit des aléas naturels auxquels il est susceptible d'être soumis**. Toutefois, tout ouvrage dépassant le niveau du sol est également soumis à des processus naturels, généralement de plus faible ampleur et continus dans le temps, tels que l'érosion, les cycles de gel/dégel, le développement racinaire, la présence d'animaux fouisseurs, etc. Pour ces processus, aucune disposition raisonnablement envisageable à la conception ou par le biais de renforcements ne permet de garantir un maintien des fonctions de l'ouvrage sur une durée supérieure à quelques centaines (voire dizaines) d'années de manière passive, c'est-à-dire en l'absence d'entretien. Aussi, pour tenir sur la durée d'intérêt de maîtrise des transferts à l'environnement, les ouvrages doivent faire l'objet d'une **surveillance** et d'une **maintenance** régulière⁴⁰, telles que décrites ci-après. **Les préconisations présentées dans la suite de ce document tiennent donc compte d'une maintenance**

³⁹ Sous certaines conditions physico-chimiques, les résidus pourraient devenir suffisamment compacts pour présenter une cohésion suffisante à leur tenue mécanique, même en cas de dégradation de l'ouvrage de ceinture.

⁴⁰ L'unique moyen de se passer d'une maintenance serait de modifier la configuration même des stockages de résidus afin qu'ils ne nécessitent plus la présence d'ouvrages de ceinture.

minimale⁴¹ des ouvrages. Cette contrainte implique de **reporter la charge d'une poursuite de cette maintenance sur les générations futures.**

La **surveillance** correspond à l'ensemble des actions permettant de détecter tout signe précurseur d'une dégradation de l'ouvrage lui-même ou de l'un de ses composants. Elle inclut en particulier des observations visuelles de l'évolution de l'ouvrage et son auscultation régulière. La surveillance permet notamment de vérifier que les drains ne sont pas colmatés et que le niveau piézométrique présent le cas échéant au sein des résidus stockés demeure sous la limite pour laquelle l'ouvrage est dimensionné. L'auscultation peut inclure, si besoin, des reconnaissances géotechniques (*e.g.* mesures de la résistance au cisaillement et du poids unitaire des résidus, des matériaux constituant le corps du barrage et du sol de fondation). Enfin, les inspections visuelles et mesures de l'évolution topographique de l'ouvrage (déplacements en crête ou sur les pentes) permettent de surveiller l'apparition d'anomalies (fissures, bombements, flexures), annonciatrices d'une potentielle diminution des performances de l'ouvrage.

La **maintenance** d'un ouvrage correspond à l'ensemble des actions permettant de le conserver dans un état tel que ses fonctions demeurent garanties. En cas d'évolution anormale, voire de dégradation de l'ouvrage ou de ses composants, mises en évidence lors des actions de surveillance, une maintenance corrective est effectuée pour rétablir le bon fonctionnement des composants et ainsi restaurer ses propriétés de stabilité. Ces actions de maintenance sont dépendantes de la présence d'une gestion administrative spécifique du stockage ; un contrôle institutionnel passif du site, de type servitudes, ne garantit pas systématiquement qu'une maintenance puisse être réalisée.

La Figure 6 ci-dessous récapitule les principales hypothèses et repères temporels relatifs à l'évolution des stockages de résidus de traitement miniers d'uranium. L'occurrence possible des prochaines glaciations, souvent positionnée au-delà de 10 000 ans, est reportée sur cette figure à titre de mise en perspective des échelles de temps en question.

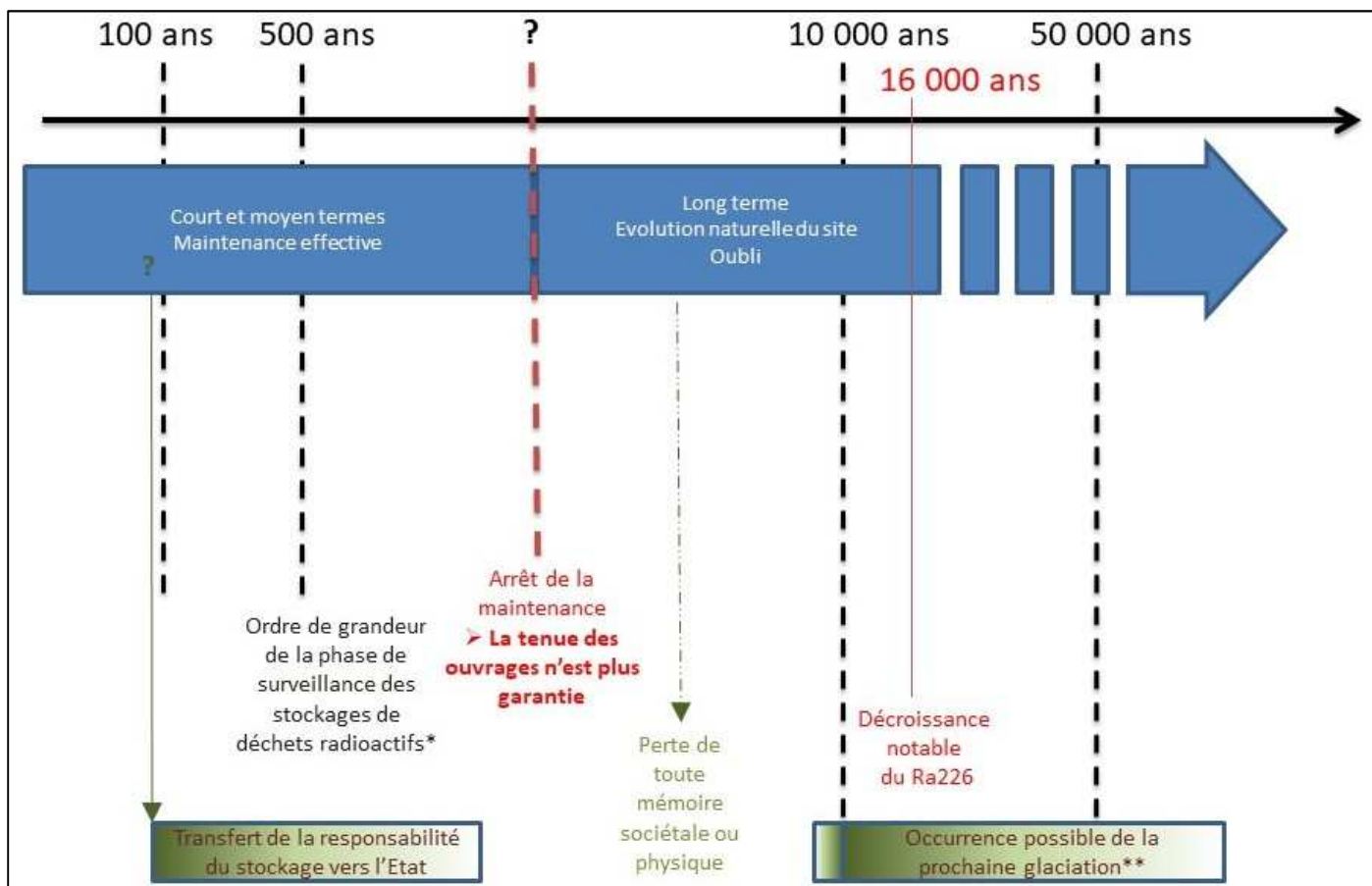


Figure 6. Principales hypothèses et repères temporels de l'évolution des stockages

⁴¹ Même si, dans le principe, des actions de maintenance pourraient rétablir le fonctionnement des dispositifs en cas d'aléa de forte ampleur, la maintenance n'est considérée dans le présent document que dans l'objectif d'éviter la dégradation des ouvrages, pour laquelle aucune disposition en amont ne permet d'obtenir un maintien pérenne de la fonction visée.

** à titre indicatif, pour les stockages de déchets radioactifs relevant des Installations Nucléaires de Base (INB), une surveillance de 300 ans est prévue pour les déchets à vie courte et de 500 ans pour les projets de stockages de déchets à vie longue.*

*** les données acquises au cours des dernières années concernant les effets du réchauffement climatique montrent que la durée de 10 000 ans correspondant à la survenue d'une prochaine glaciation pouvait être remise en cause, avec notamment l'éventualité que des incursions glaciaires surviennent plus tôt.*

5.3 Evaluation de la performance des ouvrages ceinturant les résidus miniers

L'évaluation de la suffisance des dispositions de conception d'un ouvrage de ceinture ou de sa robustesse à un instant donné permet d'apprécier les éventuels besoins de renforcement pour garantir sa stabilité mécanique sur la plus longue durée raisonnablement possible, notamment vis-à-vis des aléas naturels. Il convient de noter que dans le cadre du présent rapport, les éventuels défauts de conception ne sont pas pris en compte faute de connaissance à leur sujet.

5.3.1 Situations d'évolution d'un stockage à prendre en compte

Pour dimensionner et/ou vérifier la performance d'un ouvrage vis-à-vis des aléas naturels, il est nécessaire d'identifier la durée sur laquelle doit porter l'évaluation ainsi que les événements (survenue d'un séisme, d'une inondation, ...) qui pourraient avoir des effets non négligeables sur cet ouvrage. Cette identification s'appuie, pour les aléas naturels, sur une reconstitution des événements comparables survenus dans le passé et sur la sélection, parmi eux, d'événements extrêmes pris comme référence (cf. crue centennale, crue millénaire...). L'évaluation de la suffisance des dispositions de conception d'un ouvrage de ceinture d'un stockage, ou de ses besoins de renforcement, pour permettre de garantir sa stabilité mécanique sur la plus longue durée raisonnablement possible nécessite donc de considérer l'ensemble des situations pouvant impacter sa stabilité.

Aucune disposition raisonnablement envisageable ne permettrait de garantir la tenue mécanique des ouvrages ceinturant les résidus miniers de manière passive sur toute la durée de leur nocivité (pour rappel, durée supérieure à la dizaine de milliers d'années). Aussi, ainsi qu'indiqué au § 5.1.1 supra, l'objectif recherché est une tenue de ces ouvrages sur la durée la plus longue possible. Dans cette optique, une durée de 1 000 ans, communément considérée à l'international⁴², est retenue dans le cadre du présent rapport pour les évaluations à mener. Pour chaque type de situation étudiée, l'ampleur des aléas naturels retenus doit donc être telle que leur survenue pendant les prochains 1 000 ans soit considérée comme non négligeable. Pour la vérification de la tenue des ouvrages, les pouvoirs publics s'appuient par ailleurs sur la notion de période de retour, qui désigne la durée moyenne séparant, en un lieu donné, deux événements de même intensité. La durée de 1 000 ans est ainsi associée, sur la base d'une probabilité de dépassement des événements d'environ 10 %, à une période de retour de 10 000 ans⁴³ dans l'estimation de l'ampleur des aléas naturels à considérer. Cette période de retour correspond à un événement de probabilité de 10^{-4} .

Parmi les événements pouvant impacter la tenue d'un ouvrage, il convient de prendre en compte aussi bien les agressions externes au stockage (aléas naturels), que les agressions internes au stockage (défaillances de l'ouvrage lui-même ou de ses composants annexes, qui peuvent par exemple conduire à une accumulation d'eau dans et en amont de l'ouvrage).

Il convient aussi de distinguer les **situations survenant lorsque l'ouvrage fait l'objet d'une maintenance des situations survenant lorsque l'ouvrage n'est plus maintenu, dans la mesure où** les conséquences des événements peuvent alors être aggravées.

Pour rappel, ainsi qu'indiqué supra, les phénomènes naturels tels que le vent, le gel/dégel, les sécheresses, également susceptibles d'affecter la tenue à moyen ou long terme des ouvrages car constituant des facteurs de vieillissement, sont supposés compensés par la présence d'une maintenance régulière pendant la phase d'administration spécifique du stockage. Aussi, pour l'évaluation de la stabilité mécanique des ouvrages de

⁴² Selon une étude bibliographique* réalisée par Orano, une durée de vie de 1 000 ans est retenue pour ce type d'ouvrages dans plusieurs pays, comme la Suède, le Canada, l'Australie, les Etats-Unis d'Amérique. Le document BREF de 2008 (cf. § 3.4.2) indique également que les ouvrages de retenue de résidus miniers sont en général dimensionnés pour permettre une « tenue à long terme » de 1 000 ou 2 000 ans. La doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium de mai 1999 préconise de retenir une durée de « garantie d'efficacité des dispositifs » de stockage comprise entre 300 ans et 1 000 ans.

* Travaux de Bjelkevick cités dans [36]

⁴³ La valeur de 10 000 ans correspond à une probabilité prise à 10 % (considérée comme acceptable pour les stockages de résidus miniers) que l'événement survienne au cours d'une durée de vie de 1 000 ans envisagée pour les ouvrages de ceinture, selon une loi de Poisson : $P = 1 - e^{-t/T}$. Cette valeur est utilisée dans la Norme Industrielle Mondiale pour la Gestion des Résidus Miniers [62]

ceinture, ne sont étudiés que les phénomènes naturels (précipitations et séismes) d'ampleur extrême ainsi que décliné ci-dessous :

- durant la première phase, dite de « **maintenance effective du stockage** », l'ensemble des ouvrages et leurs annexes remplissent leurs fonctions de façon nominale. En particulier, le drainage des eaux susceptibles de s'accumuler derrière l'ouvrage est considéré comme totalement opérationnel. Le vieillissement de l'ouvrage est de même supposé couvert par les opérations de maintenance. Du point de vue des agressions, à cet « état initial » de l'ouvrage doivent être associées les situations recouvrant les aléas envisageables sur une durée de vie de 1 000 ans ;
- durant la seconde phase, succédant à l'arrêt de la maintenance et donc au cours de laquelle la « **maintenance du stockage est non effective** », l'ensemble des ouvrages et leurs annexes ont perdu leurs fonctions (vieillissement de l'ouvrage, perte de ses dispositifs de drainage). Ce nouvel état du stockage conduit à une situation de piézométrie maximale dans l'ouvrage à laquelle doivent également être associés les effets d'un séisme dans le cadre d'une étude de sensibilité.

Le tableau ci-dessous résume les différentes situations à considérer *a minima* pour évaluer la stabilité des ouvrages ceinturant les résidus (l'ampleur des aléas associés à la pluviométrie est explicitée au § 5.3.3).

Situation	Phase de vie du stockage	Niveau d'eau dans l'ouvrage	Aléas naturels
1	« Maintenance effective »	Normal (drains fonctionnels)	Sans aléa
2		Normal (drains fonctionnels)	Séisme associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)
3		Piézométrie importante (niveau d'eau élevé lié aux infiltrations très importantes)	Pluviométrie exceptionnelle débit de ruissellement, calculé à partir des pluies centennales, majoré d'un facteur 2
4	« Absence de maintenance »	Piézométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Sans aléa
5 (en sensibilité)		Piézométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Séisme associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (séisme de niveau SMS ou paléoséisme)

Tableau 9. Situations à considérer pour évaluer la stabilité des ouvrages ceinturant les résidus

En l'absence de maintenance, l'aléa « pluviométrie exceptionnelle » n'est pas considéré car cette situation conduirait à un niveau de piézométrie couvert par la situation 4 (piézométrie maximale).

