

Sécurité des ouvrages d'accumulation

Documentation de base relative à la sécurité structurale

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, série Eaux -
Rapporti dell'UFAG, serie Acqua
Bienne, 2002

Version 1.0 (Août 2002)



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



Membres du groupe de travail

Ammann Eduard	IM Ingegneria Maggia SA, Locarno
Hauenstein Walter, Dr.	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden
Loosli Daniel	Colenco Power Engineering AG, Baden
Mouvet Laurent	EPFL-Laboratoire de constructions hydrauliques, Lausanne
Müller Rudolf W. (Secrétaire)	Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel
Pougatsch Henri (Président)	Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Rechsteiner Gian	Énergie Ouest Suisse, Lausanne



TABLE DES MATIÈRES	Seite
INTRODUCTION	4
PARTIE 1 – PLAN D'UTILISATION	6
1. But du plan d'utilisation	6
2. Structure du plan d'utilisation	6
3. Eléments du plan d'utilisation	7
A) Affectation	7
B) Données de base et principes généraux	10
C) Conditions liées au site	11
D) Dispositions structurelles	13
E) Description de l'ouvrage	17
PARTIE 2 – PLAN DE SÉCURITÉ	21
1. But du plan de sécurité	21
2. Structure du plan de sécurité	21
3. Eléments du plan de sécurité	22
A) Actions	22
B) Situations critiques	26
C) Causes	31
D) Mesures	32
E) Risque résiduel	36
BIBLIOGRAPHIE	37



INTRODUCTION

Rappel des bases légales

Les bases légales relatives à la sécurité des ouvrages d'accumulation sont constituées par l'article 3^{bis} de la loi fédérale du 22 juin 1877 sur la police des eaux (RS 721.10), ainsi que l'ordonnance du 7 décembre 1998 sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) (RS 721.102).

Le champ d'application de l'OSOA est donné par son article 1. Il indique que l'OSOA s'applique automatiquement aux ouvrages d'accumulation dont la hauteur de retenue au-dessus du niveau d'étiage du cours d'eau ou du niveau du thalweg est de 10 m au moins, ou, si cette hauteur est de 5 m au moins, à ceux dont la capacité de retenue est supérieure à 50'000 m³. Elle est aussi appliquée aux ouvrages d'accumulation de moindres dimensions lorsqu'ils représentent un danger particulier pour les biens et les personnes. Elle n'est par contre pas appliquée s'il l'on établit que les ouvrages d'accumulation en cas de rupture ne constituent aucun danger particulier pour les biens et les personnes. L'OSOA confie la surveillance des petites retenues aux cantons (Art.22 OSOA).

Objectif de la documentation de base relative à la sécurité structurale

En vertu de l'article 26 OSOA, l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) peut préparer des directives en collaboration avec des représentants des autorités cantonales, des milieux scientifiques, des organisations professionnelles et de l'économie. Afin de préciser dans les directives les points relevant de la sécurité structurale, l'OFEG a formé un groupe de travail. Ce dernier a préparé cette documentation de base qui peut être employée comme document explicatif et complémentaire aux directives.

Il faut mentionner que le groupe de travail "Observation des barrages" du Comité suisse des grands barrages (CSB) a édité en décembre 2000 une publication intitulée "Sécurité structurale. Plan d'utilisation et plan de sécurité" [6]. Ce document a été préparé dans l'esprit de servir de base à la présente documentation et aux directives de l'OFEG. C'est pour cette raison que l'OFEG a conservé le même groupe de travail pour préparer cette documentation de base.

Ce document a pour objectif d'apporter toutes les précisions utiles pour développer les plans d'utilisation et de sécurité tels qu'ils sont présentés dans la publication du CSB. Il ne doit toutefois pas être considéré comme une check-list. Son contenu doit faciliter la démarche de l'exploitant et de l'ingénieur, ainsi que des autorités de surveillance, en ce qui concerne

- l'élaboration d'un nouveau projet,
- les transformations d'un ouvrage existant,
- l'analyse de la sécurité d'un ouvrage existant,
- la rédaction des consignes de service et de surveillance au stade de l'exploitation.

Le concept développé dans cette documentation de base se rapporte à tous types d'ouvrages d'accumulation quelle que soient leur fonction (en particulier les ouvrages pour le stockage d'eau, les ouvrages de protection et de rétention). Il faut rappeler que les ouvrages d'accumulation sont constitués d'un ouvrage de retenue (barrage) et d'un bassin d'accumulation (ou zone de retenue). Par cette notion d'ouvrage d'accumulation, il est indiqué que l'on se préoccupe de la sécurité non seulement de



l'ouvrage de retenue, mais également de ses fondations et ses zones environnantes, de même que celle des ouvrages annexes (évacuateur de crue, vidange de fond, etc.). Un ouvrage de retenue peut être un barrage en béton, un barrage en remblai ou un barrage mobile.

Il est bien clair que chaque ouvrage d'accumulation représente un objet particulier, aussi les plans d'utilisation et de sécurité doivent-ils être adaptés à chaque cas spécifique.



PARTIE 1 PLAN D'UTILISATION

1 But du plan d'utilisation

Etabli par l'ingénieur mandaté en accord avec le Maître de l'ouvrage, le plan d'utilisation ¹ permet de formuler les données de base du projet (fonction et caractéristiques de l'ouvrage d'accumulation, conditions d'exploitation). Il comprend la description des dispositions constructives particulières qui doivent être mises en œuvre lors de l'élaboration et la réalisation du projet. Enfin, il permet de faire état des exigences de l'autorité de surveillance et des conditions particulières d'exploitation fixées par la concession. A ce stade, il est possible de spécifier les hypothèses générales pour le dimensionnement.

Il est important de considérer dans le plan d'utilisation l'aspect de la sécurité de fonctionnement des organes de décharge mobiles.

Au cours des différentes étapes du projet et au cours de l'exploitation, le plan d'utilisation sera régulièrement mis à jour de sorte qu'il exprime toujours l'état actuel.

2 Structure du plan d'utilisation

Il appartient à l'ingénieur de définir la structure du plan d'utilisation la mieux adaptée à chaque cas particulier. En règle générale, le plan d'utilisation traite au moins des thèmes suivants:

- A) Fonction
- B) Données de base et principes généraux
- C) Conditions liées au site
- D) Dispositions structurelles
- E) Description de l'ouvrage

Le chapitre 3 contient pour chacun des points énumérés ci-dessus une liste de sujets concernant spécifiquement les barrages. Ces listes ne sont pas exhaustives, mais elles doivent faciliter l'établissement d'un plan d'utilisation.

Des exemples figurent dans la publication "Sécurité structurale des barrages. Plan d'utilisation et plan de sécurité" (Décembre 2000) du Comité suisse des barrages (CSB) [6].

¹ Un plan d'utilisation peut être établi aussi bien pour un nouvel ouvrage qu'un ouvrage existant.

3 Éléments du plan d'utilisation

A) Affectation

A1 *Affectation principale*

Il faut mentionner qu'un ouvrage d'accumulation peut avoir plusieurs affectations principales qui vont conditionner le choix des dimensions de l'ouvrage, des organes de décharge et du mode d'exploitation. Différentes fonctions sont énumérées ci-dessous.

Stockage de l'eau en vue de

- *Production d'électricité*
- *Alimentation en eau potable*
- *Irrigation*
- *Production de neige artificielle*
- *Pisciculture*
- *Réserve incendie*
- *Navigation*

Protection

- *Bassin de rétention des crues*
- *Digue pour la protection contre les crues*
- *Barrage de rétention de sédiments charriés*
- *Barrage de correction de torrent*
- *Ouvrage de protection contre les avalanches*
- *Régularisation des lacs*

Autres affectations

- *Biotope*
- *Loisirs, tourisme*
- *Réservoir subsistant d'un ancien aménagement (parfois sans affectation)*

A2 *Affectations accessoires*

Des affectations accessoires peuvent nécessiter soit la construction de parties singulières ayant une incidence directe sur la géométrie et le dimensionnement de l'ouvrage d'accumulation (par exemple, piles pour un pont), soit des mesures de sécurité ou de protection particulières. Il est donc utile de faire figurer ces détails dans les plans d'utilisation et de sécurité. Des indications concernant ces affectations accessoires sont données dans ce paragraphe sans reprendre les mesures qu'elles imposent dans la partie du plan de sécurité.

- *Voies de communication*
Pour assurer le passage du trafic, le couronnement peut être utilisé comme route ou un pont (voire une passerelle), dont les piles prennent appui sur le barrage, est érigé. Les dimensions des chaussées dépendent de la nature du trafic. Pour le dimensionnement des structures, comme les ponts ou les passerelles, les normes, directives et recommandations correspondantes (SIA, SNV) sont appliquées.



- Passage de conduites industrielles (gaz, hydrocarbures, eau, télécommunication, électricité)

Les conduites peuvent être posées directement en surface, dans le barrage ou se trouver à proximité. Il est alors nécessaire de préciser, dans le plan de sécurité, quelles peuvent être les conséquences en cas de rupture d'une ou de plusieurs conduites. Dans le cas d'une explosion (par exemple, celle d'une conduite de gaz), les pressions d'air engendrées ne sont pas négligeables et il s'agit d'évaluer l'incidence sur l'ouvrage d'une action instantanée, assimilable à un tremblement de terre.

