



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Barrages

SÉCURITÉ DES OUVRAGES D'ACCUMULATION

DOCUMENTATION DE BASE RELATIVE À LA VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ EN CAS DE CRUE



juin 2008



Impressum

Editeur: Office fédéral de l'énergie
Section Barrages

Membres du groupe de travail:

Bérod, Dominique, dr	Service des routes et des cours d'eau, Sion
Boillat, Jean-Louis, dr	Laboratoire de constructions hydrauliques, EPFL, Lausanne
Hammer, Jürg, dr (secrétaire)	Anciennement Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Hertig, Jaques-André, dr	Hertig & Lador SA, St. Livres, anciennement Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et de l'hydrologie, EPFL, Lausanne
Lafitte, Raymond, prof.	Laboratoire de constructions hydrauliques, EPFL, Lausanne Anciennement Bureau Stucky Ingénieurs-conseils SA, Renens
Müller, Dieter, dr	Colenco Power Engineering AG, Baden
Oberholzer, Alexandre	Anciennement Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Pougatsch, Henri (président)	Anciennement Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Viret, René	Anciennement Entreprise Electriques Fribourgeoises (EEF), Broc

Révision

Sonderegger, Theodor	Office fédéral de l'énergie, Ittigen
Darbre, Georges, dr	Office fédéral de l'énergie, Ittigen
Panduri, Rocco	Office fédéral de l'énergie, Ittigen

Version juin 2008
Traduction de la version allemande, Version juin 2008

Adresse

Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen
Case postale
3003 Berne

+41 31 322 5611
<http://www.ofen.admin.ch/>



Table des matières

Introduction	4
1 DÉFINITIONS	5
1.1 Crue.....	5
1.2 Bassin versant.....	5
1.3 Hydrogramme.....	5
1.4 Crues prises en compte pour les ouvrages d'accumulation.....	6
1.5 Niveau normal de retenue, cote de danger et revanche de sécurité.....	6
1.6 Délimitation par rapport aux mesures d'aménagement des cours d'eau dans un but de protection contre les crues	9
2 ESTIMATION DES CRUES DE PROJET ET DE SÉCURITÉ	10
2.1 Remarques générales	10
2.2 Crue de projet.....	10
2.2.1 Introduction.....	10
2.2.2 Données climatiques et hydrologiques.....	11
2.2.3 Résumé des méthodes usuelles	11
2.3 Crue de sécurité	13
3. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT GÉNÉRAUX.....	14
3.1 Principes.....	14
3.2 Conditions initiales	14
3.3 Evacuation de la crue de projet.....	14
3.4 Evacuation de la crue de sécurité	15
4. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT COMPLÉMENTAIRES RÉSERVÉS AUX CAS SPÉCIFIQUES.....	16
4.1 Centrales hydroélectriques.....	16
4.2 Centrales à pompage-turbinage.....	16
4.3 Bassin de compensation	17
4.4 Bassin de rétention de crues.....	17
4.5 Barrages de rétention de sédiments et de laves torrentielles, barrages de protection contre les avalanches.....	19
4.6 Barrages en cascade	19
5 MESURES CONSTRUCTIVES VISANT À MAÎTRISER LES ÉVÉNEMENTS EXCEPTIONNELS ET EXTRÊMES.....	20
5.1 Evacuateur de crue	20
5.2 Vidange de fond	20
5.3 Ouvrages de dissipation d'énergie (bassins amortisseurs).....	21
5.4 Equipements	21
5.5 Mesures applicables aux barrages en service	21
6 SURVEILLANCE EN PÉRIODE DE CRUE	22
7 SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES INSTALLATIONS	22
8 DOCUMENTATION RELATIVE À LA SÉCURITÉ EN CAS DE CRUE	23
BIBLIOGRAPHIE	24



Introduction

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 par *l'ordonnance du 7 décembre 1998 sur la sécurité des ouvrages d'accumulation* (OSOA, RS 721.102).

L'art. 1 OSOA précise le champ d'application de l'ordonnance. Celle-ci 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. L'ordonnance s'applique également aux ouvrages d'accumulation de moindres dimensions lorsqu'ils représentent un danger particulier pour les personnes ou les biens. Par contre, elle ne s'applique pas aux ouvrages d'accumulation dont il est établi qu'ils ne représentent aucun danger particulier pour les personnes ou les biens. L'OSOA confie la surveillance des ouvrages d'accumulation de moindres dimensions aux cantons (art. 22 OSOA).

Objectif et contenu de la documentation de base relative à la sécurité en cas de crue

Conformément à l'art. 26 OSOA, l'Autorité de surveillance compétente peut élaborer des directives régissant les modalités d'application de l'ordonnance. Pour ce faire, elle collabore avec des représentants des autorités cantonales de surveillance, des milieux scientifiques, des organisations professionnelles et de l'économie. Un groupe de travail a été chargé de définir des critères d'évaluation et de dimensionnement s'appliquant aux ouvrages d'accumulation sur le plan de la sécurité en cas de crue. Le groupe a préparé l'essentiel du présent document, qui commente et complète la directive.

Une crue peut provoquer des dégâts importants sur un ouvrage d'accumulation, voire entraîner sa destruction. En présence d'un tel scénario, il est primordial de prendre toutes les dispositions qui s'imposent pour garantir la sécurité de l'ouvrage. La sécurité en cas de crue doit être revue périodiquement en regard des changements climatiques ou de l'évolution des connaissances et des méthodes de calcul. Il convient par ailleurs de la vérifier en cas de modification du mode d'exploitation, de transformation de l'ouvrage ou de développement démographique important dans la région concernée.

Le chapitre 1 définit les crues qui entrent en ligne de compte pour la vérification de la sécurité des ouvrages d'accumulation, à savoir la crue de projet (événement exceptionnel) et la crue de sécurité (événement extrême).

Le chapitre 2 précise les critères permettant de dériver et de définir les crues de projet et de sécurité; les critères attachés à l'évacuation de ces crues sont décrits au chapitre 3.

Le chapitre 4 définit des critères de dimensionnement complémentaires applicables à des cas spécifiques.

Le chapitre 5 indique quelles mesures constructives entreprendre pour garantir la sécurité des ouvrages.

Les instructions relatives à la surveillance sur site en cas de crue sont indiquées au chapitre 6.

La surveillance et l'entretien sont décisifs pour garantir le parfait fonctionnement des installations. Le chapitre 7 fait l'inventaire de recommandations en la matière.

Enfin, le chapitre 8 dresse la liste des documents concernant la sécurité en cas de crue qui doivent figurer dans le dossier de l'ouvrage d'accumulation.



1 DÉFINITIONS

1.1 Crue

La **crue** désigne ici l'état des cours d'eau dont le niveau d'eau est nettement supérieur à la valeur moyenne constatée sur une longue période.

1.2 Bassin versant

Le **bassin versant** d'un ouvrage d'accumulation désigne la surface drainée située en amont du barrage et constituée du cours d'eau principal et de ses affluents. Il est délimité par les lignes de partage des eaux.

Du point de vue topographique, un bassin versant peut être décrit par la répartition de sa surface le long des cours d'eau en fonction de l'altitude (courbes hypsométriques). Sont à prendre en compte également l'étendue et le pourcentage des couvertures rocheuse, glaciaire, végétale, ainsi que des zones habitées et industrielles. Les apports d'eau permanents en provenance de bassins versants voisins (bassins versants indirects) doivent eux aussi être pris en considération.

Pour comprendre le comportement hydrologique d'un bassin versant, il est nécessaire de bien connaître ses caractéristiques géologiques, topographiques et pédologiques.

1.3 Hydrogramme

Le débit naturel entrant dans le bassin d'un ouvrage d'accumulation en fonction du temps est désigné par $Q(t)$ dans le présent document. Le débit correspondant sortant du bassin de retenue, de même que la variation du niveau du plan d'eau de la retenue, sont établis au moyen d'un calcul de rétention.

La fonction $Q(t)$ désigne l'**hydrogramme** (hydrogramme de crue) caractéristique de la crue concernée.

Peuvent être déduits de l'hydrogramme des apports $Q(t)$:

- le volume des apports $V = \int Q(t) dt$;
- la valeur maximale du débit Q_{\max} au temps t_{\max} .

1.4 Crues prises en compte pour les ouvrages d'accumulation

L'analyse de la sécurité des ouvrages d'accumulation tient compte de deux événements de crue (tableau 1), à savoir:

- **la crue de projet**, événement exceptionnel ayant une période de retour de 1000 ans; son hydrogramme est désigné par $Q_B(t)$;
- **la crue de sécurité**, événement extrême dont l'hydrogramme est désigné par $Q_S(t)$.

