

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 99 (2007)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Auscultation et système d'alarme de la plus haute digue du monde  
**Autor:** Droz, Patrice  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940130>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Auscultation et système d'alarme de la plus haute digue du monde

■ Patrice Droz

## 1. Introduction

C'est en février 1911 qu'eut lieu le séisme de magnitude 7,4 MSK qui provoqua, en plein massif du Pamir, l'effondrement d'un pan de montagne. Le village d'Usoy fut immédiatement enseveli et la rivière Murgab, bloquée par l'énorme masse de plus de 2 km<sup>3</sup>, forma rapidement le lac Sarez, dont le plan d'eau situé à environ 3270 m s'étend aujourd'hui sur 60 km de long, pour un volume de 17 milliards de m<sup>3</sup>.

De nombreuses campagnes d'observation et d'investigation ont rapidement été entreprises afin de s'assurer de la stabilité de la digue naturelle de plus de 550 m de haut. Cependant, si ces études de haut niveau portaient sur les différentes disciplines touchées par l'analyse, une synthèse, permettant d'estimer le plus objectivement possible les risques liés à la présence de ce qu'aucun n'hésitait pas à appeler «le dragon d'Asie Centrale», faisait défaut.

En 1999, une mission conduite par les Nations Unies permit de définir les besoins et les objectifs d'un système d'auscultation et d'alarme sur la digue d'Usoy et ses abords. Le présent article décrit brièvement les études et l'installation de ce système, dont le financement a été assuré par le Secrétariat suisse à l'économie (SECO), sous l'égide de la Banque Mondiale.

## 2. La digue d'Usoy et le lac Sarez

### Géologie

Le massif du Pamir est une des régions de la ceinture transorogénique des Himalayas caractérisée non seulement par une géologie complexe, mais aussi par une activité sismique et néotectonique intense et de nombreuses instabilités de terrain. Le système de failles illustre les fortes compressions nord-sud résultant de la collision des plaques eurasiatique et indienne. La région du lac Sarez appartient à un complexe anticlinal du carbonifère.

La digue d'Usoy est d'une grande

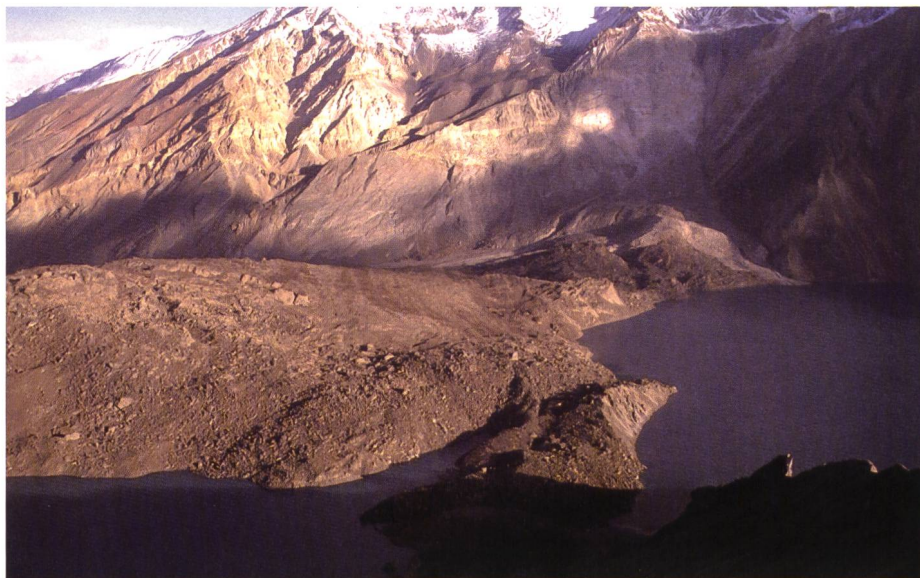


Figure 1. Digue d'Usoy et lac Sarez depuis la rive gauche.