De même, les inondations liées à la présence d'un cours d'eau à proximité et les mouvements de terrain extérieurs au stockage (fontis, subsidence, glissements de terrain) peuvent avoir une incidence sur l'intégrité de l'ouvrage et donc sur sa stabilité. Ces situations nécessitent donc d'être évaluées pour chacune des deux phases de vie du stockage. Enfin, il convient de tenir compte des risques liés à la présence de travaux miniers souterrains au droit ou à proximité de l'ouvrage, ceux-ci pouvant eux-aussi affecter sa stabilité.

S'agissant du développement d'activités humaines (*i.e.* scénario de construction d'habitations sur le stockage ou sur les résidus qui auraient pu être répandus suite à la rupture de confinement), il convient de noter que ce type de situations relève de scénarios généralement analysés dans le cadre de l'évaluation de sûreté à long terme des stockages (hors stockage géologique profond), après oubli du site, et ne sont donc pas traités dans le cadre du présent rapport relatif à la tenue des ouvrages ceinturant les résidus miniers.

5.3.2 Prise en compte de l'aléa sismique

Le mouvement sismique engendré sur un ouvrage par un séisme se produisant dans les environs de celui-ci doit tenir compte de toutes les sources de séismes possibles, qu'elles soient associées à la sismicité dite « diffuse », établie au travers d'un zonage sismotectonique, ou aux failles potentiellement actives. Deux types d'approches peuvent être utilisés pour l'évaluation du mouvement sismique de référence, l'aléa sismique à considérer étant propre à chaque site :

- l'approche probabiliste (PSHA : probabilistic seismic hazard analysis) vise à évaluer un mouvement sismique de référence de l'ouvrage correspondant à une certaine période de retour ; une période de retour de 10 000 ans est retenue dans le cadre de la présente étude.
- l'approche déterministe vise à évaluer un mouvement sismique de référence de l'ouvrage correspondant à la prise en compte d'un ou plusieurs séismes de référence. A titre d'exemple, la RFS 2001-01 de l'ASN [15] pour les installations nucléaires de base préconise à cet égard l'utilisation des SMHV (Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables) définis pour des zones sismotectoniques, puis une majoration⁴⁴ de ces séismes pour prendre en compte les incertitudes liées à leur estimation, en définissant un SMS (Séisme Majoré de Sécurité). La RFS 2001-01 complète cette approche par l'utilisation de paléoséismes définis au travers de la taille des failles potentiellement actives de la région.

Aussi,

Pour la prise en compte de l'aléa sismique, le groupe de travail recommande de prendre en compte des mouvements sismiques associés :

- soit à une période de retour de 10 000 ans ;
- soit à un ou des séismes déterministes (de préférence séisme majoré de sécurité ou paléoséismes),

et de justifier le choix de l'approche retenue en termes de données d'entrées et de prise en compte des incertitudes associées.

Il convient par ailleurs, outre l'évaluation de la tenue des ouvrages aux mouvements vibratoires ainsi engendrés, pour les ouvrages des sites de stockages situés en zone de sismicité dites « modérée » à « forte »⁴⁵, d'évaluer la probabilité d'une rupture du sol en surface, au droit de l'ouvrage, qui pourrait être produite par une faille présente dans l'environnement du site. Cet aléa n'est pas couvert par celui associé au zonage sismotectonique et implique d'identifier la présence potentielle de faille capable, via des études spécifiques des failles dans l'environnement très proche du site. En effet, bien que rare, une rupture de surface s'est produite en France lors du séisme du Teil en 2019 sur une faille considérée non active auparavant (Ritz et al, 2020 [63]).

Pour la prise en compte de l'aléa sismique, le groupe de travail recommande d'évaluer, pour les sites de stockages situés en zone de sismicité au moins modérée, la probabilité d'une rupture du sol en surface liée le cas échéant à la réactivation d'une faille présente sur le site.

Un séisme peut également conduire à un aléa liquéfaction ou à un phénomène d'érosion interne. La méthodologie à mettre en œuvre pour mener ces évaluations est détaillée au chapitre 6.

5.3.3 Prise en compte de l'aléa climatique

Parmi les aléas liés au climat, il convient de distinguer ceux qui concourent à un vieillissement de l'ouvrage à moyen ou à long terme de ceux qui peuvent engendrer une perte subite de ses fonctions.

Ainsi qu'indiqué supra, les événements climatiques tels que les précipitations, l'enneigement, le vent, l'alternance de périodes de gel/dégel et les sécheresses, contribuent au vieillissement des ouvrages. Les effets liés à de tels événements courants (d'une ampleur attendue sur quelques centaines d'années) sont, dans le cadre du présent rapport, considérés comme couverts par la maintenance de l'ouvrage et ne peuvent donc pas conduire à une perte de ses fonctions pendant sa première phase de vie. Au-delà, l'effet du vieillissement n'étant plus compensé par des actions de maintenance, il concourt à accélérer la perte de fonction de l'ouvrage et doit être pris en compte dans l'appréciation des résultats des évaluations.

S'agissant des aléas climatiques pouvant entraîner une perte subite des fonctions de l'ouvrage, deux situations sont à considérer, en lien avec une pluviométrie exceptionnelle.

⁴⁴ Augmentation de 0,5 en magnitude et de 1 en intensité.

⁴⁵ D'après le décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique et le décret 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français.

1) Niveau d'eau élevé dans l'ouvrage et dans le stockage

Une augmentation de la piézométrie entraîne une poussée hydraulique supplémentaire sur l'ouvrage. Elle peut également conduire à l'établissement de gradients hydrauliques favorisant l'érosion interne.

S'agissant du niveau piézométrique, une infiltration importante depuis la surface du sol ne pourrait conduire à un niveau d'eau maximal dans l'ouvrage (induisant une pression maximale sur l'ouvrage) qu'en cas de défaillance ou de saturation des réseaux de drainage des eaux présents au sein de cet ouvrage. Aussi, pendant la phase de maintenance effective du stockage, il convient de retenir une situation correspondant à un niveau d'eau « élevé », qui sera justifié par l'exploitant sur la base du niveau le plus élevé susceptible d'être atteint en fonction du contexte hydrogéologique de chaque site et des dispositifs de surveillance et d'alerte présents.

Pour la prise en compte de l'aléa climatique, le GT recommande que :

- pour l'évaluation relative à la phase de maintenance effective du stockage, l'exploitant retienne le niveau d'eau le plus élevé susceptible d'être atteint dans l'ouvrage compte tenu des capacités d'évacuation de ses dispositifs de drainage et des dispositifs d'alerte relatifs aux niveaux d'eau ;
- pour l'évaluation relative à la phase d'absence de maintenance, l'exploitant retienne le niveau piézométrique maximal dans l'ouvrage et au sein des résidus stockés.

S'agissant de l'établissement de gradients hydrauliques au sein de l'ouvrage, ceux-ci pourraient conduire à des circulations d'eau susceptibles d'entraîner des matériaux et ainsi créer des vides. Ainsi qu'indiqué *supra*, la méthodologie à mettre en œuvre pour évaluer ce phénomène d'érosion interne est détaillée au chapitre 6.

2) Ruissellement important en surface entraînant un risque d'érosion externe massive de l'ouvrage

Un ruissellement important peut conduire à une érosion massive de la surface de l'ouvrage (en particulier en cas de surverse d'une lame d'eau et/ou d'affouillements en pied des talus).

S'agissant de l'estimation du débit de ruissellement consécutif à une pluviométrie exceptionnelle, et devant la complexité des études pour la reconstitution des pluies historiques nécessaires pour définir des pluies de périodes de retour élevées, des approches plus opérationnelles peuvent être adoptées, par exemple en prenant comme référence un scénario de pluie centennale majoré. A titre de comparaison, l'ASN dans son guide n°13 relatif à la protection des INB contre les inondations externes [11], définit les situations à prendre en compte pour évaluer le risque d'inondation pour un site considéré et propose une méthode pour les quantifier. Ainsi, pour les INB et afin d'évaluer les conséquences d'une crue sur un bassin versant, l'ASN considère une période de retour de 10 000 ans (probabilité de 10^{-4} /an) et définit un débit maximal instantané, de préférence calculé par modélisation pluie/débit moyen adapté au temps de concentration du bassin. De plus, l'ASN précise que :

- pour les petits bassins versants, de superficie comprise entre 10 et 100 km², il est admis que le débit soit calculé à partir des pluies centennales et majoré d'un facteur 2 ;
- pour les très petits bassins versants (< 10 km²), il est nécessaire de vérifier l'existence d'une marge significative des dispositifs de protection des INB vis-à-vis de ruissellements plus importants que ceux issus de pluies centennales, et d'examiner les risques d'embâcles susceptibles d'aggraver la situation.

Pour rappel, ainsi qu'indiqué au chapitre 2 du présent rapport, les bassins versants des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium présentent tous une superficie inférieure à 10 km² (en dehors du site des Bois Noirs, soumis à la réglementation sur les grands barrages et qui fait l'objet d'une évaluation spécifique du fait de ce classement).

Aussi, sur la base des recommandations du guide n°13 de l'ASN et afin de tenir compte du fait que certains scénarios de pluies préconisés dans ce guide ne s'appliquent pas aux sites de stockages de résidus de minerais d'uranium compte tenu de l'absence de réseaux d'évacuation des eaux pluviales⁴⁶,

Le groupe de travail recommande, pour l'évaluation du risque d'érosion externe de l'ouvrage, de considérer un scénario de ruissellement résultant d'une pluie centennale sur le bassin versant situé en amont de l'ouvrage, en majorant le débit issu de cette pluie d'un facteur 2.

Par ailleurs, au vu de l'évolution en cours de l'état de l'art concernant l'impact du changement climatique sur les pluies et débits extrêmes,

Le groupe de travail recommande que soit menée une veille scientifique afin de vérifier périodiquement que les pluies centennales et débits considérés pour évaluer les risques d'érosion de l'ouvrage ne sont pas remis en cause par les effets du changement climatique.

⁴⁶ Le guide n°13 de l'ASN considère deux scénarii de pluies centennales en lien avec le comportement du réseau pluvial (avec évacuation ou en considérant le réseau bouché), en vérifiant l'existence de marges significatives pour les bassins versants amonts.

L'exploitant pourra à cet égard tenir compte des réflexions en cours au moment de la rédaction de ce rapport issues du groupe de travail « Changements climatiques », mandaté par le Comité d'orientation des recherches de l'IRSN⁴⁷.

5.3.4 Critère de vérification de la performance des ouvrages

L'analyse de stabilité des ouvrages permet de vérifier leur résistance au glissement. Ce déplacement se produit en un lieu si de nombreux facteurs d'instabilités (facteurs permanents et variables) peuvent être réunis pour générer des mécanismes de rupture. Ainsi en suivant les normes, il est possible de déterminer un facteur de sécurité (F_s) en fonction des conditions applicables sur l'ouvrage et à partir des données géotechniques de l'ouvrage et des terrains de fondation. Ce facteur correspond au rapport des forces qui tendent à retenir un certain volume, délimité par la surface topographique de l'ouvrage et une surface de rupture potentielle, sur celles qui tendent à l'entraîner vers l'aval. De manière classique, dans les études de stabilité des pentes, on considère que, pour la surface de rupture potentielle la plus critique, si $F_s >$ valeur seuil définie au-dessus de 1 (cf. § 6.3.1), le milieu est en équilibre et le massif est stable. Sinon, la stabilité n'est pas assurée.

Ainsi, et d'une manière générale, les résultats des calculs de stabilité des ouvrages associés aux différentes situations considérées doivent être mis en regard, d'une part de la stabilité du talus aval des ouvrages ceinturant les résidus miniers d'uranium, définie par la valeur du facteur de sécurité (F_s) obtenue à l'issue des calculs, d'autre part des risques d'érosion de l'ouvrage. Les évaluations portent ainsi :

- en cas de **pluviométrie exceptionnelle**, sur la stabilité statique au glissement du talus au sein duquel le niveau d'eau est élevé ou maximal ainsi que sur les risques d'érosion interne et externe.
- en cas de **séisme**, sur la stabilité au glissement du talus aval incluant les risques de liquéfaction des matériaux constituant l'ouvrage et le sol support, les éventuels effets de site et la stabilité post-sismique sans et avec réplique sismique.

La méthodologie à mettre en œuvre pour mener ces évaluations est détaillée au chapitre 6.

5.4 Evaluation des conséquences en cas de rupture de l'ouvrage

En lien avec le retour d'expérience précisé au chapitre 4, la défaillance d'un ouvrage de ceinture pourrait conduire à une perte franche ou progressive des capacités de rétention mécanique des produits présents à l'intérieur d'un stockage. Il en résulterait potentiellement un déversement de ces produits dans l'environnement du site avec comme conséquences potentielles :

- une exposition du public aux produits chimiques et radioactifs contenus dans les résidus ;
- une pollution chimique et radiologique de l'environnement ;
- un risque pour la sécurité des personnes et des biens présents dans l'environnement du stockage (*e.g.* effondrement de la digue).

Dans le cas où la stabilité à long terme d'un ouvrage n'apparaît pas garantie à l'issue de l'évaluation préconisée au § 5.3, l'exploitant peut tout d'abord proposer des renforcements de l'ouvrage via la mise en place de dispositions constructives simples, dont la mise en œuvre conduirait à assurer la stabilité de l'ouvrage ou au moins à prolonger sa durée de vie de manière passive.

Si les dispositions nécessaires pour assurer la stabilité de l'ouvrage s'avèrent complexes, il convient d'évaluer, dans un premier temps, les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage, en termes d'écoulement de matériaux hors du stockage, afin de déterminer si cet écoulement peut avoir un impact sur la sécurité des personnes ou sur l'environnement proche (par exemple si des cours d'eau à l'aval du site seraient atteints par les résidus). L'emprise des résidus déversés hors du stockage devra être estimée en fonction de différents paramètres tels que le volume stocké, la rhéologie des matériaux et la topographie du site.

Le groupe de travail recommande que lorsque les résultats des évaluations de stabilité des ouvrages montrent que leur tenue aux aléas sismiques et climatiques (cf. § 5.3) n'est pas garantie, notamment avec des valeurs de facteurs de sécurité insuffisantes (cf. chapitre 6), les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage soient présentées en termes d'étendue de l'épandage des matériaux hors du stockage.

⁴⁷ Ce groupe de travail vise à investiguer les implications des changements climatiques pour l'orientation des recherches conduites à l'IRSN en sûreté nucléaire et en radioprotection. Ses conclusions sont attendues fin 2022.

Le groupe de travail recommande dans un second temps, sur la base des résultats de ces évaluations (cf. recommandation ci-avant), d'évaluer les conséquences sanitaires et environnementales liées à cet épandage de matériaux, à la mise à nu des résidus et/ou à une contamination des cours d'eau et transferts de pollution qui pourraient en résulter, selon les scénarios d'évolution du stockage envisageables sur toute la durée de nocivité des résidus.

Une telle étude contribuerait *in fine* à la prise de décisions concernant les besoins de renforcement des différents stockages⁴⁸, ou à la limitation de leurs conséquences, qui ne relèvent pas du présent rapport.