Événement	fréquent	rare	exceptionnel	extrême
Période de retour ¹ (ans)	30	100	1000	>> 1000

Tableau 1: Événements de crue et leur période de retour

1.5 Niveau normal de retenue, cote de danger et revanche de sécurité

Le **niveau normal de retenue** d'un bassin d'accumulation peut être fixé par (figure 1):

- a) le niveau du seuil fixe d'un déversoir non vanné;
- b) le niveau maximal autorisé en exploitation normale d'un bassin d'accumulation dont le plan d'eau peut être contrôlé; ou
- c) le niveau du bord supérieur des organes mobiles en exploitation normale.

Le niveau normal de retenue peut faire l'objet d'une concession.

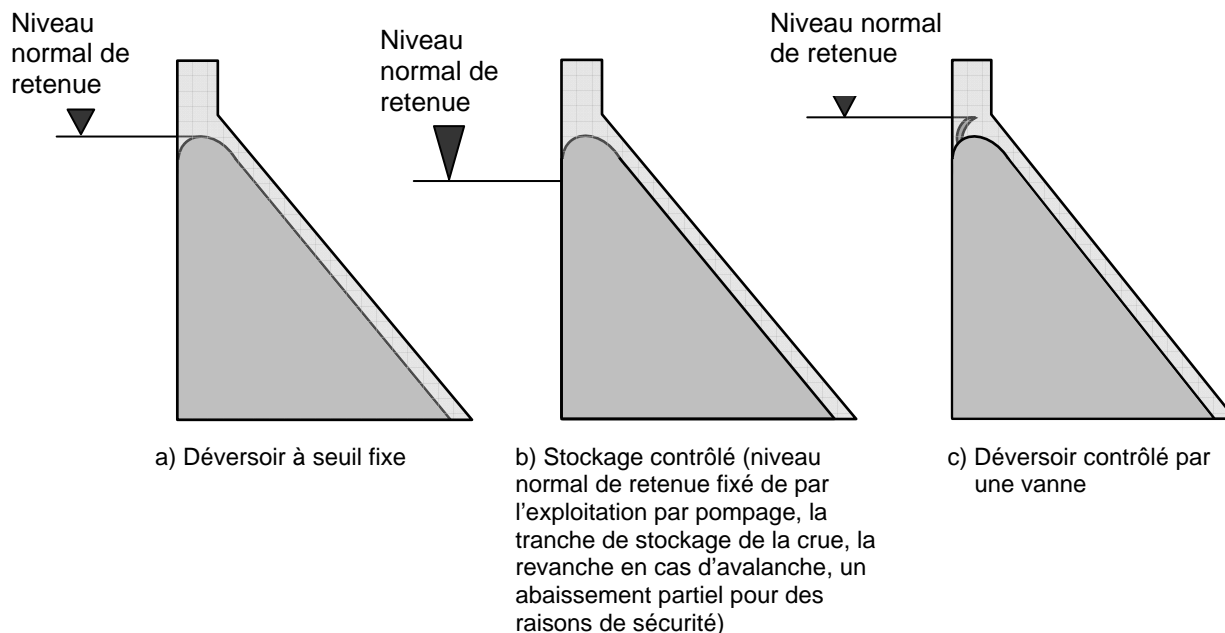


Figure 1: Définition du niveau normal de retenue

¹ La période de retour est la valeur réciproque de la probabilité de dépassement annuelle d'un événement (intervalle durant lequel un événement est atteint ou dépassé une fois en moyenne).

La **cote de danger** correspond au niveau du plan d'eau au-delà duquel la sécurité de l'ouvrage risque d'être compromise en raison d'un manque de stabilité ou de dégâts survenus (p. ex. érosion du couronnement et des appuis ou affouillement au pied du barrage), d'une sous-pression accrue ou de l'érosion interne due à l'augmentation de la pression hydrostatique.

Définition de la cote de danger :

- Dans le cas des barrages en remblai homogène, la cote de danger est située au niveau du couronnement (figure 2), dans le cas des autres barrages en remblai, elle se situe au sommet du système d'étanchéité (figure 3).
- Dans le cas des barrages en béton, la cote de danger se situe au niveau du couronnement (figures 4 et 5).

Dans certains cas particuliers et sous certaines conditions, la cote de danger peut ou doit être définie différemment (cf. chapitre 3.4).

La **revanche de sécurité** désigne la distance verticale entre le niveau maximal du plan d'eau atteint lors de l'évacuation de la crue de projet et la cote de danger. Elle doit garantir le passage de la crue de sécurité et empêcher la submersion due aux vagues.

La simple «revanche» désigne la distance entre le niveau normal de retenue (soit le niveau supérieur de la tranche de stockage de la crue, cf. figure 5) et la cote la plus basse du couronnement.

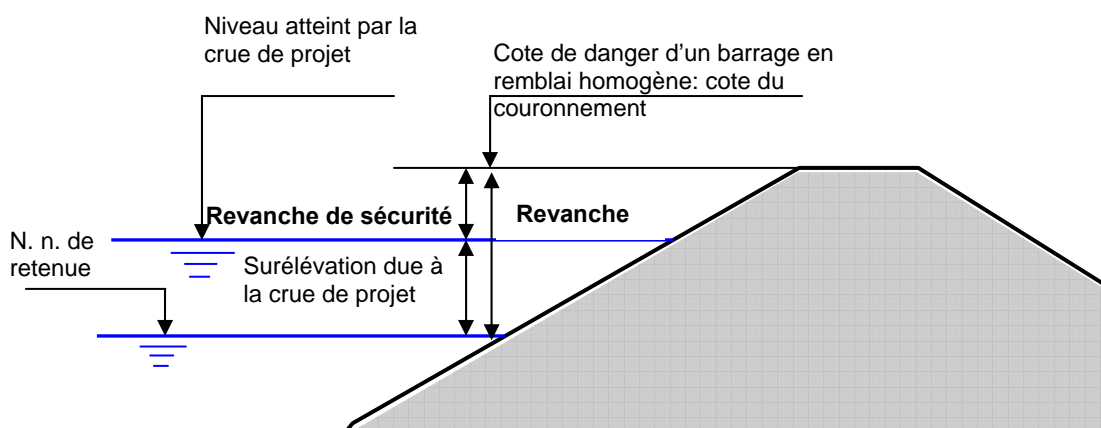


Figure 2: Définition des niveaux intervenant pour la vérification de la sécurité en cas de crue des barrages en remblai homogène

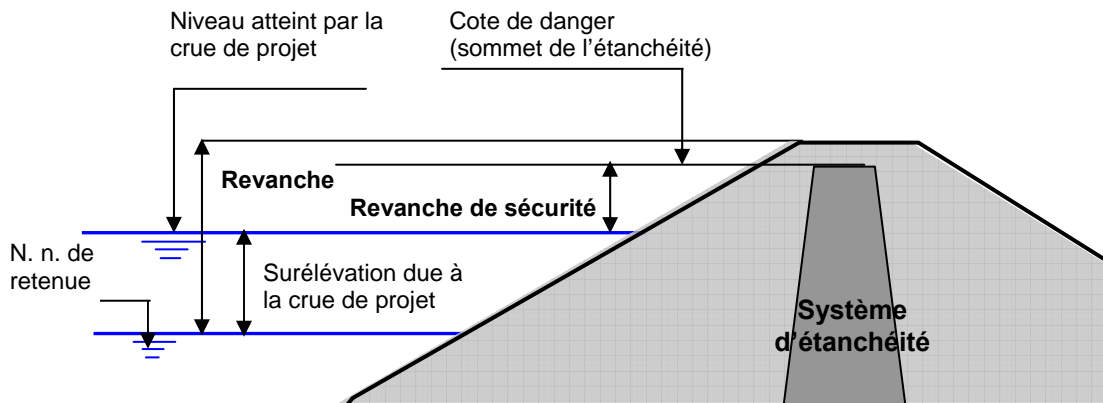


Figure 3: Définition des niveaux intervenant pour la vérification de la sécurité en cas de crue des barrages en remblai zonés

