



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN  
Ufficio federale dell'energia UFE  
Uffizi federal d'energia UFE

Matmark, <https://www.bfe.admin.ch>



Bachtelweiher, forêt, canton de ZH, Gander (2021)



# RÉVISION TOTALE DE LA DIRECTIVE PARTIE C3 VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE POUR LES BARRAGES EN REMBLAI

SÉANCE D'INFORMATION : REVISION TOTALE DE LA DIRECTIVE PARTIE C3 ▪ OFEN/ASI/TS ▪ 27.05.2025



# THÈMES

---

- Objectifs du séisme d'évaluation de la sécurité
- Détermination des propriétés des matériaux
- Évaluation du potentiel de liquéfaction
- Méthodes d'analyse
- Interprétation des résultats
- Principes spécifiques concernant les traces temporelles de l'accélération



# OBJECTIF DE LA VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE

## GÉNÉRALITÉS

---

- **2.2.1** L'objectif de l'évaluation de la sécurité sismique d'un ouvrage d'accumulation est de vérifier que, pendant et après un tremblement de terre, une défaillance de l'ouvrage pouvant entraîner un **écoulement incontrôlé et potentiellement dommageable des eaux de la retenue** (ou d'autres matériaux retenus dans le cas des barrages de protection contre les dangers naturels, par exemple des débris) peut être exclu.
- Il est à noter que les dommages, y compris les déformations permanentes qui ne compromettent pas la sécurité de l'ouvrage d'accumulation, sont considérés comme acceptables.



# OBJECTIF DE LA VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE

## DIGUES EN REMBLAI

---

- 6.8.2.1. Pour évaluer de manière fiable la performance sismique d'un barrage en remblai, une évaluation appropriée des **déformations sismiques attendues** est nécessaire. **Pour les barrages en remblais de toutes les classes**, les **déplacements calculés** doivent être évalués de manière critique, en mettant particulièrement l'accent sur la détermination de la **réduction de la revanche** à la suite du tremblement de terre.
- 6.8.2.2. Si des **déformations permanentes** sont à prévoir après l'action sismique, les points suivants doivent notamment être évalués:
  - Pour éviter un **débordement** du barrage dû à des impacts sismiques directs ou indirects (par exemple, en raison d'un glissement d'une masse de sol ou/et de roche dans les bords de la retenue), une revanche suffisamment importante doit être maintenue. Les déplacements et les tassements de la crête du barrage dus au glissement induit par les séismes doivent être pris en compte dans ce processus.
  - **L'érosion interne** doit également être exclue à l'état déformé.



# OBJECTIF DE LA VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE PLUS D'ANALYSE PSEUDO-STATIQUE

---

- Pourquoi ?
  - Représentation simplifiée de l'action sismique
    - Dans l'analyse pseudo-statique, la charge sismique est traitée comme une force horizontale constante.
    - Limitation : cette approche ignore la nature dynamique et variable dans le temps des tremblements de terre - y compris la durée, le contenu fréquentiel, les impulsions d'accélération et la propagation des ondes.
  - Pas d'indication/d'estimation de la/des déformation(s) permanente(s) (les méthodes pseudostatiques évaluent uniquement la stabilité contre le glissement ou la défaillance, mais pas l'ampleur de la déformation de l'ouvrage d'accumulation).
  - Les coefficients sismiques ne sont pas étroitement liés aux enregistrements réels des mouvements du sol ou aux analyses probabilistes de l'aléa sismique (PSHA).
  - Pas de possibilité de contrôler les fonctionnalités après le séisme



# ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES SÉISMES DU 6 FÉVRIER 2023, TREMBLEMENTS DE TERRE (M7.7 ET M7.6)



- 16 des 17 ouvrages d'accumulation endommagés étaient des barrages en remblai. Certains avec des dégâts importants.
- Barrage de Sultansuyu : barrage en remblai avec noyau d'argile.
- $H = 60 \text{ m}$ ,  $H_w = 50 \text{ m}$ ,  $L = 721 \text{ m}$ , distance de l'épicentre : 75 km
- PGA :  $409,31 \text{ cm/s}^2$ ,  $467,20 \text{ cm/s}^2$ , et  $318,75 \text{ cm/s}^2$
- Observations :
  - Des fissures longitudinales étendues (propagation latérale + Liquéfaction) sont apparues le long de la couronne et du talus de l'ouvrage d'accumulation du côté amont.
  - Tous les mouvements latéraux étaient dirigés vers le côté amont.
  - Tassement maximal de la couronne : 0,8 m ( $\sim 1,3\%$  de  $H$ )



