



Directive sur la sécurité des ouvrages d'accumulation

Partie C1 : Dimensionnement et construction

Indication: Ce document est un pré tirage de la partie C1 de la directive relative à la sécurité des ouvrages d'accumulation, révision 2014 – 2016.

La dernière version remplace les versions précédentes

Version	Modification	Date
2.0	Révision totale de la directive de l'OFEG 2002	15.1.2017
2.1	Correction de la formule au chapitre 4.6.6.3	28.8.2017



Impressum

Publication

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

Élaboration

Groupe de travail révision de la directive, partie C1 :

M. Conrad	AF-Consult Switzerland AG, Comité suisse des barrages CSB
G. R. Darbre	Office fédéral de l'énergie OFEN
A. Fankhauser	Kraftwerke Oberhasli AG, KWO
J. M. Fasel	Norbert S.A.
R. M. Gunn	Office fédéral de l'énergie OFEN
M. Hoonakker	Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages, BETCGB, France
R. Panduri	Office fédéral de l'énergie OFEN
F. Vuilleumier	BG Ingénieurs Conseils S.A.

Contrôle

Groupe en charge de la révision de la directive :

A. Baumer	Comité suisse des barrages CSB
R. Boes	ETH Zürich, Versuchsanstalt 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 13 décembre 2016

Date

Première parution (Version 2.0) : 15 janvier 2017



Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Procédure applicable	5
2.1. Approbation des plans (Art. 6 LOA).....	5
2.2. Influence de constructions souterraines	6
2.3. Analyse de sécurité d'un ouvrage existant	6
3. Convention d'utilisation, base du projet et dossier de demande d'approbation des plans... 7	
3.1. Convention d'utilisation	7
3.2. Base du projet.....	7
3.3. Dossier de demande d'approbation des plans pour un projet de construction ou de transformation d'ouvrage	8
3.4. Tâches de l'autorité de surveillance dans le cadre de l'approbation d'un projet de construction ou de modification d'ouvrage	10
3.5. Réception des travaux de construction par l'autorité de surveillance (art. 9 al. 3 OSOA)	11
4. Sécurité structurale	11
4.1. Objet de la sécurité structurale.....	11
4.2. Vérification de l'intégrité structurale.....	12
4.3. Combinaisons d'actions	12
4.4. Description des actions individuelles.....	15
4.4.1. Poids propre	15
4.4.2. Poussée de l'eau.....	15
4.4.3. Sous-pressions	16
4.4.4. Pressions interstitielles.....	16
4.4.5. Variations de température du béton	16
4.4.6. Poussée des terres et recharge aval.....	17
4.4.7. Poussée des sédiments	17
4.4.8. Séisme.....	17
4.4.9. Poussée des glaces	17
4.4.10. Avalanche	18
4.4.11. Laves torrentielles.....	18
4.5. Autres actions individuelles.....	19
4.5.1. Ancrages.....	19
4.5.2. Charges roulantes.....	19
4.5.3. Choc de bateau.....	19
4.5.4. Gonflement du béton d'origine chimique	19
4.5.5. Fluage, retrait, relaxation et tassement	20
4.5.6. Chute d'aéronef sur un ouvrage de retenue	20
4.5.7. Superstructures.....	20
4.6. Critères d'intégrité structurale	20
4.6.1. Principes de base	20
4.6.2. Classes d'ouvrages.....	21
4.6.3. Détermination des caractéristiques des matériaux	22
4.6.4. Éléments de modélisation	23
4.6.5. Facteurs partiels de résistance	25
4.6.6. Stabilité d'ensemble	26
4.6.7. Résistance ultime de l'ouvrage de retenue.....	28
4.6.8. Zone de fondation	29
4.6.9. Stabilité des versants de la zone de retenue.....	29
5. Considérations constructives particulières	30
5.1. Végétation sur les barrages en remblai.....	30
5.2. Constructions sur les ouvrages en remblai.....	30



6. Protection contre les actes de sabotage (art. 6 al. 7 LOA)	31
7. Démantèlement d'ouvrage	31
8. Bibliographie	32

Liste d'annexes

Annexe 1 Procédure permettant de prévenir toute atteinte à la sécurité d'un ouvrage d'accumulation en cas de construction souterraine à proximité.....	33
Annexe 2 Exigences ("charges") caractéristiques à satisfaire avant, pendant ou à la fin des travaux.....	34
Annexe 3 Formes conventionnelles des diagrammes de sous-pressions.....	35
Annexe 4 Définition des trois classes d'ouvrages d'accumulation	36



1. Introduction

Cette partie C1 de la directive traite de tous les aspects relevant de la sécurité structurale des ouvrages d'accumulation (art. 5 et 6 LOA et chap. 2 sect. 1 OSOA) à l'exception des cas de charge spécifiques aux crues et aux organes de vidange (cf. partie C2 de la directive) et de ceux spécifiques aux séismes (cf. partie C3 de la directive). Elle s'applique à tous les types d'ouvrages, quels que soient leurs dimensions, leurs buts et l'exploitant, dans le cadre de

- l'élaboration d'un nouveau projet et la construction d'un nouvel ouvrage;
- la transformation d'un ouvrage existant;
- l'analyse de la sécurité d'un ouvrage existant.

La mise en œuvre des indications de cette partie de la directive doit être adaptée aux spécificités de l'ouvrage considéré dans les limites des dispositions légales de la LOA et de l'OSOA.

2. Procédure applicable

2.1. Approbation des plans (Art. 6 LOA)

La construction d'un nouvel ouvrage, la transformation d'un ouvrage existant et la réalisation de travaux de révision¹ nécessitent une approbation préalable de la part de l'autorité de surveillance pour les aspects relevant de la sécurité technique. Les documents relevant de la sécurité technique à remettre par le requérant dans le cadre de sa requête sont traités au chapitre 3.3.

Dans le sens d'une coordination des procédures, l'approbation proprement dite ("approbation des plans") est délivrée par l'autorité cantonale ou fédérale compétente lorsqu'une autorisation est requise sur la base d'une autre législation que la LOA (par exemple procédure cantonale d'autorisation de construire). Le requérant joint alors tous les documents nécessaires à l'évaluation de la sécurité technique à sa demande auprès de l'autorité d'approbation². Il est de la responsabilité de cette dernière de solliciter de l'autorité de surveillance une prise de position sur les aspects relevant de la sécurité technique et d'inclure dans sa décision globale ("approbation des plans") les conclusions tirées par l'autorité de surveillance et les charges qui en découlent.

Lorsqu'aucune autorisation n'est requise sur la base d'une autre législation que la LOA, le requérant transmet sa demande directement à l'autorité de surveillance qui, après analyse du dossier, octroie l'approbation des plans directement si les exigences de sécurité technique sont remplies.

¹ Le chapitre 6.1 de la partie D de la directive spécifie les travaux de révision concernés.

² Il est distingué entre "l'autorité de surveillance", qui veille uniquement au respect des exigences de sécurité technique selon LOA et OSOA, et "l'autorité d'approbation" qui octroie une autorisation de construire ("approbation des plans") qui traite de tous les aspects à considérer dans ce cadre (par exemple également environnementaux); le résultat de l'examen de la sécurité technique par l'autorité de surveillance est l'un d'entre eux.



Il est recommandé que le requérant prenne contact à un stade préliminaire d'un projet avec l'autorité de surveillance afin de définir avec elle les exigences pour les bases du projet ainsi que d'effectuer une planification de remise directe des documents techniques et de leur examen, permettant par là un traitement rapide de la requête dès qu'une demande formelle d'approbation est déposée.

2.2. Influence de constructions souterraines

Une construction souterraine dans la zone de fondation d'un ouvrage de retenue existant (notamment un tunnel) peut induire, par l'effet drainant, des déformations des appuis qui induisent elles-mêmes des contraintes internes de l'ouvrage de retenue. Celles-ci peuvent mettre en péril la sécurité de l'ouvrage d'accumulation suivant la situation qui prévaut (type de construction souterraine, conditions hydrogéologiques, type d'ouvrage de retenue).

Avant d'autoriser une telle construction, l'autorité d'approbation compétente doit consulter l'autorité de surveillance (art. 9 LOA). Celle-ci doit décider au cas par cas s'il est nécessaire d'étudier l'impact de la construction prévue sur la sécurité de l'ouvrage d'accumulation et s'il est nécessaire que des mesures soient prises afin de prévenir un lâchage d'eau incontrôlé de la retenue. La procédure de l'**Annexe 1** sert de ligne directrice à cet effet.

2.3. Analyse de sécurité d'un ouvrage existant

L'exploitant doit effectuer une analyse de sécurité technique de tout ou partie de son ouvrage (ouvrage de retenue et ses fondations, zone de retenue, ouvrages annexes relevant de la sécurité), notamment :

- pour tenir compte de modifications de l'état de la science et de la technique en la matière;
- pour tenir compte de modifications dans les hypothèses d'une précédente vérification de la sécurité, également celles liées au mode d'exploitation de la retenue;
- sur ordre de l'autorité de surveillance³.

Le professionnel expérimenté et les experts font un report dans leurs rapports de sécurité respectifs lorsqu'ils estiment qu'une des conditions ci-dessus est satisfaite et que l'exécution d'une telle analyse est nécessaire.

Les vérifications de la sécurité technique effectuées avec succès selon les termes de la documentation de base relative à la sécurité structurale de 2002 et de la partie correspondante de la directive de 2002 restent valables; elles ne doivent pas être répétées du fait de la parution de la présente révision.