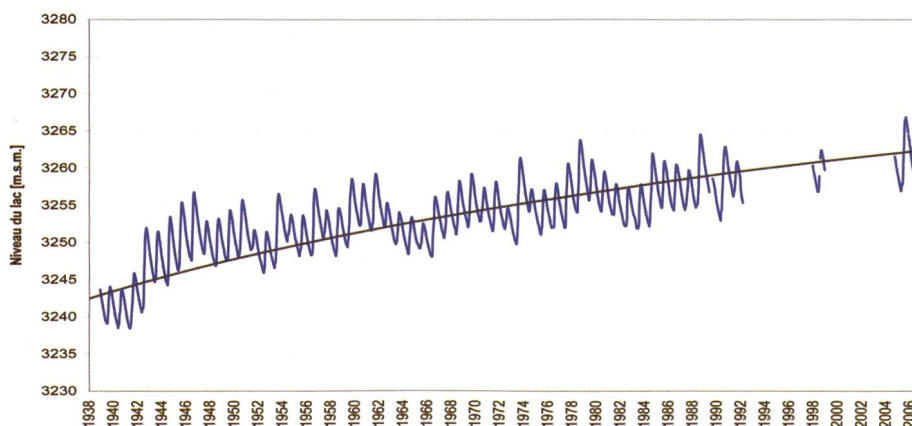


Figure 2. Evolution du niveau du lac Sarez de 1938 à 2007.

hétérogénéité, résultant de son mode de formation. Deux matériaux prédominent:

- les schistes et grès du carbonifère au centre et en rive gauche, à l'opposé de la zone de l'effondrement, avec une granulométrie s'étendant de la dizaine de mètres à la dizaine de centimètres.
- les matériaux d'origine triasique dont la granulométrie s'étend du centimètre au mètre, souvent pris dans une matrice sablo-limoneuse.

La structure interne de la digue n'est pas connue et les résultats des quelques investigations géophysiques effectuées sont douteux, en raison de l'hétérogénéité

de la structure en surface. Aucun forage n'a été réalisé. Certaines zones présentent des instabilités sur la digue elle-même.

En rive droite, l'érosion causée par les débits d'infiltration à travers la digue a formé un canyon dans une terrasse alluviale en pied de digue.

### Hydrologie et hydrogéologie

Les conditions climatiques et l'activité hydrologique de la région sont caractéristiques des zones désertiques d'altitude, avec une pluviométrie moyenne de 130 mm/an et une température moyenne de 1 °C. L'évolution du niveau du lac prouve





Figure 3. Masse instable en rive droite.



Figure 4. Vue générale du canyon. La digue d'Usoy est à droite de la photo.

un remarquable équilibre entre les apports et les pertes, si bien que depuis les années 1940 le niveau du lac ne croît que de moins de 20 cm par an en moyenne, avec des fluctuations annuelles ou pluriannuelles de l'ordre de 12 m. La revanche minimale est actuellement de 40 m.

Les premières pertes par infiltrations ont été relatées en 1914. Elles varient actuellement entre 30 et 80 m<sup>3</sup>/s, pour un module de 45 m<sup>3</sup>/s. Un horizon de sources situé en rive droite, à une centaine de mètres sous le niveau du lac, alimente la rivière Murghab. Les diverses mesures de traçage effectuées jusqu'à présent montrent que l'origine de l'eau provient essentiellement de la partie supérieure du lac, les zones correspondantes de la digue étant moins compactées. En surface, on observe très nettement le courant d'eau pénétrant dans la digue. Il est d'ailleurs fort probable, et cela est déjà sensible, que plus le niveau du lac montera, plus les débits d'infiltrations augmenteront, de sorte à atteindre un équilibre.