Il faut aussi relever qu'il devient fréquent d'utiliser le lit de la rivière pour la pose de câbles (notamment fibre optique). Au passage de barrages en rivière (en particulier les barrages en remblai), cette sujétion peut conduire à des faiblesses dues à la percolation. Si des câbles de commande sont posés à l'aval d'ouvrages d'accumulation, ils doivent être protégés contre tous dégâts en cas de crue.

- Support pour autres structures (mâts, ...)

En mettant en place des socles de fondation sur des barrages en remblai, il faut veiller à ne pas créer d'instabilités locales des talus (vérifier la capacité portante des sols) et à garantir sur le long terme les dispositifs d'étanchéité et/ou de drainage.

- Navigation

En cas de besoin, la mise en place d'une signalisation normalisée est requise.

Les documents qui fournissent les indications nécessaires sont signalés dans la bibliographie.

- Echelle à poissons

Les échelles à poissons sont souvent intégrées aux ouvrages d'accumulation, surtout à ceux situés en rivière.

Les documents qui fournissent les indications quant à la réalisation des échelles à poissons sont signalés dans la bibliographie.

- Loisirs

La sécurité des personnes doit être assurée par des mesures appropriées (surveillance, mise en place de barrières, chemin au-dessus du niveau des plus hautes eaux, signalisation adéquate, panneaux de mise en garde, etc.). Il est parfois possible qu'une installation destinée à une activité de loisirs requière une vérification particulière (par exemple, incidence d'une passerelle pour le ski de fond sur la stabilité d'un talus d'un barrage en remblai).

Entrent dans cette catégorie "Loisirs" les activités suivantes:

- Pêche
- Baignade
- Plongée
- Promenade
- Saut à l'élastique
- Varappe
- Navigation de plaisance
- Ski de fond

A3 Durées d'utilisation

Les durées d'utilisation ne doivent pas être comparées avec les durées d'amortissement des installations. La durée de vie des ouvrages est donc plus longue que les durées d'amortissement. Une limite d'utilisation ne signifie pas le démantèlement ou la ruine de l'ouvrage, éventuellement d'un élément, mais plutôt la nécessité d'engager des moyens importants pour assurer sa réhabilitation, sa transformation en vue de prolonger sa durée d'exploitation ou son remplacement. Il faut aussi souligner qu'un bon entretien permet une prolongation de la durée d'utilisation.

Des durées d'utilisation peuvent être estimées pour les parties d'ouvrages et équipement donnés ci-dessous. Les valeurs fixées doivent aussi permettre d'établir les consignes de surveillance et d'entretien.

- Barrage (structure)
- Revêtement
- Équipement mécanique
- Vantellerie, blindage
- Dispositif d'auscultation

L'expérience montre que les durées d'utilisation peuvent fortement varier pour des matériaux, des installations, des équipements identiques ou comparables. C'est pour cette raison que le présent document ne comporte aucune indication systématique de durée d'utilisation et se borne à quelques considérations, qui doivent permettre, si besoin est, de fixer ou d'évaluer une durée.

Il faut tout d'abord mentionner que les ouvrages d'accumulation sont souvent intégrés à des aménagements hydroélectriques pour lesquels une concession est octroyée pour des durées variables, mais n'excédant pas actuellement 80 ans. Elles peuvent toutefois être prolongées. Il est clair que des parties particulières de l'ouvrage (étanchéité, revêtement, ancrages, etc.) auront une durée d'utilisation plus faible que celle du corps du barrage et devront être assainis en cours d'exploitation.

Il en va de même des équipements mécaniques, pour lesquels des remplacements de pièces seront par exemple nécessaires durant leur durée d'utilisation. De tels équipements devraient pouvoir fonctionner pendant 40 à 50 ans sans devoir être remplacés. Quant au blindage et à la vantellerie, ils devraient pouvoir passer le cap des 50 ans.

Une attention toute particulière doit être portée au dispositif d'auscultation, pour lequel l'évolution technique peut jouer un rôle important. Une distinction est faite entre les instruments de mesure, les ordinateurs, les systèmes de mesure automatique et les points de repère ou de mesure.

On peut aussi se référer aux valeurs qui peuvent être données par un fournisseur.

Les documents qui fournissent des valeurs indicatives sont signalés dans la bibliographie.

A4 Conditions générales d'exploitation ²

Il appartient au Maître de l'ouvrage de fixer le mode d'exploitation du bassin d'accumulation. En général, ces derniers font l'objet d'une étude d'optimisation.

L'exploitation peut être définie par les points suivants:

- Volume utile et volume total du bassin d'accumulation
- Mode d'exploitation du bassin d'accumulation (niveaux, etc.)
- Volume réservé pour la protection contre les crues
- Fourniture d'électricité
- Fourniture d'eau industrielle

² On peut trouver dans le glossaire des termes relatifs aux barrages établi par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), ainsi que dans la banque de données de terminologie TERMDAT, les définitions utiles concernant les volumes et les niveaux.



- Dotation, débits résiduels ³
- Accès

B) Données de base et principes généraux

- Législation fédérale (lois, ordonnances, directives, recommandations) relative aux ouvrages d'accumulation, à l'aménagement des cours d'eau, à la protection des eaux, à la pêche, aux forêts, à la protection civile
- Législation cantonale
- Concession
- Normes, directives, recommandations d'associations professionnelles (SIA, SUVA, SN, ...)
- Cartes topographiques
- Annuaires hydrologiques et météorologiques
- Publications du Comité suisse des barrages (CSB), de la Commission internationale des grands barrages (CIGB)
- Littérature technique
- Documentation issue du temps de la construction
- Documentation issue de l'exploitation
- Rapports techniques

³ Le chapitre 2 de la loi fédérale sur la protection des eaux donne toutes indications concernant le maintien de débits résiduels convenables

C) Conditions liées au site

C1 Conditions topographiques

- Relevés de terrain

Pour l'implantation du barrage et de ses ouvrages annexes, il est recommandé de travailler sur des relevés au 1:500, et pour les détails au 1:200. Pour la zone du bassin d'accumulation, les relevés sont, selon la surface de la retenue, au 1:1'000, 1:2'000, voire 1:5'000. Ils doivent englober les versants dominant le bassin d'accumulation sur une hauteur suffisante.

C2 Géologie / Géotechnique

Au chapitre de la géologie et de la géotechnique, il est important de constituer un document de référence dans lequel seront introduit au fur et à mesure les résultats des investigations, les observations faites en cours de travaux (excavations, galeries, forages, injections), de même que les observations et recherches effectuées en cours d'exploitation. Il englobe entre autres l'avis géologique, la description des roches de surface et des terrains de couverture, la description des structures (pendages, failles, etc.), des indications concernant l'hydrogéologie (nappes, sources, etc.), la géologie de détail du site du barrage, des indications concernant la retenue (étanchéité du bassin, zones potentielles de glissement de terrain et d'éboulement rocheux).

Les zones d'emprunts pour les matériaux de construction sont aussi identifiées.

La première évaluation des conditions géotechniques et géologiques permet de fixer la nature de la campagne de reconnaissance (implantation des forages, détermination des essais de roches et/ou de sols, etc.).

Les caractéristiques des roches et des sols sont aussi documentées.

Relevés géologiques

- Description géologique régionale et locale
- Conditions de fondation
 - Surface de fondation
 - Appuis
- Conditions géologiques concernant la retenue
 - Étanchéité de la cuvette
 - Stabilité des versants (glissement, éboulement)
- Disponibilités en matériaux (matériaux de remblai, agrégats à béton)
- Sismicité

C3 Hydrologie

De nombreuses données peuvent être reprises des publications de MeteoSuisse (anciennement ISM), du Service hydrologique national rattaché à l'OFEG. Des données sont aussi publiées par les cantons.

- Conditions météorologiques et hydrologiques

Ces données sont prises en compte pour le projet et servent de référence pour la prolongation des séries de données en vue de vérifications ultérieures.

- Précipitations
- Régime d'écoulement
- Crues
- Transports solides



- **Avalanches et chutes de glace**
Pour évaluer l'existence d'un danger pour un ouvrage d'accumulation en cas d'avalanches et/ou de présence de glaciers, il est important de faire appel à des spécialistes. En cas de menace, des mesures doivent être prises pour éviter tout débordement par dessus le couronnement consécutif à l'arrivée dans la retenue de masses importantes de neige ou de glaces. Ces dispositions peuvent consister en une revanche complémentaire ou une limitation temporaire du niveau du plan d'eau permettant d'encaisser les volumes en jeu ⁴.

C4 Environnement

Pour les études d'impact sur l'environnement, toutes indications utiles figurent dans les diverses publications (communications, manuels, etc.) édités par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

- Objets protégés
- Mesures compensatoires et de remplacement

⁴ D'autres mesures, comme un abaissement rapide, peuvent être prises pour parer au danger. Ces mesures doivent être introduites dans le plan de sécurité.



D) Dispositions structurales

D1 Implantation et hauteur du barrage

Ce sont, en priorité, des conditions géologiques et topographiques qui dictent le choix du site de l'ouvrage de retenue. En ce qui concerne la détermination de la hauteur de l'ouvrage, elle résulte des exigences du projet et d'une étude technico-économique.

D2 Type de barrage

La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site ou à proximité déterminent le type de barrage et les possibilités d'intégration des ouvrages annexes. Il existe des barrages en béton et en maçonnerie. Quant aux barrages en remblai, ils sont en terre et en enrochements.