³ L'exploitant qui conteste l'ordre d'exécution de l'autorité de surveillance ou ses conclusions peut exiger de celle-ci qu'elle rende une décision motivée avec indication des voies de recours.



3. Convention d'utilisation, base du projet et dossier de demande d'approbation des plans

3.1. Convention d'utilisation

La convention d'utilisation décrit les objectifs d'utilisation émis par le maître de l'ouvrage, ainsi que les conditions, les exigences et les prescriptions fondamentales relatives à l'élaboration du projet, la construction et l'utilisation de l'ouvrage. Les éléments nécessaires à la compréhension des buts et des conditions d'exploitation d'un ouvrage ainsi que ceux qui entrent dans les vérifications de sa sécurité technique doivent être transmis à l'autorité de surveillance afin qu'elle puisse en prendre connaissance. La convention d'utilisation ainsi que ses mises à jour font partie du dossier de l'ouvrage établi par l'exploitant au plus tard dans le cadre de la préparation de la mise en service de l'ouvrage (art. 22, al. 2, let. b OSOA). Pour les ouvrages existants, ces éléments peuvent être inclus dans d'autres documents techniques (par exemple monographie de l'ouvrage).

Les éléments mentionnés sont notamment ceux qui décrivent :

- l'affectation de l'ouvrage d'accumulation (affectation principale et accessoire de l'ouvrage avec objectifs d'exploitation⁴);
- l'implantation (sur plans de situation et avec descriptif: ouvrage de retenue et ouvrages annexes, zone de retenue, bassin versant);
- les conditions liées au site (conditions topographiques, géologiques, hydrologiques, relevant des risques naturels);
- les dispositions structurales (type et dimensions de l'ouvrage de retenue);
- les exigences légales particulières et la documentation technique de base (notamment les exigences selon la législation sur les ouvrages d'accumulation et selon la concession octroyée).

3.2. Base du projet

La base du projet définit les données techniques spécifiques à l'ouvrage. Elle est la description technique de la transposition de la convention d'utilisation en termes spécifiques à l'ouvrage considéré. Les éléments qui relèvent de la sécurité technique sont à reprendre comme partie intégrante des plans, calculs statiques, calculs hydrauliques et autres vérifications de sécurité du dossier de demande d'approbation des plans remis à l'autorité de surveillance. Il est recommandé que le requérant fasse valider ces éléments par l'autorité de surveillance avant d'élaborer les plans détaillés et d'effectuer les analyses de sécurité. Il s'agit notamment

- des bases hydrologiques et de la méthodologie de vérification de la sécurité aux crues;
- de l'aléa sismique et de la méthodologie de vérification de la sécurité aux séismes;
- des études de sécurité particulières propres au site et à l'ouvrage d'accumulation.

⁴ Par exemple période de retour des dangers naturels contre lesquels un ouvrage est destiné à protéger la population ou débits de turbinage et puissance installée pour un ouvrage de production hydroélectrique.



3.3. Dossier de demande d'approbation des plans pour un projet de construction ou de transformation d'ouvrage

Le dossier de demande d'approbation des plans destiné à l'autorité de surveillance pour un projet de construction ou de transformation d'ouvrage doit contenir toutes les indications techniques démontrant que l'ouvrage d'accumulation planifié est dimensionné et sera construit conformément à l'état de la science et de la technique de sorte que sa sécurité reste assurée dans tous les cas de charge et d'exploitation prévisibles. Toutes modifications postérieures au projet approuvé qui relèvent de la sécurité technique nécessitent une autorisation préalable de la part de l'autorité de surveillance, voire de l'autorité d'approbation.

Les indications à fournir par le requérant relèvent généralement des éléments du Tableau 3-1 avec une adaptation aux spécificités et à l'ampleur du projet déposé :

1. Rapport technique (éléments de la convention d'utilisation et de la base du projet)
1.1 Éléments fondamentaux
1.1.1 Description du projet de construction ou de transformation d'ouvrage (ouvrage de retenue, retenue, ouvrages annexes)
1.1.2 But (affectation et type d'utilisation, durée d'utilisation prévue)
1.2 Situation et conditions cadres
1.2.1 Ouvrages et infrastructures existants
1.2.2 Topographie, cadre géomorphologique
1.2.3 Conditions du sous-sol (fondation, retenue): géologie, tectonique, géotechnique, hydrogéologie
1.2.4 Sismicité générale du site
1.2.5 Dangers naturels (notamment glissements, éboulements, laves torrentielles, avalanches, séracs, rupture de lac glaciaire, apports sédimentaires, risque d'affaissement en terrain karstique)
1.2.6 Hydrologie (bassins versants, captages, intensités de pluie, débits)
1.2.7 Courbe de remplissage de la retenue, cote normale de retenue, hauteur de retenue, volume de retenue
1.2.8 Charriages, concept de gestion des sédiments lorsque ceux-ci affectent la sécurité de l'ouvrage
1.2.9 Prélèvements des matériaux (sources et carrières, qualité des matériaux)
1.2.10 Autres exigences et contraintes propres au projet (par exemple constructions à proximité, aussi souterraines)
2. Analyse structurale et vérifications de sécurité
2.1 Éléments du système porteur
2.1.1 Système porteur (y compris les aspects de fondation, ouvrages annexes et rives): type, dimensions, détails constructifs importants
2.1.2 Dispositions constructives (joints, contact béton-rocher) *)
2.1.3 Caractéristiques des matériaux de l'ouvrage de retenue (résultats des essais, y compris caractéristiques entrant dans les vérifications *)
2.1.4 Caractéristiques des matériaux de la fondation; injections prévues, drainages
2.1.5 Méthode de construction
2.1.6 Ouvrages annexes relevant de la sécurité



2.2 Vérifications de la sécurité structurale
2.2.1 Bases de calcul; actions individuelles, combinaisons d'actions
2.2.2 Modélisation, calculs
2.2.3 Vérifications statiques de l'ouvrage de retenue (stabilité d'ensemble et résistance ultime, y compris de la fondation)
2.2.4 Stabilité des rives, vagues impulsives *)
2.2.5 Sécurité aux séismes (ouvrage de retenue, retenue, ouvrages annexes)
2.3 Vérifications de la sécurité aux crues et des organes de décharge et de vidange
2.3.1 Hydrographe des apports et des décharges (laminage), détermination de la crue de projet et de la crue de sécurité
2.3.2 Dimensionnement des organes de décharge et de vidange (capacité, revanche, hydraulique), cote de danger
2.3.3 Détermination de la crue de chantier
2.4 Planification en cas d'urgence
2.4.1 Carte d'inondation en cas de rupture de l'ouvrage de retenue
2.4.2 Composantes du dispositif d'alarme
2.5 Instrumentation, concept de surveillance, contrôles
2.5.1 Instrumentation et concept de surveillance lors de l'exploitation *) et durant les travaux (description, schémas)
2.5.2 Programme des essais de contrôle des matériaux durant les travaux
3. Éléments additionnels propres aux transformations d'ouvrage
3.1 Liaison avec la structure existante, mesures constructives au contact "ancien-nouveau"
3.2 Surveillance de l'ouvrage existant durant les travaux
3.3 Sécurité en cas de crues durant les travaux
3.4 Restrictions d'exploitation durant les travaux
4 Plans et programme des travaux
4.1 Situation, vue en plan, élévations, coupes, détails constructifs
4.2 Programme prévisionnel des travaux

*) L'autorité de surveillance peut généralement accepter que les indications relevant de ces éléments lui soient remises après l'octroi de l'approbation des plans mais avant le début des travaux.

Tableau 3-1 : Éléments relevant de la sécurité technique généralement à joindre à la demande d'approbation des plans



3.4. Tâches de l'autorité de surveillance dans le cadre de l'approbation d'un projet de construction ou de modification d'ouvrage

L'autorité de surveillance examine les documents qui lui sont remis du point de vue de la sécurité technique (prévention de l'écoulement incontrôlé de masses d'eau et gestion du risque résiduel) à l'exclusion de tout autre aspect⁵. Elle vérifie notamment que:

- le dossier remis contient tous les documents et toutes les informations qui lui sont nécessaires pour évaluer la sécurité technique. Elle peut en cela se référer au chapitre 3.3;
- les mesures constructives nécessaires à assurer la sécurité technique soient prévues, notamment
 - o l'équipement d'une vidange de fond ou d'une vanne de fond de capacité suffisante (cf. directive partie C2);
 - o les mesures de protection contre les actes de sabotage (cf. chapitre 6);
- un dimensionnement, des analyses de sécurité et un mode de construction prévu conformes à l'état de la science et de la technique (elle peut en cela se référer aux différentes parties de la présente directive). A cette fin, elle vérifie notamment
 - o la pertinence de la démarche d'analyse choisie;
 - o l'exactitude des hypothèses de départ;
 - o la plausibilité des résultats obtenus;
- l'implantation adéquate de l'instrumentation (y compris le réseau géodésique);
- la planification de l'installation d'un dispositif d'alarme-eau (lorsqu'il est requis);
- la planification de la remise de documents additionnels requis avant le début des travaux et durant leur exécution.

L'autorité de surveillance est tenue d'approuver le projet selon le chapitre 2.1 si le dossier est complet et les exigences de sécurité technique remplies.