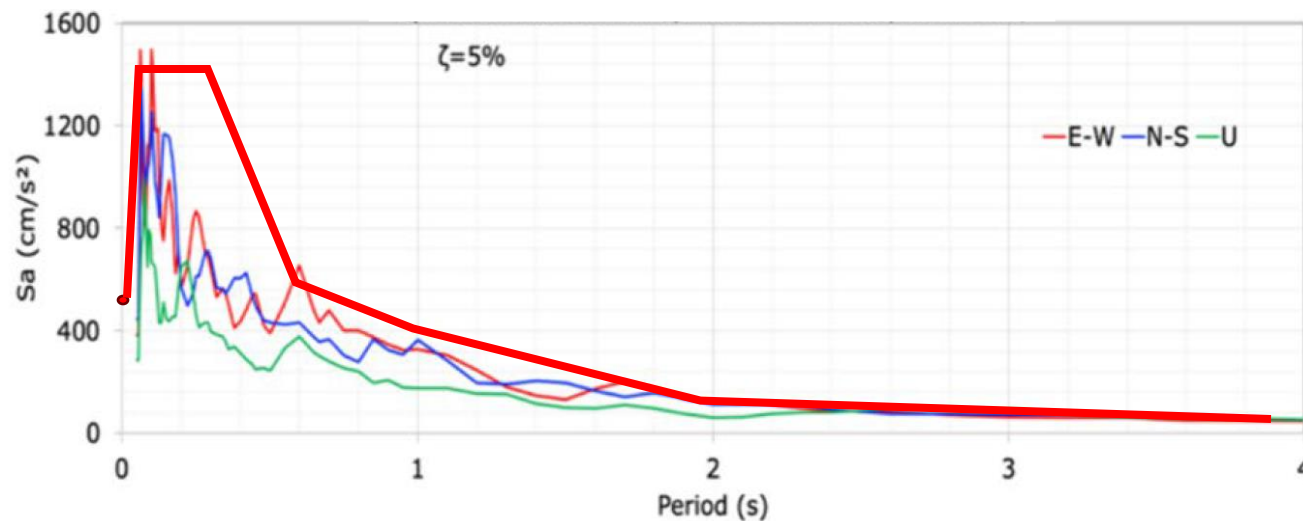
Bayraktar, et al. (2024)



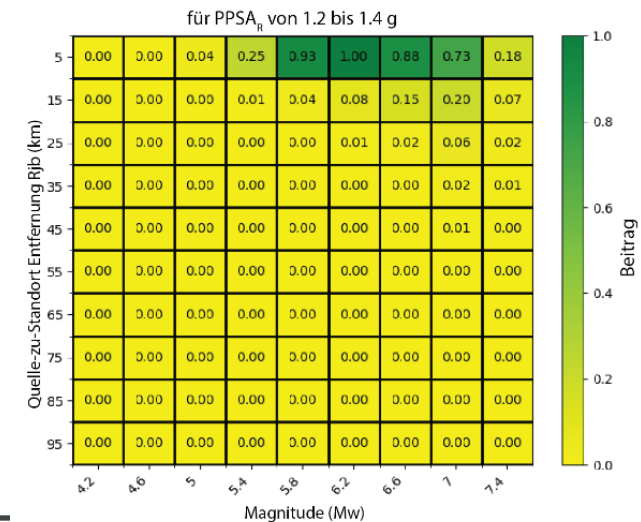
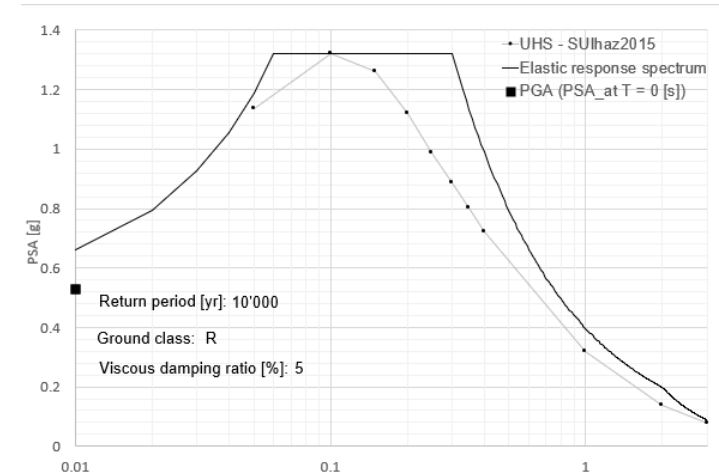


# ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES SÉISMES DU 6 FÉVRIER 2023, TREMBLEMENTS DE TERRE (M7.7 ET M7.6)

- Comparaison avec le spectre C3 : 10'000 [a.] pour un site en VS pour Class de sol R.



Bayraktar, et al. (2024)





# DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

## POINTS GÉNÉRAUX POUR LES REMBLAIS

---

- 5.3.1 Pour les **barrages en remblai de classe I**, les paramètres **statiques et dynamiques du sol doivent être déterminés par des essais in situ et/ou en laboratoire**. Des lois appropriées sur les matériaux permettant de décrire le comportement du barrage et des sols de fondation sous une charge dynamique doivent être appliquées.
- 5.3.2 [...] Le **degré d'amortissement supposé pour les barrages en remblai** doit être vérifié avec le niveau attendu de **déformation en cisaillement** dans le barrage et la fondation.
- 5.3.3 Pour les barrages en remblai des classes II et III, des paramètres des matériaux statiques peuvent être utilisés.
- 5.3.5 Pour les barrages en remblai, une distinction doit être faite entre le comportement des matériaux **drainés et non drainés**. Dans le cas de l'état non drainé, il convient notamment de prendre en compte la perte potentielle de résistance au cisaillement résultant de l'excès de pression de l'eau interstitielle.





# ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

## CRITÈRES GÉNÉRAUX

---

- 5.3.8.4. En général, les matériaux qui répondent à au moins un des critères suivants sont considérés comme peu susceptibles de présenter un potentiel de liquéfaction:
  - matériaux à faible degré de saturation,
  - matériaux avec  $D_{10} > 2$  mm et densité relative  $D_r > 50\%$ ,
  - matériaux avec  $D_{70} < 0.063$  mm et indice de plasticité (PI)  $> 25\%$
  - matériaux ayant une densité relative  $D_r > 75\%$ .
- Toutefois, si, malgré le respect des critères susmentionnés, le potentiel de liquéfaction ne peut être exclu de manière concluante, des investigations détaillées sont nécessaires.



# ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

## ÉVALUATION DÉTAILLÉE

---

- 5.3.8.5. Le potentiel de liquéfaction est généralement identifié par des corrélations entre la **sévérité de la charge cyclique** pendant un tremblement de terre et les résultats d'essais in situ qui fournissent un indice de **densité relative**. Ces essais, tels que l'essai de pénétration standard (**SPT**) ou l'essai de pénétration au cône (**CPT**), permettent de déterminer la densité relative du sol et sa résistance à la liquéfaction. La relation entre les contraintes cycliques dues aux événements sismiques et la densité est cruciale pour évaluer le potentiel de liquéfaction d'un barrage donné.
- 5.3.8.6. Le potentiel de liquéfaction peut également être évalué quantitativement en combinant les méthodes suivantes:
  - Essais en laboratoire, par exemple essais **triaxiaux dynamiques**.
  - **Modélisation par éléments finis** avec des modèles constitutifs qui peuvent représenter de manière adéquate le phénomène de génération d'une pression d'eau interstitielle excessive et de liquéfaction. Les paramètres du modèle constitutif doivent être calibrés pour refléter le comportement hydromécanique des couches de sol en question.