Barrage en béton

- Barrage poids en béton ou en béton compacté au rouleau BCR (voire en maçonnerie, pour des ouvrages anciens)
Le barrage poids a une section de forme triangulaire. Son poids propre suffit seul à contenir la poussée de l'eau.
- Barrage à contreforts
Ce barrage est constitué d'une face amont prenant appui sur des contreforts. Les contreforts sont relativement minces et conduisent les efforts jusqu'aux fondations. Ce mode de construction se subdivise en sous-catégories: contreforts à tête prismatique ou arrondie, à masque amont, à voûtes multiples.
- Barrage voûte
Ce type d'ouvrage a une forme arquée. La poussée de l'eau est en grande partie reportée sur les appuis latéraux. Ce type de barrage ne convient que lorsque la qualité de la roche de fondation est suffisante pour admettre de fortes sollicitations.

Barrage en remblai

Ces ouvrages, composés de terre et d'enrochements, ont une section de forme triangulaire et sont classés selon leur type d'étanchéité:

- Barrage en remblai en terre homogène
- Barrage en remblai zoné avec étanchéité intérieure (par exemple, noyau argileux, paroi moulée, diaphragme en béton ou béton bitumineux)
- Barrage en remblai avec étanchéité amont (dalle en béton, tapis bitumineux, membrane)

Barrage en rivière et digues latérales

Ces types d'ouvrage concernent principalement les aménagements hydroélectriques au fil de l'eau et de régularisation des lacs. L'ouvrage de retenue englobe tant la partie mobile que les digues latérales limitant la retenue le long des berges de la rivière.

On parle de barrage mobile si celui-ci comporte des organes mobiles de fermeture (vannes métalliques, vannes souples gonflables) sur au moins 50 % de sa surface mouillée à niveau normal de retenue.



D3 Critères de dimensionnement

- Stabilité

Pour les barrages en béton (poids, à contreforts, mobiles), la stabilité au glissement, au renversement, le cas échéant au soulèvement, de même que la sécurité vis-à-vis de la rupture du sol (capacité portante), l'état de contrainte interne et au niveau des fondations, doivent être vérifiés.

Pour les barrages-voûtes, la capacité portante des appuis et de l'état de contrainte interne de la structure doivent être vérifiées.

Pour les barrages en remblai, la vérification porte sur la stabilité des pentes des talus, la capacité portante des fondations.

Les différentes charges (actions) et leurs combinaisons, ainsi que les coefficients de sécurité à introduire, sont définis sous B) " Situations critiques" de la partie 2 "Plan de sécurité".

- Evacuation des crues ⁵

La crue est un événement naturel qui peut causer des pertes en vies humaines et des dommages aux biens. En conséquence, les ouvrages de retenue doivent être conçus pour permettre le passage des crues sous des conditions prévues et avec la marge de sécurité fixée.

Pour l'analyse de la sécurité des ouvrages d'accumulation en cas de crues, 2 types de crue doivent être considérés :

- la crue de projet
- la crue de sécurité.

- Séisme ⁶

Pour la vérification de la sécurité en cas de séisme, les ouvrages de retenue sont répartis en 3 classes. A chacune d'entre elles correspondent des exigences différentes. La répartition en classes est faite sur la base des données géométriques (hauteurs, volumes) figurant dans les articles 14, 21 et 22 OSOA (voir Tableau 1).

CLASSE	DESCRIPTION	CRITÈRES
I	Ouvrages de retenue soumis tous les 5 ans à expertise	$H \geq 40$ m, ou $H \geq 10$ m et $V > 1'000'000$ m ³
II	Ouvrages soumis au contrôle de la Confédération	$H \geq 25$ m, ou $H > 15$ m et $V \geq 50'000$ m ³ , ou $H > 10$ m et $V \geq 100'000$ m ³ , ou $H > 5$ m et $V > 500'000$ m ³
III	Tous les ouvrages qui n'entrent pas dans la classe I et II, ainsi que les bassins de rétention	

Tableau 1 : Critères de classes pour la vérification des ouvrages au tremblement de terre

La vérification au tremblement de terre est requise pour de nouvelles constructions, un projet de transformation, suite à un comportement anormal, lors de modifications significatives de l'état des connaissances, en cas de modification des conditions d'exploitation.

⁵ Les critères de dimensionnement, les conditions de passage des crues et des mesures structurales figurent dans la "Documentation de base relative à la sécurité en cas de crues".

⁶ Les indications relatives aux données de base et aux méthodes de calcul figurent dans la "Documentation relative à l'évaluation de la sécurité parasismique des ouvrages d'accumulation".

- Abaissement du plan d'eau

Selon l'article 4 OSOA, "le niveau de la retenue doit pouvoir être abaissé en cas de danger imminent; la retenue doit pouvoir être vidée pour des travaux de contrôle et d'entretien. A cet effet, elle doit être équipée au moins d'une vidange de fond ou d'une vanne de fond, chacune de capacité suffisante" ⁷.

Dans le cas des retenues de moyenne ou de grande capacité, une durée d'abaissement n'est pas imposée; toutefois, on veillera, de cas en cas, à fixer une durée raisonnable, notamment en tenant compte du type de l'ouvrage, de la capacité hydraulique du cours d'eau à l'aval ⁸. En ce qui concerne la durée d'abaissement des petites retenues, on vérifiera que la vidange de la retenue jusqu'au niveau des organes de vidange est possible entre 1 et 3 jours, compte tenu que le débit entrant est égal au débit moyen annuel.

Les dimensions de la vidange de fond ou de la vanne de fond peuvent être telles qu'il soit possible de maintenir la retenue abaissée en cas de travaux ou d'événement extraordinaire. Dans le cas où des sédiments pourraient s'accumuler devant l'entrée de la vidange de fond, il faut veiller à ce que la section de cet organe soit suffisante pour permettre leur passage et garantir au moins un secteur, généralement de forme conique, libre de matériaux.

Une vanne de fond est un organe qui permet l'ouverture de la partie inférieure de passes d'un barrage en rivière. Par exemple, des vannes à double corps (vanne wagon verticale) offrent cette possibilité. Il en est de même de l'écoulement sous une vanne segment. L'ouverture d'une vanne segment permet aussi, par un écoulement sous vanne, de répondre à cette fonction. Il faut relever que les largeurs des passes des barrages en rivière doivent être telles que le passage des sédiments et de corps flottants en cas de crue soit possible.

Il faut mentionner qu'un cours d'eau peut être barré par un seuil qui vu ses faibles dimensions n'est pas équipé d'une vidange de fond.

En ce qui concerne la vidange des bassins de retenue, les bases légales sont fixées par l'article 40 de la Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux et l'Ordonnance fédérale du 19 juin 1992 et modification du 27 novembre 1994 sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20; OEaux, RS 814.201). L'article 42 OEaux précise les modalités d'exécution de vidange des bassins de retenue.

- Contrôle du 1^{er} remplissage

En règle générale (à l'exception des barrages en rivière et des bassins de rétention), le premier remplissage d'une retenue s'effectue au moins en 2 étapes. Cette opération s'effectue selon un programme préétabli qui précise le déroulement de la mise en eau, l'organisation de la surveillance ainsi que les mesures et les observations pour le contrôle du comportement. Le remplissage ne peut débuter que si les organes de décharge et le dispositif d'auscultation sont opérationnels.

- Mise hors service

Si un ouvrage d'accumulation doit être mis hors service, il doit être transformé de telle manière qu'aucun stockage d'eau de manière durable soit possible et, à l'exception des travaux normaux d'entretien du cours d'eau, aucuns travaux d'entretien de l'ouvrage soient nécessaires.

Une solution consiste à créer une brèche ou un orifice dans l'ouvrage de retenue dont les dimensions sont suffisantes qu'une crue (par exemple Q100) puisse transiter sans danger.

⁷ Des indications concernant les organes de décharge figurent sous E2 "Organes de vidange" de la partie 1 "Plan d'utilisation".

⁸ Il est aussi d'usage d'abaisser le plan d'eau de telle façon que la charge soit réduite de 50 % de la charge en 8 jours.



D4 Protection de la population

Les moyens disponibles pour assurer la protection de la population, ainsi que les mesures à prendre sont décrits dans les paragraphes suivants. Il faut relever que les mesures prévues doivent figurer dans le plan de sécurité.

- Installation d'alarme

Dans le cas où une exploitation sûre de l'ouvrage d'accumulation n'est plus garantie en raison d'un comportement anormal ou de conséquences d'événements naturels (crue extrême, séisme), le propriétaire doit prendre des mesures adéquates pour éviter la mise en danger de personnes et de biens. A cet effet, il prépare un plan en cas d'urgence qui comprend des indications relatives à l'organisation de la surveillance sur place, les opérations préventives possibles (par exemple, abaissement du plan d'eau de la retenue), les moyens pour informer dans les délais les plus brefs les autorités de surveillance, ainsi que le service de piquet de la police cantonale (Art. 17, alinéa 1 et 2 et Art. 18 OSOA). Les cantons et les communes sont en mesure avec les moyens de la protection de la population (sirènes de l'alarme générale, Centrale nationale d'alarme) d'alermer la population et le cas échéant de procéder à son évacuation. Les communes doivent établir un plan d'évacuation sur la base d'une carte d'inondation indiquant les limites de la zone de submersion.

- Abaissement préventif

Un abaissement préventif, partiel ou total, est une mesure qui peut être ordonnée si un événement extraordinaire ne permet plus de garantir entièrement une exploitation sûre de l'ouvrage d'accumulation et s'il existe une menace pour les personnes et les biens. L'exploitant doit informer sans retard les autorités fédérales et cantonales concernées.