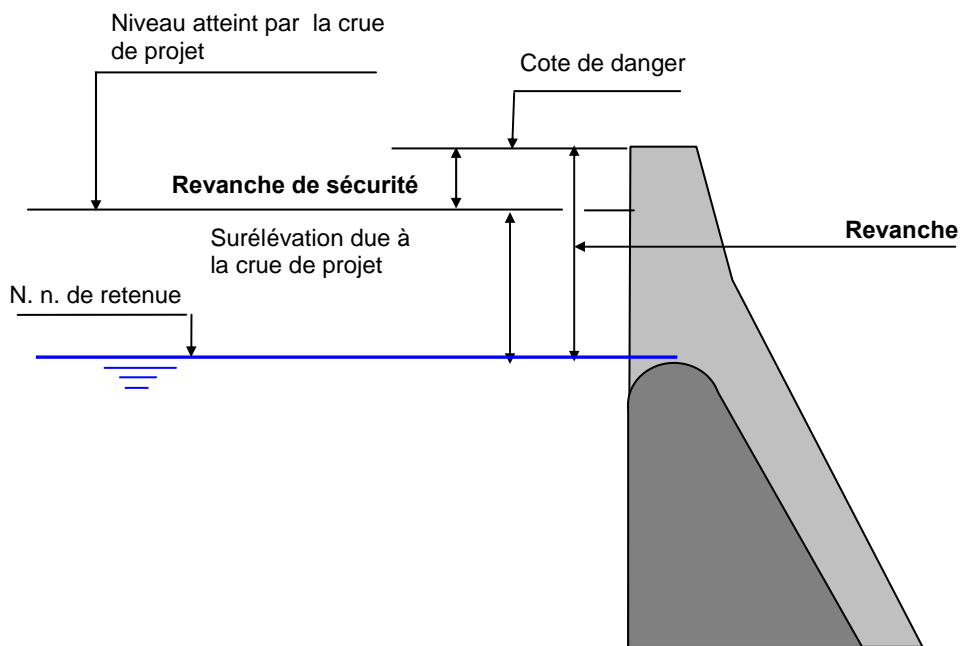


Figure 4: Définition des niveaux intervenant pour la vérification de la sécurité en cas de crue des barrages en béton, niveau de retenue normal égal au niveau du déversoir

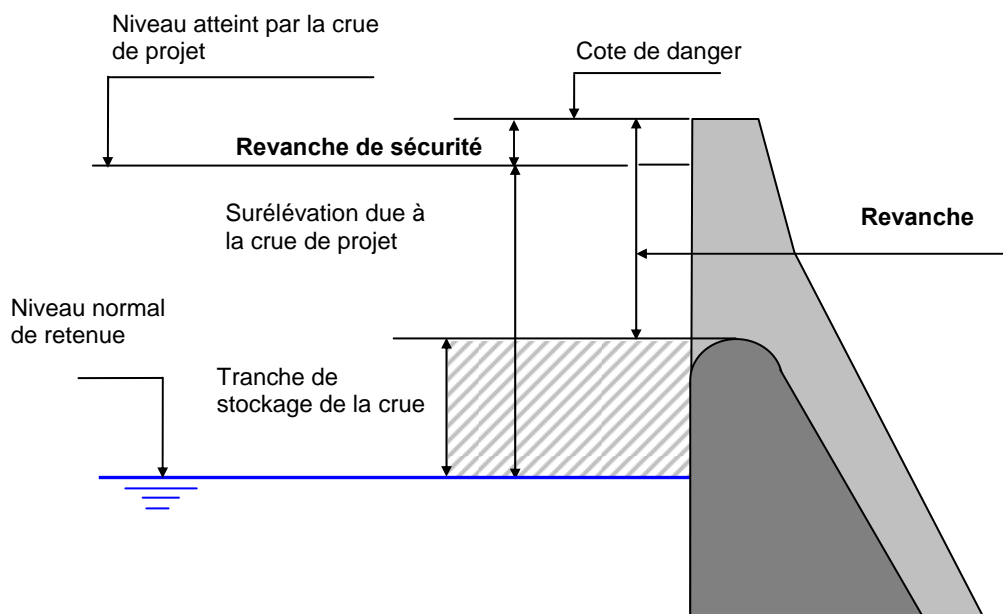


Figure 5: Définition des niveaux intervenant pour la vérification de la sécurité en cas de crue des barrages en béton, niveau normal de retenue inférieur au niveau du déversoir

La tranche de stockage de la crue (volume de rétention) désigne le volume de la retenue réservé à l'écroulement de la crue.

La surélévation due à l'évacuation de la crue de projet correspond à la tranche de réservoir située entre le niveau de retenue normal et le niveau maximal de la crue de projet. Après le passage de la crue, ce surremplissage n'est pas maintenu dans le réservoir, mais est éliminé par l'évacuateur de crue et par d'autres organes de décharge jusqu'à ce que le niveau normal de retenue soit à nouveau atteint.

1.6 Délimitation par rapport aux mesures d'aménagement des cours d'eau dans un but de protection contre les crues

Les digues latérales ou des digues de protection contre les crues construites le long d'affluents du barrage, mais situés hors de la zone de l'ouvrage d'accumulation (cf. figure 6), ne sont pas concernés par la directive. Le point d'intersection géométrique du niveau d'étiage de l'apport Q_{347} et de la ligne horizontale située 1 m au-dessus du niveau normal de retenue délimite les deux zones.

Q_{347} indique le débit qui est atteint en moyenne pendant 347 jours par année.

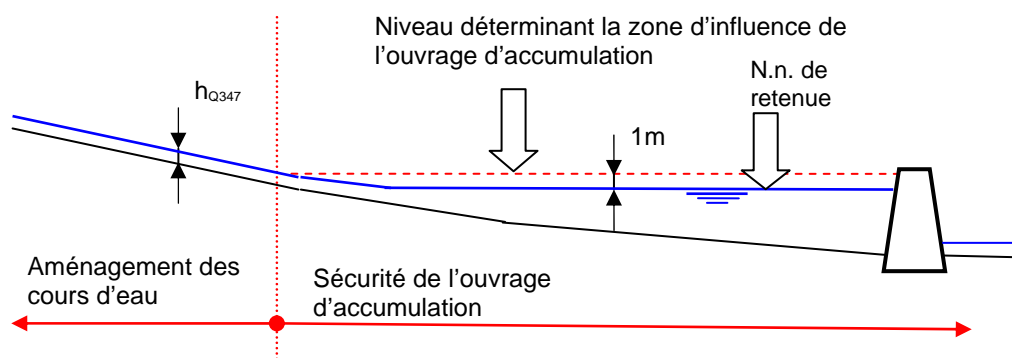


Figure 6: Délimitation entre la protection contre les crues (aménagement des cours d'eau) et la sécurité de l'ouvrage d'accumulation

2 ESTIMATION DES CRUES DE PROJET ET DE SÉCURITÉ

2.1 Remarques générales

L'évaluation de la sécurité en cas de crue se fonde en règle générale sur les hydrogrammes des apports. Il faut ainsi partir des précipitations et déterminer l'hydrogramme correspondant à chaque fois aux précipitations effectives² d'intensités de pluie de durée variable (hyétogramme). Faute de savoir à l'avance quelle durée de précipitations entraîne les conditions les plus critiques pour l'ouvrage d'accumulation, il est nécessaire d'établir une série d'hydrogrammes.

Les événements de crue examinés dans le cadre de ce document sont des événements exceptionnels, voire extrêmes, ayant une période de retour de 1000 ans ou plus. De manière générale, **l'intégralité des précipitations doit contribuer au volume des apports V**. Les phénomènes divergents qui peuvent survenir lors de périodes de retour plus courtes ne sont en règle générale pas pris en considération dans ce contexte.

La formulation quant à la **valeur maximale** Q_{\max} des hydrogrammes examinés est différente de celle ci-dessus. Cette valeur maximale dépend de la forme de l'hydrogramme, qui elle-même dépend du bassin versant et des précipitations; elle est généralement inférieure à la valeur de pointe des précipitations effectives Q_N . Reste que dans le cas des petits bassins versants, la valeur maximale de l'hydrogramme des événements extrêmes analysés se rapproche de celle des précipitations effectives. A noter que dans certaines situations particulières (p. ex. fonte des neiges), Q_{\max} peut même dépasser Q_N .

Lorsqu'il s'agit de déterminer la forme de l'hydrogramme $Q(t)$, et à défaut d'autres informations spécifiques, on peut recourir aux fonctions $Q(t)$ de la forme

$$\frac{Q(t)}{Q_{\max}} = \left(\frac{t}{t_{\max}} \cdot e^{\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)} \right)^n$$

La valeur standard de l'exposant n est 6. Si l'on dispose des informations appropriées, l'exposant n peut prendre une valeur située entre 1 et 6, selon les caractéristiques du bassin versant³.