Si nécessaire du point de vue de la sécurité technique, l'autorité de surveillance formule des exigences à remplir par le requérant ("charges") qui sont incluses dans l'approbation des plans. Elles peuvent typiquement porter sur les éléments de l'**Annexe 2**.

Il est par ailleurs rappelé que (cf. partie D de la directive):

- l'approbation des plans ne constitue pas une autorisation de mise en service ni d'exploitation;
- un programme de mise en service, un règlement de manœuvre des vannes et un règlement en cas d'urgence élaborés par l'exploitant et approuvés par l'autorité de surveillance sont des conditions préalables à l'octroi de l'autorisation de mise en service;
- un règlement de surveillance élaboré par l'exploitant et approuvé par l'autorité de surveillance est une condition préalable à l'exploitation.

⁵ Les questions relevant notamment des choix de variantes d'un projet de construction (pour autant que ces variantes satisfassent aux exigences de sécurité), de l'environnement, de débits résiduels et restitués, d'exploitation de l'aménagement et de sécurité au travail ne sont pas du ressort de l'autorité de surveillance.



3.5. Réception des travaux de construction par l'autorité de surveillance (art. 9 al. 3 OSOA)

A la fin des travaux de construction, l'autorité de surveillance contrôle que

- le requérant lui a remis tous les documents relevant de la sécurité technique fixés dans l'approbation des plans ou qu'elle a exigé avant, pendant ou à la fin des travaux de construction;
- toutes les exigences émises ("charges") qui relèvent de la sécurité technique sont satisfaites;
- les travaux ont été réalisés conformément aux plans approuvés ou, éventuellement, aux modifications approuvées⁶.

L'autorité de surveillance consigne le résultat de son contrôle dans un procès-verbal de réception des travaux, condition préalable à l'octroi d'une autorisation de mise en service (cf. chapitre 2.2 de la partie D de la directive).

Si les travaux effectués ne sont pas conformes aux plans approuvés (ou leurs modifications approuvées), elle décide du besoin d'ouverture d'une procédure de demande d'approbation pour les éléments non conformes. Dans ce cas, ainsi que si des documents sont manquants ou des exigences non satisfaites, l'autorité de surveillance peut reporter l'établissement du procès-verbal jusqu'au moment où la situation est régularisée ou fixer dans le procès-verbal des délais pour la remise des documents manquants.

4. Sécurité structurale

4.1. Objet de la sécurité structurale

La sécurité structurale a pour objet de s'assurer qu'un ouvrage d'accumulation résiste à tous les cas de charge et d'exploitation prévisibles dans le but de prévenir un écoulement incontrôlé et dommageable de grandes quantités d'eau. Il est de la responsabilité des requérants et des exploitants de prendre les mesures constructives et d'effectuer toutes les vérifications nécessaires à cette fin. Ces dernières incluent en général la vérification des éléments suivants:

- a) passage des crues et capacité suffisante des organes de décharge et de vidange;
- b) intégrité structurale de l'ouvrage de retenue et des ouvrages annexes relevant de la sécurité, ainsi que de leurs fondations et de la zone de retenue durant l'exploitation régulière ainsi que durant et après un événement exceptionnel ou extrême (tremblement de terre, etc.).

La vérification en cas de crue et les exigences relatives à la capacité des organes de décharge et de vidange font l'objet de la partie C2 de la directive et ne sont pas traitées dans cette partie C1 de la directive.

⁶ L'autorité se contente d'une appréciation sommaire, sans contrôles de détail (par exemple du mètre)



4.2. Vérification de l'intégrité structurale

La vérification de l'intégrité structurale doit généralement être effectuée pour les états limites ultimes suivants de manière conforme à l'état de la science et de la technique⁷:

- stabilité d'ensemble de tout ou partie de l'ouvrage de retenue ou d'un ouvrage annexe relevant de la sécurité (cf. chapitre 4.6.6);
- résistance ultime de tout ou partie de l'ouvrage de retenue ou d'un ouvrage annexe relevant de la sécurité (stabilité interne; cf. chapitre 4.6.7);
- résistance ultime de la zone de fondation (stabilité interne; cf. chapitre 4.6.8);
- stabilité des versants de la zone de retenue (cf. chapitre 4.6.9).

Pour les ouvrages existants, les phénomènes qui affectent la sécurité de l'ouvrage doivent être considérés dans ces vérifications (tassements, fissuration, colmatage des drains, etc.), généralement sous forme de conditions initiales de la vérification de l'intégrité structurale de l'ouvrage.

4.3. Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'actions individuelles suivantes sont généralement à considérer dans la vérification de l'intégrité structurale d'un ouvrage d'accumulation, pour autant qu'elles soient pertinentes pour l'ouvrage et le site sous investigation ; elles doivent être combinées de manière à engendrer la sollicitation la plus sévère pour l'ouvrage. Si d'autres actions peuvent affecter de manière non négligeable la stabilité d'un ouvrage ou d'autres combinaisons d'actions conduire à des résultats plus défavorables dans la vérification de la sécurité structurale, celles-ci doivent alors également être considérées selon les mêmes principes.

Les combinaisons d'actions sont classées et définies selon les tableaux suivants :

Normal (type 1)	Concernent les actions qui sollicitent régulièrement l'ouvrage de retenue.
Exceptionnel (type 2)	Concernent les actions qui peuvent survenir, mais pas nécessairement durant la vie de l'ouvrage. Dans ce cas, de légers dégâts sont tolérés. Les organes de sécurité (notamment les évacuateurs de crues et vidanges) doivent rester opérationnels.
Extrême (type 3)	Concernent les actions les plus défavorables pour lesquelles la sécurité structurale de l'ouvrage doit rester assurée (en supposant que 2 actions individuelles extrêmes ne surviennent pas simultanément ni une action individuelle extrême avec une action individuelle exceptionnelle). Dans ces cas, des dégâts peuvent survenir sans toutefois être à l'origine d'une libération d'eau incontrôlée et dommageable de la retenue (ils nécessitent par contre généralement des contrôles approfondis et des interventions constructives afin de rétablir un niveau de sécurité adéquat).

Tableau 4-1 : Types de combinaison d'actions

⁷ Cf. partie A de la directive pour la définition.



Actions individuelles		Combinaisons d'actions pour les barrages poids (béton et maçonnerie), mobiles et voûtes, y compris appuis et fondations						
		Combinaisons de type normal (Type 1)		Combinaisons de type exceptionnel (Type 2)			Combinaisons de type extrême (Type 3)	
		Lac vide	Lac plein	Crue de projet	Glace	Avalanche ou lave torrentielle	Statique	Dynamique
							Crue de sécurité	Sollicitation sismique
Poids propre ⁱⁱ⁾	X	X	X	X	X	X	X	
Poussée hydrostatique, niv. normal de retenue ⁱ⁾		X		X	(X)		X	
Poussée hydrostatique correspondant au niv. de crue			X			X		
Poussée hydrostatique aval (éventuel) ^{v)}	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Poussée des sédiments amont (éventuel)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Poussée des terres aval (éventuel)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Sollicitation sismique							X	
Poussée des glaces				X			(X)	
Pression d'avalanche ou de lave torrentielle					X			
		Actions additionnelles à prendre en compte pour les barrages-poids (béton et maçonnerie) et barrages mobiles ⁱⁱⁱ⁾						
Sous-pressions, niv. normal de retenue ⁱⁱⁱ⁾		X		X	(X)		X	
Sous-pressions correspondant au niv. de crue ⁱⁱⁱ⁾			X			X		
		Actions additionnelles à prendre en compte pour les barrages voûtes ^{iv)}						
Variations de température ^{iv)}	X	X	X	X	X	X	X	
Remarques	<p>i) Niveau normal de retenue: niveau maximal d'exploitation pour les ouvrages avec exploitation active, niveau déterminant pour la détermination de la hauteur de retenue selon la partie A de la directive pour les autres. Un niveau de remplissage intermédiaire doit également être considéré s'il conduit à des sollicitations plus élevées.</p> <p>ii) Poids propre: les étapes de construction et de clavage doivent être prises en compte de manière appropriée dans les barrages voûtes.</p> <p>iii) Les sous-pressions peuvent généralement être négligées dans les vérifications à la stabilité globale des barrages voûtes. Lorsque cela n'est pas le cas, il est nécessaire de les considérer de manière analogue aux barrages poids.</p> <p>iv) Les variations de températures peuvent généralement être négligées dans la vérification de la stabilité des barrages poids du fait de l'absence de surdétermination du système statique global; dans le cas contraire, il doit être procédé de manière analogue aux barrages voûtes. Les effets thermiques peuvent par ailleurs provoquer des contraintes de deuxième ordre, notamment au niveau des parois des galeries ainsi qu'à proximité du contact béton-rocher.</p> <p>v) La poussée hydrostatique à l'aval doit être combinée de la manière la plus défavorable avec la poussée hydrostatique à l'amont.</p> <p>X Action individuelle à considérer dans la combinaison.</p> <p>(X) Entre en ligne de compte selon les cas.</p>							
Nota	a) Les autres actions individuelles (cf. chapitre 4.5) sont à prendre en compte selon les besoins, de la manière la plus défavorable.							