Le plan d'eau de la retenue est abaissé de façon à éviter la submersion du couronnement dans le cas d'avalanches, de glissements de terrain, d'éboulements de masse rocheuse ou de chute de glace potentiels pouvant atteindre la retenue. Il doit être maintenu abaissé tant que le risque perdure. Ces conditions particulières d'exploitation sont signalées dans les consignes d'exploitation et de service.

- Exigences militaires

Le Département de la défense, de la protection de la population et des sports (DDPS), par l'intermédiaire de ses services spécialisés est compétent pour l'approbation du concept technique de l'équipement du système alarme eau. Les spécifications techniques sont fixées dans le document "Alarme-eau 2000" [7].

D5 Exigences de tiers

- Incidence sur les sources
- Accès



E) Description de l'ouvrage

E1 Caractéristiques principales de l'ouvrage d'accumulation

Les caractéristiques principales de l'ouvrage d'accumulation sont récapitulées dans le tableau 2.

Ouvrage d'accumulation	Fonction Mode de gestion Année de mise en service
Ouvrage de retenue	Type Caractéristiques géométriques (hauteur du barrage, hauteur de la retenue, longueur du couronnement, épaisseurs du couronnement et de la base, pente des parements, volume de l'ouvrage, etc.)
Retenue	Niveaux d'exploitation (normal, minimum) Niveaux des plus hautes eaux en cas de crue Caractéristiques géométriques (surface, volume) Revanche
Organes de décharge	Vidange de fond, vidange intermédiaire Type (en galerie, dans le barrage) Niveau seuil entrée, seuil des vannes Sections Capacité
Evacuateur de crues	Type Nombre et largeurs des ouvertures Niveau du/des seuil(s) Type et dimensions des vannes Capacité
Prise d'eau	Niveau du seuil Section Capacité
Hydrologie	Surface du bassin versant Débits et volumes des crues de projet et de sécurité
Géologie	Description de la géologie des zones de la retenue et du barrage Caractéristiques des roches et des sols de fondation Instabilités connues
Accès	Description des possibilités d'accès en été et en hiver (route, chemin, téléphérique, etc.) Temps de parcours Héliport

Tableau 2 : Récapitulatif des caractéristiques principales des ouvrages d'accumulation



E2 *Organes de vidange*

La vidange de fond est prioritairement un organe de sécurité et a pour principales fonctions

- (1) de maîtriser la montée du plan d'eau lors du 1^{er} remplissage,
- (2) de permettre l'abaissement, voire la vidange, de la retenue en cas de danger particulier menaçant la sécurité de l'ouvrage et
- (3) de maintenir la retenue abaissée en cas de travaux ou suite à un événement exceptionnel.

La vidange de fond est placée dans la partie basse de l'ouvrage. La vidange de fond est constituée soit par un orifice dans le corps du barrage, soit par une galerie construite dans l'un des appuis du barrage. Le choix du niveau d'implantation dépend des prévisions d'alluvionnement. Pour des ouvrages de grande hauteur, il est possible d'installer 2 vidanges à des niveaux différents.

La vidange de fond peut aussi être utilisée en cas de crue comme organe complémentaire à l'évacuation du débit. Dans des cas particuliers et sous certaines conditions, la vidange de fond peut permettre le passage des sédiments.

Pour des raisons de sécurité d'exploitation, il est de règle que les vidanges de fond soient équipées de 2 vannes, l'une faisant fonction de dispositif de sécurité, l'autre de dispositif d'exploitation ou de réglage. Dans certains cas, un batardeau amont est prévu pour fermer totalement la vidange de fond pour des contrôles et des travaux de révision.

Si la manœuvre des vannes dépend d'une alimentation électrique par le réseau, il est nécessaire de doter l'installation d'une deuxième source d'alimentation. Un système de secours (moteur diesel, groupe électrogène, batteries, accumulateurs à huile) est installé pour pallier une éventuelle coupure d'alimentation électrique. Une manœuvre manuelle des vannes doit aussi être possible.

La télécommande de la manœuvre des vannes est tolérée. L'utilisation de la télécommande est laissée à l'appréciation de l'exploitant. On veille à disposer d'un système d'ouverture par palier pour éviter une ouverture totale intempestive. La commande à distance doit être conçue de telle sorte qu'après un palier la vanne s'arrête d'elle-même et qu'un nouvel ordre soit nécessaire pour le palier suivant.

Dans certains cas, notamment pour des petits ouvrages, la manœuvre des vannes est souvent et essentiellement manuelle.

Des essais annuels de fonctionnement des vannes, avec écoulement, doivent être effectués à niveau de retenue élevé. Des indications concernant la manière de conduire ces essais figurent dans les directives, ainsi que dans la documentation de base relative à la surveillance et à l'entretien.

Dans tous les cas, il faut veiller à pouvoir accéder aux commandes installées sur place.

E3 *Evacuateur de crues*

Les évacuateurs peuvent être à seuil contrôlé ou non par des vannes (vannes planes, clapets, segments, secteurs, vanne gonflable). Les dispositifs fusibles (hausse, digue érodable) sont des solutions complémentaires.

En ce qui concerne la forme, on distingue:

- les déversoirs frontaux suivis ou non d'un coursier
 - les déversoirs latéraux avec canal collecteur
 - les déversoirs circulaires (tulipes)
 - les déversoirs en labyrinthe
- et autres formes.

Il faut prévoir des largeurs et des hauteurs de passes suffisantes afin d'éviter son obstruction par des troncs d'arbres ou d'autres débris en cas de crue. Une largeur de l'ordre de 10 m (pour autant que les conditions topographiques le permettent) peut déjà être considérée



comme suffisante. Selon les constatations faites suite aux crues de 1987⁹, il apparaît que les troncs transportés sont rapidement réduits à une longueur de 10 m. Pour un ouvrage mobile situé sur un fleuve et en plaine, la largeur utile peut être largement supérieure à 10 m. Il faut relever que la forme de la retenue peut avoir une incidence sur le transport des bois flottants.

Un tirant d'air suffisant sous une passerelle ou un pont doit être prévu. Il sera d'au moins 1,5 à 2 m dans le cas des ouvrages de retenue; dans le cas des barrages en rivière, des valeurs inférieures peuvent être tolérées. La passerelle peut aussi être conçue de telle façon qu'elle puisse être emportée en cas de crue exceptionnelle.

Dans le cas d'évacuateurs de crue contrôlés par des vannes, les mêmes dispositions seront prises en ce qui concerne la manœuvre des vannes que dans le cas des vidanges de fond (voir E2). Dans tous les cas, il faut veiller à pouvoir accéder aux commandes installées sur place et éviter d'installer un poste de manœuvre, une source d'alimentation électrique et le cheminement des câbles dans des zones susceptibles d'être submergées pendant le passage d'une crue.

Selon les conditions hivernales, il est possible de prendre des mesures, comme celle par exemple d'installer un système de production de bulles d'air pour éviter que la glace ne se fixe aux organes mobiles de surface; des systèmes de chauffage des bajoyers existent également.

E4 *Prise d'eau*

La prise d'eau est un ouvrage annexe, dont les dimensions et le débit de soutirage dépendent de la fonction de l'aménagement (production hydroélectrique, irrigation, eau potable, neige artificielle, etc.). Les caractéristiques de la prise d'eau sont fixées d'entente avec le Maître de l'ouvrage, en général, suite à une étude technico-économique. L'entrée est équipée d'une grille de protection ou d'une crépine. Selon les besoins, la prise d'eau peut être utilisée pour procéder à un abaissement partiel de la retenue.

E5 *Divers*

- Dérivation provisoire
Pour la période de chantier, une dérivation provisoire du cours d'eau est prévue pour un débit qui est fixé en fonction de la durée de construction, du type de l'ouvrage, ainsi que des risques de dommages qui peuvent être pris en compte (inondation du chantier, interruption des travaux, danger pour les résidents à l'aval). Le débit peut être de l'ordre de grandeur d'une crue correspondant à une période de retour de 20 à 50 ans pour les barrages en béton et de 80 à 100 ans pour les barrages en remblai. Selon les conséquences, des temps de retour supérieurs doivent être envisagés.
- Restrictions d'exploitation
De telles restrictions peuvent être ordonnées en cas d'événements extraordinaires (par exemple, en cas de menace de glissement de terrain, d'éboulement rocheux, de chute de glace ou d'avalanche dans la retenue).
On veillera à conserver un volume tampon soit permanent soit en abaissant temporairement le niveau du plan d'eau de la retenue.
- Restriction en cas de vidange
S'il existe un risque d'éboulement ou de glissement de terrain pendant un abaissement (rapide) du plan d'eau, des consignes particulières doivent être prévues (vitesse d'abaissement, restriction de niveau du plan d'eau).

⁹ Selon "OFEE et SHGN, "Analyses des causes des crues 1987. Résultats des recherches." Mai 1991



- **Chasse (purge)**

L'article 40 de la Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) fixe les modalités relatives au curage et vidange des bassins de retenue. Il est notamment demandé de veiller dans toute la mesure du possible à ne pas porter atteinte à la faune et à la flore lors des opérations. Les autorisations pour ces opérations sont délivrées par les autorités cantonales. L'article 42 de l'ordonnance fédérale du 19 juin 1992 et modification du 27 novembre 1994 sur la protection des eaux (OEaux) précise les modalités d'exécution.

