



Directive relative à la sécurité des ouvrages d'accumulation

Partie C3: sécurité aux séismes

La dernière version remplace les précédentes versions

Version	Modification	Date
2.0	Révision totale de la directive de l'OFEG de 2002 et de la documentation de base pour la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes (mars 2003)	1.2.2016



Impressum

Publication

Office fédéral de l'énergie, section Surveillance des barrages, 3003 Berne

Elaboration

Groupe de travail révision de la directive, partie C3 :

- P. Brenner, Weinfelden
- D. Fäh, Schweizerischer Erdbebendienst SED
- S. Malla, Axpo Power AG
- P. Obernhuber, VERBUND Hydro Power GmbH
- R. Panduri, Office fédéral de l'énergie OFEN
- R. Radogna, Ofima SA
- M. Schwager, Office fédéral de l'énergie OFEN
- T. Weber, STUDER ENGINEERING GmbH
- M. Wieland, Présidence du comité ICOLD sur les aspects sismiques des projets de barrages

Contrôle

Groupe en charge de la révision de la directive :

- A. Baumer, Comité suisse des barrages CSB
- R. Boes, ETH Zürich, Institut für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW
- G. Darbre, Office fédéral de l'énergie OFEN
- S. Gerber, Office fédéral de l'énergie OFEN
- H. Meusburger, Conférence suisse des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement DTAP
- T. Oswald, Office fédéral de l'énergie OFEN
- B. Otto, Association suisse pour l'aménagement des eaux ASAE
- R. Panduri, Office fédéral de l'énergie OFEN
- M. Perraudin, Association des entreprises électriques suisses AES
- A. Schleiss, EPF Lausanne, Laboratoire de constructions hydrauliques LCH
- A. Truffer, Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie EnDK

Document adopté par la direction de l'OFEN le 1 décembre 2015.

Date

Première parution (version 2.0): 1 février 2016



Sommaire de la partie C3

1. Introduction	4
1.1. Nécessité de la vérification de la sécurité aux séismes	4
1.2. Vérification simplifiée de la sécurité aux séismes pour les petits ouvrages d'accumulation	4
2. Comportements recherchés et vérifications	4
2.1. Comportement général recherché pour l'ouvrage d'accumulation	4
2.2. Comportements recherchés pour les ouvrages annexes	5
2.3. Comportements recherchés pour le réservoir	5
3. Classes d'ouvrages d'accumulation	6
3.1. Classification générale dans les classes d'ouvrages d'accumulation	6
3.2. Ouvrages d'accumulation servant à la protection contre les dangers naturels	7
3.3. Digués latérales des barrages mobiles	7
4. Sollicitations	7
4.1. Généralités	7
4.2. Sollicitation sismique	7
4.3. Remarques concernant les murs et les barrages mobiles	8
4.4. Remarques concernant les barrages en remblai	8
5. Valeurs caractéristiques des matériaux	8
5.1. Généralités	8
5.2. Remarques concernant les murs et les barrages mobiles	9
5.3. Remarques concernant les barrages en remblai	9
6. Méthode de vérification	11
6.1. Généralités	11
6.2. Remarques concernant les barrages poids et les barrages mobiles	12
6.3. Remarques concernant les barrages-voûtes	14
6.4. Remarques concernant les barrages en remblai	15
7. Particularités et exceptions	17
7.1. Vérification simplifiée de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes pour les petits barrages poids	17
7.2. Vérification simplifiée de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes pour les petits barrages en remblai	18
7.3. Sécurité après le séisme	19
7.4. Failles actives	19
8. Récapitulatif des exigences spécifiques aux classes	20
9. Bibliographie	21



1. Introduction

1.1. Nécessité de la vérification de la sécurité aux séismes

Une vérification de la sécurité aux séismes est nécessaire pour tous les ouvrages d'accumulation notamment:

- en cas de nouvelle construction ou de transformations dans le cadre d'une procédure d'approbation des plans;
- pour les ouvrages d'accumulation existants, lorsqu'il n'y a pas encore eu de vérification de la sécurité aux séismes;
- lorsque cela est nécessaire pour tenir compte des modifications de l'état de la science et de la technique;
- lorsque cela est nécessaire pour tenir compte de modifications dans les hypothèses d'une précédente vérification de la sécurité aux séismes.

Les vérifications réalisées avec succès jusqu'ici conformément à la méthodologie de la documentation de base pour la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes [OFEG, 2003a] sont également considérées comme réalisées compte tenu des exigences de la présente partie de la directive.

1.2. Vérification simplifiée de la sécurité aux séismes pour les petits ouvrages d'accumulation

Si les conditions visées au point 7.1 ou 7.2 sont remplies, la vérification de la sécurité aux séismes des ouvrages de retenue des petits ouvrages d'accumulation peut se faire sous une forme simplifiée conformément aux dispositions de ces points.

2. Comportements recherchés et vérifications

2.1. Comportement général recherché pour l'ouvrage d'accumulation

Le but de la vérification de la sécurité d'un ouvrage d'accumulation aux séismes est de démontrer que toute rupture conduisant à un écoulement non contrôlé de l'eau due aux sollicitations d'un séisme peut être exclue.

Des dégâts ainsi que des déformations permanentes ne mettant pas en péril la sécurité de l'ouvrage sont tolérables.

L'action sismique à appliquer est précisée au point 4.2.

La préservation du bon fonctionnement de l'ouvrage d'accumulation après le séisme n'est pas un objectif recherché au sens de la sécurité des ouvrages d'accumulation.



2.2. Comportements recherchés pour les ouvrages annexes

Afin de satisfaire au comportement recherché en cas d'action sismique, il faut démontrer ce qui suit concernant la sécurité aux séismes des ouvrages annexes relevant de la sécurité:

- Les organes de décharge et de vidange ne sont pas endommagés au niveau de leur structure au point qu'il puisse en résulter un écoulement non contrôlé de l'eau;
- Comment la vidange du réservoir ainsi que l'évacuation de l'eau en cas de crues réduites (définition ressortant de la partie C2¹⁾, sécurité en cas de crue) est encore possible immédiatement après l'action sismique avec l'aide des organes de décharge et de vidange ou d'une autre manière;
- Le bon fonctionnement de l'instrumentation qui est indispensable pour mettre en évidence une défaillance imminente est assuré après l'action sismique ou peut être rapidement rétabli; l'identification de cette instrumentation fait partie de la vérification de la sécurité aux séismes.

