

GT RELATIF À L'ÉVALUATION DE LA TENUE DES OUVRAGES CEINTURANT LES STOCKAGES DE RÉSIDUS DE TRAITEMENT DE MINÉRAIS D'URANIUM

Travaux réalisés dans le cadre des éditions
2013-2015 et 2016-2018 du PNGMDR

Réunion PNGMDR du 11 octobre 2023

Plan de la présentation

1. Éléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

Plan de la présentation

1. **Éléments de contexte et domaine d'application**
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

1.1 Éléments de contexte

- Constitution du GT: ASN, DGPR, IRSN, Orano Mining, Andra, Mines ParisTech, Geoderis, BRGM, France nature environnement
- Saisines DGPR / ASN:
 - lettres DGPR/SRT/MSNR/2014-092 et CODEP-DRC-2014-032673 du 11 juillet 2014
 - lettres DGPR/SRT/MSNR/2018/079 et CODEP-DRC-2018-028825 du 23 juillet 2018



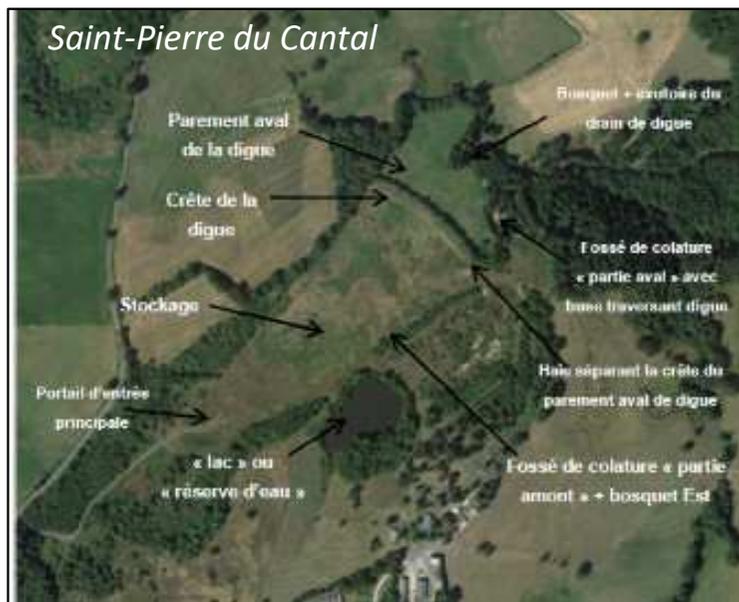
Élaborer une démarche méthodologique d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium

- Une vingtaine de réunions entre 2013 et 2022
- Rapport final transmis par lettres MTES/DGPR/SRT/MSNR/2023-014 et CODEP-DRC-2023-003279 du 30 janvier 2023 → **Recommandations R1 à R10**
- Révision en cours du chapitre relatif à la réglementation, sera publié sur le site de l'ASN (rubrique PNGMDR)

1.1 Eléments de contexte

Exploitation des mines d'uranium en France

- Entre 1948 et 2001
- Production de plus de 50 Mt de résidus de traitement de minerai
- 17 installations de stockage classées ICPE rubrique 1735 (Teufelsloch: réglementation minière)
- Responsable: Orano Mining