Tableau 4-2 : Combinaisons d'actions pour les barrages en béton



Actions individuelles	Combinaisons d'actions pour les barrages en remblai, y compris appuis et fondations							
	Combinaisons de type normal (Type 1)		Combinaisons de type exceptionnel (Type 2)				Combinaisons de type extrême (Type 3)	
	Lac vide (remblai drainé)	Lac plein	Lac vide, à la fin de la construction	Crue de projet	Vidange rapide	Avalanche ou lave torrentielle	Statique	Dynamique
							Crue de sécurité	Sollicitation sismique
Poids propre	X	X	X	X	X	X	X	X
Poussée hydrostatique, niv. normal de retenue ⁱ⁾		X				(X)		X
Pressions interstitielles, niv. normal de retenue ⁱ⁾		X			X ^{iv)}	(X)		X ⁱⁱⁱ⁾
Poussée hydrostatique correspondant au niv. de crue				X			X	
Pressions interstitielles correspondant au niv. de crue ⁱⁱ⁾				X ⁱⁱ⁾			X ⁱⁱ⁾	
Pressions interstitielles avant consolidation		(X)	X					
Sollicitation sismique								X
Pression d'avalanche ou de lave torrentielle						X		
<u>Remarques</u>	<p>i) Niveau normal de retenue: niveau maximal d'exploitation pour les ouvrages avec exploitation active, niveau déterminant pour la détermination de la hauteur de retenue selon la partie A de la directive pour les autres. Un niveau de remplissage intermédiaire doit également être considéré s'il conduit à des sollicitations plus élevées.</p> <p>ii) Pressions interstitielles en cas de crue: Une adaptation est possible en fonction de la durée de la crue et de l'efficacité des drains.</p> <p>iii) Pressions interstitielles en cas de séisme: respectivement selon les indications de la partie C3 de la directive.</p> <p>iv) Pressions interstitielles en cas de vidange rapide: Une réduction des pressions interstitielles est admissible pour des remblais constitués de matériaux bien drainés.</p> <p>X Action individuelle à considérer dans la combinaison.</p> <p>(X) Entre en ligne de compte selon les cas.</p>							
<u>Nota</u>	<p>a) Les cas de charges dépendent aussi des types de remblais.</p> <p>b) La poussée des glaces ne joue généralement aucun rôle dans la vérification à la stabilité des barrages en remblai.</p> <p>c) Les autres actions individuelles (cf. chapitre 4.5) sont à prendre en compte selon les besoins, et de la manière la plus défavorable.</p>							

Tableau 4-3 : Combinaisons d'actions pour barrages en remblais (y compris appuis et fondations)



Pour les **rives et versants des retenues**, les combinaisons suivantes sont par ailleurs retenues à fin de vérification lorsqu'une instabilité ne peut pas être exclue (généralement identifiée par un géologue) :

- Type normal (Type 1) : poids propre **et** poussée hydrostatique (lac plein), les sous-pressions (agissant sur les plans de glissement, joints, failles, etc.) et les pressions interstitielles correspondantes pour les parties sous-lacustres (maintien de la pression interstitielle et absence de poussée hydrostatique en cas de marnage rapide).
- Type exceptionnel (Type 2) : poids propre **et** poussée hydrostatique (niveau crue de projet), les sous-pressions (agissant sur les plans de glissement, joints, failles, etc.) et les pressions interstitielles correspondantes pour les parties sous-lacustres (maintien de la pression interstitielle et absence de poussée hydrostatique en cas de marnage rapide).
- Type extrême (Type 3) : poids propre **et**
 - (a) poussée hydrostatique (lac plein), les sous-pressions (agissant sur les plans de glissement, joints, failles, etc.) et pressions interstitielles correspondantes, **sollicitation sismique, ou**
 - (b) poussée hydrostatique (niveau **crue de sécurité**), les sous-pressions (agissant sur les plans de glissement, joints, failles, etc.) et pressions interstitielles correspondantes.

4.4. Description des actions individuelles

4.4.1. Poids propre

Les valeurs moyennes du poids volumique déterminées par des essais en laboratoire entrent dans la détermination du poids propre des matériaux. En l'absence d'essais en laboratoire, des valeurs standards de la littérature peuvent généralement être admises.

4.4.2. Poussée de l'eau

La poussée hydrostatique est prise en compte avec un poids spécifique de 10 kN/m^3 .



4.4.3. Sous-pressions

Les sous-pressions entrent dans les vérifications à la stabilité des barrages-poids ainsi que des coins rocheux.

Il est recommandé de déterminer les sous-pressions sur la base d'un calcul d'écoulement dont la validité des hypothèses peut être vérifiée par comparaison des résultats du calcul avec des valeurs de sous-pressions mesurées. Une attention particulière est à porter aux situations où les sous-pressions peuvent être influencées par la circulation d'eau dans les versants.

Les distributions suivantes peuvent alternativement être utilisées en l'absence de mesures de sous pressions adéquates ou en phase de projet (voir **Annexe 3**) :

- en l'absence de rideau d'injection et de drainages : une répartition triangulaire (sans présence d'eau à l'aval) ou trapézoïdale (en présence d'eau à l'aval), avec pressions amont et aval égales à la pression hydrostatique respective ;
- en présence d'un rideau d'injection amont, une réduction de la pression au niveau du rideau d'injection n'est admissible qu'en cas de fonctionnement de celui-ci et nécessite une validation préalable de la part de l'autorité de surveillance. Dans le cas contraire, aucune réduction ne peut être introduite ;
- en présence d'un système de drainage (galerie de drainage, forages drainants) : une réduction de la pression d'au maximum 50% au droit du drainage [Oberhuber 2014, US Army Corps of Engineers 2000] (pour des drains parfaitement fonctionnels).

4.4.4. Pressions interstitielles

L'intensité et la répartition des pressions interstitielles à l'intérieur du corps d'un remblai, éventuellement des barrages en maçonnerie ou des barrages en béton plus perméables (joints de reprise, etc.), sont à déterminer sur la base d'un calcul des lignes de courant et des équipotentielles, en tenant compte des caractéristiques du remblai (notamment la porosité et la perméabilité, avec prise en compte de l'anisotropie). Les hypothèses sont à vérifier par comparaison des résultats du calcul avec des valeurs de pressions interstitielles mesurées pour les ouvrages existants.

4.4.5. Variations de température du béton

Les variations de la température moyenne et du gradient de température à travers l'épaisseur des barrages voûtes sont à considérer dans les analyses de contraintes. Deux états sont généralement retenus : un état « été » et un état « hiver », à chaque fois comme différence avec l'état de température prévalant dans l'ouvrage de retenue lors du clavage des joints⁸. Les températures associées à ces états sont généralement les moyennes multi-annuelles à long terme de la saison considérée. Selon le comportement de l'ouvrage (par exemple décollement du pied amont lors d'hivers très froids ou poussée sur les culées lors d'étés très chauds), des températures plus éloignées des moyennes multi-annuelles doivent être considérées.

⁸ En l'absence de cette information pour les ouvrages existants, la température moyenne à long terme prévalant dans l'ouvrage peut être utilisée.



4.4.6. Poussée des terres et recharge aval

La poussée des terres à considérer dans une analyse (active, passive, au repos) est à déterminer au cas par cas.

4.4.7. Poussée des sédiments

L'effet de la poussée des sédiments peut généralement être pris en compte, sous sollicitation statique, par une augmentation du poids volumique de l'eau de la retenue de 4 kN/m^3 . Cette valeur peut être modifiée en fonction du type de sédiment et de la vitesse de l'action (dynamique). Cette poussée additionnelle des sédiments peut généralement être négligée lorsque la couche de sédiments est faible en comparaison avec la hauteur déterminante pour le calcul de la pression hydrostatique.⁹

4.4.8. Séisme

Le séisme est à considérer selon les indications de la partie C3 en complément aux indications de cette partie C1.¹⁰

4.4.9. Poussée des glaces

L'effet de la poussée des glaces sur les ouvrages en béton est à considérer, pour autant qu'aucun système actif n'empêche qu'elle adhère au parement (par exemple injection d'air); un marnage rapide (par exemple cycles de remplissage journaliers) a le même effet. La poussée des glaces joue généralement un rôle important dans la partie supérieure des ouvrages de petites dimensions mais est négligeable dans ceux de grandes dimensions. La poussée peut être estimée comme suit pour les ouvrages à parement vertical ou légèrement incliné [ETH 2003], [Oberhuber 2014] :

- 1) Estimation de l'épaisseur de la couche de glace selon

$$h = 0.035 \sqrt{\overline{T_L} t_w} \quad [\text{m}], \text{ au minimum } 0,3 \text{ m jusqu'à une altitude de } 500 \text{ m.s.m et } 0,8 \text{ m à partir de } 2'300 \text{ m.s.m. (extrapolation linéaire entre deux).}$$

$\overline{T_L}$ est la valeur absolue de la moyenne des températures négatives durant la période de froid considérée (en °C) et t_w la durée correspondante (en jours). Les températures et durée de période de froid représentent des valeurs moyennes multi-annuelles déterminées sur la base d'une analyse des données météo d'une station se trouvant à proximité (à altitude similaire).

- 2) Estimation de la poussée totale de la glace en multipliant l'épaisseur de la couche par une pression égale à 200 kN/m^2 .

⁹ Par exemple, une couche de sédiments de 25% de la hauteur d'eau provoque, en 2 dimensions, une augmentation de la charge statique horizontale totale de 2,5%.