Le comportement d'autres ouvrages annexes (p. ex. prises d'eau) doit être pris en compte dans les réflexions dans la mesure où la défaillance de ces ouvrages annexes en cas d'action sismique pourrait compromettre la sécurité de l'ouvrage d'accumulation.

2.3. Comportements recherchés pour le réservoir

Afin de satisfaire au comportement recherché en cas d'action sismique, il faut démontrer que suite à des mouvements de terrain dans le secteur du réservoir, la sécurité de l'ouvrage de retenue, des ouvrages annexes relevant de la sécurité et de la zone en aval de l'ouvrage d'accumulation (par suite d'un débordement de masses d'eau) n'est pas compromise.

Il faut notamment considérer comme des mouvements de terrain potentiels dus à un séisme les glissements de terrain, le glissement des berges instables, les éboulements, les chutes de blocs et les chutes de séracs.

¹⁾ La partie C2 de la directive révisée, qui traite des crues, n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, la valeur de crue réduite à appliquer doit être fixée en accord avec l'autorité de surveillance compétente



3. Classes d'ouvrages d'accumulation

3.1. Classification générale dans les classes d'ouvrages d'accumulation

Afin de vérifier la sécurité aux séismes, les différents ouvrages d'accumulation sont répartis dans 3 classes qui sont soumises à des exigences différentes.

Les critères de répartition dans les classes sont les suivants:

- Les ouvrages d'accumulation de la classe I sont ceux qui satisfont aux critères de l'art. 18, al. 1, let. a ou let. b OSOA.
- Les ouvrages d'accumulation de la classe II sont ceux qui présentent une hauteur de retenue supérieure ou égale à 5 m, qui satisfont au critère de taille de l'art. 3, al. 2 LOA et qui ne sont pas affectés à la classe I.
- Les ouvrages d'accumulation de la classe III sont ceux qui ne satisfont pas au critère de taille de l'art. 3, al. 2 LOA ou qui présentent une hauteur de retenue jusqu'à 5 m.

Les classes d'ouvrages d'accumulation sont représentées sous forme graphique à la figure 1 selon la hauteur de retenue et le volume de retenue, conformément aux définitions correspondantes de la partie A.

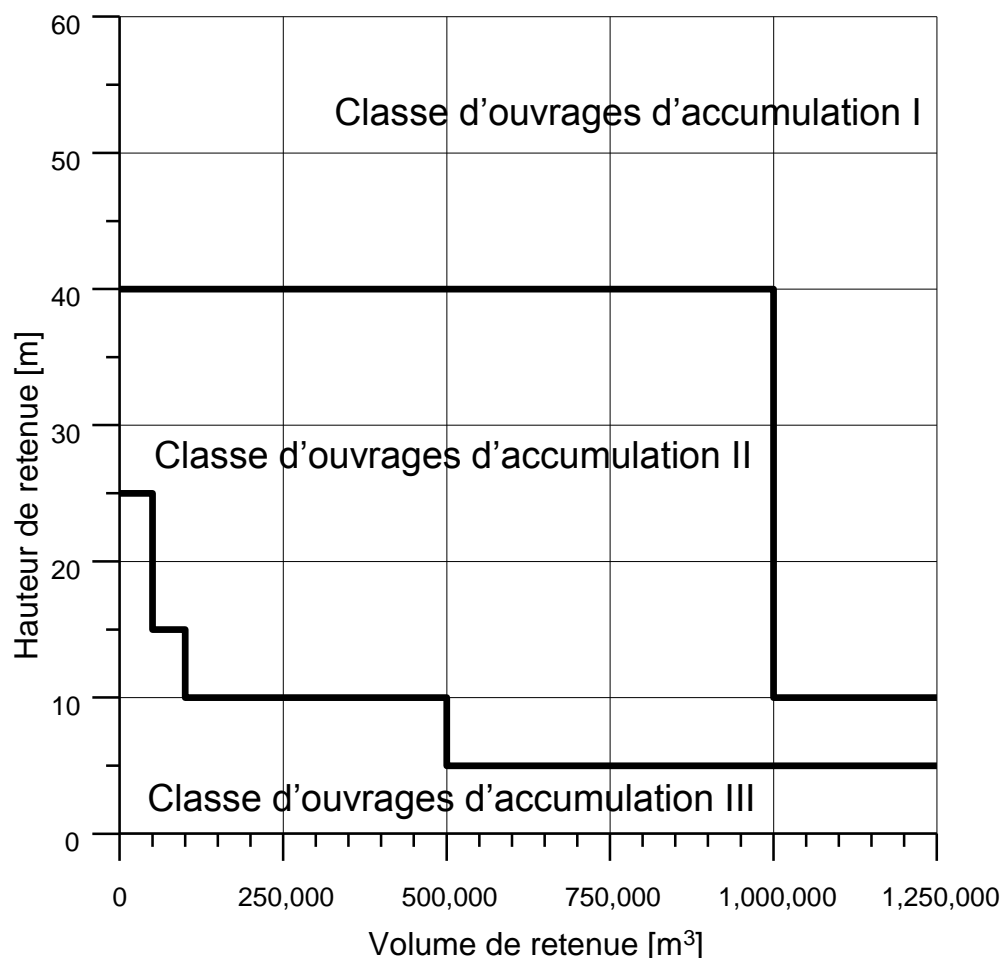


Figure 1: Définition des 3 différentes classes d'ouvrages d'accumulation



3.2. Ouvrages d'accumulation servant à la protection contre les dangers naturels

Les ouvrages d'accumulation servant à la protection contre les dangers naturels et qui ne retiennent qu'exceptionnellement de l'eau sont assignés à la classe III, indépendamment de leur hauteur de retenue et de leur volume de retenue.

3.3. Digués latérales des barrages mobiles

Les digues latérales des barrages mobiles sont assignées à la classe III, sous réserve d'autres exigences plus strictes de l'autorité de surveillance, de l'autorité concédante ou d'autorités tierces.

4. Sollicitations

4.1. Généralités

La sollicitation sismique devant être appliquée conformément au point 4.2 est une sollicitation extrême qui doit être combinée avec les cas de charge normaux ressortant de la partie C1²⁾. Les déformations et les sollicitations résultant des actions statiques constituent les conditions initiales de l'analyse sismique.

En général, l'étude du cas avec retenue pleine est suffisante pour la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes. Le niveau admis correspond au niveau déterminant pour la hauteur de retenue conformément à la partie A. Si un remplissage partiel peut entraîner un comportement plus défavorable de l'ouvrage en cas de sollicitation sismique, il est nécessaire d'évaluer et de vérifier également la situation en cas de remplissage partiel.