Les conséquences d'une perte de la fonction de rétention mécanique des résidus par les stockages pourraient être étudiées à travers les études de dangers des stockages lorsque celles-ci sont prescrites. Cependant, et à l'exception du stockage des Bois-Noirs, également soumis à la réglementation sur les grands barrages, les stockages soumis à la rubrique 1735 de la nomenclature des ICPE ne disposent pas systématiquement d'une telle étude dans la mesure où ces stockages bénéficient de l'antériorité prévue à l'article L. 513-1 du code de l'environnement (cf. § 3.2.1). Toutefois, l'établissement ou la réactualisation de l'étude de dangers peut être prescrite par le préfet au regard de l'article L. 181-14 du code de l'environnement. En revanche, l'article 3 de l'arrêté du 23 juin 2015 (relatif aux installations mettant en œuvre des substances radioactives, déchets radioactifs ou résidus solides de minerais d'uranium, de thorium ou de radium soumises à autorisation au titre de la rubrique 1716, de la rubrique 1735 et de la rubrique 2797 de la nomenclature des ICPE) impose la mise à jour de l'étude d'impact du stockage soumis à la rubrique 1735, cette mise à jour étant réalisée tous les 15 ans.

Si les hypothèses et conditions choisies pour l'évaluation des conséquences liées à la perte de la fonction de rétention mécanique de l'ouvrage évoluaient significativement, la résistance des ouvrages aux aléas nécessiterait également d'être réévaluée.

Par similitude avec les mises à jour régulières de l'étude d'impact, le groupe de travail considère que la résistance des ouvrages aux aléas nécessiterait une réévaluation régulière.

Enfin, pour l'évaluation du risque de pollution de l'environnement, il pourra être utile de se reporter au « Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages » [12], rédigé par un Groupe Pluraliste et Pluridisciplinaire constitué de l'ASN, l'IRSN, des exploitants, des bureaux d'études et de membres de la société civile et paru en 2022.

5.5 Synthèse des éléments relatifs à la démarche d'évaluation

Sachant qu'aucune disposition constructive à la conception de ces stockages ou via des renforcements ne permet de garantir une tenue mécanique des ouvrages de ceinture supérieure à quelques centaines d'années en l'absence d'entretien, **le GT considère que les ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium doivent faire l'objet d'une surveillance et d'une maintenance régulière le plus longtemps possible.** Cette contrainte implique de reporter la continuité de cette charge sur les générations futures. Afin de s'assurer du maintien dans le temps de la surveillance et de la maintenance, il est indispensable que la mémoire du stockage puisse perdurer aussi longtemps que possible.

Sous réserve de ces principes, les conséquences associées à une rupture d'ouvrage en termes d'étendue de l'épandage des matériaux hors du stockage devraient être présentées lorsque les résultats des évaluations de stabilité de l'ouvrage montrent que sa tenue aux aléas définis au chapitre 5.3.2 ne peut pas être garantie.

Etant donné les durées en jeu, **la résistance des ouvrages aux aléas nécessiterait une réévaluation régulière** afin notamment d'intégrer les résultats issus de la surveillance et des actions de maintenance le cas échéant, du retour d'expérience acquis à l'international relatif aux défaillances des grands ouvrages ainsi que les nouvelles connaissances relatives à l'évolution des résidus, des actions de l'homme et du climat et des évolutions des connaissances scientifiques et techniques d'une manière générale.

Ces réévaluations régulières pourraient également comporter le cas échéant une réévaluation des conséquences en cas de perte de la fonction de confinement d'un ouvrage de ceinture, en intégrant les évolutions des enjeux observables ou raisonnablement envisageables dans les décennies à venir dans l'environnement du site. Ainsi, des stockages, pour lesquels l'évaluation des conséquences en cas de rupture n'est pas préconisée initialement

⁴⁸ Ces décisions relèvent d'une évaluation plus large, menée dans le cadre d'une analyse multicritères comprenant l'ensemble des stockages de résidus miniers d'uranium et tenant compte, entre autres, des enjeux présents autour des sites, des conditions technico-économiques prévalant au moment des évaluations, des facteurs sociétaux *etc.*

faute d'enjeux, pourraient être amenés à faire l'objet de telles évaluations si de nouveaux enjeux apparaissaient ou si l'importance des enjeux évoluait entre deux réévaluations.

6 METHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA TENUE DES OUVRAGES

Ce chapitre présente un récapitulatif des méthodes pouvant être utilisées pour évaluer la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers. Ces méthodes reflètent, d'une manière générale, les pratiques couramment utilisées au moment de la rédaction de ce rapport et sont donc fournies à titre indicatif. D'autres méthodes, notamment celles qui seraient actualisées postérieurement à la publication de ce rapport le cas échéant, peuvent être suivies par l'exploitant.

L'évaluation de la tenue des ouvrages de ceinture nécessite le développement d'un modèle géotechnique (cf. § 6.1) visant à vérifier leur stabilité sous différentes sollicitations (cf. 6.3). Cette modélisation nécessite l'acquisition ou la sélection des données (cf. § 6.2) relatives aux caractéristiques des matériaux concernés et à la piézométrie de l'ouvrage.

6.1 *Construction du modèle géotechnique*

L'objectif du modèle géotechnique est de disposer d'une représentation réaliste de la géométrie de l'ouvrage, de la distribution des matériaux dans l'ouvrage et de la géologie du terrain de fondation de l'ouvrage, fondée sur les valeurs des paramètres géotechniques de l'ensemble de ces matériaux. Le plus fréquemment, cette représentation consiste en la sélection des sections transversales les plus pénalisantes de l'ouvrage.

Ainsi, s'agissant d'ouvrages existants, le choix de la ou des sections est décidé à partir de l'étude des plans de récolement lorsqu'ils existent, des mesures d'auscultation, des observations de la reconnaissance visuelle et des autres reconnaissances menées. Le nombre de sections doit dépendre de la complexité de l'ouvrage et des changements de géométrie, de géologie ou de piézométrie le long de l'ouvrage. Des sections spécifiques doivent être étudiées aux endroits où des désordres ou comportements singuliers ont pu être observés.

L'expérience acquise sur les ouvrages les plus anciens montre qu'il existe souvent des écarts entre les plans et la réalité, suite à :

- des erreurs ;
- des changements de référentiel géodésique ;
- des manques de récolement ;
- des tassements d'ouvrages.

Aussi, l'élaboration d'un modèle représentatif de l'état actuel de l'ouvrage nécessite de recourir à des visites in situ et si nécessaire à des relevés topographiques complémentaires.

6.2 *Données d'entrée*

6.2.1 **Caractérisation des matériaux constitutifs de l'ouvrage de ceinture, du sol de la fondation et des résidus stockés**

Pour mener à bien la justification de la stabilité des ouvrages, il convient de déterminer les caractéristiques géotechniques et mécaniques des matériaux en présence, que ce soient ceux de l'ouvrage, de sa fondation ou des produits qu'il retient.

Le modèle géotechnique à utiliser doit définir un cadre de représentation des propriétés géotechniques de l'ouvrage et de ses fondations, de manière à évaluer son comportement et sa stabilité vis-à-vis des différents critères définis au § 6.3, et ceci de manière conservative.

Les informations essentielles de l'ouvrage et de ses fondations à déterminer sont les suivantes :

- nature des matériaux (minéralogie, granulométrie et texture) ;
- pour les matériaux de type sol, distribution granulométrique, poids volumique des grains γ_s , poids volumique sec γ_d , poids volumique humide γ_h et teneur en eau w ;
- pour les matériaux rocheux : poids volumique humide γ_h , résistance à la compression simple ;
- résistance au cisaillement (cohésion c' , angle de frottement φ') ;
- perméabilité.

Si des tassements sont susceptibles de se produire, il peut aussi être nécessaire de mesurer les paramètres de compressibilité du remblai et des terrains de fondation. Pour les résidus du stockage, il faut déterminer leurs propriétés mécaniques ainsi que leur évolution dans le temps.

Ces déterminations nécessitent des reconnaissances (géotechniques, géophysiques, etc.) et des essais in situ et/ou en laboratoire et doivent éventuellement tenir compte des données connues du fait de la surveillance des

ouvrages existants. En particulier, les reconnaissances effectuées doivent s'attacher à déterminer si une (ou des) couche(s) de sol sensible(s) aux surpressions d'eau (liquéfiable en particulier) est (sont) présente(s) également en fondation. Le cas échéant, les paramètres de sensibilité à la liquéfaction seront à déterminer. Le choix des valeurs caractéristiques retenues est à justifier de manière prudente en fonction des données disponibles (cf. [21]).

La stabilité mécanique et chimique des matériaux réputés réactifs doit être étudiée. Elle a en effet des répercussions sur l'intégrité physique des stockages sur le très long terme avec l'apparition d'un grand nombre de transformations. Ces dernières engagent des processus variés comme par exemple : la compaction, l'hydratation/déshydratation, la dissolution/solubilisation, la cimentation/précipitation, l'épigénisation, qui à leur tour peuvent générer des modifications des paramètres physiques des matériaux (porosité, teneurs en eau et en sels solubles, gonflement, etc). Il convient en outre de tenir compte de l'évolution des caractéristiques biologiques des matériaux dans le temps, celles-ci étant également susceptibles de remettre en cause leurs caractéristiques mécaniques préalablement définies.

6.2.2 Données piézométriques

La stabilité d'un ouvrage en remblai est très influencée par la piézométrie en son sein. Une évaluation de la situation piézométrique courante est nécessaire, après mise en place de dispositifs de mesure. La donnée d'entrée piézométrique doit être choisie en cohérence avec la situation envisagée (cf. § 5.3.1). La Figure 7 illustre à cet égard différentes hypothèses possibles de saturation de la digue.

À défaut de données fiables, la piézométrie courante devra être considérée de manière conservative.

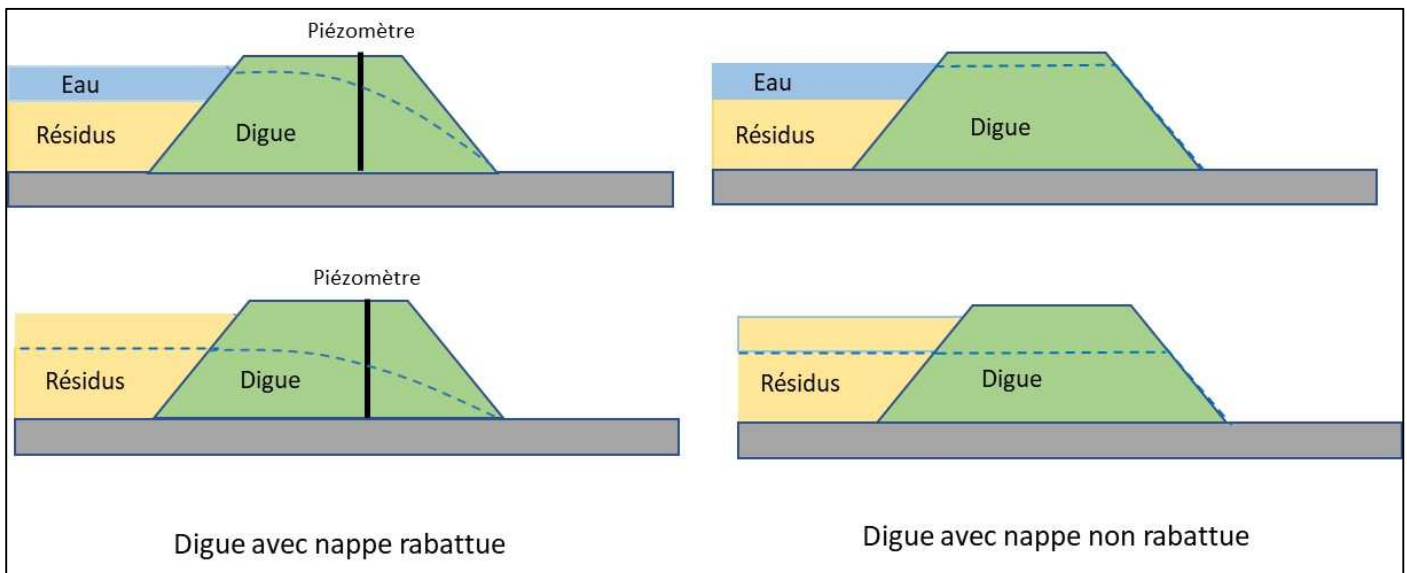


Figure 7. Illustration d'hypothèses de saturation de la digue (en pointillé bleu : le niveau d'eau)

Compte tenu des durées en jeu ainsi qu'indiqué au § 5.3.1, le cas où la piézométrie n'est plus maîtrisée par les dispositifs en place (drainage, couverture...) doit également être examiné pour refléter le comportement de l'ouvrage pendant sa seconde phase de vie.

6.3 Méthodes et critères pour la justification de la tenue des ouvrages

6.3.1 Stabilité statique au glissement

Il existe **deux méthodes pour définir les facteurs de sécurité à retenir pour les calculs de stabilité.**

- La première méthode consiste à utiliser les paramètres retenus pour le dimensionnement en vue d'obtenir un facteur de sécurité global.

Les facteurs de sécurité (FS) à obtenir sont classiquement :

- FS = 1,5 pour une situation courante ;
- FS = 1,3 pour une situation exceptionnelle (phase chantier ou défaillance du système de drainage par exemple) ;
- FS = 1,1 pour une situation extrême (régime hydraulique critique).

- La deuxième méthode consiste à combiner la méthode décrite ci-dessus et une méthode prenant en compte des coefficients de sécurité partiels en se donnant comme **objectif de vérifier un facteur de sécurité minimum ou coefficient de modèle défini dans le tableau ci-dessous** (valeurs en lien avec les recommandations du CFBR [21]).

Situation	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \phi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
Situation normale/courante	1,25	1	1,2
Situation de défaillance de contrôle des écoulements internes (piézométrie importante) et de pluviométrie exceptionnelle ⁴⁹ (équivalente à la situation 3 du Tableau 9)	1,1	1	1,2
Situation de piézométrie maximale ⁵⁰ (équivalente aux situations 4 et 5 du Tableau 9)	1	1	1,1

Les deux méthodes évoquées ci-dessus sont valables mais les valeurs numériques ci-avant ont été définies pour une durée de vie d'ouvrage de 100 ans et non pas pour des durées au-delà de 1 000 ans comme les ouvrages visés dans le présent rapport.

6.3.2 Stabilité sous sollicitation sismique

Evaluation du mouvement sismique

Le mouvement sismique engendré sur un ouvrage par un séisme survenant à proximité du site peut causer diverses défaillances sur l'ouvrage :

- une fatigue et un vieillissement mécanique et rhéologique prématuré de l'ouvrage par la répétition de mouvements successifs, qu'ils soient ponctuels (séisme ponctuel, séisme accompagné de répliques) ou espacés dans le temps sur toute sa durée de vie (succession de séismes historiques à diverses époques) ;
- en cas de mouvement fort et long, une déformation suffisante pour atteindre la rupture de l'ouvrage ou de ses équipements annexes de sécurité (drains, contreforts) ;
- le recouvrement, en cas de glissement de terrain amont induit par le séisme, augmentant le volume des produits retenus et donc les contraintes sur l'ouvrage ;
- une déstabilisation partielle ou totale de l'ouvrage ou de ses équipements annexes passifs de sécurité lié à la vibration, la rupture ou la liquéfaction des fondations et entraînant la libération en aval des produits retenus avec une propagation sous forme de glissement ou de coulée, si le drainage n'est plus effectif.