2.2 Crue de projet

2.2.1 Introduction

L'estimation de la crue de projet $Q_B(t)$ ne doit pas reposer sur une seule formule ou méthode. Bien au contraire, il convient en l'occurrence de recourir à différentes méthodes appropriées adaptées aux données disponibles et aux spécificités de la région concernée. Dans ce contexte, le nombre et la qualité des données hydrologiques (pluviomètres, débits mesurés) jouent un rôle clé. Des résultats issus de différents calculs permettent de mieux étayer les valeurs de vérification retenues. Les études hydrologiques doivent être dirigées par des professionnels spécialistes du domaine.

² C'est-à-dire, la précipitation ayant une incidence directe sur le débit.

³ En fonction de l'exposant n , le volume des apports V est égal à $V = Q_{\max} \cdot t_{\max} \cdot \frac{e^n \cdot n!}{n^{n+1}}$



Les différentes méthodes permettent aussi bien d'estimer directement le débit de la pointe de la crue $Q_{B,max}$ et le volume (formules empiriques, méthodes probabilistes) que d'établir les hydrogrammes de crue $Q_B(t)$ à partir de données pluviométriques à l'aide de modèles de transformation pluie - débit.

Les calculs doivent être adaptés en fonction des expériences et les résultats revus à intervalles réguliers en tenant compte des nouvelles connaissances et des développements les plus récents.

2.2.2 Données climatiques et hydrologiques

Les conditions climatiques d'une région (pluviométrie, température de l'air), ainsi que les débits mesurés sur les cours d'eau fournissent des informations essentielles pour réaliser une analyse hydrologique.

En Suisse, MétéoSuisse (anciennement Institut suisse de la météorologie - ISM) gère de nombreuses stations météorologiques dont les mesures peuvent être consultées. Celles-ci ont déjà permis d'effectuer diverses analyses statistiques relatives aux pluies. Elles sont disponibles pour de nombreuses stations pluviométriques sous forme de courbes Intensité – Durée – Fréquence (IDF) [33]⁴.

Des cartes pluviométriques portant sur une période de retour de 2,33 et 100 ans et sur une durée de 1 et 24 heures ont été publiées dans le cadre d'une étude [2] consacrée aux précipitations extrêmes régionales. La référence [3] propose des cartes plus récentes et plus détaillées.

Dans la plupart des bassins versants, le débit de crues peut être déduit d'un épisode de pluie ayant la même période de retour.

Les débits de crue mesurés par les stations hydrométriques exploitées par le Service hydrologique et géologique national (SHGN, aujourd'hui Section Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement) constituent une précieuse source d'informations. Ces dernières sont consignées dans les annuaires hydrologiques [26] et font aussi l'objet d'une analyse statistique [25]. Autre source d'informations: les mesures effectuées par les services cantonaux ou par des observateurs particuliers (généralement des exploitants d'aménagements hydroélectriques).

En raison du manque de séries de mesures sur de longues durées, les valeurs extrêmes doivent être extrapolées selon une loi de probabilité, p. ex. la loi de Gumbel.

2.2.3 Résumé des méthodes usuelles

Le résumé des méthodes servant à évaluer la crue de projet donne un aperçu des pratiques les plus courantes, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Les descriptions succinctes ne dispensent pas de la lecture des ouvrages spécialisés. Le lecteur se référera à la bibliographie figurant à la fin du présent document.

L'hydrologue décide au cas par cas des méthodes à appliquer dans une situation définie. Pour ce faire, il tiendra compte des critères généraux mentionnés au point 2.1.

⁴ Le chiffre entre [] correspond au numéro de la référence bibliographique indiquée à la fin du texte.



Les différentes méthodes sont brièvement décrites dans les paragraphes ci-après.

I. Méthodes historiques

Elles se fondent en premier lieu sur l'étude des relevés historiques, mais aussi sur les renseignements fournis par la population et sur les relevés de marques laissées par les crues.

II. Méthodes empiriques

Il s'agit en l'occurrence de formules empiriques et régionales et de courbes-enveloppe établissant un lien entre le débit et les superficies des bassins versants; viennent s'y ajouter d'autres paramètres tels que pluviométrie, nature du sol ou déclivité. Par ailleurs, des méthodes empiriques mettent les valeurs extrêmes relevées en relation avec les superficies des bassins versants. La courbe-enveloppe qui en résulte peut être décrite par une formule.

[32] explique les principales méthodes applicables en Suisse et commente leurs avantages et leurs inconvénients.

III. Méthodes probabilistes

a) Méthodes basées sur des séries de mesures du niveau d'eau : les valeurs de pointe ou moyennes des débits relevés sur une période définie (jour, semaine, mois, année) font l'objet d'une analyse statistique en vue de déterminer la distribution de probabilité (lois de Gumbel, LogNormal, Pearson type 3, Weibull, généralisation des valeurs extrêmes, etc.).

b) Méthodes basées sur des données pluviométriques

- A partir de séries de mesures pluviométriques, les événements de moindre probabilité sont définis par le biais d'une analyse statistique et convertis en débit au moyen de méthodes déterministes. Font également partie de cette catégorie les approches basées sur le temps d'écoulement et sur l'intensité correspondante des précipitations.
- La méthode du Gradex se fonde sur l'hypothèse selon laquelle, en période de crue et lorsque le sol est quasi saturé, l'augmentation des précipitations entraîne un accroissement équivalent du débit. En conséquence, lorsqu'elles sont tracées sur un papier à échelle fonctionnelle selon la loi de Gumbel, les droites d'extrapolation de l'intensité des précipitations et des pointes de débit évoluent en parallèle.

IV. Méthodes stochastiques

Ces méthodes permettent de tenir compte de la nature aléatoire des phénomènes hydrométéorologiques en recourant non pas à des valeurs ponctuelles, mais à des distributions statistiques selon le modèle de Neyman-Scott. Autrement dit, de multiples séries de précipitations sont générées, puis converties en une série de débits de crue à l'aide d'un modèle pluie-débit. Ces séries de crues artificielles sont ensuite traitées comme au point III a) [21].



2.3 Crue de sécurité

La crue de sécurité $Q_S(t)$ peut être évaluée de deux manières différentes.

1. Evaluation sur la base de la crue de projet

Cette méthode d'évaluation approximative basée sur l'hydrogramme de la crue de projet a été proposée en Suisse.

Le débit de crue de sécurité est évalué au moyen des formules suivantes:

a) pour les ouvrages existants: $Q_S(t) = 1.5 \cdot Q_B(t)$

b) pour les nouveaux projets ou les modifications de projet: $Q_S(t) = 1.5 \cdot Q_B\left(\frac{2t}{3}\right)$

Autrefois, seule la méthode d'évaluation basée sur la formule a) était appliquée. La nouvelle formule d'évaluation b) n'a une influence que dans les cas où l'effet de rétention est essentiel pour procéder aux vérifications voulues. $Q_{S,max}$ équivaut toujours à $1.5 \cdot Q_{B,max}$.

2. Méthode déterministe (PMP-PMF)

Cette méthode consiste à systématiser les débits de crue par la simulation et le contrôle des processus physiques liés à la production et à l'écoulement des précipitations dans un système de bassin versant. La crue maximale probable ou *PMF* (*Probable Maximum Flood*) est la crue pouvant résulter dans une région définie de la combinaison la plus sévère possible de conditions météorologiques et physiques critiques (*PMP: Probable Maximum Precipitation* ou pluie maximale probable) et dont l'écoulement dans la retenue avec tous les organes de décharge opérationnels fait monter le plan d'eau à son niveau maximal.

Dans le cadre de mandats de recherche, le Laboratoire des systèmes énergétiques (LASSEN, EPFL), puis le Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et d'hydrologie (EFLUM, EPFL) avec la collaboration d'Hertig & Lador SA ont élaboré des cartes *PMP* pour l'ensemble de la Suisse [24]. La *PMF* est établie sur la base de ces cartes.



3. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT GÉNÉRAUX

3.1 Principes

L'évaluation de la sécurité en cas de crue vise à déterminer la revanche, ainsi que la capacité des organes de décharge.

La situation la plus critique pour l'ouvrage d'accumulation lors du passage de la crue est recherchée au moyen d'une analyse d'hydrogrammes ($Q_B(t)$ et $Q_S(t)$) et compte tenu des capacités de rétention et d'évacuation de l'ouvrage.

Les phénomènes accompagnant un événement de crue doivent eux aussi être pris en compte: érosion, sédimentation, matériaux charriés, bois flottants, autres difficultés telles qu'interruption de courant ou accès impossible suite à des conditions météorologiques extrêmes (orages, tempêtes).