L'entrée d'une vidange de fond doit être dégagée de telle manière que l'écoulement par cet organe de décharge soit assuré. Il est nécessaire de garantir au moins un secteur, généralement de forme conique, libre de matériaux. Si des sédiments sont susceptibles d'obturer l'entrée ou de se déposer directement à l'amont des vannes, (de façon à empêcher un écoulement) des mesures doivent être impérativement prises pour éliminer les dépôts. On pourra recourir à des chasses ou le cas échéant à d'autres méthodes. Il est recommandé de répéter de telles opérations aussi souvent que nécessaire, ce qui permet d'éviter les dépôts de grande quantité de sédiments.
- **Elimination des corps flottants**

L'article 41 de la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) fixe les modalités relatives aux débris flottants accumulés près des ouvrages de retenue. Cet article indique que celui qui exploite un ouvrage de retenue a l'interdiction de rejeter à l'aval les débris flottants recueillis à l'amont. Il doit périodiquement recueillir les débris flottants aux abords des installations. Des exceptions sont possibles avec l'accord des autorités compétentes.
- **Accès**

Pour des raisons d'exploitation et d'exécution de travaux d'entretien, en cas d'événement extraordinaire (comportement anormal de l'ouvrage, crue, séisme) une présence de personnel sur place est nécessaire. Les accès au barrage doivent donc être garantis. Les différentes possibilités doivent être décrites et les temps de parcours estimés dans des conditions adverses.
- **Installation d'alarme**

Pour les ouvrages d'accumulation dont la capacité est égale ou supérieure à 2 mio de m³, l'alarme de la population en cas de rupture probable ou effective d'un ouvrage de retenue se fait dans la zone rapprochée au moyen de sirènes alarme eau¹⁰. La zone rapprochée couvre la région touchée par l'onde de submersion dans un laps de temps de deux heures au plus (Art. 19 OSOA)¹¹.

En plus des sirènes alarme-eau, l'installation au site et à proximité du barrage englobe la réalisation d'une centrale alarme eau, de postes d'observation, de mise à disposition de logements à proximité (Art. 19 alinéa 2 OSOA). Deux systèmes de liaison indépendants entre la centrale alarme eau et la permanence du canton doivent être prévus.

Le déclenchement de l'alarme eau incombe (Art. 20 alinéa 1 OSOA)

 - à l'exploitant, en cas de comportement anormal, d'événements naturels, ou d'acte de sabotage,
 - au commandement de l'armée en cas de menace militaire.

Pour les petites et moyennes retenues (volume inférieur à 2 mio de m³), il est possible de recourir aux sirènes de l'alarme générale, à d'autres moyens sonores ou à l'engagement de moyens mobiles.

¹⁰ Pour des valeurs de capacité proche de 2 mio de m³, l'autorité de haute surveillance peut demander l'installation d'un système alarme eau si le danger potentiel est élevé.

¹¹ A titre de redondance, les sirènes de l'alarme générale sont aussi utilisées dans la zone rapprochée. Pour des valeurs de capacité proche de 2 mio de m³, l'autorité de haute surveillance peut demander l'installation d'un système alarme eau si le danger potentiel est élevé.

PARTIE 2 PLAN DE SÉCURITÉ

1 But du plan de sécurité

L'élaboration du plan de sécurité impose l'évaluation de toutes les situations possibles de risque et la détermination des mesures adéquates à prendre en vue de garantir la sécurité de l'ouvrage. Les risques acceptables (nature des dégâts tolérés) auront une incidence directe sur les dispositions structurelles. Dans le plan de sécurité, il s'agit aussi de se préoccuper des mesures qui peuvent garantir le bon comportement de la structure et le bon fonctionnement des organes mobiles.

Ces éléments réunis, il sera possible de fixer l'ensemble des hypothèses pour le dimensionnement et la vérification (travaux de reconnaissance à entreprendre, programme de contrôle d'exécution) de l'ouvrage d'accumulation. Enfin, le plan de sécurité doit permettre de déterminer les prescriptions particulières qui doivent figurer dans les consignes de service et de surveillance.

Bien que ce document soit plutôt orienté vers la sécurité propre du barrage et de ses ouvrages annexes, il ne faut pas perdre de vue que la sécurité du personnel, des visiteurs, des promeneurs, ainsi que des accès doit aussi être garantie. Les mesures de protection doivent être discutées avec l'exploitant.

2 Structure du plan de sécurité

Le plan de sécurité constitue la base principale pour le dimensionnement des structures. Pour fixer les buts à atteindre, différentes démarches sont possibles. Il appartient à l'ingénieur de définir la structure du plan de sécurité la mieux adaptée à chaque cas particulier. En règle générale, la structure du plan de sécurité traite au moins des thèmes suivants:

- A) Actions
- B) Situations critiques
- C) Causes
- D) Mesures
- E) Risque résiduel

Des exemples figurent dans la publication "Sécurité structurale des barrages. Plans d'utilisation et plan de sécurité" (Décembre 2000) du Comité suisse des barrages (CSB) [6].



3 Éléments du plan de sécurité

A) Actions

Charges permanentes

- Poids propre (structure, organes de fermeture)

Les valeurs des poids propres données ci-dessous sont indicatives.

Barrage en béton : Le poids spécifique dépend de la qualité des matériaux (pierres, agrégats) et de la mise en place.

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| - Maçonnerie | 22 à 23 kN/m ³ |
| - Béton coulé | 23 kN/m ³ |
| - Béton de masse, vibré | 24 à 24.5 kN/m ³ |
| - Béton armé | 25 kN/m ³ |

Barrage en remblai : Le poids propre des matériaux varie en général entre 16 et 22 kN/m³; les valeurs adéquates doivent être déterminées par des essais en laboratoire

- Poussée des terres (remblai)

La poussée des terres au repos est prise en compte. Il faut aussi remarquer que cette poussée peut varier dans le temps. Il faut relever que la poussée des terres n'agit pas forcément comme force stabilisante.

- Ancrages

En ce qui concerne les ancrages, les normes SIA V191 peuvent être employées. Il faut noter que les ancrages permettent d'apporter le complément nécessaire pour renforcer la stabilité, si les critères de sécurité usuels ne sont pas satisfaits. Toutefois, le coefficient de sécurité ne doit pas être inférieur à 1.0 sans ancrages. Les ancrages doivent être régulièrement contrôlés pendant l'exploitation.

Charges variables

- Poussée de l'eau

La masse spécifique de l'eau non chargée est égale à 1000 kg/m³; toutefois, une eau chargée de sédiments en suspension peut atteindre de 1050 à 1100 kg/m³, voire plus.

- Sous-pressions

Les forces de sous-pressions sont dues à la percolation de l'eau à travers le barrage et les fondations. En fonction de la présence ou non d'un voile d'injection, d'un système de drainage (galerie, forages drainants), le diagramme des sous-pressions peut avoir différentes formes.

La forme la plus simple correspond à une répartition triangulaire (sans présence d'eau à l'aval) ou trapézoïdale (en présence d'eau à l'aval). L'introduction d'un coefficient de réduction λ des sous-pression permet de tenir compte de la qualité du rocher de fondation, du rôle et de l'efficacité du voile d'injection et du système de drainage. La valeur de λ peut varier entre 1, sans voile d'injection, ni drainage et 0,75 (au minimum) avec voile d'injection et drainage (Voir Figure 1, Hypothèse I). En cas de présence d'un voile d'injection et d'un système de drainage, il existe selon les pratiques admises d'autres formes de diagramme des sous-pressions. A titre d'exemple, la figure 1 indique 2 possibilités sous Hypothèse II. Dans les 2 cas, la valeur amont est égale à la pression hydrostatique.

On peut aussi consulter la publication du Comité suisse des barrages [8].

Le diagramme des sous-pressions peut aussi être déduit de la construction d'un réseau d'écoulement.

Dans le cas d'un ouvrage existant, les valeurs mesurées peuvent être introduites.



Enfin, il faut relever que le diagramme des sous-pressions peut se modifier suite à un séisme. Si par exemple une fissure s'est formée à l'amont, la sous-pression maximum est prise en compte sur la longueur de la fissure.

- Pression d'écoulement des eaux de percolation

Les infiltrations à travers un barrage en remblai peuvent entraîner des particules de matériau et conduire par érosion interne à la création de canaux qui peuvent progressivement s'agrandir. Ce phénomène d'érosion est connu sous le nom de "renard" et doit être analysé. Par ailleurs, il faut vérifier si, sous l'effet des pressions d'infiltration (ou sous-pressions), il n'existe pas un risque de soulèvement de parties de l'ouvrage.

Les pressions interstitielles peuvent varier avec le temps, la perméabilité, la charge hydrostatique et les conditions de drainage. Un réseau des lignes de courants et des équipotentielles permet de connaître l'intensité et la répartition des pressions interstitielles. Il faut relever qu'en ce qui concerne la stabilité les pressions interstitielles peuvent réduire la résistance au cisaillement.

- Température du béton

Les variations de températures du béton sont dues au dégagement de chaleur lors de sa prise et aux échanges avec l'environnement extérieur (insolation, températures de l'air et de l'eau). Les températures ont une incidence sur les contraintes et les déformations de la structure. Les variations de température sont importantes sur les parements. A l'intérieur, elles sont sensiblement plus faibles et sont généralement déphasées et atténuées du fait de l'inertie thermique du béton de masse. Sur l'épaisseur de la section, une relation linéaire entre les 2 parements (forme trapézoïdale) est admise. Elle se compose d'une variation uniforme de la température par rapport à une température de référence et d'un gradient de température entre les 2 parements.