# ANALYSE

## BARRAGES EN REMBLAI DE CLASSE III OUVRAGES D'ACCUMULATION

---

- **6.3.4.3.1.** Pour les ouvrages d'accumulation de classe III: les méthodes d'analyse possibles sont divisées en deux sous-classes:
  - a. Analyse des blocs de glissement à l'aide de méthodes empiriques applicables ou de modèles de corrélation basés sur l'analyse. Cette approche s'applique à:
    - i. Toutes les digues de protection contre les dangers naturels;
    - ii. Barrages qui remplissent toutes les conditions suivantes: 1)  $PPSA_R < 0.35$  g, 2) le barrage ne présente aucun signe d'endommagement important pour la sécurité, 3) le barrage satisfait aux exigences de sécurité statique, c'est-à-dire au cas de charge normal (type 1), comme indiqué dans la partie C1 de la directive, et 4) les vérifications de sécurité en cas de crue, comme indiqué dans la partie C2 de la directive, sont remplies.
  - b. Analyse temporelle à l'aide de la méthode linéaire équivalente intégrée à l'analyse par la méthode des blocs de glissement. La génération d'une pression d'eau interstitielle excessive doit être prise en compte à l'aide de modèles simplifiés. Cette approche s'applique à tous les autres barrages en remblai de classe III qui ne satisfont pas aux conditions du paragraphe 6.3.4.3.1.a.



# ANALYSE

## BARRAGES EN REMBLAI DE CLASSE II OUVRAGES D'ACCUMULATION

---

- **6.3.4.3.2.** Pour les ouvrages d'accumulation de classe II: Analyse temporelle à l'aide de la méthode **linéaire équivalente** intégrée à l'analyse par la méthode des **blocs de glissement**. Les effets potentiels de la génération de pressions d'eau interstitielles excessives doivent être pris en compte.



# ANALYSE

## BARRAGES EN REMBLAI DE CLASSE I OUVRAGES D'ACCUMULATION

---

- **6.3.4.3.3.** Pour les ouvrages d'accumulation de classe I: Analyse temporelle à l'aide de la méthode **linéaire équivalente** intégrée à l'analyse par la méthode des **blocs de glissement**. Les effets potentiels de la génération de pressions d'eau interstitielles excessives doivent être pris en compte.
  
- Si les deux conditions suivantes ne sont pas remplies, une analyse dynamique **non linéaire de la déformation (analyse temporelle)** utilisant des modèles constitutifs hydromécaniques capables de modéliser la génération et la dissipation des surpressions d'eau interstitielle doit également être effectuée:
  - i. **Aucun excès de pression positive de l'eau interstitielle** dans le corps du barrage et dans la fondation n'est attendu pendant le tremblement de terre.
  - ii. La **déformation cyclique** moyenne due à la charge sismique reste **inférieure à 0.4%**.



# ANALYSE AUTRES PRINCIPES

---

- 6.3.4.3.4. Dans l'analyse temporelle à l'aide de la méthode linéaire équivalente intégrée à l'analyse par la méthode des blocs de glissement, **des analyses de sensibilité avec des limites supérieures et inférieures** pour les propriétés des matériaux doivent être utilisées pour tenir compte des incertitudes.
- 6.3.4.3.5. Dans l'analyse des blocs de glissement, la composante horizontale de l'accélération agissant au centre de gravité de la masse glissante peut être utilisée; **les effets de la composante verticale peuvent être négligés.**
- 6.3.4.3.6. Dans le cas d'une modélisation utilisant une analyse dynamique non linéaire de la déformation (analyse temporelle), les paramètres des modèles constitutifs intégrés doivent être calibrés sur la base d'essais en laboratoire et/ou in situ. Les incertitudes liées aux paramètres doivent être déterminées et prises en compte. Il est recommandé de vérifier la performance du modèle numérique par rapport à des modèles physiques existants ou à des cas pertinents et bien documentés tirés de la littérature. **En outre, les résultats de l'analyse temporelle à l'aide de la méthode linéaire équivalente intégrée avec les effets de la génération de pressions d'eau interstitielles excessives doivent servir de référence pour la comparaison.**



# INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

## TASSEMENT PERMANENT DE LA CRÊTE

---

- 6.8.2.3. Les tassements permanents acceptables en crête, dus aux effets combinés de la densification, de la consolidation et de la formation de surfaces de glissement sous l'effet de l'action sismique, ne doivent pas dépasser 25% de la revanche de sécurité définie au paragraphe 2.3.2. de la partie C2 de la directive: Sécurité contre les inondations et abaissement du niveau d'eau du réservoir.





# INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

## POTENTIEL D'ÉROSION INTERNE

---

- 6.8.2.6. Pour **les barrages en remblai avec noyau**, le potentiel d'érosion interne après déformation permanente peut être exclu si les conditions suivantes sont remplies:
  - i. Entre les différentes zones du barrage, la fonctionnalité du filtre est toujours assurée.
  - ii. Le noyau est encore suffisamment recouvert et est constitué d'un matériau qui peut supporter les déformations imposées sans changement significatif de sa perméabilité.
  - iii. L'épaisseur résiduelle des couches filtrantes et drainantes à l'état déformé est au moins égale à la moitié de l'épaisseur à l'état non déformé.



# INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

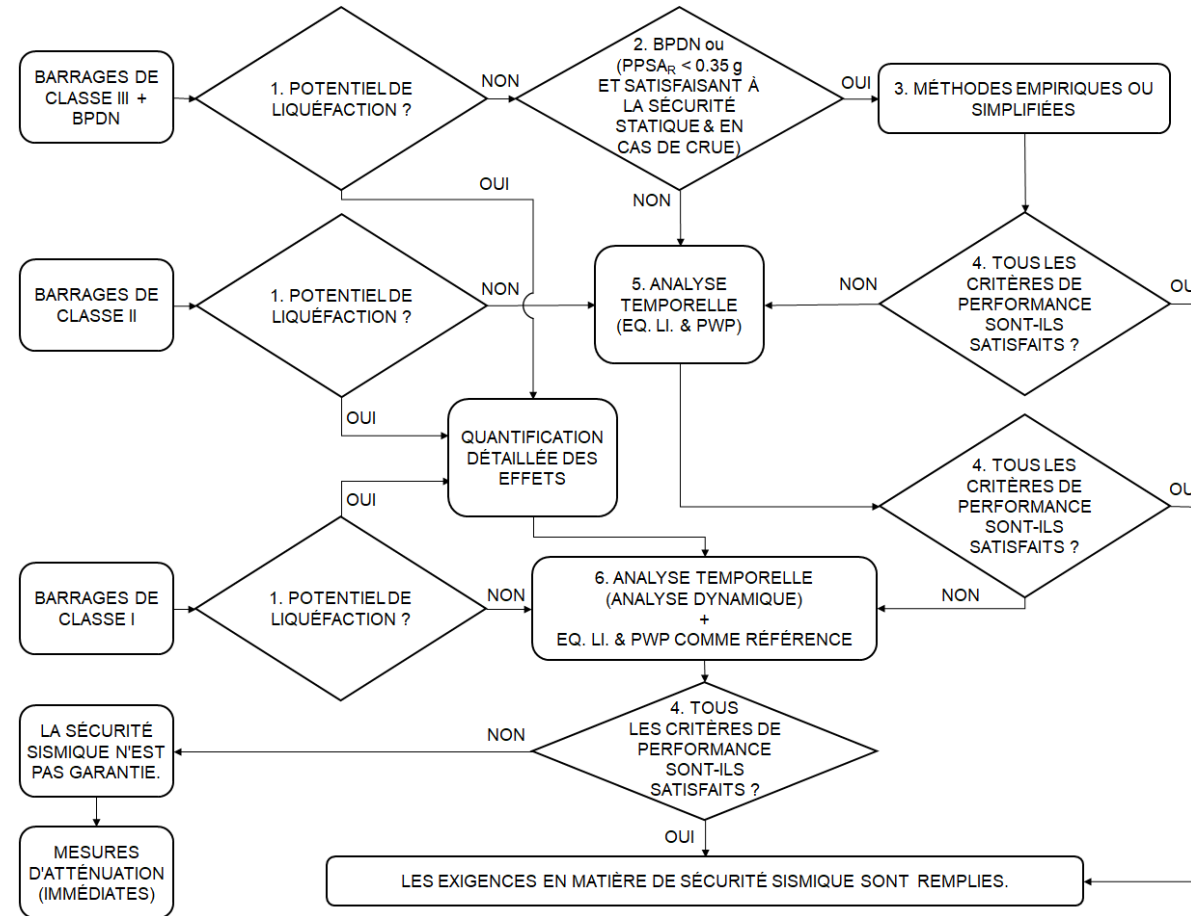
## POTENTIEL D'ÉROSION INTERNE

---

- 6.8.2.7. Pour les **barrages en remblai avec un masque d'étanchéité** en amont, les aspects suivants doivent être vérifiés:
  - i. L'intégrité du masque d'étanchéité doit être évaluée.
  - ii. Si des dommages au masque d'étanchéité ne peuvent être exclus, les risques qui en résultent, tels que l'érosion interne et les changements de stabilité dus à la formation potentielle d'une surface d'infiltration dans le corps du barrage, doivent être évalués.
  - iii. L'épaisseur résiduelle des couches filtrantes et drainantes sous le masque d'étanchéité à l'état déformé doit être au moins égale à la moitié de l'épaisseur initiale à l'état non déformé.
  - iv. Entre les différentes zones du barrage, la fonctionnalité du filtre est toujours assurée.