© Orano

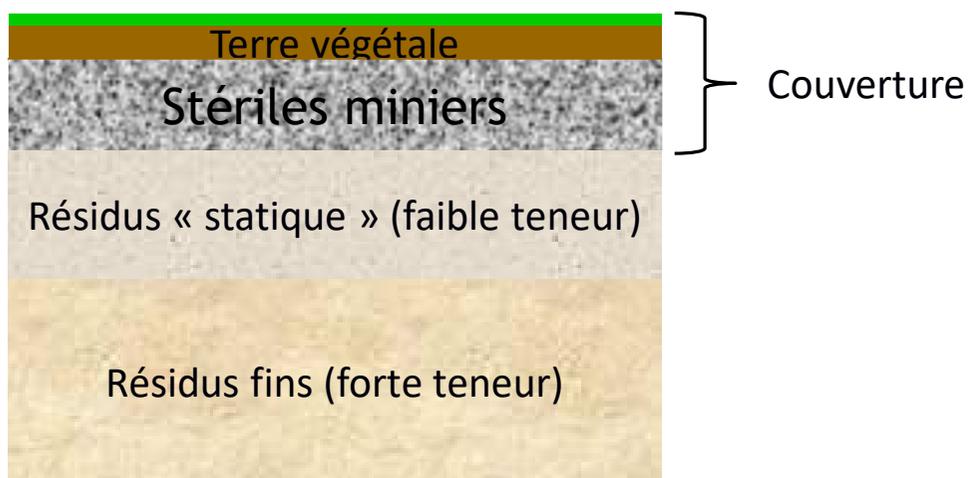


© Orano

1.2 Domaine d'application

Nature des produits stockés

- Résidus de traitement issus d'une lixiviation statique ~ 40 Bq/g (TFA)
- Résidus de traitement issus d'une lixiviation dynamique ~ 300 Bq/g (FA)
- Stériles miniers
- Autres déchets (démantèlement, boues des STE...)

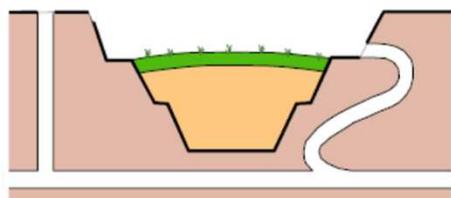


*Unique stockage avec couverture en lame d'eau:
Bois-Noirs Limouzat*

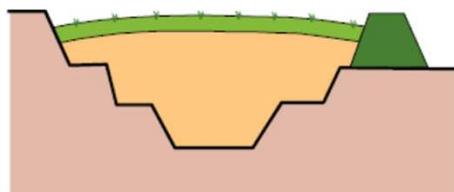


® Orano

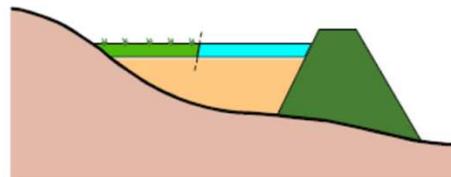
1.2 Domaine d'application



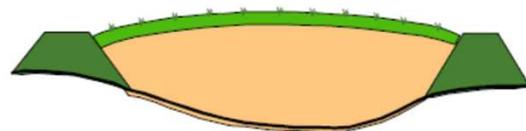
M.C.O. (± T.M.S)
REPLISSAGE TOTAL OU PARTIEL



M.C.O. + DIGUE
REPLISSAGE TOTAL



THALWEG BARRE PAR DIGUE
REPLISSAGE TOTAL



DEPRESSION + MERLON OU DIGUE DE CEINTURE
REPLISSAGE TOTAL

® Orano (modifié)

Stockages constitués de bassins clos par des ouvrages de ceinture :

- Bois-Noirs Limouzat
- Bernardan
- Bertholène
- Lavaugrassse

Anciennes mines à ciel ouvert (MCO) avec ouvrage de ceinture :

- Brugeaud
- Montmassacrot
- Le Bosc
- Saint-Pierre du Cantal

Stockages ceinturés par un ouvrage de ceinture :

- Ecarpière

Stockages ceinturés par des merlons de terre ou de stériles miniers de hauteur <15m :

- Gueugnon
- Rophin
- Bauzot

12 STOCKAGES CONCERNÉS PAR DES OUVRAGES DÉPASSANT LE NIVEAU NATUREL DU SOL
9 PRIORITAIRES POUR LES ÉVALUATIONS

1.2 Domaine d'application

Fiches synthétiques élaborées pour les 12 stockages avec ouvrages de ceinture (cf. rapport du GT)