Tant pour les événements exceptionnels que pour les événements extrêmes, la prise en compte des **apports d'eau par adduction** dans les retenues ne peut être négligée que lorsque leur dérivation ou leur arrêt est garanti même dans les situations extrêmes. Si ce n'est pas le cas, ces apports sont ajoutés au débit naturel de la crue de projet ou de la crue de sécurité.

3.2 Conditions initiales

Pour la vérification du passage de la crue de projet comme du passage de la crue de sécurité, on admet en règle générale que le plan d'eau initial équivaut au niveau normal de retenue.

Les conditions spéciales sont évoquées au chapitre 4.

3.3 Evacuation de la crue de projet

La crue de projet doit pouvoir être évacuée avec une marge de sécurité définie par la hauteur de la revanche ultime, sans provoquer de dégâts (ni à l'ouvrage d'accumulation lui-même, ni aux organes de décharge). Ce type de crue fait partie des événements exceptionnels. Les critères attachés à l'évacuation de la crue de projet conduisent au **dimensionnement adéquat de l'évacuateur de crue** comme des autres organes de décharge disponibles en cas de crue.

Se fondant sur l'hydrogramme de la crue de projet entrant dans la retenue $Q_B(t)$ et sur les conditions initiales, les calculs permettent de connaître

- (1) le débit maximal évacué ;
- (2) la surélévation maximale du plan d'eau durant l'évacuation de la crue (figures 2 à 5) ;
- (3) la tranche de stockage de la crue (figure 5).

Les critères suivants s'appliquent:

- La capacité de l'évacuateur de crue peut être complétée par la mise en service de la vidange de fond, sous réserve de la règle «n - 1» ci-dessous.
- La vérification est faite en admettant, pour tous les barrages en béton et en remblai, que parmi «n» organes mobiles de décharge, celui dont la capacité est la plus importante est hors service (règle «n - 1»).
- L'éventualité d'une obstruction des organes de décharge nécessaires à l'évacuation de la crue et les conséquences qu'elles impliquent doit être examinée.

- Les apports d'eau par adduction sont pris en compte conformément au point 3.1.

Le tableau 2 contient quelques valeurs indicatives pour la revanche de sécurité minimale en cas de crue de projet.

Hauteur du barrage	$H < 10$ m	$10 \text{ m} \leq H < 40$ m	$H \geq 40$ m
Barrage en béton	0,50 m	1,00 m	1,00 m
Barrage en remblai	1,00 m	2,00 m	3,00 m
avec protection pierreuse amont	1,00 m	1,50 m	2,50 m

Tableau 2: Valeurs indicatives de revanche de sécurité

3.4 Evacuation de la crue de sécurité

La crue de sécurité désigne le débit que l'ouvrage d'accumulation doit être capable de retenir ou d'évacuer dans des conditions extrêmes. Lors de la vérification de l'évacuation de la crue de sécurité, il faut contrôler que le niveau de l'eau accumulée dans la retenue ne dépasse pas la cote de danger.

Les critères suivants s'appliquent:

- Il est à prouver sur la base de l'hydrogramme de la crue de sécurité $Q_S(t)$, que la cote de danger n'est pas dépassée, même en cas d'événement extrême.
- Dans le cas des ouvrages d'accumulation (barrages en béton et barrages en remblai) conçus de manière correspondante, il est possible de fixer la cote de danger en dérogeant aux critères du chapitre 1.5. Il incombe alors à l'ingénieur spécialisé de vérifier que, jusqu'au niveau de cette cote, l'ouvrage reste stable et qu'il n'y a pas d'érosion des appuis ou du pied (compte tenu également des vagues provoquées par une tempête). Si des dégâts de moindre importance sont admis, toute rupture partielle ou totale du barrage est exclue.
- Pour les barrages en béton, la vérification du passage de la crue de sécurité est faite en admettant que tous les organes mobiles de décharge opérationnels sont en fonction.
- Pour les barrages en remblai, la vérification est faite en admettant que parmi «n» organes mobiles de décharge, celui dont la capacité est la plus importante est hors service (règle «n – 1»).
- Les apports d'eau par adduction sont pris en compte conformément au point 3.1.



4. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT COMPLÉMENTAIRES RÉSERVÉS AUX CAS SPÉCIFIQUES

4.1 Centrales hydroélectriques

Si l'aménagement est équipé d'une centrale hydroélectrique, le débit de turbinage n'est généralement pas pris en compte lors de la vérification de l'événement exceptionnel. Font exception les centrales qui ne peuvent pas être submergées et qui sont en mesure d'évacuer le débit de turbinage (p. ex. groupe-bulbe en position de drapeau), ou qui sont équipées d'au moins deux lignes à haute tension autonomes destinées à évacuer l'énergie. Quoi qu'il en soit, la vérification tiendra compte au maximum de $n - 1$ turbines.

En règle générale, le débit de turbinage ne peut être pris en compte lors de la vérification d'un événement extrême.

4.2 Centrales à pompage-turbinage

Lors de la vérification de la capacité des organes de décharge en cas d'événement exceptionnel, d'une part, et de l'évacuation d'un événement extrême à un niveau inférieur à la cote de danger, d'autre part, il est distingué entre l'exploitation par pompage avec un système de commande redondant et celle avec un système non redondant.

Exploitation en pompage avec un système de commande non redondant

- a) Événement exceptionnel : la base de dimensionnement est la valeur déterminante entre le débit naturel $Q_B(t)$ défini au chapitre 2.2 et le débit de pompage maximal Q_{Pmax} .
- b) La combinaison déterminante pour le cas d'événement extrême est la somme de $Q_S(t)$ et du débit maximal de pompage Q_{Pmax} .

Exploitation en pompage avec un système de commande redondant

- a) L'événement exceptionnel correspond au débit naturel $Q_B(t)$ décrit au chapitre 2.2.
- b) L'événement extrême est la valeur la plus critique entre le débit naturel $Q_S(t)$ et le débit de pompage maximal Q_{Pmax} .

4.3 Bassin de compensation

La capacité des organes de décharge (cf. figure 7) est évaluée sur la base de la somme du débit naturel (Q_{direct}) et de la capacité des adductions dans le bassin tels que prises d'eau (Q_F), débit turbiné de centrales situées en amont (Q_{T_o}), et éventuellement du débit (Q_R) provenant de la cheminée d'équilibre d'une centrale inférieure, qui en cas d'arrêt subit reflue dans le bassin de compensation.

Si Q_{direct} est négligeable, la vérification de l'événement exceptionnel s'effectuera sur la base des critères décrits au chapitre 3.3. Si non, tant l'événement exceptionnel que l'événement extrême seront examinés selon les critères des chapitres 3.3 et 3.4.