Ainsi qu'indiqué au § 5.3.2, deux types d'approches peuvent être utilisées pour l'évaluation du mouvement sismique de référence à prendre en compte pour la stabilité d'un ouvrage, à savoir (i) une approche déterministe prenant en compte un ou des séismes déterministes (séisme majoré de sécurité ou paléoséismes), ou (ii) une approche probabiliste (PSHA) en considérant un séisme de période de retour de 10 000 ans. Dans cette seconde approche, il est possible d'évaluer l'incertitude liée aux données d'entrée et aux modèles (incertitude épistémique). A cet égard, l'aléa est défini, pour une période de retour donnée, par une distribution caractérisée par une moyenne, une médiane et des fractiles. Le niveau d'aléa pris en compte devra donc spécifier non seulement la période de retour mais également le fractile associé (cf. [9][60]).

Les ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers étant soumis par arrêté ministériel à la réglementation fixant les règles parasismiques applicables à certaines ICPE, l'aléa sismique retenu pour ces ouvrages devra en tout état de cause correspondre à un niveau au moins aussi élevé que celui de cet arrêté.

Le mouvement sismique doit être pris en compte dans le sens horizontal et transversal. En outre, si la géologie et la topographie du site le justifie, la prise en compte des effets de site⁵¹ se fera avec des méthodes classiques

⁴⁹ Cette situation équivaudrait à la « situation exceptionnelle de crue (PHE) » mentionnée dans les recommandations du CFBR [21].

⁵⁰ Cette situation équivaudrait à la « situation extrême de crue » mentionnée dans les recommandations du CFBR [21].

⁵¹ Modification locale du signal sismique due à la géologie et/ou à la topographie du site.

(simulation de sismogrammes, modélisation de la réponse vibratoire en surface du sol) en utilisant les données d'entrée (§ 6.1 ci-dessus) et des logiciels reconnus par la communauté scientifique.

Critères de justification de la tenue des ouvrages au mouvement sismique

L'analyse de la stabilité d'un ouvrage de ceinture sous sollicitation dynamique repose sur le même type de calcul que l'analyse statique, en tenant compte des forces d'inertie générées par la sollicitation sismique. On parle d'analyse pseudo-statique de la stabilité de l'ouvrage, qui constitue une première approche a priori conservative pour évaluer la stabilité de l'ouvrage sous séisme. À noter que ce type d'approche n'est envisageable que pour des ouvrages hors contexte de liquéfaction (ouvrages non constitués de matériaux liquéfiables ou dont la fondation n'est pas estimée liquéfiable) et hors contexte d'augmentation des pressions interstitielles sous chargement dynamique.

Dans ce cas, les coefficients à utiliser sont les suivants :

Situation	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \phi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
Séisme	1	1	1,1

L'analyse du comportement sismique de l'ouvrage doit être complétée par une étude de sensibilité sur le niveau d'aléa retenu, cela dans l'objectif notamment de vérifier qu'en fonction du choix de ces paramètres, il n'apparaîtrait pas d'effet « seuil » qui remettrait en question sa stabilité.

Si l'analyse pseudo-statique conclut à l'absence de stabilité de l'ouvrage ou à l'apparition d'un effet « seuil » proche des paramètres préconisés, une analyse temporelle (accélérogrammes) peut être envisagée pour la justification, avec prise en compte d'autres indicateurs liés aux phénomènes sismiques (durée de la sollicitation sismique, contenu fréquentiel, amplitude du mouvement, accélérogramme, spectre de réponse de l'ouvrage, ...).

Le guide méthodologique « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » d'octobre 2014 [9], tout particulièrement le paragraphe 6.2, fournit des éléments utiles sur les différentes méthodes d'évaluation de la stabilité des ouvrages aux séismes.

Enfin, en cas de survenue d'un séisme ayant affecté un ouvrage de ceinture, une étude de stabilité devra être réalisée en situation post-sismique afin de vérifier que les éventuelles dégradations de matériaux ou modifications des conditions hydrauliques dans l'ouvrage ne remettent pas en cause sa stabilité statique.

6.3.3 Evaluation du risque de rupture de sol en surface en cas de séisme

L'impact d'une rupture de sol en surface au Quaternaire, induite par la réactivation d'une faille présente au droit de l'ouvrage, pourrait avoir pour conséquence la rupture ou une déstabilisation partielle ou totale de l'ouvrage et/ou de ses équipements annexes de sécurité.

Cet impact devra être étudié pour les ouvrages situés en zones de sismicité a minima modérée lorsque la probabilité d'une telle rupture apparaît non négligeable ($> 10^{-6}/\text{an}$). Pour les sites concernés, des études spécifiques pourront ainsi être nécessaires de façon à évaluer, à partir de lois empiriques issues de la littérature, les potentiels rejets verticaux et horizontaux des ruptures en surface et ainsi déterminer les déplacements permanents susceptibles d'affecter la stabilité de l'ouvrage. Pour la probabilité de rupture, des déplacements de l'ordre de 10 cm sont généralement estimés "négligeables" quand ils sont à fréquence de 10^{-6} par an (cf. études de Krsko en Slovénie et de Diablo Canyon en Californie [14]).

Le TecDoc n°1987 de 2021 de l'AIEA [14] présente une méthodologie pouvant être suivie pour effectuer ce type d'évaluation. Gurpinar *et al* (2017) [61] proposent également une procédure en plusieurs étapes pour y parvenir.

6.3.4 Evaluation du risque de liquéfaction

La liquéfaction correspond à une perte totale de la résistance au cisaillement due à l'augmentation, durant le mouvement sismique, de la pression d'eau interstitielle dans les sols saturés.

Une analyse du risque de liquéfaction doit être effectuée systématiquement pour détecter si le sol de fondation comprend des couches étendues ou des lentilles épaisses de sable fin et lâche, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe phréatique ou si ce niveau est proche de la surface du sol. Cette analyse doit également être effectuée pour les matériaux de l'ouvrage de ceinture.

L'évaluation du potentiel de liquéfaction sera effectuée à partir des données d'entrée (§ 6.1 ci-dessus). Elle nécessite, plus particulièrement et pour chaque ouvrage étudié, la connaissance des données suivantes pour ses matériaux de constitution et son sol de fondation (approche qualitative) :

- une analyse granulométrique : en particulier les sables fins saturés à granulométrie uniforme ($0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,5 \text{ mm}$ et coefficient d'uniformité $C_u = D_{60} / D_{10} < 15$) et dans un état de faible densité, sont susceptibles de se liquéfier. Il est à noter que d'autres sols à granulométrie moins sensible peuvent se liquéfier selon le contexte géologique (interstratifiés par exemple) et hydraulique (favorables aux surpressions avec par exemple la présence de couches imperméables encadrant une couche potentiellement liquéfiable) ;
- des essais au pénétromètre statique (CPT, CPTu) ou dynamique (SPT) qui permettent d'estimer la résistance des sols et leur densité relative par corrélation. À défaut d'essais pénétrométriques, mais de façon non privilégiée, des corrélations avec des essais pressiométriques, ou avec des essais géophysiques en forage (cross-hole, down et up-holes) peuvent être envisagées. Ces corrélations peuvent conduire à des erreurs d'interprétation selon les contextes géologiques.

Dans le cas où le risque est identifié, cette approche qualitative peut être complétée d'une évaluation quantitative du risque de liquéfaction, proposée par Seed et Idriss [64], compatible avec l'EN1998-5 [16], consistant en :

- une évaluation de la contrainte de cisaillement sismique et du CSR (Cyclic Stress Ratio ou contrainte de cisaillement cyclique normalisée) ;
- une évaluation du CRR (Cyclic Resistance Ratio ou résistance cyclique de cisaillement normalisée), nécessitant la connaissance de la résistance du sol mesurée au travers d'un essai SPT (nombre de coups SPT) ou d'un essai CPT ou CPTu.
- un calcul du coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction à une profondeur donnée défini par :

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

L'EN1998-5 préconise l'adoption d'un coefficient de sécurité égal à 1,25 pour cette méthode.

L'évaluation du risque de liquéfaction sera effectuée à partir de modèles et méthodes éprouvées de la littérature. Les guides méthodologiques « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » d'octobre 2014 de la DGPR [9] et « Évaluation du risque de liquéfaction des sols sous l'effet des séismes - Connaissances pratiques et applications aux projets géotechniques de décembre 2020 [10] présentent d'autres approches pour l'analyse du risque de liquéfaction. Les recommandations du CFBR [21] peuvent également être utilisées à ce sujet.

L'EN1998-5 n'est cependant pas applicable aux ouvrages non définis comme « à risque normal »⁵². Dans ce cas, des coefficients correctifs supplémentaires doivent être pris selon l'approche présentée dans le Cahier technique 45 de l'AFPS [10] ou le guide « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » [9].

6.3.5 Evaluation du risque d'érosion externe

L'érosion externe regroupe tous les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure d'un ouvrage (CFBR, 2021 [22]). Les mécanismes sont notamment la surverse, les effets de courant sur les pentes ou les pieds de pente (affouillement) et le ruissellement des eaux météoritiques.

Les ouvrages de ceinture sont aussi exposés aux agents d'altération (gel/dégel, vent, cycles d'humidification/séchage, phénomène de dessiccation et cycles thermiques) et à l'action des racines et des animaux fouisseurs qui déstructurent les terrains.

Le départ de matériaux sous les mécanismes d'érosion externe induit une diminution de section et/ou un raidissement local du talus de l'ouvrage, ce qui peut conduire à diminuer la résistance de l'ouvrage à différents mécanismes tels que le glissement ou l'érosion interne.

S'agissant plus particulièrement du ruissellement, celui-ci peut conduire en l'absence de protection externe à une érosion massive de la surface de l'ouvrage, notamment en cas de surverse d'une lame d'eau et/ou d'affouillements en pied des talus. Ce risque doit être pris en compte essentiellement au travers du dimensionnement hydraulique (dimensionnement du réseau de collecte des eaux de surface pour l'aléa pluviométrique défini au § 5.3.1 et/ou de la capacité des ouvrages d'évacuation des crues le cas échéant) et des règles de l'art et des bonnes pratiques de conception des ouvrages de ceinture. En particulier, l'érodabilité⁵³ des matériaux proches de la surface du sol, qui dépend de leurs caractéristiques physiques et mécaniques,

⁵² Les ouvrages à « risque normal » sont définis dans l'art. R.563-3 du code de l'environnement (art. R.563-3) comme des « bâtiments, équipements et installations pour lesquels les conséquences d'un séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat ».

⁵³ L'érodabilité peut être définie comme la relation entre le taux d'érosion du matériau et la vitesse de l'eau au contact avec le matériau.

notamment leur granulométrie (Briaud et al, 2018 [65]), doit être appréciée pour chaque stockage de résidus en tenant compte des débits de ruissellement définis au § 5.3.1. Il convient pour cela principalement de déterminer si certaines dispositions constructives, telles que l'ajout en surface d'un revêtement de protection (matériaux à plus forte granulométrie par exemple) ou bien la mise en œuvre de techniques visant à diminuer les sollicitations hydrauliques (adoucissement des pentes de talus, épis de protection par enrochements par exemple), pourraient être mises en place pour limiter les conséquences associées à ce risque, notamment sur le long terme lorsqu'il n'y aura plus de maintenance de ces ouvrages.

Courivaud *et al.*, 2019 [66] présentent des éléments de méthodologie pour l'évaluation du risque d'érosion par surverse dans le cadre des barrages et digues dont il est possible de s'inspirer pour l'évaluation relative aux ouvrages ceinturant les résidus miniers. Ces auteurs proposent notamment six étapes pour analyser le risque d'érosion externe d'un ouvrage (cf. Tableau 10) et précisent que cette analyse est à mener à l'aune de la connaissance de la physique des phénomènes, et de la connaissance de l'ouvrage lui-même, tel qu'illustré dans le Tableau 11. Ils précisent également que l'initiation de l'érosion externe est à étudier « *en tenant compte de la présence d'une protection de surface, de ses caractéristiques et de l'occurrence de l'initiation de l'érosion du corps de l'ouvrage lui-même si cette protection vient à ne plus remplir sa fonction* ».

N°	Etape	Question
1	Sollicitation	Quelles sont les sollicitations ?
2	Protection	Y-a-t-il une protection de surface ? Quelle est son efficacité ?
3	Localisation	Quelles sont les localisations possibles d'initiation de l'érosion ?
4	Initiation	Quels sont les mécanismes possibles d'initiation de l'érosion ?
5	Formation de la brèche	Quels sont les mécanismes de formation de la brèche ?
6	Développement de la brèche	Quels sont les mécanismes de développement de la brèche ?

Tableau 10. Les questions des six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe [66]

N°	Etape	Physique des phénomènes
1	Sollicitation	Ecoulements à surface libre, fortement turbulent et aérés sur forte rugosité (skimming flows), Jet impactants. Calcul de la contrainte hydraulique.
2	Protection	Seuil d'érodabilité (en contrainte limite ou en vitesse limite) de la protection de surface en fonction du temps (durée de la sollicitation)
3	Localisation	A analyser en fonction du type d'ouvrage et du type de sol
4	Initiation	Connaissance de la contrainte critique du sol (seuil d'érosion)
5	Formation de la brèche	Fonction du type d'ouvrage et du type de sol
6	Développement de la brèche	Cinétique de brèche pilotée par le coefficient d'érosion Couplage entre érosion et stabilité mécanique Prise en compte de l'incidence éventuelle de la vitesse du fleuve ou du canal Prise en compte éventuelle de la fosse d'érosion

Tableau 11. Quelques éléments relatifs aux six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe [66]

Il convient de noter qu'à la date de publication du présent rapport, l'approche de l'évaluation du risque d'érosion externe ne fait pas l'unanimité entre les experts de la communauté scientifique.

6.3.6 Evaluation du risque d'érosion interne

L'érosion interne est un mécanisme qui résulte de l'arrachement et du transport de grains d'un des matériaux constitutifs de l'ouvrage, sous l'effet des forces générées par un écoulement qui le traverse. Le risque d'érosion interne demeure tout au long de la vie de l'ouvrage, dès lors qu'il existe une différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval mais il peut être accentué à l'occasion d'événements venant augmenter ce gradient hydraulique.

Cette augmentation du gradient hydraulique peut être causée par :

- un raccourcissement des chemins hydrauliques entre l'amont et l'aval. C'est notamment le cas en présence d'animaux fouisseurs, lors du développement ou de la putréfaction d'un réseau racinaire ou du fait de fissures dues aux tassements différentiels provoqués par un séisme ;
- une augmentation de la charge hydraulique. Une pluviométrie exceptionnelle ou une augmentation de la perméabilité de la couverture peuvent par exemple en être la cause ;

- une dégradation des propriétés mécaniques du sol. Du fait de l'activité organique présente dans les sols, la perméabilité de ceux-ci peut être amenée à varier significativement au cours du temps, facilitant les écoulements.