¹⁰ Une analyse aux séismes simplifiée peut être effectuée pour les petits barrages de la classe III selon les chapitres 7.1 et 7.2 de la partie C3 de la directive. Le facteur de sécurité statique entrant dans cette analyse simplifiée est obtenu, par analogie à l'équation du chapitre 4.6.6.1, selon $FS = \frac{\tan \varphi \sum N + cA}{\sum T}$ pour le cas de charge normal (lac plein).



4.4.10. Avalanche

Il est distingué entre l'impact direct d'une avalanche butant contre un ouvrage prévu à cet effet (ouvrage de protection contre les avalanches) et une vague impulsive provoquée par une avalanche déferlant dans la retenue.

Avalanche butant contre un ouvrage de retenue

Lorsque des avalanches peuvent buter contre l'ouvrage de retenue, la pression exercée sur l'ouvrage de retenue à considérer pour les vérifications est celle provoquée par une avalanche avec temps de retour de 300 ans. La pression q_f est à déterminer selon les indications de la littérature spécialisée, par exemple selon [Salm et al. 1987, Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen 1999, Schleiss et Pougatsch 2011] pour une avalanche de fond

$$q_f = 0.5c_d\rho_f v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

avec v_f = vitesse de l'avalanche [m/s], c_d = 2 à 3 (coefficient de résistance) et ρ_f = 0.3 [t/m³].

En présence d'un risque d'impact par des objets individuels (par exemple des arbres), la pression correspondante doit être additionnée à la pression q_f .

Vague impulsive

Lorsque les avalanches peuvent déferler dans la retenue, la vague impulsive générée par une avalanche de temps de retour de 300 ans doit être estimée et le risque de submersion de l'ouvrage de retenue évalué. Des mesures constructives ou d'exploitation doivent être prises si la vague peut dépasser la cote de danger selon la partie C2 de la directive (par exemple par la construction d'un parapet ou l'augmentation permanente ou temporaire de la revanche).

La procédure selon [Heller et al. 2009] permet de calculer la hauteur de la vague engendrée au niveau de l'ouvrage de retenue (ainsi que la zone d'impact, le débit et la durée de la vague) et les forces à appliquer dans les calculs de structure.

4.4.11. Laves torrentielles

Les mêmes considérations que pour les avalanches s'appliquent, cf. [Salm et al. 1987, Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen 1999, Heller et al. 2009, Rickenmann 1995, 1999, 2008, 2016, Bergmeister et al. 2009, Schleiss et Pougatsch 2011]. La pression peut être déterminée selon

$$q_f = 0.5c_d\rho_f v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

avec v_f = vitesse de la lave torrentielle [m/s], c_d = 1.5 à 2.0 (coefficient de résistance) et ρ_f = 1.8 [t/m³].



4.5. Autres actions individuelles

4.5.1. Ancrages

Les ancrages (tirants précontraints et passifs) permettent d'apporter le complément nécessaire pour renforcer la stabilité lorsque les critères de sécurité usuels ne sont pas satisfaits. Leur action est à considérer selon la norme SIA 267 en vigueur [SIA 2013a, 2013b].

Les nouveaux ancrages (principalement les ancrages précontraints) doivent être conçus et installés de manière à pouvoir mesurer leur force et contrôler leur état.

Pour de nouveaux ouvrages de retenue, le coefficient de sécurité sans ancrage (ouvrage de retenue et zone d'appui) ne doit pas être inférieur à 1,0 pour les combinaisons d'actions de type normal.

L'utilisation des ancrages pour la stabilisation des versants est permise selon la pratique usuelle en mécanique des sols et des roches. Une attention particulière doit être portée aux aspects de fluage et relaxation [SIA 2013a].

4.5.2. Charges roulantes

Les charges roulantes ne sont généralement pas déterminantes dans l'analyse des contraintes d'ouvrages de retenue et peuvent être négligées. Dans le cas contraire, celles provenant du trafic routier peuvent être reprises de la norme SIA 261 [SIA 2014] et introduites, selon le cas, en tant que charge normale ou exceptionnelle (cf. chapitre 4.3).

4.5.3. Choc de bateau

Les situations accidentelles de choc de bateau peuvent jouer un rôle dans le cas des barrages mobiles avec écluses. Lorsque cela est le cas, elles sont à prendre en compte en tant que charge exceptionnelle (cf. chapitre 4.3).

4.5.4. Gonflement du béton d'origine chimique

En cas de présence avérée d'un gonflement d'origine chimique du béton d'un barrage existant (notamment lié à une réaction alcali-agrégats), les contraintes internes qui y sont associées dues à une surdétermination du système statique (barrages voûtes) ainsi que l'endommagement éventuel du béton (stade avancé de la réaction) sont à évaluer au cas par cas, ainsi que l'impact sur la sécurité.



4.5.5. Fluage, retrait, relaxation et tassement

Les effets différés comme le fluage, le retrait et la relaxation du béton se développent graduellement avec le temps ce qui conduit à une modification des lois d'élasticité. Ces effets doivent être considérés lorsqu'ils peuvent influencer l'état de contraintes de l'ouvrage de retenue, soit de manière explicite (loi de comportement) soit implicite (modification globale du module d'élasticité du béton, rocher, remblai, etc.).

Pour les remblais, une contre-flèche le long de la crête doit être prise en compte lors du projet afin de garantir une revanche suffisante en cas de tassement.

4.5.6. Chute d'aéronef sur un ouvrage de retenue

Aucune vérification pour cette sollicitation n'est exigée (fait partie du risque résiduel).

4.5.7. Superstructures

Les superstructures telles que les mâts de communication ne relèvent généralement pas des organes annexes de sécurité et ne tombent pas sous les termes de cette directive. Il faut par contre veiller à ce qu'ils ne créent pas d'instabilités locales au niveau de leurs fondations.

4.6. Critères d'intégrité structurale

4.6.1. Principes de base

Les critères de vérification de l'intégrité structurale sont fonction de l'état ultime pour lequel la vérification est effectuée et du type de combinaison d'actions selon le chapitre 4.3. Dans le cadre des vérifications, des calculs de sensibilité portant notamment sur les caractéristiques géotechniques et les sous-pressions doivent être effectués afin de mettre en évidence les paramètres prépondérants et de mieux cerner la performance effective de l'ouvrage considéré en fonction du niveau de connaissance de ces paramètres.

Les vérifications sont à conduire selon le concept des facteurs de sécurité partiels pour sollicitation et résistance, de la manière suivante:

- **Sollicitations:** Leur estimation la plus juste ("best estimate"), respectivement leurs valeurs moyennes si leur détermination est effectuée sur la base d'une analyse statistique ou leurs valeurs médianes si leur détermination est effectuée sur la base de plusieurs modèles d'estimation possibles. Aucun facteur partiel de charge n'est à introduire.
- **Résistance:** Diminution de la résistance caractéristique par les facteurs partiels du chapitre 4.6.5.



4.6.2. Classes d'ouvrages

Afin de vérifier leur intégrité structurale sous sollicitations statiques, les différents ouvrages d'accumulation sont répartis dans trois classes qui sont soumises à des exigences différentes au niveau de l'ampleur des vérifications et investigations à entreprendre. Il s'agit de la même classification que celle utilisée pour la vérification de la sécurité aux séismes, cf. partie C3 de la directive.

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 l'**Annexe 4** selon la hauteur de retenue et le volume de retenue, conformément aux définitions correspondantes de la partie A de la directive.

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.

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.



4.6.3. Détermination des caractéristiques des matériaux

Les paramètres nécessaires des matériaux doivent en général être déterminés grâce à des essais représentatifs en laboratoire et sur le terrain. Le fractile de 5% est à retenir pour les valeurs de résistance¹¹. Les résultats d'essais réalisés pendant la construction peuvent être utilisés pour les ouvrages existants. Il faut en tous les cas rester prudent quant au choix des paramètres du fait des incertitudes associées à la détermination des caractéristiques des matériaux.

Les paramètres des matériaux peuvent également être calculés à partir d'analyses de mesures de comportement de l'ouvrage, s'il peut être démontré que le calcul inverse (rétro-analyse) est apte à déterminer les paramètres nécessaires.

La résistance du béton à la compression statique uniaxiale f_{cs} (détermination par essai sur cylindre dont la taille est à déterminer en fonction de la granulométrie du béton) et à la traction statique f_{ts} (détermination par essai brésilien sur cylindre dont la taille est également à déterminer en fonction de la granulométrie du béton) sont à déterminer pour un âge du béton représentatif de l'instant d'apparition de l'action réelle ou hypothétique pour laquelle la vérification est effectuée, ou de manière conservatrice.

Pour les ouvrages d'accumulation des **classes I et II**, la résistance à la traction du béton doit être déterminée sur la base d'essais à la traction. En l'absence de tels essais, une résistance nulle est à introduire dans les analyses et vérifications.

Pour les ouvrages d'accumulation de la **classe III**, la résistance à la traction statique du béton f_{ts} (en MPa) peut être évaluée en fonction de la résistance à la compression statique f_{cs} (en MPa) sur la base de la relation [Arioglu et al. 2006] :

$$f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}, \text{ au maximum } 3 \text{ MPa}$$

Pour les ouvrages d'accumulation existants de la **classe III**, les paramètres des matériaux peuvent être issus de la littérature ou de données de constructions comparables. Si les valeurs de résistance sont estimées ainsi, elles doivent être réduites d'un facteur de 1,2 (y compris angle de frottement), la cohésion devant, elle, être réduite d'un facteur de 2,0. Les facteurs partiels de résistance selon le chapitre 4.6.5 s'ajoutent à cette réduction.