- Charges roulantes

Les charges sont données par la norme SIA 160 [1].

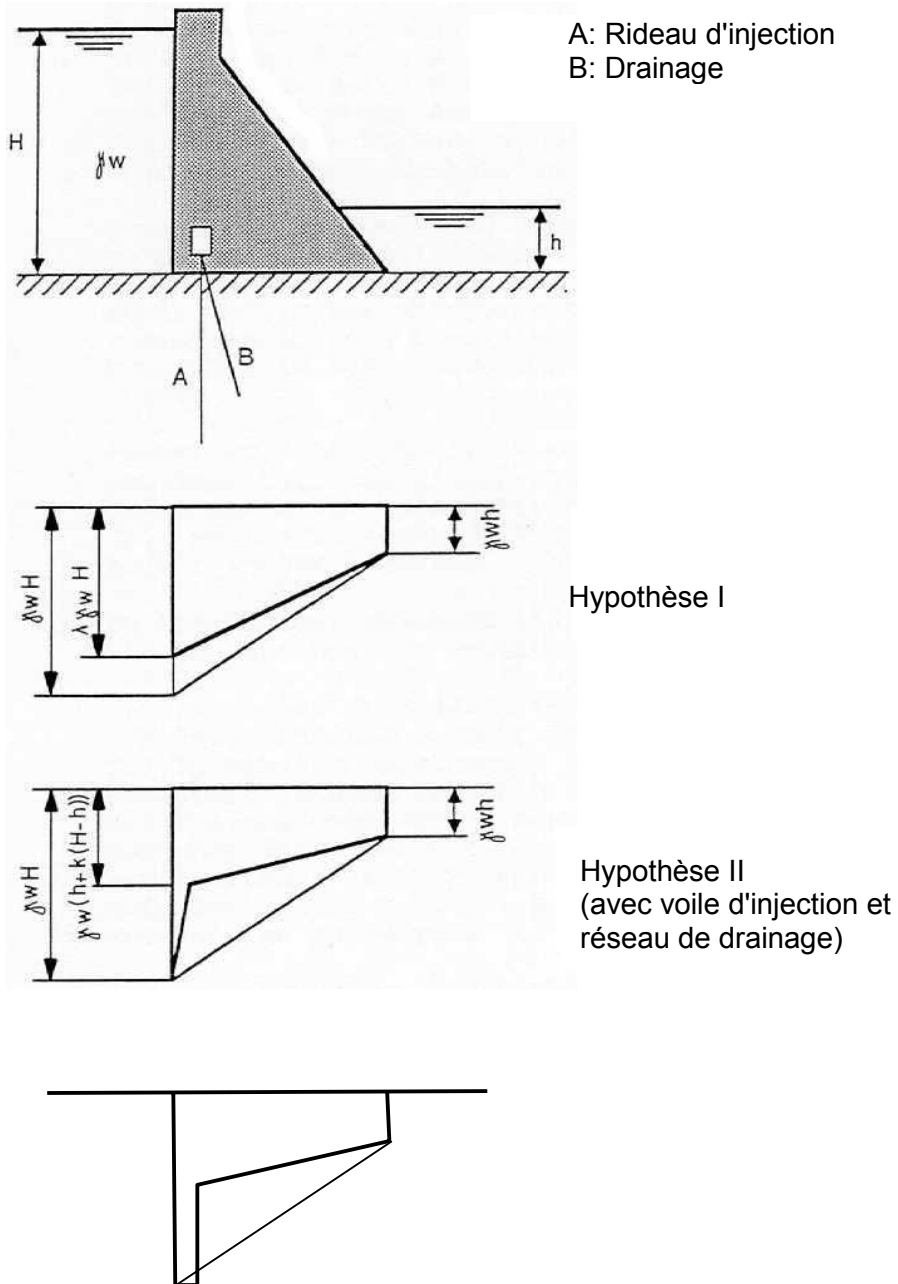


Figure 1 : Formes conventionnelles des diagrammes de sous-pressions
 λ, k = coefficients de réduction des sous-pressions



Charges exceptionnelles

- **Crue**

Une crue est définie par son hydrogramme caractérisé principalement par sa pointe ou ses pointes, son volume, ainsi que sa durée, sa vitesse de montée, son temps de montée et de décrue. Les caractéristiques de l'hydrogramme qui engendre la situation la plus critique pour l'ouvrage d'accumulation compte tenu des possibilités d'évacuation et de rétention seront recherchées. Si la capacité de rétention est négligeable, seule la pointe peut être prise en compte. Les conditions d'évacuation doivent être vérifiées pour une crue de projet et une crue de sécurité. Pour déterminer la sécurité en cas de crues d'un ouvrage d'accumulation, il s'agit de rechercher l'hydrogramme qui conduit à la surélévation maximale du plan d'eau.
- **Séisme**

Les calculs de vérification au séisme s'effectuent sur la base d'un séisme de vérification qui se base sur des considérations probabilistes. Les bases sismologiques usuelles sont applicables.

Le danger sismique est défini, en un endroit donné, par la probabilité d'occurrence d'un mouvement de terrain induit par un séisme d'une force donnée. A chaque classe de barrages correspond un séisme de vérification.
- **Avalanche**

Dans le cas des avalanches, on distingue les avalanches qui, lorsqu'elles atteignent la retenue, peuvent provoquer une vague avec un risque de submersion et celles qui peuvent venir buter contre un ouvrage prévu à cet effet (digue de protection contre les avalanches). Il faut s'assurer que l'ouvrage est capable d'encaisser le choc provoqué par l'avalanche. Selon la pratique usuelle, une avalanche avec temps de retour de 300 ans est prise en compte.

Les documents qui fournissent les indications nécessaires sont signalés dans la bibliographie.
- **Laves torrentielles**

Ce cas est considéré si la force totale sur l'ouvrage est supérieure à la poussée hydrostatique; ce cas peut se présenter pour des ouvrages de faible hauteur.

Les documents qui fournissent les indications nécessaires sont signalés dans la bibliographie.
- **Poussée des glaces**

La poussée des glaces est une charge exceptionnelle et n'entre pas en ligne de compte en cas de fluctuation prononcée du plan d'eau, car la couche de glace n'est pas en mesure d'adhérer au barrage. Toutefois, il faut admettre qu'elle peut avoir une incidence non négligeable pour les ouvrages de faible ou moyenne hauteur; selon la hauteur de la retenue, la poussée de la glace peut être égale ou supérieure à la force hydrostatique.

Il faut souligner que l'intensité de la poussée des glaces est une valeur encore mal définie; selon la littérature, elle varie entre 20 et 300 kN/ml.

Les documents qui fournissent les indications nécessaires sont signalés dans la bibliographie.



B) Situations critiques

Les situations critiques sont données, d'une part, par les combinaisons des charges et, d'autre part, par la description des dangers et des dégâts possibles.

B1 Combinaisons des charges

Selon l'article 3 alinéa 1 OSOA, la sécurité des ouvrages d'accumulation doit être assurée dans tous les cas de charge et d'exploitation prévisibles. Les différents types de charge reconnus sont décrits dans les paragraphes précédents. Parmi les cas d'exploitation possibles à considérer, on peut citer par exemple les limites de marnage du plan d'eau, les aspects de mise hors service en vue d'une révision d'équipement hydromécanique, les défauts de fonctionnement d'organe de décharge, l'impossibilité de turbinage, les conséquences de cas de panne éventuelle (défaut d'alimentation électrique).

Quant aux combinaisons possibles de charge selon les types de barrages (barrage en béton, barrage en remblai), elles sont résumées dans les tableaux 3, 4 et 5. Il appartient toutefois à l'ingénieur de fixer, en fonction du plan de sécurité, les cas de combinaison de charges les plus défavorables qui doivent être vérifiés.

Les calculs sont menés en considérant les phases de construction et différents cas concernant l'exploitation.

Dans le cas particulier des barrages voûte, il est tenu compte des étapes de construction. Pour les barrages en remblai, des cas pendant la construction (matériaux argileux non consolidés, étanchéité provisoire) et en fin de construction sont analysés.

Pour les cas des ouvrages en exploitation, on distingue

- Type 1 Cas normal
- Type 2 Cas exceptionnel
- Type 3 Cas extrême

Commentaires:

Le cas normal (Type 1) concerne les charges qui sollicitent régulièrement l'ouvrage de retenue.

Le cas exceptionnel (Type 2) concerne les cas de charges exceptionnelles qui peuvent survenir, mais pas nécessairement pendant la vie de l'ouvrage de retenue. Dans ce cas, de légers dégâts sont tolérés.

Le cas extrême (Type 3) concerne les cas de charges les plus défavorables que pourrait subir l'ouvrage de retenue. Ils sont hypothétiques et constituent les limites physiques. Dans ces cas, des dégâts importants peuvent survenir sans toutefois mettre en péril l'ouvrage de retenue.