A l'échelle des particules de sol, quatre mécanismes peuvent être à l'origine du phénomène d'érosion interne (cf. Figure 8) :

- l'érosion de conduit ou de fissure : les particules de la surface du conduit ou des lèvres de la fissure sont entraînées par l'écoulement ;
- l'érosion de contact : les particules d'un sol fin sont entraînées le long de son contact avec un sol plus grossier par l'écoulement parcourant ce dernier ;
- l'érosion régressive : les particules sont arrachées dans un premier temps à l'exutoire d'un écoulement, puis l'arrachement progresse de l'aval vers l'amont depuis l'extrémité aval du conduit déjà créé (d'où le nom d'érosion régressive) ;
- la suffusion : les particules fines du matériau sont déplacées par infiltration à travers la matrice du sol, dans le cas d'un matériau à la granulométrie discontinue qui n'assure pas l'autofiltration.

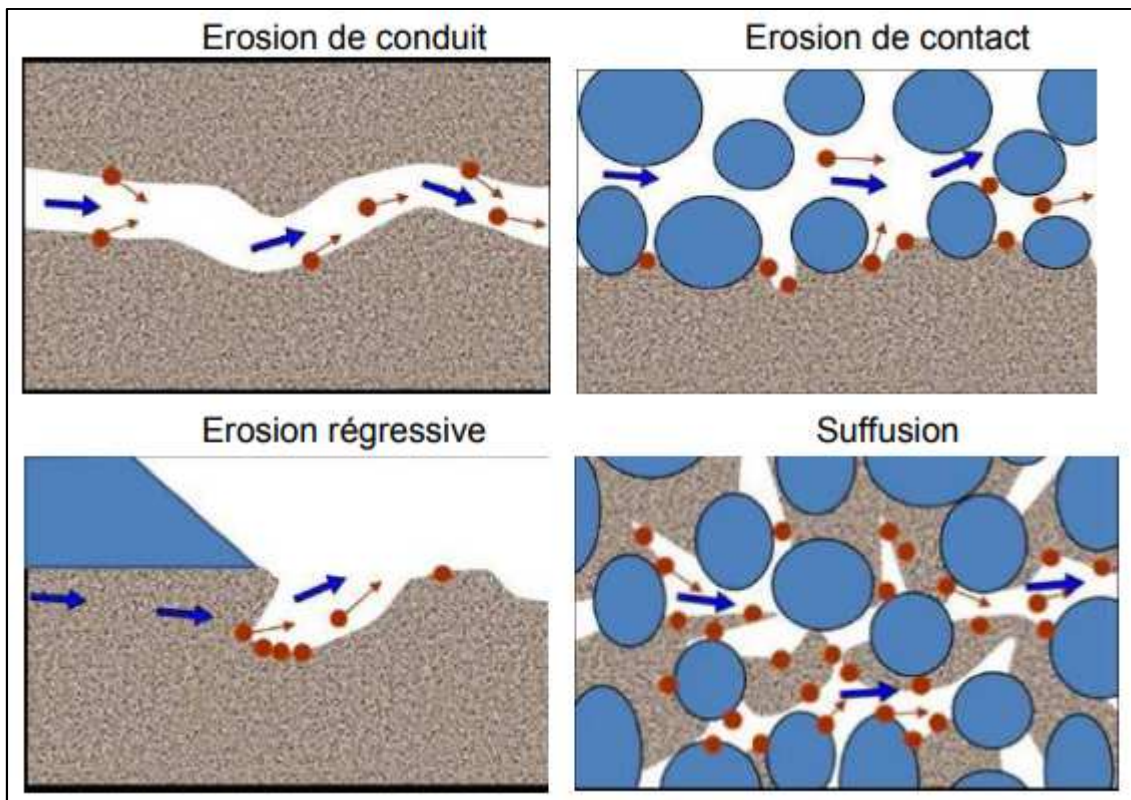


Figure 8. Illustration des mécanismes d'initiation de l'érosion interne [68]

L'érosion interne peut conduire à la ruine de l'ouvrage, soit directement par ses effets (la création d'un conduit par érosion régressive est un processus qui évolue généralement jusqu'à une taille de conduit entraînant l'effondrement de son toit), soit indirectement par modification des pressions dans le corps de l'ouvrage (les entraînements dus à une suffusion peuvent s'arrêter mais conduire à une redistribution des perméabilités et donc à une évolution défavorable de la piézométrie, qui peut elle-même conduire à une rupture par instabilité mécanique ou à l'initiation d'une érosion régressive).

La prise en compte de ces risques doit notamment se faire qualitativement au travers de l'évaluation du potentiel d'entraînement des particules fines et la définition des mesures nécessaires pour stabiliser ces particules sur le long terme. Afin d'évaluer le risque d'érosion interne, il est également nécessaire de tenir compte du comportement hydraulique de l'ouvrage et de l'évolution des matériaux stockés. Les documents [67] et [68] issus du projet national ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques)⁵⁴, contiennent des méthodes de référence récentes dans ce domaine. En s'attaquant à l'étude d'un des mécanismes de rupture les plus complexes et dangereux des barrages et des digues, ce projet a en effet mis en œuvre un

⁵⁴ Le Projet National ERINOH, soutenu par le MEDDE, a été mené de 2006 à 2013 par 32 partenaires (publics et privés) représentant des entreprises, des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des laboratoires de recherche et des bureaux d'études.

important programme de recherche et d'études dont l'aboutissement a été la rédaction des recommandations ERINOH en 3 volumes, dont les 2 premiers [18][19] sont publiés et le troisième devrait paraître en 2022.

Un rapport provisoire du groupe de travail du CFBR sur l'érosion, en cours de parution à l'heure où le présent document est rédigé, propose également une méthode d'évaluation du risque d'érosion interne basée, entre autres, sur les travaux d'ERINOH. Cette nouvelle méthodologie, qui vise à évaluer le risque d'érosion interne de façon plus poussée que le simple dire d'expert, s'appuie tout de même sur des critères qui ne sont pas totalement objectifs. Cette méthode, qui n'a pas encore fait l'épreuve du temps, est en cours d'évaluation dans la profession.

Enfin, l'exploitant pourra également se baser sur le document « Méthodologie d'analyse du risque d'érosion interne » de l'ICOLD [69].

7 METHODOLOGIE D'EVALUATION DES CONSEQUENCES EN CAS DE RUPTURE

7.1 Généralités

Une rupture, une déstabilisation partielle ou une déstabilisation totale d'un ouvrage de ceinture et/ou de ses équipements annexes passifs de sécurité peuvent entraîner la libération en aval des produits retenus avec une propagation sous forme de glissement ou de coulée.

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.

Les conséquences d'un glissement peuvent s'avérer importantes, les matériaux 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. Les glissements ne peuvent affecter que des ouvrages de hauteur conséquente (plusieurs dizaines de mètres).

Lorsque les teneurs en eau des résidus sont importantes, la rupture de l'ouvrage de retenue peut engendrer des phénomènes de type coulée. Le mélange eau-matériaux se comporte alors comme un fluide visqueux s'écoulant 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.

L'évaluation de l'aléa coulée, qui représente le cas le plus courant et surtout celui présentant potentiellement les effets les plus importants et les plus difficiles à quantifier, pourra être réalisée selon les modalités présentées dans le guide de l'Ineris [24] relatif à l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain de type coulée lié aux ruptures de barrages de résidus miniers. Les principaux éléments issus de ce document sont synthétisés ci-après.

7.2 Éléments de caractérisation d'une coulée

Le retour d'expérience sur les ruptures d'ouvrage de ceinture montre qu'en général deux événements se succèdent : immédiatement après la rupture, une coulée constituée d'un mélange d'eau, de résidus et des matériaux de l'ouvrage, 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 créées par l'évènement initial.

Les modes d'écoulement du mélange résidus - remblai (le cas échéant) - eau sont régis par la mécanique des fluides. Il est cependant 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. Le modèle de Bingham est fréquemment utilisé pour cette évaluation.

La seconde difficulté pour caractériser une coulée est de définir a priori si l'écoulement du fluide résidus-eau sera laminaire ou turbulent à la suite de la rupture de l'ouvrage de ceinture, 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. D'après le guide de l'Ineris [25], il apparaît que les deux régimes d'écoulement doivent être envisagés et qu'il n'existerait pas 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.

L'intensité d'une coulée est tributaire de sa hauteur en un point donné en aval du barrage ayant rompu et de la vitesse du flux toujours en un point donné. Cette dernière est cependant difficile et complexe à appréhender en raison des nombreux paramètres qui régissent les modes et régimes d'écoulement, tels qu'évoqués ci-avant. C'est pourquoi le guide d'évaluation des aléas minier de l'Ineris [25] ne retient que le paramètre hauteur pour évaluer l'intensité. Ce guide précise que lorsque la 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. Diverses approches empiriques, statistiques et mécaniques (ces dernières étant fonction du mode d'écoulement attendu) sont exposées dans la littérature. L'Ineris en a analysé un certain nombre qui sont présentées succinctement dans le Tableau 13 (cf. § 7.3). L'Ineris présente également la limite d'utilisation et la mise en garde de la sous-estimation ou de la surestimation de l'intensité ou de l'extension du phénomène pour chacun des modes d'analyse.

7.3 Evaluation de l'intensité et de la distance parcourue par la coulée

Quatre paramètres clés interviennent dans l'évaluation de l'intensité et de la distance parcourue de la coulée : le volume des résidus, le volume d'eau libre, la hauteur de l'ouvrage de ceinture ainsi que la pente et la morphologie du terrain à l'aval de l'ouvrage.

Le Tableau 12 synthétise, pour ces quatre paramètres, les données d'entrée nécessaires et propose pour chacun d'eux, en l'absence de ces données d'entrée ou en cas d'évolution à long terme de ces paramètres, les investigations complémentaires qu'il conviendrait de réaliser.

Paramètres clés	Données d'entrée	Investigations complémentaires possibles	Facteurs évolutif à long terme
Volume des résidus	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	Sondages, profils géophysiques si le contraste est fort entre les résidus et le substratum	Non
Volume d'eau libre	Volume de rétention, temps de concentration, en fonction d'une pluie de période de retour donnée Profondeur et fluctuation de la nappe dans les résidus. Valeur de PHE dans les résidus Pluviométrie mensuelle, journalière, voire à pas de temps plus réduit selon la spécificité du site	Sondages Piézométrie (<i>a minima</i> un à proximité de l'ouvrage) Calculs classiques d'hydrologie Projections climatiques spécifiques selon la particularité du site	Oui
Hauteur de l'ouvrage de ceinture	Hauteur, (largeur, longueur)	Non pertinentes	Non
Pente et morphologie de l'aval	Pente totale, pente par tronçons, morphologie, largeur, obstacles naturels ou anthropiques, nature du couvert végétal	Relevés géomètres, scan laser terrestre, lidar aéroporté, établissement d'un MNT	Oui

Tableau 12 : Paramètres nécessaires à l'évaluation de l'intensité de la coulée [24]

Le Tableau 13 synthétise les différents modèles disponibles dans la littérature et analysés par l'Ineris permettant d'évaluer l'intensité de la coulée et son extension géographique.

Paramètre estimé	Modèle	Commentaires
Hauteur de coulée	Lucia et al. Mécanique du solide déformable	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	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	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	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	Solutions pratiques et faciles d'utilisation (abaques). Nécessite d'évaluer le volume mobilisable de résidus 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	Données d'entrée peu aisées à acquérir (viscosité plastique, seuil de cisaillement). La pente aval peut être intégrée. Surestimation de la distance

Tableau 13 : Modèles disponibles dans la littérature permettant d'évaluer l'intensité de la coulée et son extension géographique [24]

8 CONCLUSION

Ce rapport propose une démarche méthodologique d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers sur la base des connaissances existantes relatives aux stockages français de résidus de traitement de minerais d'uranium, de la réglementation, de la documentation encadrant ces stockages et leurs ouvrages de ceinture, ainsi que du retour d'expérience disponible sur la gestion de ce type d'ouvrages dans le monde. Parmi les 17 sites de stockages de résidus de traitements miniers d'uranium présents en France, 9 d'entre eux (Bois-Noirs Limouzat, Ecarpière, Montmassacrot, Brugeaud, Lavaugrasse, Bernardan, le Bosc, Bertholène, Saint-Pierre du Cantal) sont concernés prioritairement par cette méthodologie d'évaluation.

Le retour d'expérience concernant les causes et conséquences des défaillances de ce type d'ouvrages, montre que les accidents survenus dans le monde sont principalement liés à des défauts de reconnaissance géologique et géotechnique, ou à de défauts de conception des ouvrages, ou à une insuffisance de maintenance ou de gestion des niveaux d'eau dans l'ouvrage, ou encore à des événements extrêmes telles que de fortes précipitations ou des séismes.

Compte tenu de la durée de vie des éléments radioactifs contenus dans les résidus miniers de l'ordre de 16 000 ans, et du fait qu'aucune disposition constructive à la conception ou via des renforcements ne permette de garantir une tenue mécanique des ouvrages de ceinture supérieure à quelques centaines d'années en l'absence d'entretien, il apparaît que les ouvrages ceinturant les stockages de résidus doivent faire l'objet d'une surveillance et d'une maintenance le plus longtemps possible. La prolongation de cette contrainte sur les générations futures implique en outre de mettre tout en œuvre en termes de dispositions visant à préserver la mémoire de ces stockages aussi longtemps que possible.

S'agissant de l'évaluation de la tenue des ouvrages de ceinture, sur lesquels repose le confinement des résidus, le groupe de travail recommande de viser une tenue des ouvrages sur une durée de 1 000 ans, communément considérée à l'international pour ce type d'ouvrages, et propose sur cette base une méthodologie adaptée. Celle-ci consiste en des modélisations, prenant en compte diverses sollicitations, définies à partir d'hypothèses d'évolutions de l'installation de stockage, qui incluent l'arrêt de la maintenance ainsi que la survenue d'aléas naturels sismiques ou climatiques d'ampleur exceptionnelle.

Un état des lieux des méthodes les plus pertinentes pour évaluer la tenue des ouvrages ceinturant les stockages de résidus miniers a été établi. En particulier, une liste de paramètres à acquérir pour constituer le modèle géotechnique à la base des évaluations de stabilité est proposée. Les méthodes et critères (notamment en termes de valeurs de facteurs de sécurité) permettant de vérifier la tenue des ouvrages en conditions statique ou sous diverses sollicitations (séisme, liquéfaction, érosion externe et interne) sont également proposés.

Enfin, les membres du groupe de travail ont émis dix recommandations (cf. § Synthèse des recommandations) concernant :

- les situations d'aléas naturels (sismiques et climatiques) d'un stockage à considérer,
- l'évaluation des conséquences en cas de rupture de l'ouvrage,
- des éléments à considérer pour la démarche d'évaluation de la stabilité des ouvrages à long terme.