#### Rive droite

Située environ 4 km en amont de la digue, en rive droite, une masse instable menace de s'effondrer dans le lac. Cette masse est constituée de façon évidente par plusieurs zones, notamment à sa base par des grès très fracturés du carbonifère d'une masse rocheuse glissée, puis disloquée à mi-pente, par des dépôts détritiques de grès et de schistes. Des mouvements de l'ordre de 10 à 15 cm par an sont enregistrés.

Plusieurs hypothèses relatives à l'extension de cette masse instable ont dû être étudiées, la chute soudaine de celle-ci dans le lac pouvant générer des vagues énormes susceptibles de passer par-dessus la digue et de provoquer ainsi une crue aussi soudaine que dévastatrice. Le scénario le plus probable consiste en une

succession d'effondrements de la partie basse, suivi du glissement progressif des couches supérieures.

### 3. Processus de danger

La définition d'un système d'auscultation et d'alarme impose d'identifier au mieux les processus de danger liés à la digue.

#### Stabilité de la digue

De par ses dimensions générales (hauteur moyenne: 550 m, épaisseur à la base: env. 4 km), la digue naturelle d'Usoy présente une grande stabilité générale (facteur de sécurité de 4,5). Les calculs pseudo-statiques entrepris en introduisant des forces horizontales correspondant à une accélération de pointe de 0,4 g (supérieure à celle du séisme maximal possible, compte tenu des analyses probabiliste et déterministe) donnent un facteur de sécurité de 1. Pour une accélération de pointe de 0,5 g, des instabilités locales sont identifiées sur les parements et les déplacements maximum sont de l'ordre de 10 à 50 cm, valeurs négligeables en regard de la masse de la digue.

#### Erosion interne

L'analyse des débits d'infiltration et de la variation des niveaux du lac montre une forte corrélation entre ces deux paramètres, à l'exception de certaines périodes au cours desquelles le niveau du lac a enregistré une cote jamais atteinte auparavant. On peut en conclure qu'une cote record du niveau du lac perturbe le régime de percolation à travers la digue, qui se stabilise par la suite. Cette observation est corroborée par l'analyse de la montée et de la descente annuelle du lac en regard des débits d'infiltration: des hystérèses importantes apparaissent lors d'années exceptionnelles. On peut expliquer ces phénomènes par le fait que, lorsque le lac monte au-delà de sa limite précédente, les chemins d'écou-

lement sont modifiés et ont tendance à migrer vers la partie supérieure de la digue, le toit des chemins d'écoulement s'érodant et colmatant les parties basses.

De plus, les conditions géométriques de l'écoulement à travers la digue montrent que le gradient est de l'ordre de 10%. Cette valeur et la granulométrie en jeu permettent d'exclure un risque d'érosion interne ou de fracturation hydraulique dans le corps de la digue.

#### Erosion externe

La migration des chemins d'écoulement entraîne, comme cela a été le cas en septembre 2006, une modification des écoulements à l'intérieur de la digue et l'apparition de nouvelles sources. Celles-ci déstabilisent localement le parement aval de la digue et engendrent de petits glissements de terrain superficiels, négligeables quant à la stabilité de la digue elle-même, mais qui peuvent obstruer momentanément la rivière et après rupture, déclencher une onde de crue relativement importante. Le même phénomène peut se produire suite à un séisme, même de relativement faible intensité.

#### Surverse

La surverse du lac par-dessus la digue ne peut être raisonnablement considérée que consécutivement à un glissement de terrain ou un effondrement dans la retenue. Si plusieurs scénarios catastrophiques avaient pu être considérés dans le passé, l'enchaînement d'événements tels que décrit plus haut est certainement le plus plausible. Plusieurs approches ont cependant été utilisées pour estimer les conséquences d'un glissement soudain et global de la masse instable de la rive droite:

- comparaison avec d'autres événements similaires et des résultats d'essais sur modèle réduit



- analyse numérique sur la base d'un modèle utilisant les équations de St-Venant.