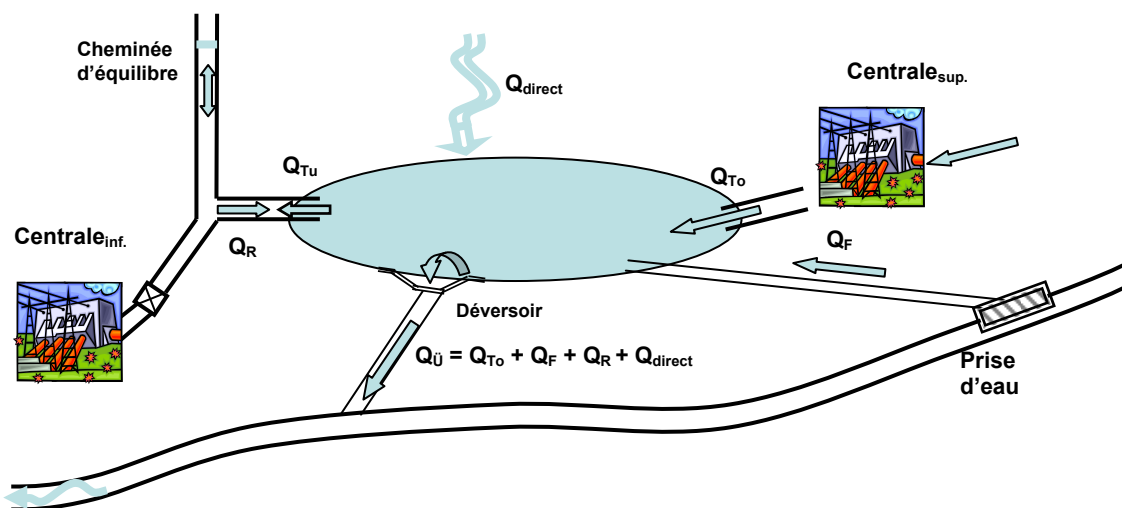


Figure 7: Débits dans un bassin de compensation

4.4 Bassin de rétention de crues

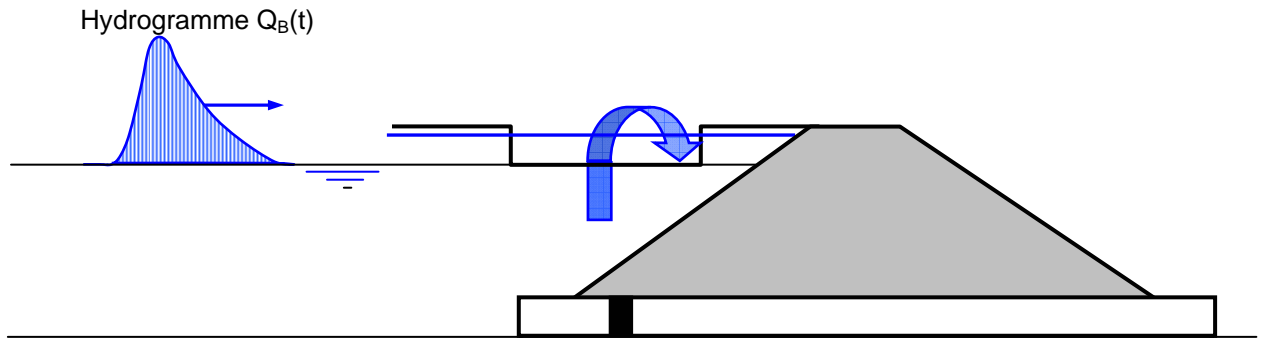
La base du dimensionnement d'un bassin de rétention de crues inclut le volume qu'il doit contenir et sa capacité d'évacuation (objectif de protection et réduction de la pointe de crue). Le niveau du seuil du déversoir de l'évacuateur de crue est déterminé en fonction de ces deux critères.

La vérification de la sécurité en cas de crue prend en considération deux cas de figure (figures 8a et 8b)⁵.

- La crue de projet entre dans un bassin déjà plein. La vidange de fond est hors service ou obstruée (cas de panne). La capacité des organes de décharge pour l'évacuation de crue et la revanche de sécurité requise sont définies en fonction de ce cas.
- La crue de sécurité entre dans un bassin vide ou dans un bassin qui contient de l'eau en permanence, dont le niveau est considéré comme niveau initial. La vidange de fond est hors service ou obstruée au moment de l'arrivée de la crue de sécurité. Ce cas de figure permet de vérifier que la cote de danger n'est pas dépassée.

⁵ Le cas dans lequel la crue de projet entre dans un bassin vide permet d'évaluer les risques dans la zone en aval (cas de surcharge). S'il n'est pas déterminant dans la situation présente, il permet de vérifier le comportement hydraulique de l'ouvrage.

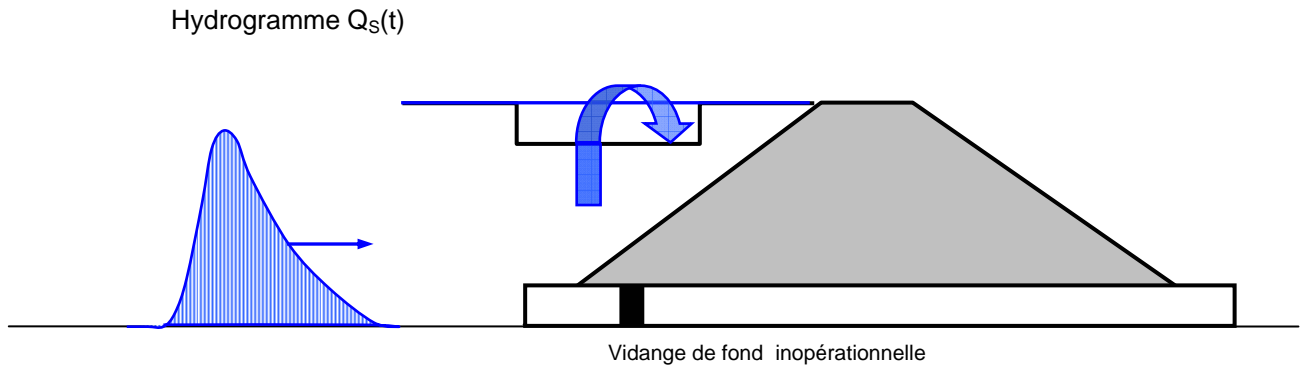
a) Evacuation de la crue de projet: la crue entre dans un bassin déjà plein, la vidange de fond est inopérante



Vidange de fond inopérante

Figure 8a: Cas a) évacuation de la crue de projet

b) Evacuation de la crue de sécurité: la crue entre dans un bassin vide ou étant au niveau initial, la vidange de fond est opérante



Vidange de fond opérante

Figure 8b: Cas b) évacuation de la crue de sécurité

4.5 Barrages de rétention de sédiments et de laves torrentielles, barrages de protection contre les avalanches

Dans ce cas, les crues de projet et de sécurité pénètrent dans le bassin rempli de matériaux jusqu'au niveau du seuil du déversoir. Le pertuis éventuel (muni ou non de barreaux ou de madriers) est obstrué (figure 9), à moins que des mesures constructives suffisantes permettent d'éviter une obstruction.

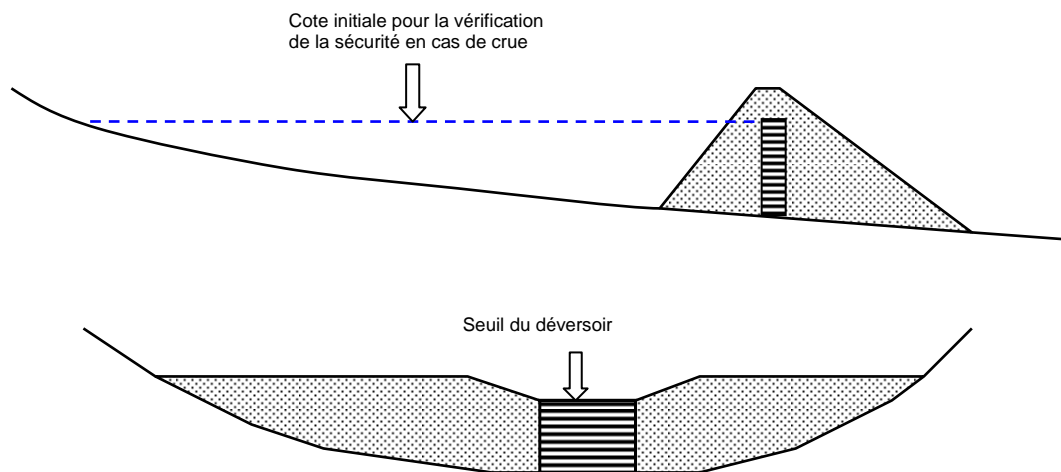


Figure 9: Bassin de rétention de sédiments et de laves torrentielles

4.6 Barrages en cascade

Pour les barrages en cascade, la crue de projet ou la crue de sécurité correspond au débit évacué du réservoir situé juste en amont, augmenté des apports naturels et des adductions d'eau du bassin intermédiaire (figure 10).

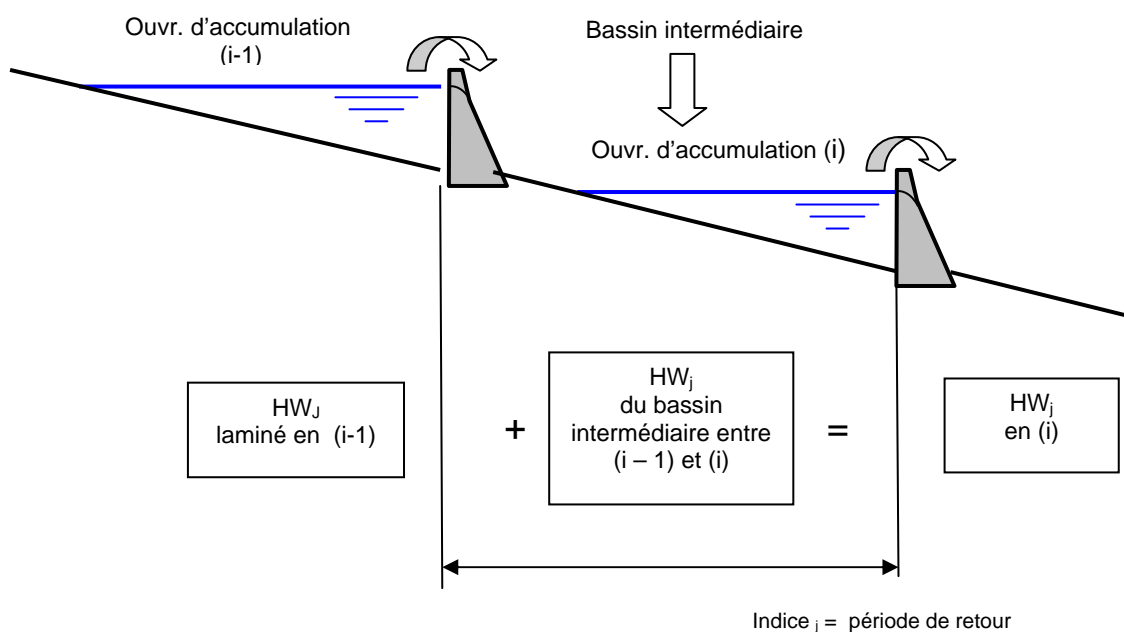


Figure 10: Détermination des crues de projet et de sécurité dans le cas de barrages en cascade