4.2. Sollicitation sismique

Pour vérifier la sécurité des ouvrages d'accumulation existants aux séismes, on peut appliquer une sollicitation sismique conformément à la documentation de base pour la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes [OFEG, 2003a] (partie B – Séisme de vérification). Pour vérifier la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes dans le cadre d'une demande d'approbation des plans, la sollicitation sismique à appliquer doit être fixée en accord avec l'autorité de surveillance compétente³⁾.

²⁾ La partie C1 de la directive révisée – qui présente les combinaisons de charges et les coefficients de sécurité – n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, les combinaisons de charges visées aux tableaux 3, 4 et 5 de la documentation de base «Documentation de base relative à la sécurité structurale» [OFEG, 2002] s'appliquent.

³⁾ Le 1^{er} septembre 2015, le Service sismologique suisse (SSS) a publié le modèle d'aléa sismique 2015 de la Suisse. L'OFEN examine actuellement si ce nouveau modèle doit être repris dans la directive révisée.



4.3. Remarques concernant les murs et les barrages mobiles

Il faut tenir compte de l'effet dynamique de l'eau de la retenue (voir points 6.2 et 6.3).

La sous-pression agissant au contact entre le barrage et la fondation ou entre des surfaces de rupture dans la fondation doit être prise en compte dans le cadre de la vérification de la stabilité en cas de sollicitation sismique de la même manière que dans le cas statique. En l'absence de valeurs confirmées par mesures, et en l'absence de voile d'injection ou d'autre perturbation hydrogéologique, on peut admettre une répartition de sous-pression linéaire entre l'amont et l'aval.

Si l'on peut escompter une modification de la sous-pression en raison de la sollicitation sismique, la stabilité après le séisme doit être vérifiée en tenant compte de ces conditions modifiées.

4.4. Remarques concernant les barrages en remblai

L'effet hydrodynamique de l'eau de la retenue peut être négligé pour les barrages en remblai. Une éventuelle élévation de la pression interstitielle suite à la sollicitation sismique doit être prise en compte.

5. Valeurs caractéristiques des matériaux

(Remarque: Ce chapitre sera éventuellement remanié après la publication de la partie C1 de la directive.)

5.1. Généralités

Pour vérifier la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes, il faut prendre en considération l'incertitude au niveau des paramètres des matériaux conformément aux principes de la partie C1⁴⁾.

Les paramètres nécessaires des matériaux doivent en général être déterminés grâce à des essais en laboratoire et sur le terrain. A cet égard, il est nécessaire de choisir des essais représentatifs pour les paramètres des matériaux. Les résultats d'essais réalisés pendant la construction peuvent être utilisés. En l'absence de tels résultats ou s'ils sont insuffisants, il faut effectuer de nouveaux essais.

Les paramètres des matériaux peuvent également être calculés à partir d'observations de mesures sur l'ouvrage, s'il peut être démontré que le calcul inverse est apte à déterminer les paramètres nécessaires.

Pour les ouvrages d'accumulation existants de la classe III, les paramètres des matériaux peuvent être évalués en se servant de valeurs issues de la littérature ou de données de constructions comparables. Si les valeurs de résistance sont évaluées ainsi, elles doivent

⁴⁾ La partie C1 de la directive révisée n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, les principes de la «Documentation de base relative à la sécurité structurale» [OFEG, 2002] s'appliquent.



être réduites d'un facteur 1,2, la cohésion (réelle) devant être réduite d'un facteur 2,0 (voir aussi [OFEN, 2014]).

Concernant le sol de fondation et ses caractéristiques géotechniques, des remarques analogues à celles pour la détermination des paramètres des matériaux s'appliquent.

5.2. Remarques concernant les murs et les barrages mobiles

Le poids volumique du béton doit être déterminé par mesures ou il faut admettre une valeur prudente pour chaque étape de vérification.

La résistance du béton à la traction statique f_{ts} (en MPa) peut être évaluée pour les ouvrages d'accumulation de la classe III en fonction de la résistance à la compression statique f_{cs} (en MPa), sur la base de la relation $f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}$, la valeur utilisée pour f_{ts} en se basant sur cette évaluation ne devant pas dépasser 3 MPa.

Les valeurs de résistance dynamique du béton peuvent être évaluées de manière empirique en augmentant de 30% les valeurs statiques correspondantes. Le module d'élasticité dynamique du béton peut être évalué en augmentant de 25% le module statique.

Pour la vérification de la sécurité au glissement le long de la surface d'appui du barrage, on peut utiliser les valeurs statiques de la résistance au cisaillement.

La valeur d'amortissement du béton non armé peut être admise à 5% en cas d'analyses viscoélastiques linéaires.

5.3. Remarques concernant les barrages en remblai

Pour les ouvrages d'accumulation de la classe I, il faut déterminer des valeurs caractéristiques statiques et dynamiques du remblai en réalisant des essais. Il faut prendre en compte une loi de comportement des matériaux adaptée pour décrire le comportement du remblai en cas de sollicitation cyclique. En général, un calcul avec des valeurs caractéristiques linéaires équivalentes est suffisant.

Pour les ouvrages d'accumulation des classes II et III, des valeurs caractéristiques statiques suffisent selon la méthode de vérification précisée au point 6.

Lorsqu'il faut s'attendre à un comportement entièrement drainé, l'analyse sera effectuée en contraintes effectives. Dans ce cas, les principes suivants s'appliquent :

- En général, la résistance au cisaillement résiduelle doit être considérée, sauf si l'adoucissement (softening) est pris en compte dans la loi de comportement des matériaux.
- En règle générale, aucune cohésion ne sera introduite, sauf si elle peut être justifiée par des essais en laboratoire. A cet égard, il faut démontrer que les essais ont été réalisés dans des conditions reproduisant un sol entièrement drainé ainsi qu'un niveau de contraintes correspondant à celui prévalant dans le remblai.



Lorsqu'il faut s'attendre à un comportement non drainé (ou partiellement drainé), l'analyse peut être effectuée en contraintes totales ou en contraintes effectives :

- En cas d'analyse en contraintes totales des digues des classes II et III, la résistance au cisaillement en état non drainé lors de sollicitations cycliques peut être admise comme 80% de la valeur statique correspondante [Makdisi-Seed, 1978] ; pour les digues de la classe I, il faut déterminer cette résistance dynamique en réalisant des essais.
- En cas d'analyse en contraintes effectives, il faut s'assurer que l'influence des surpressions interstitielles est représentée correctement par la loi de comportement des matériaux. La plausibilité de la résistance au cisaillement mobilisée en état non drainé doit être vérifiée.