¹¹ Dans le cas des analyses non-linéaires par les éléments-finis, une valeur moyenne de résistance peut être introduite dans les modèles (lois de comportement).



4.6.4. Éléments de modélisation

Pour les cas de charges statiques, les exigences minimales de modélisation selon le Tableau 4-4 sont appliquées :

Thème	Classe d'ouvrages d'accumulation		
	I	II	III
Détermination des pressions interstitielles (remblais)	Modèle 2D d'éléments finis ou différences finies	Modèle 2D d'éléments finis ou différences finies	Modèle 2D, empirique
Détermination de la température interne (barrages-voûtes)	Modèle 2D d'éléments finis ou différences finies	Modèle 2D d'éléments finis ou différences finies	Modèle 2D, empirique
Vérification de la stabilité d'ensemble, ouvrages à comportement fondamentalement bidimensionnel	Modèle 2D	Modèle 2D	Modèle 2D
Vérification de la stabilité d'ensemble des autres ouvrages	Modèle 3D d'éléments finis	Modèle 3D d'éléments finis	Modèle 2D, pour chaque bloc
Vérification de la stabilité interne, ouvrages à comportement fondamentalement bidimensionnel	Modèle 2D d'éléments finis de l'ouvrage de retenue et de la fondation	Modèle 2D d'éléments finis de l'ouvrage de retenue, modélisation sommaire de la fondation	Modélisation par poutre simple (barrages poids) ou analyse de stabilité au glissement (barrages en remblais) ; modélisation sommaire de la fondation
Vérification de la stabilité interne des autres ouvrages	Modèle 3D d'éléments finis de l'ouvrage de retenue et de la fondation	Modèle 3D d'éléments finis de l'ouvrage de retenue, modélisation sommaire de la fondation	Modélisation par poutres croisées sans torsion (barrages-voûtes) ou analyse de stabilité au glissement (barrages en remblais) ; modélisation sommaire de la fondation

Tableau 4-4 : Exigences minimales de modélisation



Lors d'une modélisation à 3 dimensions de la zone de fondation par éléments finis, la dimension de celle-ci doit satisfaire aux dimensions minimales suivantes en fonction de la rigidité du béton du barrage et du sol de fondation [Fok K-L, Chopra A. K. 1985]:

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

E_b : module d'élasticité du béton,

E_s : module d'élasticité du sol de fondation

H : hauteur de l'ouvrage

R_f : dimensions spatiales du modèle du sol de fondation

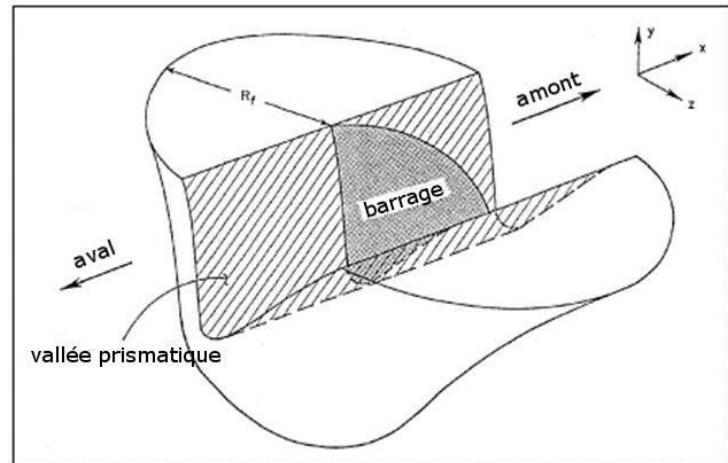


Figure 4-1 : Délimitation du modèle de fondation 3D [Fok et Chopra, 1985]



4.6.5. Facteurs partiels de résistance

Les facteurs des tableaux 4-5 et 4-6 sont applicables. Ils sont à introduire tel qu'indiqué dans les chapitres suivants.

Combinaison de type	Stabilité d'ensemble (barrages en béton et remblais)		
	Glissement		Soulèvement ^{**)}
	Cohésion	Angle de frottement	
	γ_{mc}	$\gamma_{m\phi}$	γ_{sf}
Normal	3,0	1,5	1,15
Exceptionnel	2,0	1,3	1,05
Extrême statique ^{*)}	1,1	1,1	1,00

*) Une combinaison de type « Extrême dynamique » doit satisfaire aux exigences de prévention de l'écoulement incontrôlé de masses d'eau selon la partie C3 de la directive.

***) A court terme, après une sollicitation sismique jusqu'à la réalisation d'éventuelles mesures (voir la partie C3, § 7.3 alinéa 2), le facteur partiel dans le cas de soulèvement doit être supérieur ou égal à 1,0.

Tableau 4-5 : Facteurs partiels de résistance pour la stabilité d'ensemble (§ 4.6.6.)

Combinaison de type	Stabilité des remblais, glissement		Stabilité des barrages en béton, contraintes	
	γ_{mc}	$\gamma_{m\phi}$	γ_{sc} ^{*)}	γ_{st} ^{*)}
Normal	3,0	1,5	3,0	2,0
Exceptionnel	2,0	1,3	2,0	1,5
Extrême statique ^{**)}	1,1	1,1	1,1	1,1

*) γ_{st} , résistance à la traction (brésilienne) et γ_{sc} , résistance à la compression sur cylindre dont la taille est à déterminer en fonction de la granulométrie du béton [cf. par exemple Schleiss et Pougatsch, 2011].

***) La combinaison de type « Extrême dynamique » doit satisfaire aux exigences de prévention de l'écoulement incontrôlé de masses d'eau selon la partie C3 de la directive.

Nota :

- En règle générale, aucune augmentation de la résistance ne peut être considérée dans le cas d'un état de compression biaxiale.
- La résistance à la traction est généralement nulle au niveau de l'interface béton-rocher et d'environ 55% de la résistance du béton au niveau des joints verticaux et horizontaux. Si les reprises de bétonnage ne sont pas préparées avec soin, la résistance à la traction au niveau des reprises de bétonnage à considérer dans les analyses et vérifications est d'au plus 40% de celle du béton [Oberhuber 2014] et [ICOLD-EC, 2004a].

Tableau 4-6 : Facteurs partiels de résistance pour la résistance ultime (§ 4.6.7)



4.6.6. Stabilité d'ensemble

4.6.6.1. Stabilité au glissement

La stabilité au glissement doit être vérifiée par rapport à la surface critique potentielle la plus défavorable, en tenant compte de la structure géologique des fondations et de la pente des interfaces. La stabilité au glissement est satisfaite si :

$$\sum T \leq \left[(tg \varphi \sum N) / \gamma_{m\phi} \right] + \left[(cA) / \gamma_{mc} \right]$$

Avec :

$\sum N$	= Somme des efforts normaux sur la surface de glissement ¹²	A	= Aire de la fondation
$\sum T$	= Somme des efforts tranchants sur la surface de glissement	φ	= Angle de frottement interne (valeur résiduelle)
γ_{mc}	= Facteur partiel de résistance pour la cohésion	c	= Cohésion (valeur résiduelle)
$\gamma_{m\phi}$	= Facteur partiel de résistance pour l'angle de frottement		

La cohésion ne peut être prise en compte que si elle est effectivement mobilisable. Pour tenir compte des incertitudes et du risque d'une diminution ou d'une disparition de la cohésion due à un mouvement, la valeur résiduelle de la cohésion doit être utilisée. Les valeurs de φ et de c doivent également tenir compte de l'état du plan de glissement.

S'il y a une incertitude quant à la mobilisation possible de la cohésion ou quant à sa valeur, une cohésion nulle doit être introduite dans les vérifications.

Ces considérations s'appliquent également à la vérification de la stabilité au glissement dans le corps de barrages en maçonnerie ou en béton, par exemple le long de reprises de bétonnage.

¹² y compris déduction due à la sous pression



4.6.6.2. Stabilité au basculement

Il s'agit de s'assurer qu'aucunes tractions dues à un basculement n'apparaissent le long de l'interface béton-rocher pour les combinaisons d'actions de type normal et restent limitées pour les combinaisons d'actions de type exceptionnel et extrême statique selon les critères suivants:

Combinaisons de type normal (type 1):	Résultante des forces agissant dans le tiers central de la section (y compris déduction due aux sous pressions)
Combinaisons de type exceptionnel (type 2):	Résultante des forces agissant dans les deux tiers centraux (un tiers de la section réparti de part et d'autre du centre) de la section (y compris déduction due aux sous pressions)
Combinaisons de type extrême statique (type 3):	Résultante des forces agissant dans la section (y compris déduction due aux sous pressions)

Au cas où ce critère n'est pas satisfait, une analyse de stabilité détaillée tenant compte de l'ouverture de la zone de contact doit être effectuée et des mesures constructives appropriées envisagées, par exemple pour empêcher la pénétration d'eau à l'interface pour les combinaisons d'actions de type normal.

La zone non-fissurée doit être à même de reprendre les forces à l'interface avec les facteurs partiels selon le *Tableau 4-5*.

4.6.6.3. Stabilité au soulèvement

La stabilité au soulèvement ou flottaison se définit par le rapport entre la somme des forces verticales dirigées vers le bas V_b et celle des forces verticales dirigées vers le haut V_h et est satisfaite si

$$V_h \leq V_b / \gamma_{sf}$$

La stabilité au soulèvement (par exemple un soulèvement hydraulique par annulation des contraintes effectives) doit être vérifiée dans le cas des barrages "légers", tels que les barrages mobiles et les remblais, en présence de couches géologiques peu ou pas perméables à l'aval du barrage.