La première approche utilise les données des événements catastrophiques de Flores Island, Indonésie (1992; [1] Imamura, 1996), Tafjord (1934; [2] Harbitz 1991). Par analogie, en considérant toujours les hypothèses les plus défavorables, puis en tenant compte des effets de réflexion sur la rive opposée au glissement, on obtient des hauteurs de vague incidente de 19 et 48 m pour des volumes de glissement de 100 millions et 500 millions de m<sup>3</sup> respectivement. Cette approche semble toutefois trop pessimiste.

La deuxième approche part de l'hypothèse d'une vague en pied de glissement de 50 m de haut et considère la topographie environnante et sub-lacustre. Les résultats obtenus montrent qu'après de multiples réflexions, les vagues n'atteignent pas les points bas du couronnement de la digue. Les résultats obtenus correspondent par ailleurs aux valeurs issues des recommandations de la CIGB en la matière [3].

### Arbre des causes

Les méthodes développées en analyse de risque permettent de mettre davantage en évidence les divers processus pouvant aboutir à un événement redouté. Dans le cas présent, si la rupture soudaine et totale de la digue est un événement qui peut être exclu, on considère plutôt l'occurrence d'une crue soudaine et catastrophique ( $Q > 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en aval de la digue d'Usoy. Les phénomènes pouvant déboucher sur une telle crue sont illustrés dans la figure suivante.

L'arbre des causes permet de construire le système d'auscultation. Ainsi, chaque phénomène déclencheur, ou sa conséquence, peut être détecté, suivi et analysé. Le système d'alarme est défini sur la base d'une sélection de paramètres pertinents du système d'auscultation.

### 4. Système d'auscultation

La figure 7 montre la localisation des différents éléments constituant le système d'auscultation.

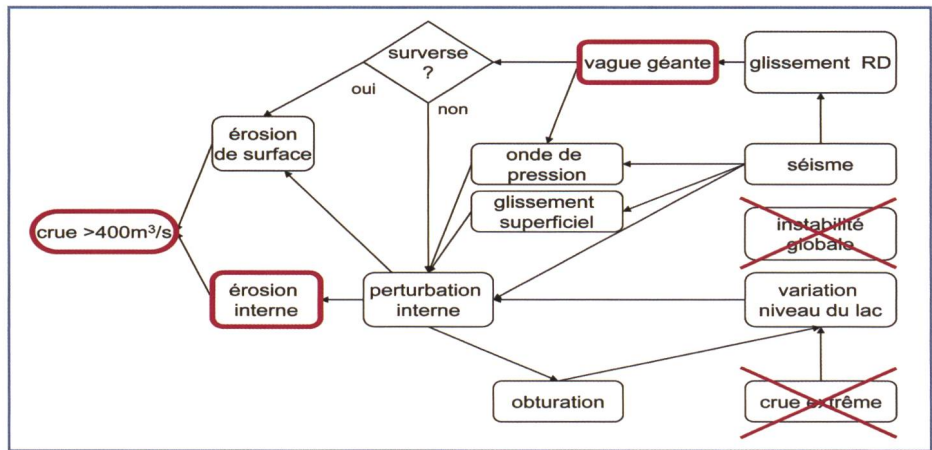


Figure 5: Arbre des causes relatif à la digue d'Usoy.

Phénomène	Paramètre suivi	Equipement sélectionné
Instabilité de la rive droite	déplacement	GPS
Séisme	activité sismique	Accélérographe
Variation du niveau du lac	niveau du lac	Cellule de pression
Vague exceptionnelle	hauteur de vague	Cellule de pression
Perturbation du régime d'infiltration	mouvements sur la digue	GPS
Crue	niveau d'eau dans la rivière	Détecteur

Figure 6: Conception du système d'auscultation de la digue d'Usoy.