Des sollicitations cycliques peuvent engendrer des surpressions interstitielles considérables dans le cas des sables fins en état saturé, notamment lorsque toutes les conditions suivantes sont remplies:

- La courbe granulométrique du matériau se situe entre 10 et 90% du poids à l'intérieur du domaine "2" de la figure 2;
- La pente C_u de la courbe granulométrique (coefficient d'uniformité d_{60} / d_{10}) est inférieure à 2;
- Le matériau est saturé;
- La compacité D_r est inférieure à 0,5.

Dans ce cas, l'influence des surpressions interstitielles causées par les sollicitations cycliques doit être considérée dans une analyse en contraintes effectives.

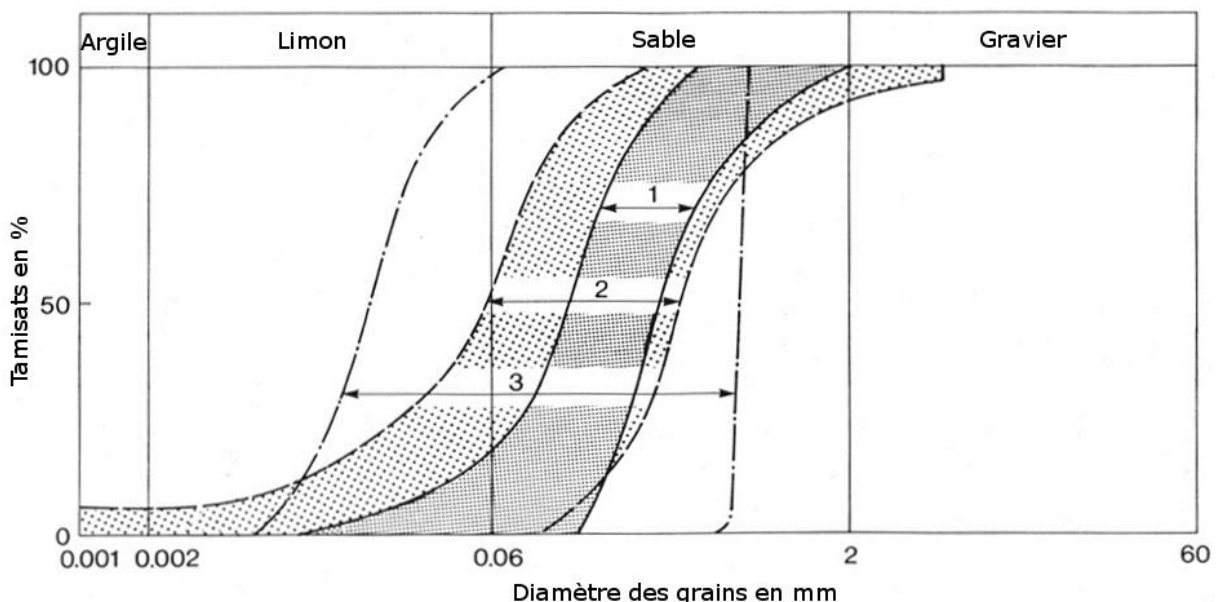


Figure 2: Domaines granulométriques de sols liquéfiables [Finn, 1972]



6. Méthode de vérification

6.1. Généralités

La procédure de vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes comprend en général les étapes suivantes:

Etape 1) Modélisation: la modélisation doit prendre en compte le sol de fondation, l'ouvrage de retenue et le bassin de retenue.
La configuration géologique et géotechnique du sol de fondation ainsi que les propriétés mécaniques de l'ouvrage de retenue et du sol de fondation doivent être déterminées.
Les particularités de l'ouvrage d'accumulation (comme p.ex. points faibles, programme d'injection et d'étapes de bétonnage lors de la construction ou des événements particuliers lors de la construction) doivent être pris en compte dans la modélisation, dans la mesure où elles peuvent avoir une influence déterminante sur la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes. Il faut également tenir compte des résultats de mesure de la surveillance régulière.

Etape 2) Analyse: le comportement de l'ouvrage d'accumulation pendant et après le séisme doit être analysé.
Lors de l'analyse du comportement pendant le séisme, les déformations et les dégâts permanents doivent être déterminés en tenant compte de la sollicitation sismique.
Lors de l'analyse du comportement après le séisme, les conséquences en résultant doivent être examinées. On tiendra notamment compte de possibles déformations, dégâts, surpressions interstitielles et modifications permanentes des conditions de sous-pression.

La procédure d'analyse du comportement pendant le séisme doit être choisie en fonction de la classe de l'ouvrage d'accumulation; les exigences minimales suivantes s'appliquent en général:

- Pour les ouvrages d'accumulation de la classe I: calcul dynamique avec évolution temporelle, avec un modèle d'éléments finis
- Pour les ouvrages d'accumulation de la classe II: méthode du spectre de réponse (resp. concernant les digues: méthode simplifiée du spectre de réponse en tenant compte de plusieurs formes modales)
- Pour les ouvrages d'accumulation de la classe III: procédure quasi-statique (resp. prise en compte de la première forme modale)

Etape 3) Interprétation et appréciation:
Le comportement pendant le séisme et le comportement après le séisme doivent être évalués conformément au point 2 concernant l'atteinte du comportement recherché.
Si d'éventuelles mesures sont prévues après un séisme, la sécurité des conditions en résultant doit également être évaluée en tant que partie intégrante de la



vérification de la sécurité aux séismes⁵⁾. Les coefficients de sécurité ressortant du point 7.3 s'appliquent.

- Etape 4) Procédure d'analyse affinée ou planification de mesures: si la sécurité aux séismes d'un ouvrage d'accumulation de la classe II ou III ne peut pas être vérifiée avec la procédure d'analyse correspondant à la classe de l'ouvrage, elle peut être vérifiée en suivant la procédure d'une classe inférieure. Si ce n'est pas non plus possible, des mesures constructives ou des mesures relatives à l'exploitation sont nécessaires.

6.2. Remarques concernant les barrages poids et les barrages mobiles

Modélisation:

L'influence dynamique de la retenue peut être prise en compte de manière simplifiée par le biais de masses d'eau entraînées couplées rigidement, par exemple selon [Westergaard, 1931]. Elles sont introduites comme masses ponctuelles dans le modèle et agissent perpendiculairement au parement amont de l'ouvrage.