4.6.7. Résistance ultime de l'ouvrage de retenue

4.6.7.1. Ouvrages en remblai

La vérification a pour but de s'assurer que la stabilité de l'ouvrage est préservée pour toutes les combinaisons d'actions considérées, avec une marge de sécurité contre l'apparition de dégâts éventuels selon les facteurs partiels de résistance (Tableau 4-6).

Une vérification portant sur le risque d'érosion interne doit être effectuée. La présence de racines en décomposition ou de nids ou terriers de rongeurs qui forment des chemins de percolation préférentiels, d'un endommagement des systèmes d'étanchéité ou de drainages, d'un endommagement du filtre, etc. doit être considérée. Il en va de même en ce qui concerne le déchaussement par exemple pour des remblais dont le pied aval se trouve à proximité immédiate d'un cours d'eau pouvant sortir de son lit ou en présence de digues submersibles.

4.6.7.2. Ouvrages en béton

La vérification a pour but de s'assurer qu'aucun endommagement du béton (fissuration) ne se produise qui soit propre à engendrer une instabilité locale ou globale, pour toutes les combinaisons d'actions considérées et avec une marge de sécurité selon les facteurs partiels de résistance (Tableau 4-6).

Au cas où les contraintes dépassent les résistances admissibles, il doit être démontré qu'une redistribution des contraintes est possible. Si la démonstration est effectuée sur la base d'un calcul de stabilité partiel (par exemple d'un bloc), les facteurs partiels de résistance selon le Tableau 4-5 ("stabilité d'ensemble") sont à satisfaire.

En cas de fissuration possible, il est également nécessaire de s'assurer qu'aucune masse d'eau ne puisse s'échapper de l'ouvrage de manière incontrôlée, ni qu'une érosion de l'ouvrage par abrasion ne puisse se produire.

4.6.7.3. Ouvrages mobiles

Les ouvrages mobiles sont traités de manière similaire aux ouvrages en béton.



4.6.8. Zone de fondation

La vérification à la résistance ultime de la zone de fondation inclut:

- **capacité portante:** Vérification de l'état de contraintes de la zone de fondation selon les règles usuelles de la géotechnique, en particulier au contact fondation-rocher, en tenant compte des facteurs partiels selon le *Tableau 4-6*;
- **glissement ou rupture:** Selon les règles usuelles de la géotechnique et de la mécanique des roches, en tenant compte des facteurs de résistance selon le *Tableau 4-5* (valable pour les surfaces de glissement et les coins rocheux);
- **affouillements:** Notamment à l'aval des barrages mobiles, liés au mode d'exploitation de l'ouvrage. Des mesures appropriées (d'exploitation et/ou constructives) doivent être prises si la stabilité de l'ouvrage est menacée;
- **érosion:** Notamment en présence de percolation, endommagement du voile d'étanchéité, et présence de fissures.

4.6.9. Stabilité des versants de la zone de retenue

La vérification a pour but de s'assurer qu'aucun glissement, détachement ou instabilité pouvant provoquer une vague impulsive propre à endommager ou à submerger l'ouvrage ou à directement endommager l'ouvrage de retenue ou ses ouvrages annexes de sécurité (y compris les organes de décharge) ne puissent se produire, en tenant compte des facteurs partiels de résistance selon le *Tableau 4-5*. Une attention particulière doit être portée au cas de charge de vidange rapide.

Au cas où cette démonstration ne peut être fournie, les conséquences éventuelles d'une instabilité et d'une vague impulsive ainsi générée doivent être évaluées. En fonction de ces conséquences, les dispositions constructives (par exemple drainage de la zone, pose d'ancrages ou de clous, etc.), de surveillance (propre à identifier un danger imminent) ou d'exploitation (augmentation de la revanche) nécessaires doivent être prises.



5. Considérations constructives particulières

5.1. Végétation sur les barrages en remblai

Les talus et le couronnement des **nouveaux** barrages en remblai doivent rester libres de toute végétation (arbres, arbustes et buissons denses) qui pourrait

- endommager les dispositifs d'étanchéité de par la propagation de racines;
- obstruer les systèmes de drainage;
- empêcher le contrôle visuel des talus (mise en évidence de tassement, d'instabilité, de fissures, de venues d'eau) ;
- attirer des rongeurs qui peuvent creuser des trous et des couloirs et, par-là, endommager les dispositifs d'étanchéité ou constituer des chemins de percolation interne préférentiels ;
- provoquer des dégâts importants aux talus en cas d'arrachement (par exemple de par des arbres abattus lors de vents violents).

Une végétation ne peut être admise que pour des plantes à racines courtes et disposées de façon clairsemée et pour autant qu'un surprofil du remblai soit présent (absence de racines dans le profil statique).

Pour les **ouvrages existants** et les **digues latérales** des barrages mobiles, les mêmes exigences que pour les nouveaux ouvrages s'appliquent dans leur principe. D'entente avec l'autorité de surveillance, une certaine flexibilité quant à la mise en œuvre peut cependant être admise, notamment à l'extérieur du profil statique requis.

Selon la législation fédérale sur les forêts (Loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991, RS 921.0 et Ordonnance sur les forêts du 30 novembre 1992, RS 921.01), les buissons et les arbres situés sur un barrage ou immédiatement contre le pied aval d'un barrage (en règle générale dans une bande de 10 m de largeur) ne sont pas considérés comme forêts et ne tombent pas sous les dispositions de cette législation.

5.2. Constructions sur les ouvrages en remblai

Les talus, le couronnement ainsi que le terrain à proximité immédiate des ouvrages en remblai (bande d'environ 10 mètres) doivent rester libres de toute construction qui pourraient entraver la bonne exécution des contrôles visuels nécessaires et des mesures (notamment mesures géodésiques).



6. Protection contre les actes de sabotage (art. 6 al. 7 LOA)

Il s'agit de prévenir les actes de sabotage à l'encontre des ouvrages d'accumulation dont le territoire submersible est exposé à un grand danger (art. 11 al. 2 LOA, art. 26 al. 2 OSOA). Cela concerne tous les ouvrages d'accumulation disposant d'un dispositif alarme-eau (cf. partie E de la directive). L'autorité de surveillance peut ordonner d'étendre les mesures à prendre à d'autres ouvrages si nécessaire ainsi qu'ordonner la prise d'autres mesures, par exemple sur la base de l'analyse des dangers effectuée dans le cadre de l'élaboration du règlement en cas d'urgence. Elle peut également renoncer à exiger des mesures mentionnées ci-après si elles ne contribuent que marginalement à prévenir les actes de sabotage ou si d'autres mesures équivalentes sont prévues.

- Accès à l'intérieur d'un ouvrage de retenue :
 - o les portes d'accès à l'intérieur des ouvrages de retenue doivent satisfaire à la classe de résistance RC 4 selon EN 1627:2011 ;
 - o par principe, seules les personnes autorisées doivent avoir accès à l'intérieur des ouvrages de retenue. L'instrumentation de mesure se trouvant le long du chemin de visite doit alors être protégée contre des manipulations intempestives ;
- Accès aux commandes des organes de décharge et de vidange:
 - o L'accès au tableau commande des organes de décharge et de vidange doit être restreint au personnel autorisé. Les accès aux commandes qui ne se trouvent pas à l'intérieur d'un ouvrage de retenue ou d'un bâtiment satisfaisant à la classe de résistance RC 4 selon EN 1627:2011 doivent eux-mêmes satisfaire à cette exigence;
- Accès aux vannes
 - o Lorsqu'il est facilement possible d'atteindre les vannes des organes de vidange par l'aval, l'accès doit en être surveillé (par exemple détecteur de personne et caméra vidéo). Un filet de protection ou une grille légère empêchant les animaux de pénétrer dans la galerie de fuite sans restreindre le débit peut être installé afin d'éviter les alarmes intempestives.

7. Démantèlement d'ouvrage

Le démantèlement d'un ouvrage d'accumulation est assimilé, du point de vue de la procédure, à une modification d'ouvrage. Si les critères d'assujettissement selon l'art. 2 LOA ne sont plus satisfaits après le démantèlement, l'exploitant peut demander à l'autorité de surveillance qu'elle constate ce fait; l'ouvrage ne tombe alors plus sous les dispositions de la LOA.

Une remise en fonction de l'ouvrage d'accumulation après qu'il ait été démantelé correspond à la construction et à la mise en service d'un nouvel ouvrage avec les autorisations préalables que cela implique.