ACTIONS	BARRAGE-POIDS, BARRAGE MOBILE							
	Type 1		Type 2			Type 3		
	Cas normaux		Cas exceptionnels			Cas extrêmes		
	Lac vide	Lac plein	Crue	Glace	Avalanche	Crue	Séisme lac vide 2)	Séisme lac plein
Poids propre	X	X	X	X	X	X	X	X
Poussée hydrostatique Niv. normal de retenue ¹⁾		X		X	(X)			X
Poussée hydrostatique Niv. crue de projet			X					
Poussée hydrostatique Niv. crue de sécurité						X		
Poussée hydrostatique aval	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Sous-pression Niv. normal de retenue		X		X	X			X
Sous-pression Niv. Crue de projet			X					
Sous-pression Niv. crue de sécurité						X		
Poussée des sédiments (amont)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Poussée des terres (aval)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Séisme							X	X
Poussée des glaces				X				(X)
Avalanche ou lave torrentielle					X			
Remarques	<p>1) Selon les cas, un niveau intermédiaire de remplissage doit aussi être considéré</p> <p>2) Optionnelle</p> <p>(X) entre en ligne de compte selon les cas</p> <p>Les températures entrent dans les calculs des contraintes et des déformations</p>							

Tableau 3 : Cas des barrages-poids, des barrages mobiles et des barrages en maçonnerie



ACTIONS	BARRAGE-VOÛTE							
	Type 1		Type 2			Type 3		
	Cas normaux		Cas exceptionnels			Cas extrêmes		
	Lac vide	Lac plein	Crue	Glace	Avalanche	Crue	Séisme lac vide 2)	Séisme lac plein
Poids propre	X	X	X	X	X	X	X	X
Poussée hydrostatique Niv. normal de retenue ¹⁾		X		X	(X)			X
Poussée hydrostatique Niv. crue de projet			X					
Poussée hydrostatique Niv. crue de sécurité						X		
Poussée hydrostatique aval (éventuelle)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Gradient de température		X	X	X	X	X	X	X
Variation de température		X	X	X	X	X	X	X
Poussée des sédiments (amont)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Poussée des terres (aval)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Séisme							X	X
Poussée des glaces				X				(X)
Avalanche /Lave torrentielle					X			
Remarques	<p>1) Selon les cas, un niveau intermédiaire de remplissage doit aussi être considéré</p> <p>2) Optionnelle</p> <p>(X) entre en ligne de compte selon les cas</p> <p>Les sous-pressions peuvent aussi être prises en compte selon les cas</p>							

Tableau 4 : Cas des barrages-voûtes



ACTIONS	BARRAGE EN REMBLAI								
	Fin de construction		Exploitation						
	Bassin vide		Type 1	Type 2			Type 3		
			Cas normal	Cas exceptionnels			Cas extrêmes		
Sans séisme	Avec séisme	Lac plein	Crue	Vidange rapide	Avalanche	Crue	Séisme lac vide 2)	Séisme lac plein	
Poids propre	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Poussée hydrostatique Niv. normal de retenue *)			X			X			X
Poussée hydrostatique Niv. crue de projet				X					
Poussée hydrostatique Niv. crue de sécurité							X		
Pressions interstitielles avant consolidation	X	X							
Pressions interstitielles Niv. normal de retenue 1)			X		X	(X)	X	(X)	X
Pressions interstitielles induite par le séisme								(X)	X
Vidange rapide avec pressions interstitielles correspondantes					X				
Pressions interstitielles Niv. crue de projet				X					
Pressions interstitielles Niv. crue de sécurité							X		
Séisme		X						X	X
Avalanche / Lave torrentielle						X			
Remarques	1) Selon les cas, un niveau intermédiaire de remplissage doit aussi être considéré; les pressions interstitielles seront adaptées en conséquence 2) Optionnelle (X) entre en ligne de compte selon les cas Les cas de charges dépendent aussi des types de digues								

Tableau 5 : Cas des barrages en remblai



B2 Description des dangers et des dégâts possibles

Dans la définition des situations critiques, une différence doit être faite entre les ouvrages en béton, en maçonnerie et en remblai (digue). Les situations pouvant conduire à une diminution de la sécurité de l'ouvrage, voire à sa rupture (ruine) doivent être envisagées.

Ouvrages en béton

- Déplacement des appuis
- Déplacement différentiels des plots
- Glissement
- Dégâts au corps de l'ouvrage
- Submersion du couronnement
- Percolation à travers l'ouvrage et les fondations (fissures)
- Erosion interne de la fondation
- Obturation d'organes de décharge
- Organes de décharges bloqués
- Affouillement au pied aval du barrage

Ouvrages en remblai

- Tassement de la digue ou des fondations (diminution de la revanche)
- Erosion interne (piping)
- Instabilité de pentes
- Dégâts au corps de la digue (fissures)
- Submersion du couronnement
- Percolation à travers l'ouvrage et les fondations
- Obturation d'organes de décharge
- Organes de décharges bloqués
- Erosion au pied aval de la digue
- Erosion au travers de terriers, tanières et le long de racines



C) Causes

C1 Causes principales¹²

Événements naturels

- Crue
- Séisme
- Avalanche
- Lave torrentielle
- Glissement de terrain
- Chute de pierre
- Accumulation de sédiments

Événements provoqués (consécutifs à une intervention de tiers)

- Travaux souterrains
- Sabotage, vandalisme
- Explosion
- Bombardement
- Chute d'aéronef ou de satellite

Autre(s) effet(s)

- Affouillement

C2 Causes particulières

- Défaillance de l'alimentation électrique
- Panne de l'équipement mécanique
- Interruption des télécommunications

C3 Causes liées au projet

Défaut du projet

- Sous-dimensionnement
- Hypothèses erronées
- Erreur d'exécution
- Emploi erroné d'un matériau

Etat du barrage

- Déficience de la qualité des matériaux
- Fissuration importante
- Vieillesse, usure (parties métalliques)
- Réaction alcali-agrégats
- Dégradation du voile d'injection

¹² Parmi les événements cités, certains peuvent conduire à des dégâts qui sont tolérables. Toutefois, les conséquences peuvent être plus graves si ces événements sont d'envergure supérieure aux hypothèses admises pour le dimensionnement.



D) Mesures

Les mesures peuvent être de différentes natures. Il faut toutefois distinguer les mesures qui sont prises au stade du projet (éventuellement pendant l'exécution) de celles qui doivent être envisagées pendant l'exploitation pour améliorer la sécurité structurale de l'ouvrage.

Il n'est donc pas aisé de dresser un catalogue de mesures. Seules des indications générales peuvent être données. En effet, dans les mesures à prendre, le dimensionnement, le contrôle de l'exécution (par exemple, contrôle de la qualité des matériaux, essais de mise en place des remblais), des dispositions constructives particulières (par exemple, conception d'un système de drainage, d'étanchéité, choix de matériaux spéciaux) sont différents aspects qui jouent chacun un rôle. Le soin est donc laissé à l'ingénieur, en fonction des problèmes particuliers, de rechercher toutes les mesures adéquates.

Pour illustrer ces propos, quelques indications sont données ci-dessous:

D1 Dimensionnement des structures

- Définition des charges à prendre en compte
- Critères de stabilité

Barrages en béton

En règle générale, les stabilités au glissement, au renversement et le cas échéant au soulèvement seront vérifiées.

- La stabilité au glissement par rapport à une surface critique se définit par un rapport entre la somme des forces verticales et la somme des forces horizontales. Il faut noter que la position de la résultante et les contraintes à l'amont sont aussi des critères de jugement.
- La stabilité au renversement est garantie si la résultante des forces considérées se trouve dans le tiers central ¹³.
- La stabilité au soulèvement se définit par le rapport entre la somme des forces verticales dirigées vers le bas et celle des forces verticales dirigées vers le haut. La stabilité au soulèvement est souvent vérifiée dans le cas des barrages "légers", tels que les barrages en rivière.

En ce qui concerne les coefficients de sécurité, les valeurs suivantes peuvent être admises:

CAS DE CHARGE		
Normal	Exceptionnel	Extrême
1.5	1.3	1.1

Tableau 6: Coefficients de sécurité de stabilité pour les ouvrages en béton sans tenir compte de la cohésion

¹³ Pour autant que le point de rotation soit bien défini, la stabilité au renversement peut être vérifiée par la relation entre le moment stabilisant et le moment renversant.



Remarques concernant la stabilité au glissement

Les calculs font intervenir l'angle de frottement interne φ et, accessoirement, la cohésion c . En général, la cohésion n'est pas prise en compte. Elle peut cependant être introduite dans des cas particuliers en la justifiant.

La relation suivante est généralement utilisée:

$$FS = [(tg \varphi * \Sigma V) + (c * A)] / \Sigma H$$

FS	=	Coefficient de sécurité	A	=	Aire de la fondation
ΣV	=	Somme des forces verticales	φ	=	Angle de frottement interne
ΣH	=	Somme des forces horizontales	c	=	Cohésion

Les valeurs des coefficients de sécurité donnés dans le tableau 6 concernent des calculs où la cohésion n'est pas prise en compte.

En principe, on peut tenir compte d'une cohésion si elle est effectivement mobilisable et si l'angle de frottement interne est faible. Pour fixer la valeur de la cohésion, il faut soit disposer de résultats d'essais, soit se référer à des valeurs données dans la littérature. Les coefficients de sécurité au glissement seront majorés pour tenir compte des incertitudes et du risque d'une diminution ou d'une disparition de la cohésion due à un mouvement. Pour les 3 cas de charge, les valeurs des coefficients de sécurité du tableau 6 seront respectivement de 3, 4 et 5.

Il est aussi possible d'introduire des coefficients de sécurité partielle. La relation envisagée est de la forme suivante:

$$\Sigma H < [(tg \varphi * \Sigma V) / FS1] + [(c * A) / FS2]$$

Il faut aussi mentionner que les plans de glissement envisagés tiendront compte de la structure géologique des fondations. Les valeurs de φ et de c dépendront aussi de l'état du plan de glissement.