Pour les barrages poids, une considération bidimensionnelle de la section transversale déterminante est en générale suffisante. Dans les vallées étroites ou en cas de conditions de fondations variables, il faut considérer plusieurs sections transversales et une considération tridimensionnelle peut s'avérer nécessaire. Il faut porter une attention particulière aux zones d'appuis.

Pour les barrages mobiles, un modèle tridimensionnel est généralement nécessaire. Il comprend au moins un pilier et la moitié des ouvertures (passes) adjacentes. Si des éléments de l'ouvrage (comme des ponts, des installations d'entraînement, etc..) ne sont pas pris en compte dans la modélisation, l'effet de ces éléments sur le comportement de l'ouvrage doit être présenté de manière compréhensible.

Ouvrages d'accumulation de la classe I:

- Le modèle d'éléments finis doit également comprendre le sol de fondation. Le sol de fondation peut être modélisé sans masse. Si le modèle prend en compte la masse du sol de fondation, il faut notamment veiller à la modélisation correcte des conditions de bord du modèle.

Ouvrages d'accumulation de la classe II:

- Le modèle doit également comprendre le sol de fondation, soit par modélisation avec des éléments finis comme pour la procédure concernant la classe I, soit par l'introduction d'une flexibilité équivalente du sol de fondation (ressorts).

Ouvrages d'accumulation de la classe III:

- Le sol de fondation peut être admis comme étant rigide.

⁵⁾ Si, par exemple, une baisse rapide du niveau de la retenue est prévue immédiatement après le séisme, il faut vérifier la sécurité de ce cas de charge après le séisme en tenant compte d'une éventuelle élévation de la pression interstitielle.



Analyse:

Pour les barrages poids, il suffit de prendre en compte une seule sollicitation sismique horizontale perpendiculaire à l'axe du mur. Dans le cas des barrages mobiles, il faut également prendre en considération la sollicitation en direction de l'axe du barrage et évaluer le comportement du barrage dans cette direction au moins avec un modèle simplifié. La sollicitation verticale doit être prise en compte comme décrit ci-dessous.

Il faut vérifier la sécurité au glissement le long de surfaces de glissement potentielles. S'il est tenu compte de la cohésion, la surface de contact doit être réduite en tenant compte d'éventuelles ouvertures de joints ou de fissures.

D'éventuels déplacements le long de surfaces de glissement potentielles peuvent être calculés à l'aide de la méthode Newmark [Newmark, 1965].

La vérification de la stabilité au basculement est satisfaite si la résultante des forces reste à tout moment dans la section et qu'une rupture locale peut être exclue. Si cette condition n'est pas remplie, il faut établir qu'en dépit du mouvement résultant, il est satisfait au comportement recherché à la section 2.

Ouvrages d'accumulation de la classe I:

- Il faut prendre en compte la sollicitation verticale.
- Il faut également vérifier les contraintes.

Ouvrages d'accumulation de la classe II:

- Il faut prendre en compte la sollicitation verticale.
- Il faut également vérifier les contraintes.

Ouvrages d'accumulation de la classe III:

- La sollicitation verticale peut être négligée.
- On peut renoncer à vérifier les contraintes.

Interprétation et appréciation:

Si on s'attend à des déplacements de glissement permanents après la sollicitation sismique, les points suivants doivent notamment être évalués:

- Eventuelle modification des sous-pressions, par exemple suite à des drainages ou à des éléments d'étanchéité endommagés ou cisailés dans le sol de fondation.
- Intégrité des éléments d'étanchéité de l'ouvrage.
- Dégâts et sollicitations concernant des éléments reliés à l'ouvrage (notamment galeries de décharge et d'évacuation et autres installations annexes).



6.3. Remarques concernant les barrages-voûtes

Modélisation:

L'influence dynamique de la retenue peut être prise en compte de manière simplifiée par le biais de masses d'eau entraînées couplées rigidement, par exemple selon [Westergaard, 1931]. Elles sont introduites comme masses ponctuelles dans le modèle et agissent perpendiculairement au parement amont de l'ouvrage.

Un modèle tridimensionnel est nécessaire.

Ouvrages d'accumulation de la classe I:

- Le modèle d'éléments finis doit également comprendre le sol de fondation. Le sol de fondation peut être modélisé sans masse. Si le modèle prend en compte la masse du sol de fondation, il faut notamment veiller à la modélisation correcte des conditions de bord du modèle.

La délimitation du modèle doit notamment présenter les dimensions minimales suivantes en fonction de la rigidité du béton du barrage et du sol de fondation (voir figure 3):

$$\begin{aligned} R_f &> 1,0 \cdot H && \text{pour } E_b / E_s = 1,0 \\ R_f &> 1,5 \cdot H && \text{pour } E_b / E_s = 0,5 \\ R_f &> 2,0 \cdot H && \text{pour } E_b / E_s = 0,25 \end{aligned}$$

E_s : Module d'élasticité du béton; E_b : Module d'élasticité du sol de fondation; H : hauteur de l'ouvrage; R_f : dimensions spatiales du modèle du sol de fondation

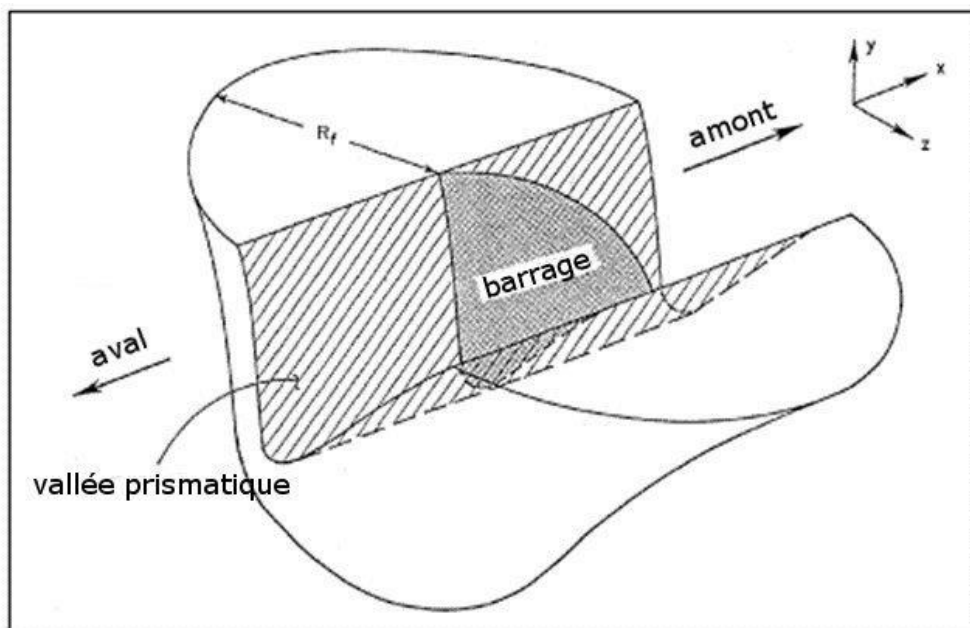


Figure 3: Délimitation du modèle



Ouvrages d'accumulation des classes II et III:

- Le modèle doit également comprendre le sol de fondation, soit par modélisation avec des éléments finis comme pour la procédure concernant la classe I, soit par l'introduction d'une flexibilité équivalente du sol de fondation (ressorts).