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

F _S en conditions normales	F _S en cas de séisme ¹
1,81	1,41

Informations complémentaires

Cadre réglementaire ICPE 1735, surveillance décennale

Usages actuels en surface du stockage

Projet de parc photovoltaïque

Plan de la présentation

1. Eléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

2. Réglementation, doctrine et guides

■ **Réglementation** relative:

- aux stockages de résidus de traitement de minerais de traitement d'uranium
- aux déchets de l'industrie extractive
- à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées soumises à autorisation
- aux ouvrages ceinturant les résidus sous lame d'eau ou liquides soumis à la nomenclature IOTA

■ **Doctrine** IPSN/DPPR en matière de réaménagement des stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium (1999)

■ **Guide** du BRGM « Méthodologie d'évaluation de la stabilité des digues à stériles uranifères » (2001)

■ **Guide** méthodologique de la DGPR relatif à la réglementation de sécurité et de sûreté des barrages relevant de la loi sur l'eau (2016)

■ **Document BREF** « Gestion des déchets de l'industrie extractive » (2018)

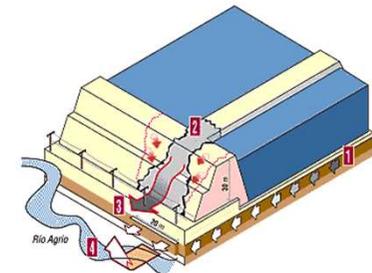
 Éléments qui ne s'appliquent pas tous directement aux sites de stockage de résidus miniers d'uranium d'un point de vue juridique, mais qui sont utiles à l'élaboration de la doctrine de l'évaluation de la stabilité des ouvrages ceinturant lesdits stockages de résidus miniers

Plan de la présentation

1. Eléments de contexte
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. **Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue**
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue

- Présentation des principaux **types et causes de défaillances** des ouvrages de retenue (général puis focus **résidus miniers**)
- Un récapitulatif sommaire des 36 **événements majeurs** survenus entre les années 1992 et 2022 est fourni
- Présentation de deux ruptures catastrophiques de digues à stériles:
 - **Digue de Los Frailes en Espagne (avril 1998)**
 - **Digue de Bento Rodriguez au Brésil (novembre 2015)**
- France: ancienne digue Est du bassin B2 de **Malvési**



Les accidents dans le monde sont principalement liés à:

- des défauts de reconnaissance géologique et géotechnique ou de conception des ouvrages
- 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 de la digue suite à des événements extrêmes comme des fortes précipitations ou des séismes

Plan de la présentation

1. Eléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

■ Durée de nocivité des résidus:

- ^{226}Ra radionucléide majoritaire: $t_{1/2} = 1\ 600$ ans → risque radiologique sur *a minima* 16 000 ans
- La tenue des ouvrages nécessiterait une évaluation sur du très long terme (plusieurs milliers d'années)

■ Aucune disposition (à la conception ou via des renforcements) ne permet de garantir la tenue mécanique de ces ouvrages sur une durée supérieure à quelques centaines d'années sans entretien

■ **R9** – 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**

- Contrainte relayée aux générations futures
- Nécessité de dispositions visant à **préserver la mémoire** des stockages aussi longtemps que possible

■ **Erosion** → les phénomènes naturels (vent, gel/dégel, sécheresses...) sont supposés compensés par la maintenance régulière pendant la première phase de vie du stockage

■ **Durée de vie** visée pour les ouvrages: **1 000 ans**

4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

Evolution des stockages → Deux phases de vie:

MAINTENANCE EFFECTIVE
VS
MAINTENANCE NON EFFECTIVE

 **Objectif des études:** rechercher dès la conception, ou via des renforcements, une **tenue mécanique des ouvrages de ceinture** sur une durée d'environ **1 000 ans** vis-à-vis d'aléas autres que l'érosion, en particulier vis-à-vis:

- d'aléas naturels (**pluviométrie, séisme**) d'ampleur extrême
- de **niveaux d'eau** importants dans l'ouvrage

R1 – Situations à prendre en compte pour évaluer la stabilité des ouvrages:

Situation	Phase de vie du stockage	Niveaux d'eau dans l'ouvrage	Aléas naturels
1	a. 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 (système de niveau SMS ou paléoséisme)
3		Pluviométrie 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	b. Absence de maintenance	Pluviométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Sans aléa
5 (sensibilité)		Pluviométrie maximale (liée à l'inefficacité des drains)	Séisme associé à une période de retour de 10 000 ans, ou à une évaluation déterministe (système de niveau SMS ou paléoséisme)

R1 – Situations à prendre en compte pour évaluer la stabilité des ouvrages:

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 (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)



4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

PRISE EN COMPTE DE L'ALÉA SISMIQUE

Evaluation du mouvement sismique

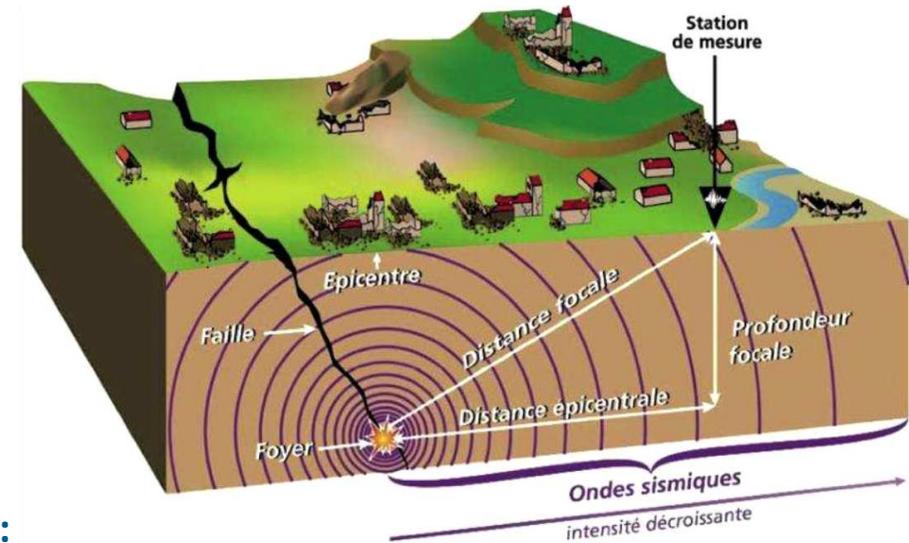
- 2 types d'approches: probabiliste ou déterministe

R2 – 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 SMS ou paléoséisme)
- et justifier le choix de l'approche retenue en termes de données d'entrées et de prise en compte des incertitudes associées

Evaluation du risque de rupture de sol en surface

- R3 – Evaluer, 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**



4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

PRISE EN COMPTE DE L'ALÉA CLIMATIQUE

■ Deux situations à considérer:

- **Niveau d'eau élevé** dans l'ouvrage et dans le stockage
- **Ruissellement important en surface** entraînant un risque d'érosion externe massif de l'ouvrage

Niveau d'eau élevé

■ **R4 – Phase de maintenance effective** du stockage: retenir 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

– **Phase d'absence de maintenance**: retenir le **niveau piézométrique maximal** dans l'ouvrage et dans les résidus

4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

PRISE EN COMPTE DE L'ALÉA CLIMATIQUE

Deux situations à considérer:

- **Niveau d'eau élevé** dans l'ouvrage et dans le stockage
- **Ruissellement important en surface** entraînant un risque d'érosion externe massif de l'ouvrage

Ruissellement important

R5 – Risque d'érosion externe: 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**

Evolution en cours de l'état de l'art concernant l'impact du changement climatique sur les pluies et débits extrêmes:

R6 – Mener 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

4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages

EVOLUTION DES CONSÉQUENCES EN CAS DE RUPTURE DE L'OUVRAGE

- **R7** – Lorsque les résultats des évaluations de stabilité des ouvrages montrent que leur tenue aux aléas sismiques et climatiques n'est pas garantie, les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage devront être présentées en termes **d'étendue de l'épandage des matériaux** hors du stockage
- **R8** – Dans un 2nd temps, évaluer les **conséquences sanitaires et environnementales** liées à cet épandage, 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

DÉMARCHE D'ÉVALUATION DE LA STABILITÉ À LONG TERME

- Durées en jeu → nécessité d'intégrer les résultats issus de la surveillance et de la maintenance, du retour d'expérience international, nouvelles connaissances, évolution des normes, évolution du climat...
- **R10** – La résistance des ouvrages aux aléas nécessite une réévaluation régulière

Plan de la présentation

1. Éléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. **Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages**
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

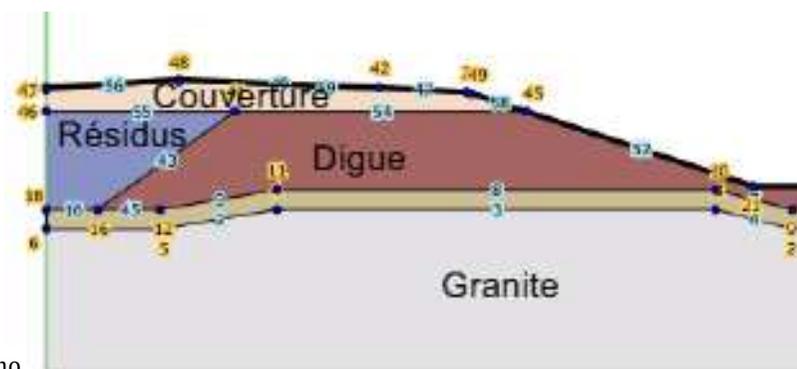
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

Données d'entrée (non exhaustif):

- niveau piézométrique dans l'ouvrage
- 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
- paramètres de compressibilité du remblai et des terrains de fondation
- propriétés mécaniques des résidus dans le stockage et évolution dans le temps

Construction d'un modèle géotechnique

- représentation réaliste de la géométrie de l'ouvrage, de la distribution des matériaux dans l'ouvrage et de la géologie du terrain de fondation
- sélection des sections transversales les plus pénalisantes de l'ouvrage



© Orano

5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

■ Stabilité statique au glissement (deux méthodes):

- Obtention d'obtenir un facteur de sécurité (FS) global
 - **FS = 1,5** pour une **situation courante**
 - **FS = 1,3** pour une **situation exceptionnelle** (e.g. phase chantier ou défaillance du système de drainage)
 - **FS = 1,1** pour une **situation extrême** (régime hydraulique critique)
- Méthode ci-dessus combinée à la prise en compte des coefficients de sécurité partiels pour vérifier un FS minimum ou coefficient de modèle:

Situation:	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan \varphi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
○ Normale/courante	1,25	1	1,2
○ Défaillance de contrôle des écoulements internes (piézométrie importante) et pluviométrie exceptionnelle	1,1	1	1,2
○ Piézométrie maximale	1	1	1,1

5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

■ Stabilité sous sollicitation sismique

Evaluation du mouvement sismique

- Approche déterministes (SMS ou paléoséisme) ou probabiliste (PSHA)

➤ Critères de vérification:

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

Evaluation du risque de rupture de sol en surface

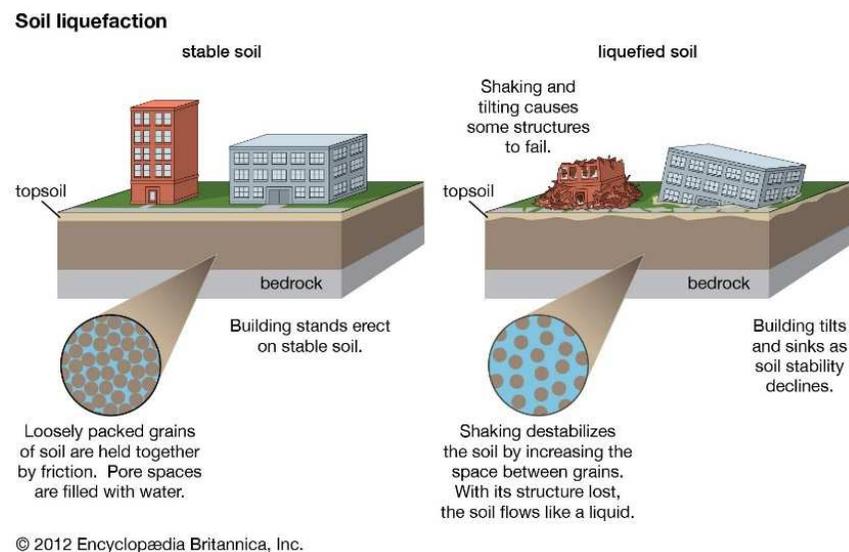
- Uniquement pour les ouvrages situés en zones de sismicité *a minima* modérée lorsque la probabilité d'une telle rupture apparaît non négligeable ($> 10^{-6}/\text{an}$)

➤ Cf. TecDoc n° 1987 de 2021 de l'AIEA

5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

Risque de liquéfaction

- 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
- Approche qualitative suivie le cas échéant d'une approche quantitative (Seed et Idriss, 1971)
- Guides méthodologiques: DGPR (2014), Association Française du Génie Parasismique (2020)
- Recommandations du CFBR (2015)