Il est utile de souligner que ce rapport va au-delà de la réglementation en vigueur sur certains points, et ceci afin de prendre en compte les spécificités de ces ouvrages sur le long terme. **Ce rapport n'a ainsi pas vocation à être utilisé par les inspecteurs de l'environnement pour l'application de leur pouvoir de police, la démarche méthodologique d'évaluation visant la tenue à long terme des ouvrages.**

9 ANNEXES

9.1 Lettres de mission du GT

9.1.1 Lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2014-092 et CODEP-DRC-2014-032673 du 11 juillet 2014



Direction générale de la prévention des risques

Service des risques technologiques
Mission sûreté nucléaire et radioprotection
92055 La Défense cedex

Affaire suivie par Jérémie VALLET
Nos réf. : DGPR/SRT/MSNR/2014-092

**Autorité de Sûreté Nucléaire
Direction des déchets, des installations de
recherche et du cycle**

15 rue Louis Lejeune
CS70013
92541 MONTROUGE CEDEX

Affaire suivie par Amel MELLOUK
Nos Réf. : ASN-CODEP-DRC-2014-032673

Montrouge, le 11 JUIL. 2014

Note à l'attention

des membres du « groupe de travail stabilité des digues »

Objet : Missions confiées au « groupe de travail stabilité des digues »

Le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs, prévu à l'article L.542.1 du code de l'environnement, aborde les problématiques liées à la gestion des anciens sites miniers d'uranium. L'un des axes de la gestion de ces sites concerne la tenue à long terme des digues ceinturant les stockages de résidus issus du traitement du minerai d'uranium.

Dans le cadre du PNGMDR 2007-2009, AREVA a remis aux services de l'Etat une étude sur l'évaluation de la tenue des digues en cohérence avec le cadre méthodologique défini par le BRGM. Cette première approche indiquait une bonne stabilité des ouvrages, mais nécessitait des compléments.

Dans le cadre du PNGMDR 2010-2012, AREVA a rendu deux études complémentaires, prenant notamment en compte un niveau d'aléa sismique renforcé et l'impact de l'arrêt de l'entretien des sites. Ces différents éléments produits par AREVA permettent désormais de disposer des bases nécessaires à la formalisation de la doctrine à suivre pour évaluer la stabilité géomécanique à long terme des digues et à la définition des niveaux d'exigences associés pour garantir la sûreté à long terme des stockages.

Le PNGMDR, dans son édition 2013-2015, demande la création du groupe de travail « GT Stabilité des digues ». Sa mission consiste à « élaborer la doctrine d'évaluation de la tenue à long terme des digues ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerai d'uranium sur la base des études déjà transmises à ce sujet par AREVA. »



1. Objectif et livrable du groupe

Les membres du GT se fixent pour mission de rendre un rapport présentant des propositions quant à la doctrine d'évaluation de la stabilité des digues, notamment en termes de définition :

- de la notion de long terme associée à ces ouvrages ;
- des niveaux d'exigences ou de performance associés ;
- de la méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages.

Les membres du GT s'attacheront à prendre en compte :

- l'ensemble des études transmises par AREVA Mines dans le cadre du PNGMDR ainsi que les avis de l'ASN et ceux de l'IRSN sur ces études ;
- la réglementation concernant les exigences associées aux ouvrages dans le milieu conventionnel ;
- le retour d'expérience des organisations en charge de la gestion et du suivi des ouvrages dans le milieu conventionnel.

2. Organisation des travaux

2.1. Composition du groupe

Le pilotage et le secrétariat du groupe de travail « Stabilité des digues » sont assurés conjointement par la DGPR/MSNR et l'ASN.

Les membres du GT représentent leur organisation : d'autres représentants peuvent se joindre aux réunions à la discrétion des organisations.

AREVA Mines : M. Crochon, M. Andres

IRSN : M. Cushing, M. Guillevic, Mme Gallerand

DGPR / BSSS : M. Chevallier, Mme Léger

BRGM / DPSM : M. Sabourault

DGPR / BETCGB : M. Aigouy

Mines ParisTech : M. Fleurisson

Ponctuellement, d'autres organisations peuvent être associées aux discussions sur des points précis (Geoderis, INERIS, BARPI, ANDRA...).

2.2. Thèmes de travail

Le groupe de travail « Stabilité des digues » s'attachera en particulier à répondre aux problématiques listées ci-dessous.

1. Définition du périmètre du GT

a) Définitions

- définir les types d'ouvrages (digues, barrages, merlons) tels que retenus pour le GT en précisant les catégories d'ouvrages non retenues dans le périmètre du GT ;
- définir la notion de stabilité ;
- définir la fonction des ouvrages retenus ;
- définir la notion de long terme.

b) Retour d'expérience d'autres configurations similaires

- éventuellement partager la vision avec d'autres organisations sur le sujet ;
- réaliser un inventaire des cas de ruptures de digues et des enjeux associés (cas de Malvés, rapport OPECST de 2008) ;
- réaliser un inventaire du REX international (notamment d'après le rapport GT Séisme et Barrage DGPR/SRNH).

2. Évaluation de la tenue des ouvrages sur le long terme

a) Hypothèses à prendre en compte

- définir le périmètre potentiellement impacté ;
- définir les caractéristiques de l'évolution climatique en cohérence avec l'échelle temporelle visée ;
- définir les caractéristiques des aléas d'origine naturelle à prendre en compte (amplitude, période de retour, type de phénomènes – séisme, crue, pluie extrême, ...) ;
- définir l'évolution probable des matériaux en fonction du contexte climatique (effets de la végétation, de l'érosion, des phénomènes de dissolution/précipitation, de l'altération par le gel et les cycles gel-dégel, sécheresse, ...)
- statuer sur la prise en compte ou non d'un changement d'usage du site ;
- définir la durée de vie attendue de l'ouvrage, en particulier :
 - estimer la durée de vie théorique de l'ouvrage ;
 - définir les exigences associées à la durée de vie théorique de l'ouvrage ;
- statuer sur la prise en compte des événements concomitants ;
 - définir les attendus en termes de réponses de l'ouvrage.

b) Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

- définir la méthodologie à mettre en œuvre pour évaluer la tenue des ouvrages sur la base des éléments issus du 2a et des documents déjà produits, notamment ceux d'AREVA, et des avis associés.

2.3. Aspects réglementaires – documents de référence

Les membres du GT se baseront notamment sur la documentation suivante :

Réglementation et guides

- Arrêté du 19/04/10 relatif à la gestion des déchets des industries extractives
- Directive 2006/21/CE du Parlement Européen et du Conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE
- Arrêté du 24/01/11 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées
- MTD (BREF) : Gestion des résidus et des stériles des activités minières (janvier 2009) (DGPR)
- Décision de la Commission du 20 avril 2009 relative à la définition des critères de classification des installations de gestion de déchets conformément à l'annexe III de la directive 2006/21/CE du Parlement européen et du Conseil concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive

Documents concernant les ouvrages dans le domaine conventionnel :

- OPECST : Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques (juillet 2008)
- MEDDTL-DGPR (novembre 2010) : Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques
- CFBR (juin 2010) : Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai – Recommandations provisoires
- CFBR (juin 2013) : Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages

Études demandées par les pouvoirs publics concernant les stockages de résidus de traitement des minerais d'uranium

- 1986 : Note d'instruction technique relative aux installations de traitement des minerais d'uranium
- 1993 : Rapport Barthélémy-Combes « Déchets faiblement radioactifs – 1ere partie : stockage de résidus de traitement de minerai d'uranium
- 1999 : Doctrine de réaménagement des stockages de résidus
- 2001 : Méthodologie pour l'évaluation de l'impact radiologique des stockages de résidus et traitement de minerais d'uranium élaborée par l'IRSN (ex IPSN)
- 2001 : Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues ceinturant certains stockages de résidus élaborée par le BRGM (BRGM-RP-51068-FR)
- 2010 : Rapport du GEP Limousin - Recommandations pour la gestion des anciens sites miniers d'uranium en France

Études AREVA et avis IRSN et ASN dans le cadre du PNGMDR

- PNGMDR 2007-2009 :
 - ✓ Note AREVA BUM/DI/QSSE RT 07/062 du 19 janvier 2009 : Analyse de la tenue à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères ;
 - ✓ Avis IRSN IRSN/DIR/2009/388 du 12 juin 2009 ;
 - ✓ Avis ASN n°2009-AV-0075 du 25 août 2009.
- PNGMDR 2010-2012 :
 - ✓ Notes AREVA :
 - ✓ Note Coyne et Bellier RP P. 002231.01 partie 1 étude bibliographique du 23 janvier 2012
 - ✓ Note Coyne et Bellier RP P. 002231.02 partie exigence à retenir avec application au site générique du 23 janvier 2012
 - ✓ Avis IRSN n°2012-330 du 16 juillet 2012
 - ✓ Avis ASN n°2012-AV-0168 du 11 octobre 2012

2.4. Méthode de travail

Les travaux seront réalisés entre les séances du GT et les conclusions présentées en séances plénières et discutées. Le rapport présentera les conclusions du GT. Les relevés de décision permettront de tracer les orientations prises par le GT.

Les points de désaccord sur les éléments de doctrine retenus pourront apparaître dans le corps du texte du rapport.

3. Calendrier de travail:

L'échéance de remise du document de doctrine est fixée au 1^{er} trimestre 2015. Il est prévu que le GT « Stabilité des digues » se réunisse à une fréquence d'une réunion tous les deux ou trois mois en fonction des besoins.

Le chef de la mission
sûreté nucléaire et radioprotection

BENOIT BETTINELLI

Pi

J. VALLET

Le directeur des déchets,
des installations de recherche et du cycle


FABIEN SCHILZ

9.1.2 Lettres référencées DGPR/SRT/MSNR/2018/079 et CODEP-DRC-2018-028825 du 23 juillet 2018



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE



Direction générale
de la prévention des risques
Service des risques technologiques
Mission sûreté nucléaire et radioprotection
92055 La Défense cedex

Affaire suivie par Sandrine BUSSON
Réf. : DGPR/SRT/MSNR/2018/079

Autorité de Sûreté Nucléaire
Direction des déchets, des installations de
recherche et du cycle
15 rue Louis Lejeune - CS70013
92541 MONTROUGE CEDEX

Affaire suivie par Sarah MAUROUX
Réf. : CODEP-DRC-2018-028825

Montrouge, le **23 JUL. 2018**

Note à l'attention

des membres du groupe de travail « maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium »

Objet : Missions confiées au groupe de travail

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), prévu par l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement, traite de la gestion des anciens sites miniers d'uranium. Un des axes de cette gestion concerne la tenue à long terme des digues ceinturant les stockages de résidus issus du traitement du minerai d'uranium.

Dans le cadre du PNGMDR 2007-2009, Areva Mines, devenue Orano Mining, a remis une étude sur l'évaluation de la tenue des digues en cohérence avec le cadre méthodologique défini par le BRGM. Cette première approche indiquait une bonne stabilité des ouvrages à long terme, mais nécessitait des compléments.

Dans le cadre du PNGMDR 2010-2012, Orano Mining a rendu deux études complémentaires, prenant en compte notamment une augmentation du niveau d'aléa sismique et l'impact de l'arrêt de l'entretien des sites. Ces éléments permettent de disposer des bases nécessaires à la formalisation de la doctrine à suivre pour évaluer la stabilité géomécanique à long terme des digues et à la définition des exigences associés pour garantir la sûreté à long terme des stockages.

Le PNGMDR, dans son édition 2013-2015, demande la création du groupe de travail « GT Stabilité des digues ». Sa mission consiste à « élaborer la doctrine d'évaluation de la tenue à long terme des digues ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerai d'uranium sur la base des études déjà transmises [...] ». Le PNGMDR 2016-2018 préconise la poursuite des travaux du groupe de travail « maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les résidus de minerai d'uranium ».

1. Objectif du groupe de travail

Un groupe de travail « stabilité des digues », pluraliste et composé d'un nombre de représentants des différentes parties prenantes, experts techniques, exploitant, administration, a été constitué en 2013 et s'est réuni à neuf reprises jusqu'en 2015, ses missions étaient encadrées par la note du 11 juillet 2014. Afin de cadrer la reprise des travaux du GT, maintenant intitulé « maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium », la présente note définit les missions GT, élargit sa composition, fixe les modalités de fonctionnement et les livrables attendus ainsi que leurs échéances.

La principale mission du GT est d'élaborer une méthodologie permettant d'éclairer les parties prenantes (autorités administratives, l'exploitant...) et le public sur les enjeux liés au maintien à long terme des ouvrages. Le GT, dans sa forme précédente, a établi un projet de méthodologie d'évaluation de la stabilité.

Le PNGMDR 2016-2018 indique que « la vérification de la stabilité de la digue sur le long terme, repose, pour le groupe de travail, sur l'analyse du maintien des performances minimales nécessaires au maintien de ses fonctions (contenir les produits et limiter les transferts à l'extérieur) en dépit des agressions (aléa sismique, régimes hydrauliques extrêmes) auxquelles il est susceptible d'être soumis. Le groupe de travail propose une démarche à suivre et des méthodes d'évaluation de la tenue à long terme des digues de stockages de résidus. Néanmoins, les ouvrages peuvent être soumis à d'autres aléas : l'érosion, l'évolution des matériaux (physique, chimique, biologique des différents éléments constitutifs de l'ouvrage et des résidus) ou le relais d'aléas, que les connaissances actuelles ne permettent pas d'évaluer. Ces aléas doivent néanmoins être pris en considération si des éventuels travaux de confortement devaient être mis en œuvre. »

Afin d'éprouver ce projet, le PNGMDR 2016-2018 indique que « le groupe de travail sera consulté par Areva sur la mise en œuvre de cette méthode sur quelques cas et rendra ses conclusions avant le 31 décembre 2017 ». Au regard de ce retour d'expérience, une mise à jour de la méthodologie établie par le GT sera réalisée.

Le GT précisera les réflexions précédentes et définira notamment :

- la notion de long terme associée à ces ouvrages,
- les performances attendues des ouvrages à long terme et les exigences associés,
- la méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages.

Une première étude des éléments d'évaluation des conséquences en cas de perte de fonctions de ces ouvrages sera établie.

Le GT s'attachera à prendre en compte :

- l'ensemble des études transmises par Orano Mining dans le cadre du PNGMDR ainsi que les avis de l'ASN et ceux de l'IRSN sur ces études ;
- la réglementation et documents techniques concernant les exigences associées aux ouvrages dans les domaines physico-chimique et radiologique ;
- le retour d'expérience des organisations en charge de la gestion et du suivi des ouvrages dans les domaines physico-chimique et radiologique.

2. Organisation des travaux

2.1. Composition du groupe

Le pilotage et le secrétariat du GT sont assurés par l'ASN, avec l'appui de la DGPR/MSNR. Le secrétariat technique est confié à l'IRSN.

Les membres représentent leur organisation. Chaque organisation peut désigner d'autres représentants pouvant se joindre aux réunions. Les organisations représentées sont :

- Orano Mining,
- IRSN,
- DGPR / BSSS,
- BRGM / DPSM,
- DGPR / BETCGB,
- MINES ParisTech,
- FNE,
- ARCADIS
- ANDRA,
- GEODERIS.