Analyse:

Outre les sollicitations dans deux directions horizontales, il faut aussi prendre en compte la sollicitation verticale, sauf pour les barrages-voûtes de la classe III.

En cas de sollicitations locales élevées, il faut prendre en compte la formation de fissures et d'ouvertures de joints. Les zones de la fondation et des appuis doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Interprétation et appréciation:

Lors de l'interprétation des résultats d'une analyse viscoélastique, notamment s'agissant des contraintes de traction calculées, il faut tenir compte des propriétés structurelles effectives (comme joints entre les blocs, éventuelle formation de fissures dans le barrage, etc.) ainsi que des possibles conséquences d'un dépassement de la résistance des matériaux. En cas de contraintes de traction calculées élevées en direction de l'arc, on doit notamment supposer qu'elles ne peuvent pas être transmises à travers les joints verticaux. La procédure suivante peut alors être suivie afin de réaliser une analyse plus approfondie:

- Il faut supposer une ouverture des joints dans les zones fortement sollicitées. Dans ces zones, la transmission des contraintes pendant le séisme n'intervient pas par l'effet d'arc, mais par effet de console des différents blocs.
- Le comportement de l'ouvrage fissuré resp. déstructuré (sollicitation, déformation, stabilité) suite à la sollicitation sismique doit ensuite être examiné.

6.4. Remarques concernant les barrages en remblai

Modélisation:

Pour les barrages en remblai, une considération bidimensionnelle de la section transversale déterminante est en général suffisante. Dans les vallées étroites ou en cas de conditions de fondations variables, il faut considérer plusieurs sections transversales. Il faut porter une attention particulière aux zones d'appuis.

Le sol de fondation d'une digue peut être admis comme étant rigide, en cas de différence de rigidité suffisante entre le matériau de la digue et la fondation.



Analyse:

Ouvrages d'accumulation de la classe I:

- Lors de l'analyse du comportement dynamique du corps de la digue, il faut prendre en compte la sollicitation verticale.
- Il est en général permis de dissocier le calcul des accélérations de celui des déformations permanentes.
- Les déformations permanentes peuvent être calculées avec la méthode de Newmark [Newmark, 1965]. Pour calculer les déplacements de glissement, les composantes verticales de l'accélération peuvent être négligées.

Ouvrages d'accumulation de la classe II:

- Lors de l'analyse du comportement dynamique du corps de la digue, il faut prendre en compte la sollicitation verticale.
- L'accélération dans le bloc de rupture déterminant, ainsi que d'éventuelles déformations permanentes peuvent p. ex. être estimées selon [Makdisi-Seed, 1978] ou [Bray-Travasrou, 2007].

Ouvrages d'accumulation de la classe III:

- La sollicitation verticale peut être négligée.
- Il est permis de supposer que l'accélération dans le bloc de rupture déterminant atteint 1,5 fois l'accélération maximale horizontale du sol.
- D'éventuelles déformations permanentes peuvent p. ex. être estimées selon [Makdisi-Seed, 1978] ou [Bray-Travasrou, 2007].

Interprétation et appréciation:

S'il faut s'attendre à des déformations permanentes après la sollicitation sismique, il convient d'évaluer notamment les points suivants:

- La revanche restante doit être suffisamment grande également dans un état déformé, de manière à ce que la sécurité de la digue puisse être assurée.
- L'érosion interne doit aussi pouvoir être exclue dans l'état déformé.
- Pour les digues avec masque amont, l'intégrité du masque doit être évaluée. S'il faut s'attendre à ce que le masque puisse être endommagé, les dangers en résultant pour la digue (comme érosion interne et modification des conditions de stabilité) doivent être évalués.
- Pour les digues avec noyau d'étanchéité le risque d'érosion interne après la déformation permanente peut être exclu lorsque les conditions suivantes sont respectées:
 - a) Les critères de filtre sont encore respectés entre les différentes zones de la digue.
 - b) Le noyau de la digue a encore une couverture suffisante et est composé de matériaux qui peuvent s'adapter aux déformations imposées sans changement significatif de leurs propriétés de perméabilité.
 - c) L'épaisseur résiduelle des couches de filtre et de drainage en état déformé est au moins égale à la moitié de l'épaisseur initiale en état non déformé.



7. Particularités et exceptions

7.1. Vérification simplifiée de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes pour les petits barrages poids

Si un petit barrage poids de la classe d'ouvrages d'accumulation III satisfait à tous les critères suivants, il est permis de supposer que la vérification de la sécurité aux séismes de l'ouvrage de retenue est satisfaite:

- L'accélération maximale horizontale du sol due à la sollicitation sismique au site n'est pas plus grande que l'accélération critique du sol calculée à partir de la figure 4 en fonction du coefficient statique de sécurité contre le glissement.
- Le coefficient de sécurité requis pour les cas de charge statiques normaux conformément à la partie C1⁶ est atteint et pour ces charges les contraintes à la surface de fondation restent en compression, c'est-à-dire la résultante des forces à prendre en considération reste dans le noyau de la section.
- Les vérifications statiques effectuées ne tiennent compte ni d'une éventuelle remontée de la surface d'appui contre l'aval ni d'une poussée de la terre à l'aval.
- La section du barrage poids est approximativement triangulaire.
- La largeur à la base de la surface d'appui n'est pas plus grande que 4/5 de la hauteur du mur.
- Le barrage poids n'est pas mis en eau à l'aval.
- Il peut être admis que les conditions de sous-pression ne changent pas en raison de la sollicitation sismique.