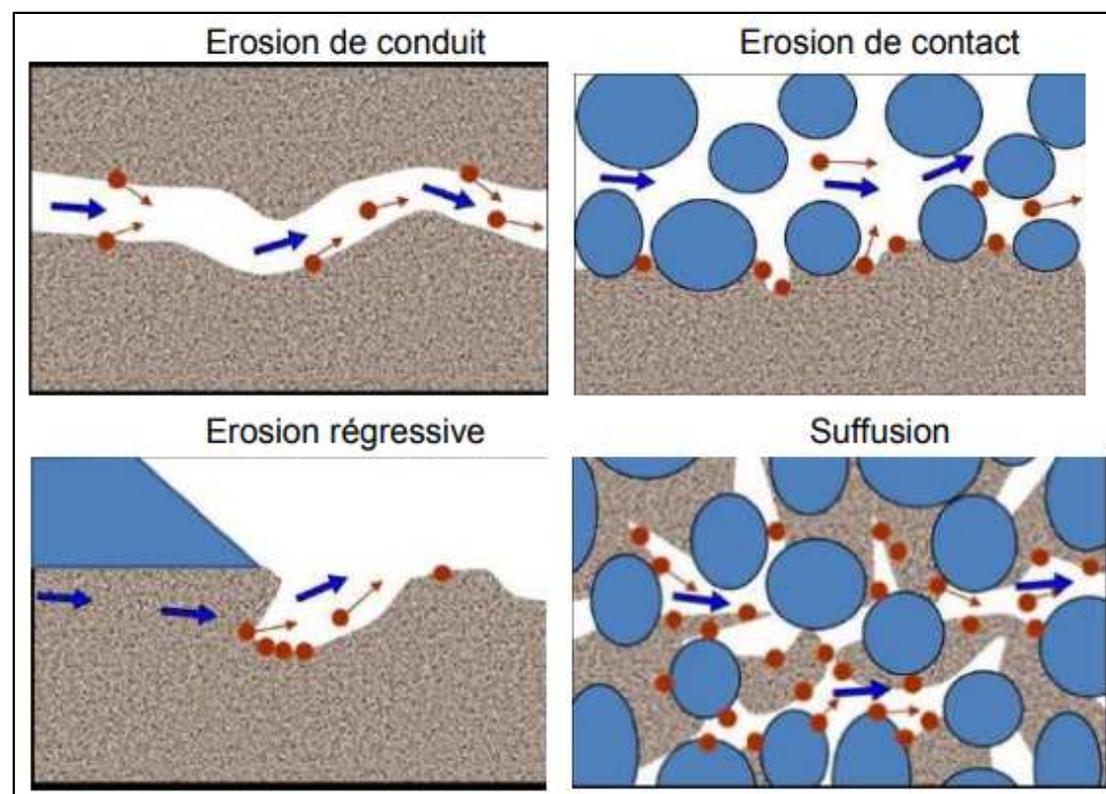
Risque d'érosion externe

- Ruissellement des eaux météoritiques (érosivité: [Briaud et al., 2018](#)), surverse ([Courivaud et al., 2019](#)), effets de courant sur les pentes ou pieds de pente (affouillement)
- Phénomènes de gel/dégel, vent, cycles d'humidification/séchage, phénomène de dessiccation et cycles thermiques
- Action des racines et des animaux fouisseurs

5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages

■ Risque d'érosion interne

- Arrachement et transport de grains des matériaux constitutifs de l'ouvrage du fait de l'écoulement d'eau
- Prise en compte qualitative de ce risque:
 - évaluation du potentiel d'entraînement des particules fines
 - définition des mesures pour stabiliser ces particules sur le long terme
 - tenir compte du comportement hydraulique de l'ouvrage et de l'évolution des matériaux stockés
- Projet national ERINOH
- GT du CFBR (rapport en cours)
- Icold (2015)



Plan de la présentation

1. Eléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
- 6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture**
7. Conclusion

6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture

- Une rupture, une déstabilisation partielle ou une déstabilisation totale d'un ouvrage de ceinture peuvent entraîner la libération en aval des produits retenus

- Deux types de propagation :

Glissements

- Mouvement d'une masse de terrain le long d'une zone de rupture (surface continue de forme circulaire, plane ou complexe)
- Les matériaux se répandent vers l'aval sous forme de cône d'épandage

Phénomènes de type coulée

- Lorsque les teneurs en eau des résidus sont importantes
- Cas le plus courant dans le monde, effets potentiellement les plus importants et les plus difficiles à quantifier

➤ [Guide de l'Ineris \(2021\)](#)

Plan de la présentation

1. Eléments de contexte et domaine d'application
2. Réglementation, doctrine et guides encadrant le domaine
3. Retour d'expérience concernant les ouvrages de retenue
4. Démarche d'évaluation de la tenue des ouvrages
5. Méthodologie d'évaluation de la tenue des ouvrages
6. Méthodologie d'évaluation des conséquences en cas de rupture
7. Conclusion

7. Conclusion

- Le GT a élaboré une doctrine d'évaluation de la tenue à long terme des ouvrages ceinturant les stockages de résidus de traitement de minerais d'uranium
- 10 recommandations ont été émises
- Les ouvrages de ceinture devront faire l'objet d'une surveillance et d'une maintenance le plus longtemps possible
→ contrainte sur les générations futures
- Différentes situations d'évolution du stockage ont été envisagées concernant la survenue d'un aléa naturel, l'arrêt de la maintenance ou un cumul des deux
- Il convient de viser une tenue des ouvrages sur une durée de 1 000 ans dans les évaluations de stabilité
- Lorsque les résultats des évaluations montrent que la tenue des ouvrages n'est pas garantie sur cette durée, il convient de présenter les conséquences associées à une rupture de l'ouvrage en termes d'étendue de l'épandage des matériaux
- Les résultats des évaluations constitueront un des éléments d'appréciation de l'impact à long terme des stockages et pourront être utiles aux prises de décisions concernant les actions à mettre en œuvre
- La résistance des ouvrages aux aléas nécessite une réévaluation régulière