2.2. Thèmes de travail

Le GT répond aux problématiques listées ci-dessous.

a) Définition du périmètre du GT

✓ Terminologie (Références du GT)

Le GT définit :

- les types d'ouvrages (digues, barrages, merlons) retenus, en précisant ceux qui ne sont pas retenus dans le périmètre du GT ;
- la fonction des ouvrages retenus ;
- la notion de long terme ;
- les aléas pris en compte ;
- la notion de tenue ou maintien des fonctions des ouvrages ;
- les typologies des pertes de fonction de l'ouvrage ;
- les éléments d'évaluation des conséquences des pertes de fonctions d'un ouvrage par rapport aux aléas considérés.

✓ Mise à jour des documents supports

Le GT réalise une mise à jour de la liste des textes réglementaires relatifs aux ouvrages retenus, des guides techniques et des études. Il se repose notamment sur la liste en annexe.

✓ Retour d'expérience d'autres configurations similaires

Le GT précise notamment les éléments suivants :

- les approches d'autres organisations ayant des problématiques similaires (barrages, digues de rivière, merlons, verses d'anciennes mines...);
- l'inventaire des cas de ruptures de digues et les enjeux associés (cas Malvés, rapport OPECST de 2008),
- le retour d'expérience international (notamment d'après le rapport GT Séisme et Barrage DGPR/SRNH).

b) Évaluation du maintien des fonctions des ouvrages ceinturant les résidus de minerais d'uranium

Le GT définit les données d'entrée pour la mise en place d'une méthodologie d'évaluation du maintien des fonctions des ouvrages (périmètres potentiellement impactés, tenue des ouvrages dans le temps...).

Pour établir cette méthodologie, il s'appuie sur le projet de méthodologie proposé par le premier groupe de travail l'enrichit par le retour d'expérience suite à la réalisation des premières études d'Orano Mining d'évaluation du maintien des fonctions de ses ouvrages.

c) Principes d'évaluation des conséquences en cas de perte de fonction de l'ouvrage

Après avoir établi une méthodologie d'évaluation du maintien des fonctions des ouvrages sur le long terme, le GT étudie les principes d'évaluation des conséquences des défaillances des ouvrages.

Ces principes d'évaluation devront permettre, en fonction de la réglementation, de :

- caractériser les enjeux des sites ;
- caractériser les conséquences d'une défaillance en fonction de différents scénarios.

2.3. Organisation du travail

À partir du projet de rapport du GT « stabilité des digues » du 22 octobre 2015, les membres du GT complète les travaux précédents selon 3 axes :

- Mise à jour des éléments décrits dans le rapport portant sur la doctrine ;
- Développement des éléments de justification des hypothèses retenues dans la méthodologie ;
- Mise à jour de la méthodologie au vu des deux premiers cas d'études réalisées par Orano Mining.

3. Calendrier de travail

Le GT se réunit régulièrement (4 à 5 réunions annuelles). Les travaux du GT font l'objet d'un rapport d'étape au plus tard le 31 décembre 2018.

Le chef de la mission
sûreté nucléaire et radioprotection



BENOIT BETTINELLI

Le directeur des déchets,
des installations de recherche et du cycle



CHRISTOPHE KASSIOTIS

9.2 Bibliographie

Réglementation et guides

- [1] Arrêté du 19/04/10 relatif à la gestion des déchets des industries extractives
- [2] Directive 2006/21/CE du Parlement Européen et du Conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE
- [3] Arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées
- [4] MTD (BREF) : Gestion des résidus et des stériles des activités minières (janvier 2009) (DGPR) <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/51/124/51124584.pdf>
- [5] European Commission (2018): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109657>
- [6] Décision de la Commission du 20 avril 2009 relative à la définition des critères de classification des installations de gestion de déchets conformément à l'annexe III de la directive 2006/21/CE du Parlement européen et du Conseil concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive
- [7] Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu
- [8] MEDDE – DGPR (2016) « Guide méthodologique relatif à la réglementation de sécurité et de sûreté des barrages relevant de la loi sur l'eau » 16 août 2016
- [9] Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques - Rapport rédigé à la demande du MEDDE – DGPR Version définitive - octobre 2014
- [10] AFPS (2020) – Cahier technique n°45, Évaluation du risque de liquéfaction des sols sous l'effet des séismes - Connaissances pratiques et applications aux projets géotechniques, Dec 2020, 2 Vols. Publication de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS).
- [11] Guide n°13 de l'ASN relatif à la protection des installations nucléaires de base (INB) contre les inondations externes. Version du 8 janvier 2013
- [12] IRSN (2022). Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages – Concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact. 25/01/22. https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_2021-00838-Guide-methodologique-evaluation-risque-radiologique-pour-faune-et-flore-sauvages.pdf
- [13] DOCTRINE relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel. 06/03/12. [Doctrines ERC.pdf \(ecologie.gouv.fr\)](http://ecologie.gouv.fr/Doctrines/ERC/Doctrines/ERC.pdf)
- [14] AIEA (2021). IAEA-TECDOC-1987 - "An Introduction to Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis in Site Evaluation for Existing Nuclear Installations". <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE-1987web.pdf>
- [15] ASN (2001). « Règle fondamentale de sûreté n°2001-01. Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface ». <https://www.asn.fr/l-ASN-reglemente/rfs/rfs-relatifs-aux-inb-autres-que-rep/rfs-2001-1-rfs-i.1.c.-du-31-05-2001>
- [16] NF EN 1998-5 : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques. Normes Nationales et documents normatifs nationaux, AFNOR, Aout 2015, 42 p.
- [17] ASN (1984) Objectifs de sûreté et bases de conception pour les centres de surface destinés au stockage à long terme de déchets radioactifs solides de période courte ou moyenne et de faible ou moyenne activité massique (8 novembre 1982) ; révision 1 (19 juin 1984)
- [18] ERINOH, Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques. Vol. 1. Méthodologie de caractérisation expérimentale. Auteur : collectif IREX. Éditeur(s) : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées

- [19] ERINOH, Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques. Vol. 2. Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai. Auteur : collectif IREX. Éditeur(s) : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées

Documents concernant les ouvrages dans le domaine conventionnel :

- [20] OPECST : Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques (juillet 2008)
- [21] CFBR (octobre 2015) : Comité Français des Barrages et Réservoirs – Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai
- [22] CFBR (juin 2013) : Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages
- [23] CFBR (2021) : Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai. Vol. 1 Cadre général, mai 2021
- [24] Ineris (2021) : Ruptures de barrages de résidus miniers : retour d'expérience et évaluation du phénomène. Rapport n° 178736-1971292-V2.0
- [25] Ineris (2018) : Guide d'évaluation des aléas miniers. Rapport n° 17-164640-01944A
- [26] WISE Uranium project. Tailing dam safety. <http://www.wise-uranium.org/indexm.html>. Chronology of major tailings dam failures : <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

Études demandées par les pouvoirs publics concernant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium

- [27] 1986 : Note d'instruction technique relative aux installations de traitement des minerais d'uranium
- [28] 1993 : Rapport Barthélémy-Combes « Déchets faiblement radioactifs – 1ere partie : stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium
- [29] 1999 : Doctrine en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium de mai 1999. Note DPPR_NT IPSN 99-42 établie par l'IPSN et la DPPR
- [30] 2001 : Méthodologie pour l'évaluation de l'impact radiologique des stockages de résidus et traitement de minerais d'uranium élaborée par l'IRSN (ex IPSN)
- [31] 2001 : Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues ceinturant certains stockages de résidus élaborée par le BRGM (BRGM-RP-51068-FR)
- [32] 2010 : Rapport du GEP Limousin - Recommandations pour la gestion des anciens sites miniers d'uranium en France

Études AREVA et avis IRSN et ASN dans le cadre du PNGMDR

- PNGMDR 2007-2009 :
- [33] Note AREVA BUM/DI/QSSE RT 07/062 du 19 janvier 2009 : Analyse de la tenue à long terme des digues de rétention de stockage de résidus de traitement de minerais uranifères
- [34] Avis IRSN DIR/2009/388 du 12 juin 2009
- [35] Avis ASN n°2009-AV-0075 du 25 août 2009
- PNGMDR 2010-2012 :
- [36] Note Coyne et Bellier RP P. 002231.01 partie 1 étude bibliographique du 23 janvier 2012
- [37] Note Coyne et Bellier RP P. 002231.02 partie exigence à retenir avec application au site générique du 23 janvier 2012
- [38] Avis IRSN n°2012-330 du 16 juillet 2012
- [39] Avis ASN n°2012-AV-0168 du 11 octobre 2012
- PNGMDR 2013-2015 :
- [40] Avis ASN n°2016-AV-0254 du 9 février 2016

- PNGMDR 2016-2018 :

- [41] Note Tractebel Engineering et Coyne et Bellier P. 005961.0002 établissement du dossier géotechnique des ouvrages des Bois Noirs du 8 mars 2018
- [42] Note Tractebel Engineering et Coyne et Bellier P. 005961.0003 NT09 établissement du dossier géotechnique des ouvrages de l'Ecarpière du 2 juillet 2018
- [43] Avis ASN n°2021-AV-0374 du 4 février 2021
- Avis IRSN hors cadre du PNGMDR
- [44] Avis IRSN sur le dossier 2005 Argile. Rapport DSU n°106

Autre documentation

- [45] Comurhex – Site de Malvesi (11) Dossier de demande d'autorisation de création - Installation nucléaire de base ECRIN « Entreposage Confiné de Résidus Issus de la conversion » 2011. Volume 1 pièce 7 § 3.4.2

Articles, thèses

- [46] Aubertin et al. (2002). Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur CD-ROM, Presses internationales Polytechnique).
- [47] Aubertin, Michel & Mbonimpa, Mamert & Jolette, Darcy & Bussière, Bruno & Chapuis, Robert & James, Michael & Riffon, Olivier (2018). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle
- [48] Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chappuis, R.P., James, M., Riffon, O. (2002) Stabilité technique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers : problèmes persistants et méthodes de contrôle. Défis et perspectives : Symposium 2002 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, CIM, Compte-rendu sur CD-Rom
- [49] Aubertin, M., Bussière, James, Mbonimpa, M., B., Chappuis, R.P., (2013) Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers – Partie I – Mise en contexte et caractéristiques générales, Déchets Sciences et Techniques n°64 juin 2013 pp : 28-36
- [50] Bocking, K., (2010) Post-closure liabilities. ACG Newsletter. Dec. 2010 pp : 20-23
- [51] Bjelkevik A. 2005. "Stability of Tailings Dam". Licentiate thesis
- [52] Davies, M.P. et Lighthall, P.C. (2001). « Geotechnical aspects of several recent mine tailings impoundment failures ». 54e Conférence Canadienne de Géotechnique. Odysée de la Terre, September, Calgary, Canada. CD-Rom : 321-326
- [53] BRGM (2001). Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues à stériles uranifères. Application à deux sites pilotes. Rapport BRGM/RP-51068-FR
- [54] M. Rico, G. Benito, A.R. Salgueiro, A. Díez-Herrero, H.G. Pereira (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context, Journal of Hazardous Materials, Volume 152, Issue 2, pp. 846-852, ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- [55] Fry, J.J. (2013) Colloque CFBR IRSTEA Digues du 13/06/13. Mécanismes méconnus de rupture de digues. <https://docplayer.fr/9448389-Mecanismes-meconnus-de-rupture-de-digues-j-j-fry-edf-cih.html>
- [56] CIGB (2001) Tailings dams – Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris + Bulletin 120 Aspects de la conception parasismique des barrages
- [57] Alonso E. et Gens A. (2006): Aznalcollar dam failure Part1 : observations and material properties. Géotechnique 56, N°3, 165-183
- [58] Eriksson N. et Adamek P. (2000): The railing pond failure at the Aznalcollar mine, Spain. 6th International Symposium in Environmental issues and waste management in Energy and Mineral production, Calgary, Alberta, Canada, 30 May – 2 June 2000

- [59] Norbet R. Morgenstern, Steven G. Vick, Cassio B. Viotti, Bryan D. Watts. (2016). Fundão Tailing Dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão dam. August 25, 2016
- [60] Beauval, C. Analyse des incertitudes dans une estimation probabiliste de l'aléa sismique, exemple de la France. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2003. Français. tel-00673231
- [61] Gürpınar, A., Serva, L., Livio, F., & Rizzo, P. C. (2017). Earthquake-induced crustal deformation and consequences for fault displacement hazard analysis of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 69-85. doi:10.1016/j.nucengdes.2016.11.007. [Earthquake-induced crustal deformation and consequences for fault displacement hazard analysis of nuclear power plants - ScienceDirect](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.11.007)
- [62] ICMM/UNED/PRI (2020) Global Industry standard on Tailings management (Norme Industrielle Mondiale pour la Gestion des Résidus Miniers). 5 août 2020. https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-tailings-standard_FR.pdf
- [63] Ritz, J.F., Baize, S., Ferry, M. et al. Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France. *Commun Earth Environ* 1, 10 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0012-z>
- [64] Seed, H.B., and Idriss, I.M., 1971, "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM9, p. 1249-1273
- [65] Briaud J.L., Govindasamy A. V. and Shafii I. (2018) - Erosion Charts for Selected Geomaterials, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2017, 143(10): 04017072
- [66] Courivaud J-R., Deroo L. et Bonelli S. (2019) – Erosion externe des barrages et des digues – Colloque CFBR : « Justification des barrages : Etat de l'art et Perspectives », Chambéry, 27 et 28 11 2019
- [67] Deroo L., Fry J.-J., ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques. Guide pour l'Ingénierie, Presses de Ponts et Chaussées.
- [68] J.J. Fry, D. François, D. Marot, Stéphane Bonelli, P. Royet. Etude de l'érosion interne: apport du projet Erinoh. *Vingt-cinquième congrès des Grands Barrages*, Jun 2015, Stavanger, Norvège. pp.486-507. fhal-01318294f
- [69] ICOLD. *Méthodologie d'analyse du risque d'érosion interne* » *Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, Bulletin n°164, 2015

9.3 Glossaire

Affouillement : Erosion et affaissement d'un sol après sa saturation préalable en eau.

Epigénisation : Remplacement lent d'un minéral par un autre, molécule par molécule, par apport de substance

Erodabilité : Elle peut être définie comme la relation entre le taux d'érosion du matériau et la vitesse de l'eau au contact avec le matériau.

Lixiviation : Dans le domaine de l'industrie minière de l'uranium, la lixiviation désigne le passage en phase liquide de l'uranium contenu dans le minerai. Elle est réalisée par apport de réactifs sous forme de solution :

- soit sur le minerai en place dans le sous-sol (lixiviation statique *in situ*) ;
- soit sur le minerai fragmenté et stocké sur des aires aménagées (lixiviation statique en tas) ;
- soit sur le minerai fragmenté et placé dans un réacteur en usine (lixiviation dynamique).

Méthode amont : Méthode de construction de digue à résidu dans laquelle le corps de la digue est construit par la fraction grossière des résidus séparée par hydrocyclonage et la crête de la digue se déplace vers l'amont au fur et à mesure que sa hauteur s'élève.

Méthode aval : Méthode de construction de digue à résidu dans laquelle le corps de la digue est construit par la fraction grossière des résidus séparée par hydrocyclonage et la crête de la digue se déplace vers l'aval au fur et à mesure que sa hauteur s'élève.

Parafouille : Rideau étanche placé sous un ouvrage (digue, barrage, etc.) pour empêcher un écoulement d'eau (renard) ou un affouillement.