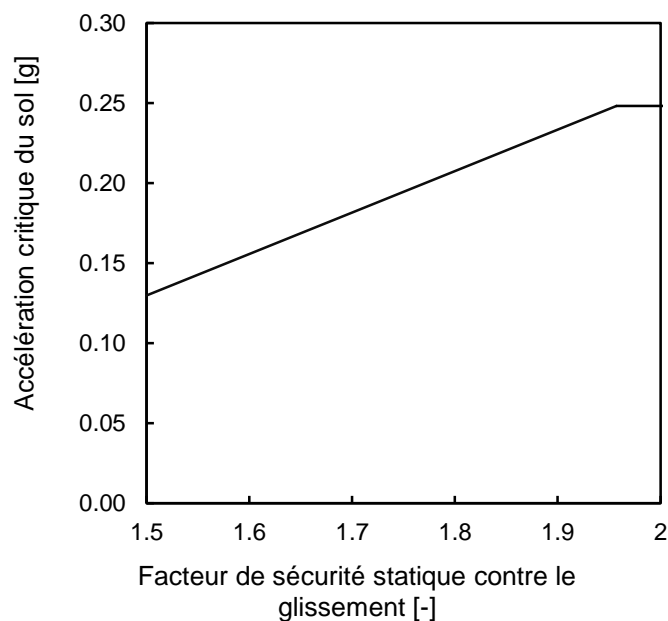


Figure 4: Accélération critique du sol en fonction du coefficient statique de sécurité contre le glissement

⁶⁾ La partie C1 de la directive révisée – qui présente les combinaisons de charges et les coefficients de sécurité – n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, le coefficient statique de sécurité de 1,5 visé aux tableaux 6 et 7 de la «Documentation de base relative à la sécurité structurale» [OFEG, 2002] s'applique pour les cas de charge normaux.



Il faut néanmoins démontrer que l'ouvrage d'accumulation satisfait au comportement recherché à la section 2. Il faut notamment vérifier que les exigences relatives aux installations annexes et au réservoir sont satisfaites.

7.2. Vérification simplifiée de la sécurité des ouvrages d'accumulation aux séismes pour les petits barrages en remblai

Si un petit barrage en remblai de la classe d'ouvrages d'accumulation III satisfait à tous les critères suivants, il est permis de supposer que la vérification de la sécurité aux séismes de l'ouvrage de retenue est satisfaite:

- L'accélération maximale horizontale du sol due à la sollicitation sismique au site n'est pas plus grande que l'accélération critique du sol calculée à partir de la figure 5 en fonction du coefficient statique de sécurité, de la pente du talus et de la saturation du talus:
 - Si le talus de la digue n'est pas saturé d'eau, la figure 5a s'applique dans l'hypothèse de conditions drainées.
 - Si le talus de la digue est saturé d'eau, la plus petite des deux accélérations critiques du sol calculées à partir des figures 5a et 5b est déterminante. La figure 5b tient compte de conditions non drainées par le biais d'une analyse de stabilité sous contraintes totales; le coefficient statique de sécurité à introduire doit donc être calculé pour la résistance au cisaillement en conditions non drainées à attendre en cas de séisme.
- Le coefficient de sécurité requis pour la stabilité de la pente dans des cas de charge statiques normaux conformément à la partie C1⁷ est atteint (à l'exception de blocs de rupture minces, superficiels).
- La pente du talus à l'amont n'est pas plus raide que la pente du talus à l'aval.
- Il ne faut pas s'attendre à une augmentation considérable de la pression interstitielle suite au séisme ni pour les matériaux composant la digue ni pour les fondations. L'évaluation est réalisée conformément à la section 5.3.
- Les déformations de la digue ne portent atteintes ni à l'étanchéité à court terme ni à celle à long terme de l'ouvrage après le séisme:
 - Il n'y a pas de masque amont ou d'éléments d'étanchéité rigides.
 - Il n'y a pas d'ouvertures ou d'éléments rigides pouvant occasionner la formation de fissures dans le corps de la digue et ainsi favoriser l'érosion interne.

⁷⁾ La partie C1 de la directive révisée – qui présente les combinaisons de charges et les coefficients de sécurité – n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, le coefficient statique de sécurité de 1,5 visé aux tableaux 6 et 7 de la «Documentation de base relative à la sécurité structurale» [OFEG, 2002] s'applique pour les cas de charge normaux.

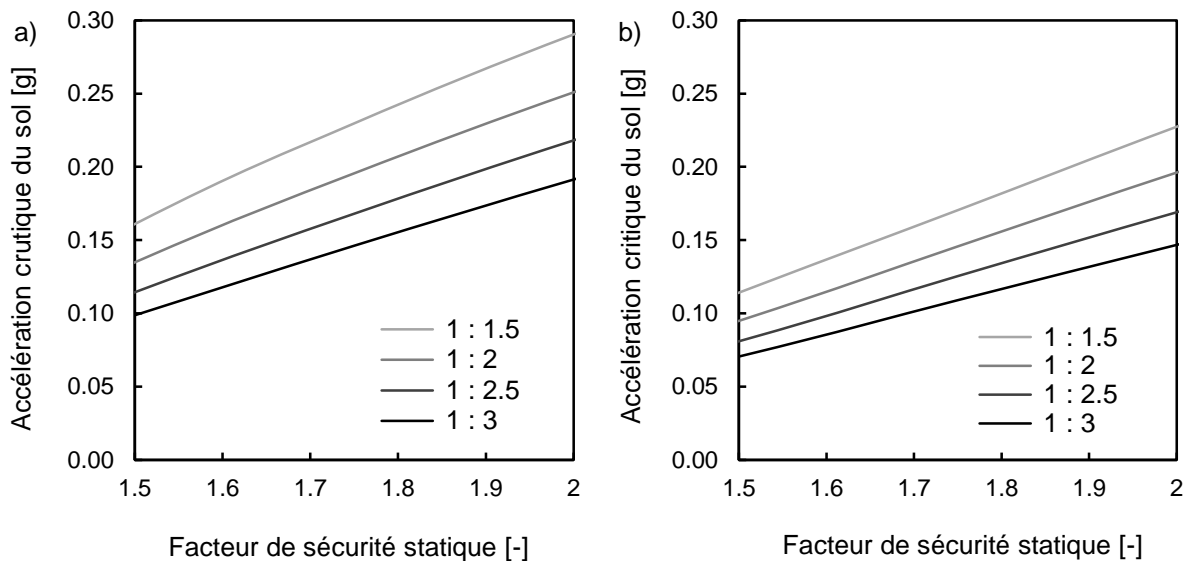


Figure 5: Accélération critique du sol en fonction du coefficient statique de sécurité pour la stabilité du talus et la pente du talus: a) en conditions drainées, b) en conditions non drainées.