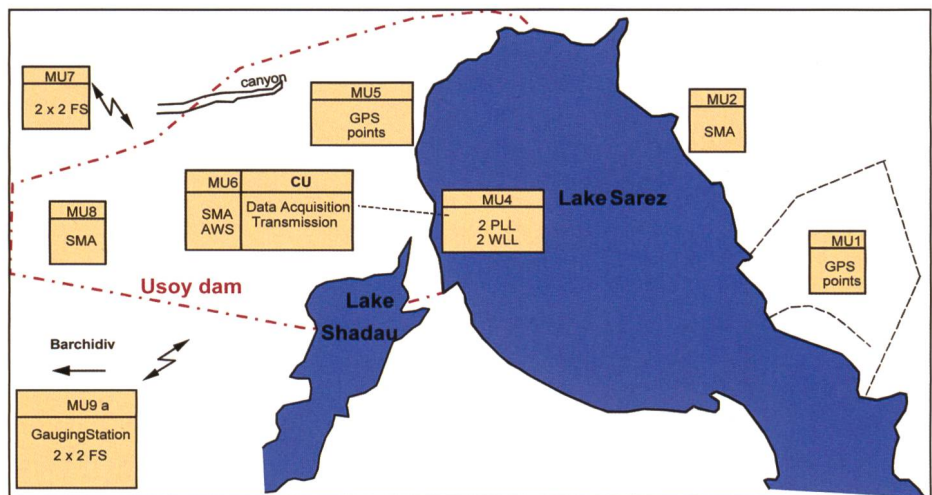


Figure 7. Vue générale du système d'auscultation de la digue d'Usoy.

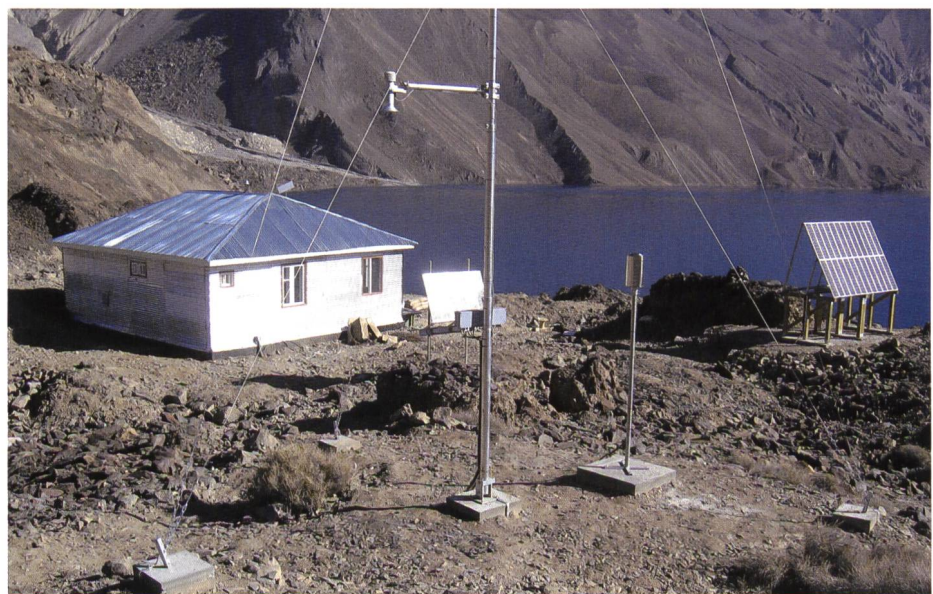


Figure 8. Bâtiment d'exploitation de l'unité centrale et station météo.

#### Légende (figure 7)

SMA:	accélérographe
PLL/WLL:	cellules de pression
AWS:	station météo
Gauging station:	station de jaugeage
FS:	détecteur de crue
CU:	unité centrale





Figure 9. Unité centrale et générateur.



Figure 10. Contrôleur de sirène (gauche), sirène et panneau solaire (droite) dans un des villages.

Sur la digue, les 20 points GPS sont fixés sur des rochers importants. Sur la masse instable de la rive droite, des colonnes de béton de 2 m de profondeur ont été construites pour recevoir l'embase de l'antenne GPS. Il est prévu d'effectuer 2 à 3 mesures GPS par an, afin de suivre les éventuels déplacements.