Période de retour : Désigne la durée moyenne séparant, en un lieu donné, deux séismes de même intensité, mais il arrive que ce terme soit aussi utilisé pour exprimer la durée moyenne entre deux séismes de même magnitude. Selon la loi empirique établie par Gutenberg et Richter en 1944, la période de retour décroît à mesure que l'on considère des intensités sismiques faibles, pour la simple raison que les séismes sont d'autant plus fréquents que leur magnitude est faible. La période de retour de 475 ans considérée dans la réglementation parasismique française correspond quant à elle à un niveau d'accélération ayant une probabilité de 10% d'être atteinte en 50 ans.

Renard : Phénomène d'érosion interne d'une digue dû au cheminement de l'eau à travers les matériaux de la digue conduisant à l'entraînement des particules les plus fines du matériau sous l'effet d'un gradient hydraulique élevé (dit critique), pouvant conduire à l'ouverture d'un conduit se développant de l'aval vers l'amont et à terme à un affouillement brutal et spectaculaire.

Risberme : Plate-forme au milieu d'un talus de grande hauteur pour augmenter sa stabilité et faciliter son entretien.



Suffusion : L'un des quatre mécanismes d'initiation de l'érosion interne. Erosion sélective des particules fines d'un matériau à granulométrie étalée à travers les pores et constriction formés par la matrice de particules grossières.

Verse : Dépôt de stériles provenant de l'exploitation minière dont la partie supérieure est une plateforme (synonyme de halde).

9.4 Détails sur les ruptures des digues à stérile de Los Frailes et de Fundão

Rupture de la digue à stérile de la mine de Los Frailes (25 avril 1998)

Les éléments présentés ci-après sont issus de [57] [58].

La mine de Los Frailes en Andalousie était exploitée par la société Boliden avec une production au moment de la catastrophe de 4.1 millions de tonnes de minerai de pyrite pour en extraire du Zn, Pb et Cu. La pyrite extraite contient également de nombreux autres métaux en plus faibles concentration comme de l'As, du Cd.

Les résidus du traitement métallurgique par flottation qui représentent environ 90% du minerai traité et dont la granulométrie est très fines ($d_{80} < 45 \mu\text{m}$), sont déversés dans un bassin derrière une digue de 30 m de hauteur construite avec des enrochements provenant de l'exploitation minière (Figure 9). Cette digue repose sur une couche de sables et graviers alluvionnaires de 4 m d'épaisseur surmontant une couche de marne bleue d'environ 70 m d'épaisseur

La rupture de la digue s'est produite le 25 avril 1998 vers 2h30 du matin sur une distance d'environ 50 m (Figure 4 2). 5.5 Mm³ d'eau acide ($p_H=2.9$) et environ 1,5 millions de m³ de résidus riches en métaux (Zn, Fe, Cu, Pb, As, S) ont été déversés dans la rivière située au pied de la digue puis transportés jusqu'à 13 km en aval. Une crue de 3,6 m a été mesurée 30 minutes après la rupture à une distance d'environ 7 km. Plus de 2600 ha ont été recouverts de stériles sur une épaisseur atteignant de 4 m près de la digue.

Les opérations d'assainissement ont démarré quelques semaines plus tard. Environ 10 millions de tonnes de résidus et de sols pollués ont dû être décapés, ce qui a représenté l'équivalent de 500 000 camions. Il a fallu procéder à la neutralisation des sols et de plus de 45 puits. Le coût total de la remise en état est estimé à 237 millions de dollars.

La rupture de la digue (Figure 10) est liée à un glissement initial sur une distance de 1m d'une plaque de 30 m de long et de 20 m de large du sol de fondation au niveau des marnes bleues (1) située à la jonction des deux bassins. La digue s'est rompue brutalement (2) entraînant la rupture de la jetée de séparation entre les deux bassins. Sous l'effet combiné des effluents qui s'engouffrent sous la digue et de la diminution de résistance au cisaillement du sol d'assise, le déplacement de la digue s'accroît sur plus de 60 m et un affaissement de 2 à 3 m. La digue finit par se rompre sur une section de 50 m en déversant les boues et eaux acides dans la rivière (3). Le lit de la rivière Agrio se soulève de 3 m modifiant son cours (4).

La rupture du sol de fondation serait due à une fragilisation des marnes par les eaux acides et le développement de fortes pressions interstitielles exercées par l'eau conduisant à une diminution de la résistance au cisaillement des marnes.

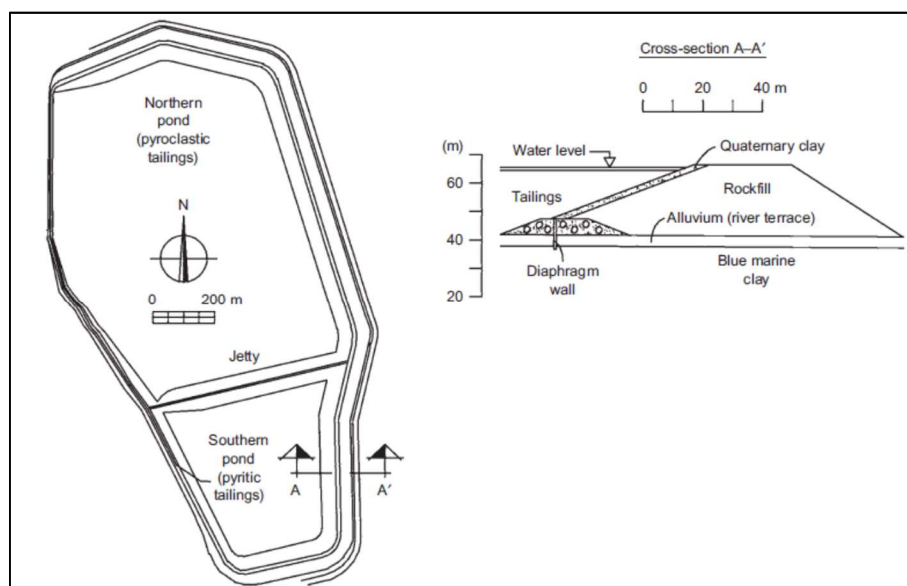


Figure 9. Plan de la digue à résidu de la mine d'Aznalcollar et coupe représentative de la digue [57]

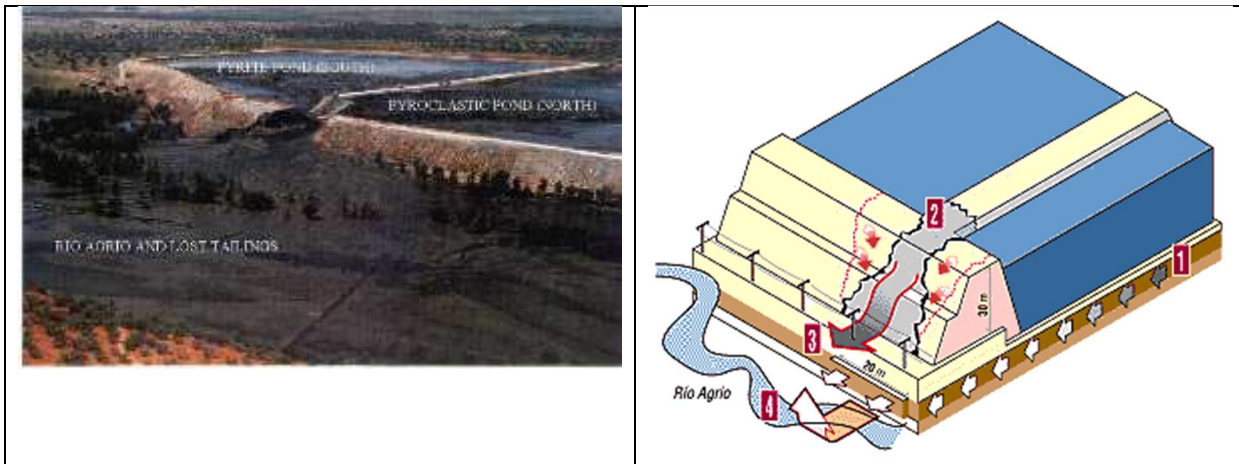


Figure 10. Photographie de la digue après la rupture et représentation des différentes phases de la rupture de la digue (d'après [26])

Rupture de la digue à stérile de Fundão, mine de Samarco, Minas Geiras, Brésil (25 novembre 2015)

Les éléments présentés ci-après sont issus de [59].

La mine de fer de Samarco est exploitée en commun par les sociétés minières brésilienne VALE et anglo-australienne BHP-Billiton dans l'Etat du Minas Geiras au voisinage de la ville de Mariana. La mine exploite un gisement d'Itabirite, roche formée d'une alternance de fines couches d'hématite et de quartzite, qui nécessite d'être broyée pour en récupérer l'hématite. Deux types de résidus transportés sous forme de boue dans deux tuyaux séparés sont déversés dans le réservoir de la digue à stérile de Fundão :

- des « sables » qui sont un mélange de particules de taille des sables et des silts ; ils se drainent facilement, mais quand ils sont déposés dans un état saturé et de faible densité, ils sont susceptibles de se liquéfier, et donc de se comporter comme un fluide par perte des contact entre les particules ;
- des « schlamms » constitués de particules fines de nature argileuse, tendre et compressibles et présentant une faible perméabilité.

La digue a été créée par la méthode amont (Figure 11). Au démarrage, les sables sont déposés derrière une digue en terre compactée initiale de petite hauteur (starter dam). Ils sont ensuite utilisés pour surélever la digue et augmenter progressivement la capacité de stockage. Les schlamms sont déversés derrière les dépôts de sable qui les retiennent si bien que les deux types de matériaux sont sensés ne pas être mélangés. Afin de préserver les caractéristiques de drainage des sables, une plage de dépôts de 200 m de large est maintenue pour empêcher les fines gorgées d'eau d'être déposées trop près de la crête de la digue où elles empêcheraient le drainage. Un système de drainage de forte capacité est installé à la base du « starter dam » pour permettre le drainage des sables et réduire ainsi leur saturation. L'eau drainée est ensuite recyclée dans le processus de traitement.

La rupture de la digue a eu lieu le 25 novembre 2015 à 15h45 (Figure 12). Sa hauteur était de 110 m. Un nuage de poussière apparut au niveau de l'appui gauche et des fissures se formèrent au sommet de la digue. Dans cette zone, la digue a commencé à « onduler telle une vague » comme si elle « fondait ». Les résidus qui semblaient solides quelques minutes avant se sont transformés en une rivière de boue (60 millions de tonnes de résidus) qui atteignit et détruisit la ville de Bento Rodriguez située en aval provoquant 19 décès, puis emprunta le lit de la Rivière Doce pour atteindre la mer située à plusieurs dizaines de kilomètres.

La rupture de la digue en forme d'un glissement-coulée par liquéfaction est la conséquence d'une série d'incidents (phénomènes de renard dans le starter dam, dysfonctionnement du système de drainage de base, mauvaise gestion des fines et de la boue) ont eu lieu au cours du développement de la digue. Ceux-ci ont conduit à un changement du design initial favorisant la saturation des sables et augmentant leur potentiel de liquéfaction ainsi que le recul de la crête au-dessus de l'appui gauche permettant le dépôt de schlamms à proximité de la crête. Ces schlamms ont été ensuite mis en charge par le dépôt de sables lors de l'élévation de la verse (figure 3). Un mécanisme d'extrusion des schlamms s'est alors initié entraînant un cisaillement des sables lâches et saturés qui se sont liquéfiés conduisant à la ruine de la digue en coulée-glisement. Il est également possible que ce mouvement horizontal affectant les sables ait été amplifié par une série de trois petits chocs sismiques ayant eu

lieu environ 90 minutes avant la rupture, mais leur action, testée au laboratoire et modélisée numériquement, n'a pas été déterminante.

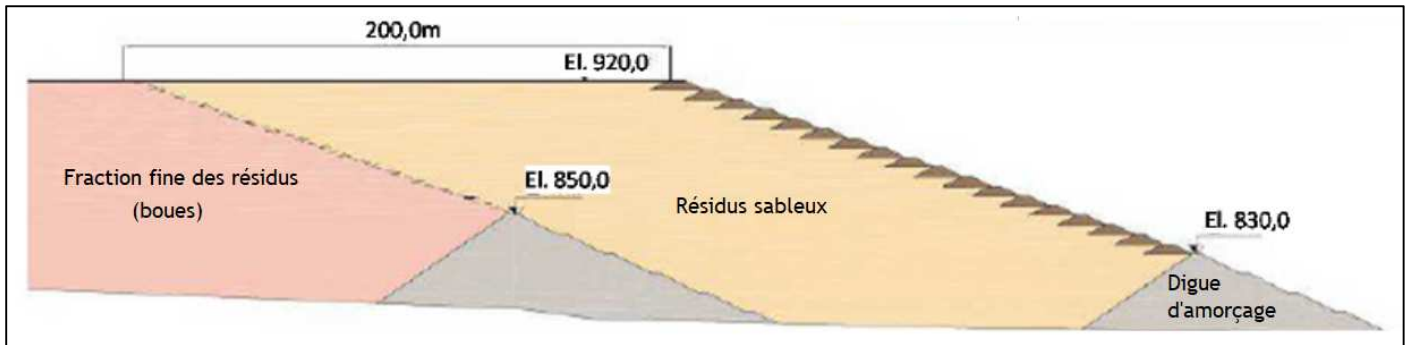


Figure 11. Méthode de construction par la méthode amont

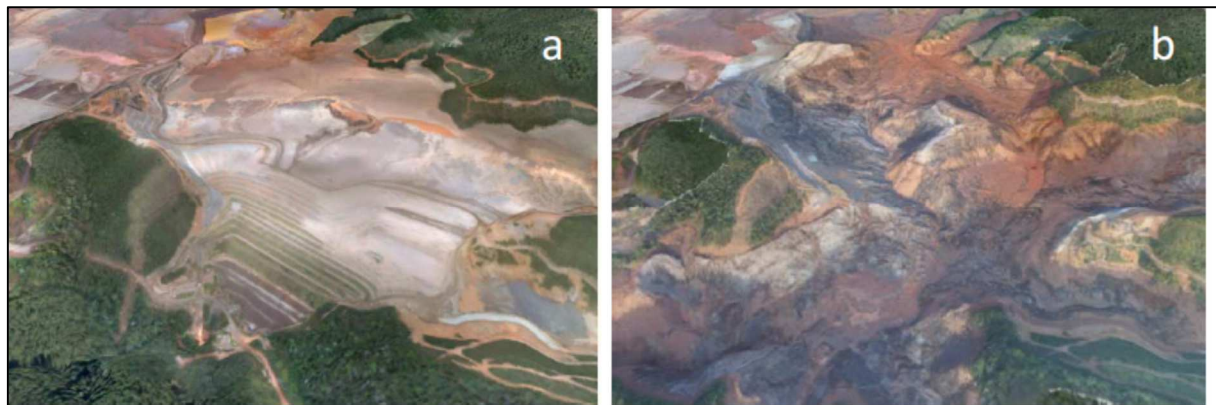


Figure 12. Site de la digue Fundão et du réservoir a) avant et b) après rupture