5 MESURES CONSTRUCTIVES VISANT À MAÎTRISER LES ÉVÉNEMENTS EXCEPTIONNELS ET EXTRÊMES

5.1 Evacuateur de crue

Afin d'éviter toute obstruction par des bois flottants, des troncs d'arbres ou autres débris en cas de crue, il est nécessaire de prévoir des largeurs et des hauteurs de passes suffisantes. Selon les observations faites pendant les crues de 1987 [15], les troncs transportés sont rapidement réduits à une longueur de 10 m (dans les régions alpines et préalpines). Mais pour les barrages mobiles et les ouvrages de décharge situés en plaine sur de grands cours d'eau, la largeur utile d'une ouverture doit être nettement supérieure à 10 m. Il faut relever que la forme de la retenue a une incidence sur le transport des bois flottants. En aval de l'évacuateur de crue, il est préférable que l'eau transite non pas à travers une galerie, mais si possible dans un canal ouvert. L'éventualité d'une obstruction des organes de décharge requis pour évacuer la crue et les conséquences possibles de leur mise hors service sont à examiner.

Le tirant d'eau sous une passerelle ou un pont devrait être d'au moins 1,5 à 2 m par rapport au plan d'eau de la crue de projet. La passerelle doit être conçue de manière à pouvoir être démontée rapidement en cas d'urgence.

Les ouvrages sans vidange de fond (p. ex. prises d'eau) qui ne sont équipés que d'un seul organe de décharge (vanne, barrage gonflable) doivent être construits de manière à éviter toute érosion latérale lorsque la vanne est hors service. En règle générale, il s'agit en l'occurrence d'ouvrages qui, en raison de leurs dimensions modestes et du faible potentiel de danger qu'ils présentent en cas de rupture, ne sont pas soumis à la surveillance des Autorités.

5.2 Vidange de fond

La vidange de fond est avant tout un organe de sécurité dont les principales fonctions sont:

- (1) maîtriser la montée du plan d'eau lors du premier remplissage ;
- (2) permettre l'abaissement du plan d'eau, voire la vidange du bassin de retenue en cas de danger menaçant la sécurité de l'ouvrage ;
- (3) maintenir le plan d'eau abaissé en cas de nécessité (travaux d'entretien ou travaux consécutifs à un événement exceptionnel) ;
- (4) servir d'organe complémentaire pour l'évacuation de la crue de projet ou de sécurité.

Une autre fonction importante de la vidange de fond est l'exécution de chasses périodiques pour l'élimination des dépôts dans la retenue.

Il est souhaitable que la vidange de fond soit équipée de deux vannes, l'une remplissant la fonction de dispositif de sécurité (réserve, révision), l'autre celle de dispositif d'exploitation ou de réglage. Une vanne batardeau en amont permet de vider la galerie pour procéder à une inspection et réaliser des travaux d'entretien.

Selon les dimensions de l'ouvrage, la vidange de fond peut être complétée par une vidange intermédiaire.



5.3 Ouvrages de dissipation d'énergie (bassins amortisseurs)

Le pied de l'ouvrage doit être conçu de manière à éviter toute érosion. L'énergie de l'eau déversée par le biais de l'ouvrage d'évacuation doit être dissipée dans un bassin amortisseur ou, si les conditions topographiques et géologiques l'autorisent, le coursier peut se terminer par un saut de ski pour rejeter la lame d'eau au loin à l'aval. A défaut d'un bassin amortisseur au pied de l'ouvrage, il convient d'évaluer la géométrie des affouillements et, le cas échéant, de vérifier la stabilité du barrage dans cette zone. Dans le cas des barrages de rétention de sédiments, il faut prendre en compte qu'une eau chargée de sédiments provoque un affouillement plus prononcé.

5.4 Equipements

Si la manœuvre des vannes est électrique, l'installation nécessite une deuxième source d'alimentation autonome (groupe électrogène de secours, batterie, accumulateur) afin de pallier d'éventuelles coupures de courant. En cas d'urgence, les vannes doivent également pouvoir être manoeuvrées manuellement.

La commande à distance des vannes est admise et laissée à l'appréciation de l'exploitant. Dans ce cas, un système d'ouverture par paliers doit être prévu pour éviter une ouverture totale involontaire. La commande à distance doit être conçue de manière à ce que la vanne s'arrête d'elle-même après chaque palier et qu'un nouvel ordre soit nécessaire pour le palier suivant. Quoi qu'il en soit, une commande locale doit être à disposition.

Dans le cas des petits ouvrages, un mécanisme de manœuvre manuel s'avère généralement suffisant.

Les centres de commande doivent absolument rester accessibles même en cas de crue ; de même, les sources d'alimentation électrique et les chemins à câbles doivent rester secs.

Certaines mesures comme l'intégration d'un système de production de bulles d'air ou de systèmes de chauffage des bajoyers s'avèrent utiles pour pallier les désagréments des conditions hivernales (formation de glace).

5.5 Mesures applicables aux barrages en service

Lorsqu'un barrage en béton ou en remblai en service ne satisfait pas aux critères définis, les mesures suivantes (sans ordre de priorité) peuvent être envisagées :

- adaptation des consignes d'exploitation (par exemple abaissement du niveau normal de retenue) ;
- augmentation de la capacité de l'organe d'évacuation (par abaissement du seuil du déversoir ou en intégrant une nouvelle passe) ;
- construction d'un mur ou d'un parapet (cet élément doit être apte à résister à la poussée de l'eau) ;
- surélévation de la crête du barrage ;
- utilisation d'un ouvrage fusible ;
- protection contre l'érosion en cas de submersion ;
- mise en place d'un nouvel évacuateur de crue.

Lorsqu'un barrage en remblai risque d'être submergé lors du passage d'une crue, le couronnement et le parement aval peuvent rétroactivement être transformés en

ouvrage de déversement. A condition cependant qu'il s'agisse d'un barrage de faible hauteur et que la chute de la lame déversante reste modeste [1].

6 SURVEILLANCE EN PÉRIODE DE CRUE

La maîtrise d'un événement de crue suppose l'élaboration préalable de règlements et d'une stratégie applicable en cas d'urgence.

- L'évaluation de la sécurité en cas de crue repose sur une stratégie d'ouverture des organes de décharge précise. En cas d'agissement différent, la sécurité risque d'être menacée. D'où la nécessité de définir des instructions contraignantes pour l'utilisation des organes de décharge. Réunies dans un «règlement de manœuvre des vannes», elles doivent être univoques et simples à appliquer. Ce règlement indique la procédure à suivre en cas d'exploitation normale et en cas de panne.
- La stratégie d'urgence en cas de crue est nécessaire pour garantir la meilleure gestion possible du risque résiduel.

La présence de personnel sur place est nécessaire suivant le niveau de la retenue et les prévisions hydrologiques. La surveillance comprend le suivi de l'évolution du niveau du plan d'eau (des repères et/ou des échelles limnimétriques avec marques visibles seront installés à cet effet pour pallier une défaillance du système de mesure automatique). Elle permet d'assurer la manœuvre des organes mobiles (vannes de surface ou de fond) en cas d'interruption de l'alimentation électrique ou de la commande à distance, de détecter des pertes d'eau inattendues et l'apparition de dégâts à l'ouvrage (apparition de sources, phénomènes de renard pour une digue).

Par ailleurs, l'équipe de surveillance assure sur place la liaison entre le barrage et un service de permanence. En cas de danger pour la population habitant en aval, elle doit être en mesure de déclencher une alarme. Pour ce faire, elle doit prévoir que les liaisons téléphoniques sont souvent coupées en cas d'intempéries et/ou de crues importantes, d'où l'importance de disposer d'un second moyen de communication indépendant.