Deux accélérographes sont situés à distance de l'unité centrale abritée par un nouveau bâtiment d'exploitation. L'alimentation électrique doit donc être indépendante, de même que la transmission des données à l'unité centrale.

Deux groupes de cellules de pression ont été posés dans le lac par des plongeurs: un groupe pour enregistrer les variations du niveau du lac et un pour détecter et enregistrer des vagues de hauteur exceptionnelle.

Une station météorologique très complète permet de suivre les paramètres climatiques pouvant influencer sur le comportement de la digue et contribue à enrichir les données disponibles jusque dans les années 1990.

Les détecteurs de crue sont situés

au premier endroit possible en aval de la digue, soit environ 3 km en aval de celle-ci, et au premier village, Barchidiv, soit 18 km en aval. Une station de jaugeage avec mesure en continu du débit de la rivière transmet ces données à l'unité centrale.

Mis à part les données des cellules de pression et des GPS, l'ensemble des informations est transmis par satellite Inmarsat Mini C à l'unité centrale. L'ensemble des données d'auscultation est ensuite transmis quotidiennement également par satellite à Dushanbe, dans les locaux du Département Usoy dépendant du Ministère des Situations d'Urgence et de la Protection Civile.

## 5. Système d'alarme

Le système d'alarme vient se greffer sur le système d'auscultation. Deux niveaux d'alarme ont été définis, le premier devant déclencher des opérations de réparation du système ou une mission d'observation; le second envoie directement une alarme par satellite dans les 18 villages de la vallée de la Bartangen aval de sa confluence avec la Murghab.

L'ensemble des données (auscultation, alarme, état du système) peut être visionné sur des écrans de contrôle du système d'exploitation au bâtiment d'exploitation et à Dushanbe.

## 6. Conclusions

L'analyse globale et multidisciplinaire des processus de danger pouvant affecter la stabilité et le comportement de la digue d'Usoy a permis de se faire une idée plus objective du risque lié au lac Sarez. Afin de diminuer ce risque, un système d'alarme a été mis en place. Il est couplé à un système d'auscultation qui permet de suivre le comportement de la digue et de la rive droite instable et d'identifier des modifications éventuelles.

La mise en valeur de la ressource en eau du lac Sarez par le biais d'un projet hydroélectrique permettant également d'abaisser le niveau du lac conduirait à un niveau global du risque inférieur à celui d'un barrage construit par l'homme.

## Remerciements

Mes remerciements vont à:

K. Maskaev et ses collègues, Usoy Dept. Dushanbe, pour leur soutien au cours du projet  
A. Palmieri et R. Cestti, Banque Mondiale, et D. Vogel et Ch. Kellerhals, SECO, pour leur suivi attentif

G. Schaeren, Norbert SA, pour les aspects géologiques

L. Spacic-Gril et L. Attewill, Gibb Ltd., pour les analyses sismiques

J.-M. Rouiller, SI Lausanne, pour le suivi de l'installation

A. Neumann et P. de Goumoens et de nombreux autres collaborateurs de STUCKY SA.

H. Uhlmann, FELA AG, pour l'installation remarquable des systèmes d'auscultation et d'alarme.

## Références

- [1] Numerical model for tsunami generation due to subaqueous landslide along a coast, Ima-mura F., Science of Tsunami Hazards – N° 14.1, 1996, pp 13–28
- [2] Numerical simulation of slide generated waves, Harbitz C., Science of Tsunami Hazards – N° 9.1, 1991, pp 15–22
- [3] Glissements de versants de retenues: reconnaissances, études et gestion, Bulletin 124, CIGB-ICOLD, 2002.

Adresse de l'auteur

Patrice Droz, Stucky SA

rue du Lac 33, CH-1020 Renens

Tel. +41 21 637 15 40, pdroz@stucky.ch