Il faut néanmoins montrer que l'ouvrage d'accumulation satisfait au comportement recherché au point 2. Il faut notamment vérifier que les exigences relatives aux installations annexes et au réservoir sont satisfaites.

7.3. Sécurité après le séisme

A long terme resp. après d'éventuelles mesures nécessaires, la sécurité de l'ouvrage d'accumulation après la sollicitation sismique doit correspondre à la sécurité avant le séisme conformément à la partie C1⁸⁾.

A court terme, c'est-à-dire immédiatement après la sollicitation sismique jusqu'à la réalisation d'éventuelles mesures nécessaires, la sécurité ne doit pas descendre en dessous de 80% du coefficient de sécurité pour les cas de charge normaux et extraordinaires conformément à la partie C1⁸⁾. Les cas de charge extrêmes peuvent être ignorés pendant cette période. L'autorité de surveillance définit en l'espèce combien de temps cet état de sécurité réduite est admis.

7.4. Failles actives

En cas de faille active⁹⁾ répertoriée sur le site de l'ouvrage d'accumulation, des études spécifiques adaptées au cas concret doivent être réalisées.

⁸⁾ La partie C1 de la directive révisée – qui présente les combinaisons de charges et les coefficients de sécurité - n'a pas encore été publiée. Jusqu'à ce que tel soit le cas, les coefficients statiques de sécurité de 1,5 et 1,3 visés aux tableaux 6 et 7 de la «Documentation de base relative à la sécurité structurale» [OFEG, 2002] s'appliquent pour les cas de charge normaux et les cas de charge extraordinaires.

⁹⁾ Définition d'une faille active selon le bulletin n° 72 (1989) d'ICOLD: „A fault, reasonably identified and located, known to have produced historical fault movements or showing geologic evidence of Holocene (11000 years) displacements and which, because of its present tectonic setting, can undergo movement during the anticipated life of man-made structures.“



8. Récapitulatif des exigences spécifiques aux classes

Tableau 1: Récapitulatif des exigences minimales concernant la vérification de la sécurité aux séismes, dans la mesure où elles dépendent de la classe d'ouvrages d'accumulation.

Thème	Classe d'ouvrages d'accumulation		
	I	II	III
Période de retour des séismes	10 000 ans	5000 ans	1000 ans
Sollicitation verticale	Oui	Oui	Non
Paramètres des matériaux	Essais en laboratoire et in situ (aussi essais effectués lors de la construction), éventuellement calcul inverse à partir de mesures de comportement	Essais en laboratoire et in situ (aussi essais effectués lors de la construction), éventuellement calcul inverse à partir de mesures de comportement	Essais en laboratoire et in situ (aussi essais effectués lors de la construction), éventuellement calcul inverse à partir de mesures de comportement; pour les ouvrages existants aussi en se basant sur la littérature ou des ouvrages comparables
Résistance du béton à la traction statique	Essais spécifiques à l'ouvrage	Essais spécifiques à l'ouvrage	Essais spécifiques à l'ouvrage ou sur la base de la relation (MPa) $f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}$, f_{ts} max. 3 MPa
Valeurs caractéristiques dynamiques du sol	Essais spécifiques à l'ouvrage	Littérature ou ouvrages comparables	-
Modèle pour barrages poids	Modèle 2D d'éléments finis y comp. sol de fondation	Modèle 2D y comp. sol de fondation ou ressorts	Modèle 2D, sol de fondation rigide
Modèle pour barrages mobiles	Modèle 3D d'éléments finis y comp. sol de fondation	Modèle 3D y comp. sol de fondation ou ressorts	Modèle 3D, sol de fondation rigide
Modèle pour barrages-voûte	Modèle 3D d'éléments finis y comp. sol de fondation	Modèle 3D y comp. sol de fondation ou ressorts	Modèle 3D y comp. sol de fondation ou ressorts
Modèle pour barrages en remblai	Modèle 2D d'éléments finis	Modèle 2D	Modèle 2D
Procédure d'analyse générale	Calcul dynamique avec évolution temporelle	Méthode du spectre de réponse (resp. prise en compte de plusieurs valeurs propres)	Procédure quasi-statique (resp. prise en compte de la première valeur propre)
Accélération dans les blocs de glissement déterminants d'un barrage en remblai	Calcul à partir d'éléments finis avec évolution temporelle	Avec procédure simplifiée, avec l'aide du spectre de réponse	Simplifié par amplification de l'accélération maximale du sol avec le facteur 1,5
Vérification des contraintes des barrages poids et mobiles	Oui	Oui	Non



9. Bibliographie

OFEN, 2014: Internationale Übersicht über die Anforderungen an die Gleit- und Kippsicherheitsnachweise von Gewichtsmauern (en allemand), étude du Dr. Pius Oberhuber sur mandat de l'OFEN, avril 2014.

Bray-Travasariou, 2007: J.D. Bray, T. Travasarou; Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, pp. 381-392, 2007.

OFEG, 2002 Office fédéral des eaux et de la géologie; Sécurité des ouvrages d'accumulation, Documentation de base relative à la sécurité structurale, rapports de l'OFEG, série Eaux, Version 1.0, Bienne, 2002.

OFEG, 2003a: Office fédéral des eaux et de la géologie; Sécurité des ouvrages d'accumulation, Documentation de base pour la vérification des ouvrages d'accumulation aux séismes, rapports de l'OFEG, série Eaux, Version 1.2, Bienne, 2003.

OFEG, 2003b: Office fédéral des eaux et de la géologie; Sécurité des ouvrages d'accumulation, Directive pour la vérification aux séismes: Exemples d'application à des ouvrages de petite hauteur de retenue, rapports de l'OFEG, série Eaux, mars 2003.

Finn, 1972: W.D. Liam Finn; Soil dynamics and liquefaction of sand, *Proceedings of the International Conference on Microzonation for safer Construction-Research and Application*, Seattle, Wash, 1972.

Makdisi-Seed, 1978: F.I. Makdisi, H.B. Seed; Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. GT7, pp 849-867, 1978.

Newmark, 1965: N.M. Newmark; Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, No. 15(2), pp 139-160, 1965.

Westergaard, 1931: H.M. Westergaard; Water Pressures on Dams During Earthquakes, *American Society of Civil Engineers*, Paper No. 1835, November 1931.