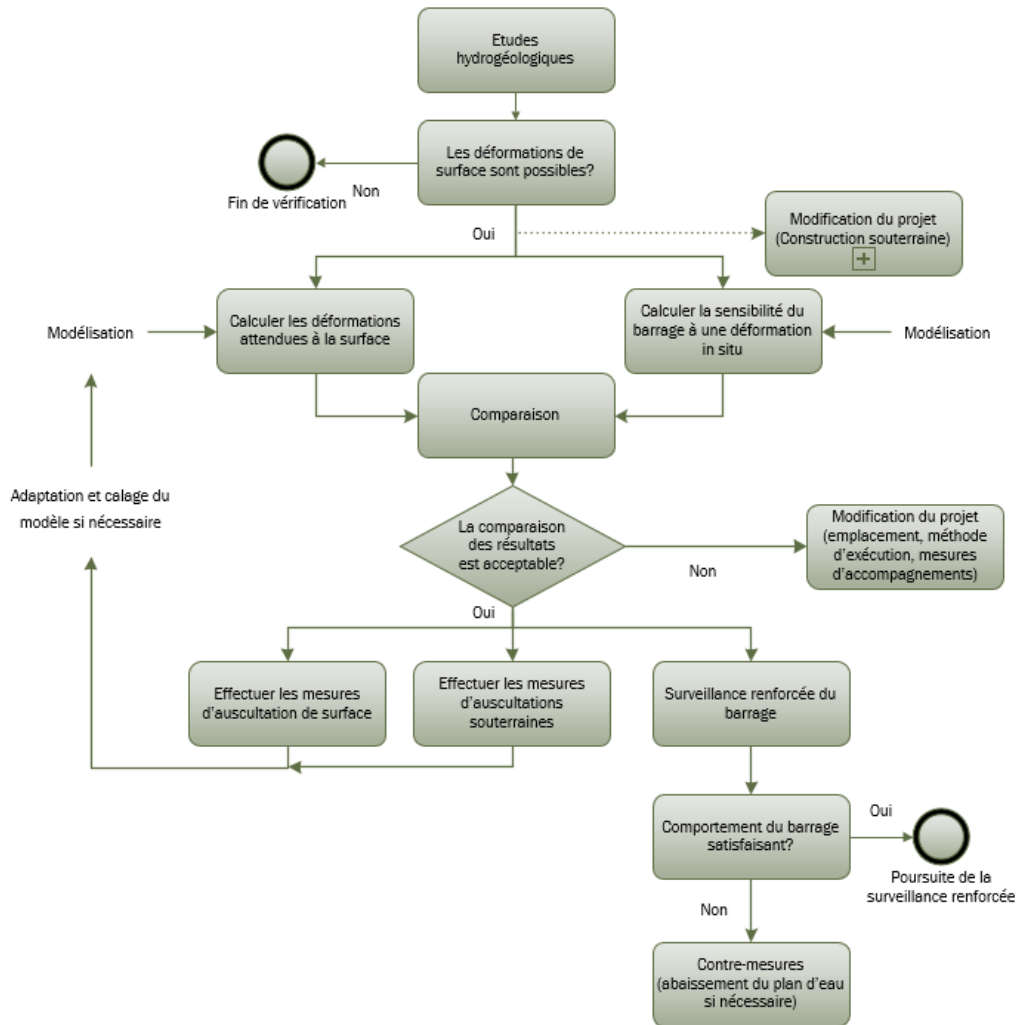


8. Bibliographie

- Arioglu, N., Canan Girin, Z., Arioglu, E. (2006). Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion. *ACI Materials Journal* 103(1), 18–24.
- Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J. & Miklau-Rudolf, F., 2009: *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren, Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*. Ernst und Sohn.
- ETH Zürich, 2003. *Einführung in die Physik aquatischer Systeme, Professur für Umweltphysik, notes du cours 2003/2004*.
- Fok K-L, Chopra A. K *Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams*, Earthquake Engineering research Center, Report N° UCB/EERC-85/07, pp. 20 - 33 July 1985.
- Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen, 1999: *Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren*.
- Heller Valentin, Hager Willi H., Minor Hans-Erwin, 2009: *Landslide generated impulse waves in reservoirs, Basics and computation, VAW_4257 EN, February 27th 2009*.
- ICOLD-EC, 2004: *ICOLD European Club, Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams, Final Report, 2004*.
- Kupfer H. B., Gerstle K. H. *Behaviour of Concrete under biaxial Stresses*, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, pp. 853-866, August 1973.
- Obernhuber, Pius, 2014: *Internationale Übersicht über die Anforderungen an die Gleit- und Kippsicherheitsnachweise von Gewichtsmauern, OFEN, avril 2014*.
- Rickenmann, D., 1995: *Beurteilung von Murgängen*. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Nr. 48, pp. 1104-1108.
- Rickenmann, D., 1999: *Empirical relationships for debris flows*. *Natural Hazards*, 19(1), 47-77.
- Rickenmann, D., 2008: *Lastfälle aus Murgangprozessen – Bemessungsgrundlagen*. *Herbstkurs der Fachleute für Naturgefahren (FAN), Bellinzona, Schweiz, 17.9.2008*.
- Rickenmann, D. 2016: *Methods for the quantitative assessment of channel processes in torrents (steep streams)*. *IAHR Monograph Series, CRC Press/Balkema, ISBN: 978-1-138-02961-3 (Hbk), ISBN: 978-1-4987-7662-2 (eBook PDF)*.
- Salm, B., Zarn, B., Bigger, V., 1987: *Schnee, Lawinen und Lawinenschutz; Vorlesung, ETHZ*.
- Schleiss Anton J., Pougatsch Henri, 2011: *Les Barrages – Du projet à la mise en service, Traité de génie civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, Vol. 17*.
- SIA 2013a: *Norme 267, Géotechnique*.
- SIA 2013b: *Norme 267/1, Géotechnique – Spécifications complémentaires*.
- SIA 2014: *Norme 261, Actions sur les structures porteuses*.
- US Army Corps of Engineers, 2000: *“Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Gravity Dams by Three Federal Agencies”*, ERDC/ITL TR-00-1 January 2000.



Annexe 1 Procédure permettant de prévenir toute atteinte à la sécurité d'un ouvrage d'accumulation en cas de construction souterraine à proximité



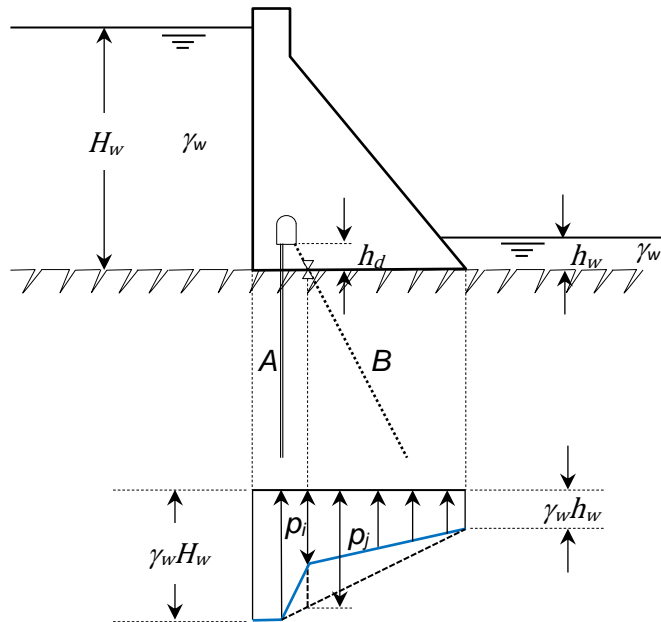


Annexe 2 Exigences ("charges") caractéristiques à satisfaire avant, pendant ou à la fin des travaux

Exigences (sélection)
Avant l'exécution des travaux
Annonce écrite du début des travaux
Confirmation par essais des caractéristiques des matériaux admises lors des vérifications
Pendant l'exécution des travaux (voir également art. 6 al. 2 OSOA)
Planification actualisée des travaux et état d'avancement des travaux
Accompagnement des travaux de construction et des injections par un professionnel (par exemple géologue ou géotechnicien)
Éventuelles restrictions d'exploitation (lors de la modification d'un ouvrage existant)
Installation d'un dispositif d'alarme-eau
Communication des résultats des contrôles d'exécution et des essais de matériaux
Communication des résultats des travaux d'injection
Annonce d'évènements particuliers
Annonce écrite de la fin des travaux
A la fin des travaux (voir également art. 6 al. 3 et art. 9 OSOA)
Remise d'un rapport final de construction y compris documentation photographique des travaux
Remise de l'interprétation des résultats des contrôles d'exécution et des essais de matériaux
Remise des plans conformes à l'exécution
Remise des relevés géologiques et de leur interprétation
Remise de l'interprétation des résultats des contrôles effectués durant les travaux
En cas de travaux sur les organes de décharge et de vidange: contrôle de leur fonctionnement (essai avec lâchure)
Spécifiques aux modifications d'ouvrage
Mesure de référence avant début des travaux (y compris géodésie complète)
Protection du système de mesures existant durant les travaux (en particulier de mesures géodésiques)
Poursuite du programme de mesures, éventuellement de manière renforcée; communication des résultats (à qui, à quelle fréquence)



Annexe 3 Formes conventionnelles des diagrammes de sous-pressions



Légende

A rideau d'injection

B voile de drainage

X point de mesure à l'interface

p_j pression sans l'effet de drainage à l'interface

p_i pression avec l'effet de drainage à l'interface : $p_i = p_j - k(p_j - p_m)$, où

p_m la plus grande valeur de pression entre $\gamma_w h_w$ et $\gamma_w h_d$ (selon l'élévation de la galerie)

k coefficient de réduction / rabatement (voile de drainage)

Nota :

- i) Il faut s'assurer que l'espacement des forages de drainage ainsi que ceux du rideau d'injection sont adéquats pour l'atteinte des objectifs au moyen d'essais sur site.
- ii) Les diagrammes ci-dessus ne s'appliquent pas aux barrages à contreforts, joints évidés et évidés (cas spécifiques).



Annexe 4 Définition des trois classes d'ouvrages d'accumulation