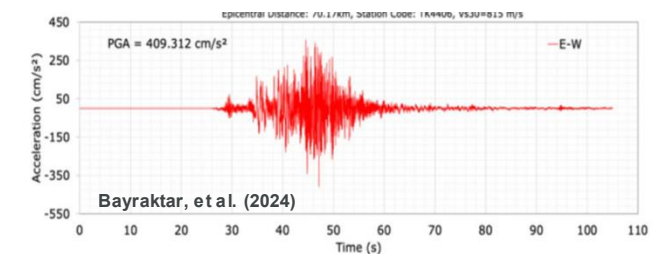
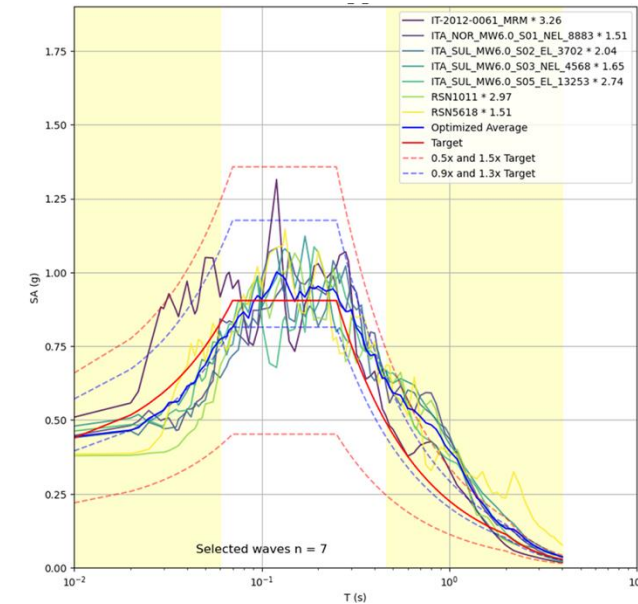
# INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS LOGIGRAMME POUR LA VÉRIFICATION





# PRINCIPES SPÉCIFIQUES CONCERNANT LES ACCÉLÉROGRAMMES

- L'OFEN fournit un ensemble de 7 traces temporelles de l'accélération avec trois composantes
- La durée significative et l'intensité d'Aria de chaque trace et de l'ensemble satisfont aux exigences énoncées au § 4.3.5.
- La moyenne géométrique des deux composantes horizontales est compatible avec le spectre normative.
- Pour les simulations 2D, la composante horizontale la plus défavorable doit être utilisée (la compatibilité de ces composantes doit être contrôlée séparément - le cas échéant, les traces temporelles doivent être remises à l'échelle).
- Pour les enregistrements de séismes très longs, il est possible de "couper" les traces temporelles, mais il faut justifier que la section coupée n'a aucune influence sur les résultats finaux.



# DOCUMENT D'AIDE TECHNIQUE

## OBJECTIFS

---

- Objectif 1 : Méthodes analytiques et empiriques d'évaluation de la sécurité sismique des remblais en cas de séisme
- Objectif 2 : méthodes linéaires équivalentes combinées avec le glissement des blocs
- Objectif 3 : méthodes de modélisation numérique dynamique non linéaire
- Objectif 4 : lois des matériaux, détermination des paramètres et étalonnage
- Objectif 5 : exemples progressifs selon l'état de la technique et sur la base de la directive partie C3 de l'OFEN





# MERCI DE VOTRE ATTENTION

---



Amin Askarinejad  
Spécialiste de la surveillance des barrages

DETEC OFEN TS

[amin.askarinejad@bfe.admin.ch](mailto:amin.askarinejad@bfe.admin.ch)

energieplus.com