Barrages en remblai

La stabilité des talus au glissement peut être vérifiée par des méthodes classiques, telles que celles proposées par Bishop, Janbu. Selon les cas de charge, on peut admettre les valeurs suivantes des coefficients de sécurité:

			CAS DE CHARGE	COEFFICIENT DE SÉCURITÉ
Fin de construction	Bassin vide	Sans séisme		1.3
		Avec séisme		1.1
Exploitation	Bassin plein	Sans séisme	Normal	1.5
	Vidange rapide	Sans séisme	Exceptionnel	1.3
	Bassin plein	Avec séisme	Extrême	1.1
	Bassin vide	Avec séisme	Extrême	1.1

Tableau 7: Coefficients de sécurité pour les barrages en remblai



- Caractéristiques des matériaux (résistance, contraintes admissibles)
- Données géologiques
- Déformations admissibles
- Données géométriques particulières (largeur du couronnement, revanche, largeur des passes)
- Caractéristiques des fondations (résistance, perméabilité dissolution, etc.)

D2 Mesures constructives au moment du projet

- Organes de décharge
- Système de traitement des joints (injections, redans)
- Système de drainage
- Système d'étanchéité
- Mode de traitement du sous-sol (injections)
- Renforcement des appuis (ancrages)
- Dispositif d'auscultation
- Végétation

Dans la mesure du possible, il faut assurer que les talus et le couronnement des digues restent libres de végétation (arbres, arbustes et buissons denses) afin de

- faciliter l'observation visuelle (mise en évidence de tassement, d'instabilité, de fissures, de venues d'eau);
- éviter d'attirer la faune qui peut creuser des trous et des couloirs;
- éviter par la propagation des racines l'obturation des systèmes de drainage, l'attaque des dispositifs d'étanchéité;
- éviter des dégâts importants aux talus en cas d'arrachement d'arbres.

Aucun arbre, arbuste ou buisson ne devrait être toléré sur le parement amont en contact en permanence avec l'eau.

Les parements amont et aval qui ne sont pas en contact permanent avec l'eau peuvent être recouverts de terre végétale. Une végétation peut être admise pour autant que le choix se porte sur des plantes à racines courtes et disposées de façon clairsemées. Si nécessaire, des mesures doivent être prises pour éviter que les racines ne perturbent les systèmes de drainage et d'étanchéité, et pour que la stabilité des talus ne soit pas compromise (un surprofil peut être prévu).

D3 Mesures avant et pendant les travaux

- Campagnes de sondage et essais
- Essais de convenance des matériaux
- Essais de mise en place des remblais
- Contrôle de la qualité des agrégats et des bétons [9]
- Contrôle des remblais
- Mise à jour des plans

D4 Mesures constructives pendant l'exploitation

- Entretien
- Renforcement par ancrages
- Réalisation ou amélioration du système de drainage
- Consolidation par injection (béton, fondation)
- Amélioration du voile d'étanchéité
- Contrôles, mesures
- Mesures contre le sabotage

Certaines mesures à prendre contre les sabotage peuvent être essentiellement constructives et de ce fait n'auront aucune incidence ou effet sur la structure principale (et éventuellement n'entrent pas dans les calculs de vérification de la structure globale).

Deux exemples peuvent être donnés. Le premier concerne la surveillance des accès (en général depuis l'aval), le second la position des vannes de décharge. En ce qui concerne les accès depuis l'extérieur, la surveillance peut se faire au moyen de caméras TV, d'un système d'alarme par rayons lumineux, de détecteur de personnes, mais aucun de ces systèmes n'empêche d'atteindre les vannes. La mise en place d'une grille à la sortie des galeries est une mesure qui peut s'avérer efficace.

- Support pour autres structures (mâts, ...)
Pour les barrages en remblai, des dispositions sont à prendre, en cas de présence d'appuis d'autres constructions, afin de ne pas créer d'instabilités locales des talus et de garantir sur le long terme les dispositifs d'étanchéité et/ou de drainage.

D5 Mesures pendant l'exploitation

- Mise en place de panneaux de mise en garde
Afin d'assurer la sécurité des personnes, des panneaux de mise en garde sur le site et le long du cours d'eau (risque de lâchure d'eau) et, si nécessaire, de la signalisation normalisée requise pour la navigation seront installés.
- Risque de glissement, éboulement, avalanche, chute de glacier
Les mesures possibles consistent en une surveillance des versants et un abaissement en cas de danger, un abaissement préventif (notamment pendant la période hivernale en regard du risque d'avalanche).
- Alluvionnement
Les entrées de la vidange de fond et d'autres organes doivent être maintenues libres de sédiments afin que l'écoulement soit garanti. Si des sédiments sont susceptibles d'obstruer l'entrée ou de se déposer directement à l'amont des vannes, des mesures doivent être impérativement prises pour éliminer les dépôts.
- Événement extraordinaire
Lors de la mise en évidence d'un événement extraordinaire, la surveillance sera renforcée et des mesures constructives peuvent être envisagées tant que l'événement est maîtrisable. Dans le cas où une exploitation sûre et la sécurité de l'ouvrage d'accumulation ne sont plus garanties, un abaissement préventif, partiel ou total, est la mesure qui peut être ordonnée. Le dispositif d'alarme-eau peut être éventuellement mis en opération.
- Fait de guerre
Le commandement de l'Armée peut ordonner un abaissement préventif des retenues. En cas de rupture d'un ouvrage de retenue, le système alarme-eau entre en action.



E) Risque résiduel

En raison de leur faible probabilité d'occurrence, les cas suivants peuvent être négligés:

- Chute d'aéronef sur un ouvrage
- Chute de satellite

Par ailleurs, les événements suivants peuvent être tolérés:

- Dégâts non critiques en cas de crue extrême ou de séisme extrême
- Hypothèse qu'une crue et un séisme extrêmes ne surviennent pas en même temps

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Action sur les structures porteuses*; Norme SIA 160 (1989)
- [2] *Sécurité des ouvrages et des installations*; Directives SIA 465 (1998)
- [3] *Conservation des ouvrages*; Norme SIA 469 (1997)
- [4] Ordonnance du 7 décembre 1998 sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) (RS 721.102)
- [5] *Dam failures, Statistical analysis / Rupture de barrages, analyse statistique*; Bulletin ICOLD No.99 (1995)
- [6] *Sécurité structurale des barrages. Plans d'utilisation et plan de sécurité*; Publication du Comité suisse des barrages (CSB), Groupe de travail observation des barrages. (Décembre 2000)
- [7] *Alarme-eau 2000*; Documentation, DIK VBS, Abteilung Telekommunikation, 8600 Dübendorf (1985)
- [8] *Auftrieb bei Betontalsperren*; Publication du Comité suisse des barrages (CSB), Groupe de travail "Sous-pressions" (avril 1992)
- [9] *Le béton des barrages suisses : expérience et synthèse*; Publication du Comité suisse des barrages. Groupe de travail "Béton de barrage", "wasser, energie, luft – eau, énergie, air", 92. Jahrgang, Heft 7/8 (2000)

Liste des documents particuliers

Navigation

- Loi fédérale du 3 octobre 1975 sur la navigation intérieure (RS 747.201) et l'ordonnance du 8 novembre 1978 sur la navigation dans les eaux suisses (ONI, RS 747.202.1)
- Rheinschiffahrtspolizeiverordnung vom 1. Dezember 1999
- Code européen des voies de navigation intérieure (CEVNI), recommandations des Nations Unies, Revision 2 (2002)

Echelle à poissons

- *Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement*; Larinier, M., Porcher, J.P., Travade, F., Gosset, C., Conseil Supérieur de la Pêche, éditeur; collection Mise au point (1994)
- *Gestion piscicole des lacs et retenues artificielles*; INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), Editeurs : Gerdeaux, D. et Billard, R. (1985)
- *Fischaufstiegsanlagen*; Norme SIA 232 (1996)
- *Fischaufstiegsanlagen – Bemessungen, Gestaltung, Funktionkontrolle*; Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) Heft 232/1996 (1996)

Durée d'utilisation

- *Kalkulatorische Abschreibungen zur Ermittlung der Selbstkosten bei Elektrizitätswerken*; Domman, F., Bitterli, F., Bollhalder, O., Bucher, E.; (1975)
- *Evaluation technico-économique d'un aménagement hydro-électrique lors de l'exercice du droit de retour avec ou sans anticipation*; C. Cleusix, G. Favre, R. Zurbriggen, A. Jaccard. Etat du Valais (1988)



Avalanche

- *Schnee, Lawinen und Lawinenschutz*; Salm, B., Zarn, B., Bigger, V., Vorlesung, ETHZ (1987)
- *Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren*; Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen (1999)

Laves torrentielles

- *Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren*; Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen (1999)
- *Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen*; Tognasca, Ch., Mitteilungen VAW 164 (1999)

Poussée des glaces

- *Thrust exerted by expanding ice sheet*; E. Roes. American Society of Civil Engineers (ASCE). May 1946 (pp. 571 – 585) and December, 1946 (pp. 1301 – 1400), (1964)
- *Barrages et ouvrages annexes dans les climats froids / Dams and related structures in cold climate*; ICOLD Bulletin No. 105 (1996)
- *Stahlwasserbau (Theorie – Konstruktive Lösungen – Spezielle Probleme)*; Wickert, G., Schmausser, G., p. 445 ff (1971)