7 SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES INSTALLATIONS

Les indications relatives aux contrôles visuels et aux essais périodiques de fonctionnement des vannes figurent au chapitre 11 (surveillance et entretien) des directives « Sécurité des ouvrages d'accumulation ».

L'état des bétons des piles, des déversoirs, des évacuateurs, des galeries et des puits est vérifié lors d'inspections. Les parties dégradées sont remises en état si nécessaire. Il sera également vérifié qu'aucune partie d'ouvrage n'est obstruée par des blocs de rocher, de la neige ou des blocs de glace limitant ou empêchant l'écoulement; le cas échéant, ces dépôts doivent être éliminés immédiatement.

Si des affouillements sont susceptibles de se former au pied des ouvrages, il est nécessaire de procéder régulièrement à des relevés topographiques afin de s'assurer que la stabilité du barrage n'est pas compromise. Il en va de même pour les zones délimitées par un contre-barrage (p. ex. bassin amortisseur).



Afin de garantir en tout temps la mise en service des vannes, il faut prévoir:

- des contrôles de fonctionnement réguliers des organes mobiles ;
- l'installation et le contrôle de groupes électrogènes de secours ;
- le contrôle régulier de l'état de toutes les composantes (vannes, appuis, glissières, éléments d'étanchéité, vérins, équipement électrique, etc.), ainsi que des travaux d'entretien courants.

Dans le cas où la retenue doit être maintenue abaissée en raison de travaux ou suite à un événement exceptionnel, il est recommandé de déterminer le niveau d'eau associé à des crues de différentes périodes de retour (10, 20, 50, 100 ans).

L'entretien de l'émissaire en aval du barrage, et notamment le contrôle de sa capacité hydraulique suffisante, est généralement du ressort des cantons.

8 DOCUMENTATION RELATIVE À LA SÉCURITÉ EN CAS DE CRUE

Le dossier de l'ouvrage d'accumulation doit notamment contenir les documents suivants :

- les études hydrologiques (avec données de base et hypothèses de calcul) ;
- les calculs hydrauliques ;
- les schémas hydrauliques et électriques des équipements ;
- les plans principaux des structures ;
- les plans des organes mobiles ;
- les courbes de capacité (amenée d'eau-écoulement en fonction du temps, plan d'eau en fonction du temps) ;
- le règlement de manœuvre des vannes ;
- la stratégie d'urgence en cas de crue.



BIBLIOGRAPHIE

(sélection)

- [1] André S., 2004: High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements. Communication LCH N° 20, Ed. A. Schleiss, Lausanne
- [2] ASF, 1974: Les débits maximaux des cours d'eau suisses observés jusqu'en 1969 / Die grössten bis zum Jahr 1969 beobachteten Abflussmengen in schweizerischen Gewässern
- [3] Atlas hydrologique de la Suisse / Hydrologischer Atlas der Schweiz;
http://hydrant.unibe.ch/hades/hades_dt.htm
- [4] Audouard A., Hertig J.-A., Fallot J.-M., 2006: Modélisation des précipitations extrêmes pour la Suisse. Actes du 19^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC) à Epernay, France 6-9.09.2006, pp. 83-88
- [5] Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie Nr. 33, 1986: Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen
- [6] Béroud D., et al., 1992: Calcul des crues extrêmes par des méthodes déterministes du type pluie maximale probable (PMP) / crue maximale probable (PMF), IATE/EPFL, Bonnard & Gardel (Lausanne), SA Ufficio d'Ingegneria Maggia (Locarno)
- [7] Biedermann R., et al., 1988: Safety of swiss dams against floods: Design criteria and design flood, CNSGB, CIGB Q.63 R. 22
- [8] Boillat J.-L.; Schleiss A., 2002: Détermination de la crue extrême pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF, Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 94. Jahrgang, Heft 3/4, pp. 107-116
- [9] Brena A., 2007: On the sensitivity analysis of the PMF to the space-time distribution of a PMP. Analysis of the hydrological response of a catchment. Analyse de la sensibilité de la PMF à la distribution spatiale et temporelle d'une PMP. Master of Advanced Studies Thesis, EPFL
- [10] Bulletin ICOLD 108; 1998: Cost of flood control in dams, review and recommendations / Coût de la maîtrise des crues dans les barrages, synthèse et recommandations
- [11] Bulletin ICOLD 109, 1997: Dams less than thirty meters high / Barrages de moins de 30 m de hauteur
- [12] Bulletin ICOLD 57, 1987: Spillways for dams / Évacuateur des crues de barrages
- [13] Bulletin ICOLD 82, 1992: Selection of design flood, current methods / Choix de la crue de projet, méthodes actuelles
- [14] Bulletin ICOLD 99, 1995: Dam failures, statistical analysis / Rupture de barrages, analyse statistique
- [15] Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Landeshydrologie und -geologie LHG, 1991: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987: Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 4; Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, 14, Bern
- [16] Chow V. T., 1988: Applied Hydrology, Civil Engineering Series, McGraw-Hill International Edition
- [17] CRSFA, 1993: Intempéries du Haut-Valais: les précipitations des 22-25 septembre 1993 sur le massif du Simplon. CRSFA, CH-1950 Sion
- [18] Dubois, J., Boillat, J.-L., 2000: Routing System, Modélisation de routage de crues dans systèmes hydrauliques à surface libre, Communication 9, Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [19] Dubois, J., Piroton, M., 2002: Génération et transfert des crues extrêmes, Communication 10, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [20] Dubreuil P., 1974: Initiation à l'analyse hydrologique, Editions Masson et Cie (Paris)
- [21] Favre, A-C., 2000: Single and multi-site modeling of rainfall based on the Neyman-Scott process. Thèse EPFL, n° 2320



- [22] Hernandez, J. G. et al., 2007: Routing System II, Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques, Communication 32, Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [23] Hertig, J.-A., Fallot J.-M., Brena A., 2007: Méthode d'utilisation des cartes de PMP pour l'obtention de la PMF
- [24] Hertig, J.-A., Audouard A., 2005: Cartes des précipitations extrêmes pour la Suisse (PMP 2005). Rapport final EPFL-EFLUM, Lausanne; revidierte Karten 2008
- [25] Landeshydrologie und -geologie (LGH), 1986 / 1988: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern; Hydrologische Mitteilungen Nr. 7 und Nr. 8
- [26] Landeshydrologie und -geologie (LGH); Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz (Periodika)
- [27] Meylan P., Musy A., 1999: Hydrologie fréquentielle, Edition HGA Bucarest
- [28] Musy A. & Higy C.; 2004: Hydrologie, une science de la nature, Presses polytechniques et universitaires romandes
- [29] Musy A. e-drologie Cours d'hydrologie générale, Site Web de l'Ecole polytechnique de Lausanne: <http://echo.epfl.ch/e-drologie>
- [30] Réméniéras G., 1986: L'hydrologie de l'ingénieur, Editions Eyrolles
- [31] Sinniger, R. et al., 1997: Recherche dans le domaine des barrages, crues extrêmes, Communication 5, Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [32] Spreafico M. Weingartner R. et al. 2003: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Berichte des BWG, Serie Wasser - Rapports de l'OFEG, Série Eaux - Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque, Nr.4
- [33] Starkniederschläge des Alpen- und Alpenrandgebietes (EAFV 1977 und WSL 1992)
- [34] Vischer D., 1980: Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss, Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 40 1980
- [35] WMO, 1986: Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation. WMO- No. 332, WMO, Geneva
- [36] Zeller, J., Geiger, H., Roethlisberger, G., 1980: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrand-Gebiet, Institut fédéral de recherche forestière (FNP: Birmensdorf)
- [37] Zellweger, F., Musy, A., 2000: CRUEX, rapport de synthèse. Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne



$Q(t)$	hydrogramme de crue, débit entrant naturel
$Q_S(t)$	hydrogramme de la crue de sécurité
$Q_B(t)$	hydrogramme de la crue de projet
Q_{max}	débit maximal
t	temps
t_{max}	temps associé au débit maximal
V	volume des apports
Q_N	volume des précipitations
Q_{Bmax}	débit de pointe de la crue de projet
Q_{Smax}	débit de pointe de la crue de sécurité
Q_{Pmax}	débit maximal de pompage
Q_F	débit de la prise d'eau
Q_{To}	débit turbiné en amont
Q_{Tu}	débit turbiné en aval
Q_{direct}	débit naturel
Q_R	débit provenant d'une cheminée d'équilibre