

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDES BARRAGES

VINGT SIXIÈME CONGRÈS
DES GRANDS BARRAGES
Vienne, Juillet 2018

**UNE BASE DE DONNÉES DES INCIDENTS* DE BARRAGES
RÉPERTORIÉS PAR LA CIGB**

**A DATA BASE FOR DAM INCIDENTS LISTED BY ICOLD
(BILINGUAL REPORT)**

Michel DE VIVO
Secrétaire Général de la CIGB

Patrick LE DELLIOU
Président du Comité du registre mondial des barrages et de la documentation

François LEMPERIERE
Président de HYDROCOP

Michel POUPART
Comité de la sécurité des barrages

FRANCE

SUMMARY

ICOLD publications on dam incidents were entered into a database. These data have been updated by the addition of about one hundred new cases of failures, of which nearly 50 have occurred since 1990. Its objective is to be as exhaustive as possible for failures and to provide references enabling to access more detailed information. The various fields and information contained in this database are described. Preliminary statistical analyzes presented by way of example show trends according to the type of dam or the causes of failure in a fault mode.

* Le terme « incident » est défini au 2.3 – the word « incident » is defined in 2.3

RÉSUMÉ

Les publications de la CIGB relatives aux incidents de barrages ont été introduites dans une base de données. Ces données ont été mises à jour par l'ajout d'une centaine de nouveaux cas de ruptures, dont près de 50 ont eu lieu depuis 1990. Son ambition est d'être aussi exhaustive que possible pour les ruptures et de fournir les références permettant d'accéder à des informations plus détaillées. Les différents champs et les informations contenues dans cette base sont décrits. De premières analyses statistiques présentées à titre d'exemple mettent en lumière des tendances suivant le type d'ouvrage ou sur les causes de rupture relatives à un mode défaillance.

1. INTRODUCTION

Le rapport décrit les publications CIGB consacrées aux incidents de barrages et détaille pour chacun le contenu des informations répertoriées. Une base de données reprenant l'ensemble de ces informations a été créée et en permet une exploitation plus efficace. Des résultats statistiques issus de cette base, en croisant les types de barrages, les modes de rupture, l'âge des barrages à la rupture, etc. illustrent les utilisations potentielles de cette base.

2. LES PUBLICATIONS DE LA CIGB

2.1. CONTEXTE

Dans toutes les industries à risque, l'analyse des incidents est un outil important pour améliorer la sécurité. La compréhension des causes de l'incident permet de modifier ce qui a été identifié comme une faiblesse, soit dans la conception, la construction, soit dans l'exploitation d'une installation industrielle. Les barrages obéissent aux mêmes règles, et c'est la raison pour laquelle la CIGB a toujours été impliquée dans la collecte et l'analyse des incidents des barrages. La CIGB a lancé à trois reprises des enquêtes mondiales pour recueillir des informations sur les incidents de barrage. Le livre «Leçons tirées des accidents des barrages» a été publié en 1974, «Détérioration des barrages et réservoirs» en 1983 et le bulletin 99 «Analyse statistique des échecs des barres» a été publié en 1995. Ces trois publications peuvent être résumées comme suit :

Leçons tirées des accidents de barrage (1974) : 266 cas d'incidents de «grands barrages» (antérieurs à 1966) sont énumérés parmi lesquels environ 70 sont des ruptures ; chaque cas est décrit, en anglais et en français, avec quelques caractéristiques du barrage, les conditions de la rupture, les conséquences et les

mesures correctives le cas échéant. Au début du bulletin figurent de nombreuses analyses statistiques en croisant les âges, les types, etc., des barrages concernés. En outre, plusieurs articles donnent des informations plus détaillées sur 11 ruptures "célebres" (Malpasset, St Francis, etc.) et d'autres articles fournissent des recommandations sur la conception des barrages et leurs fondations. Ce document est référencé ci-après sous le nom de «LFDI».

Détérioration de barrages et réservoirs – Recueil de cas et analyse (1983) : cette publication est une actualisation de «Leçons tirées des accidents de barrage» et son contenu est similaire ; il décrit 1105 cas de détérioration, dont 107 sont des ruptures. Un travail très important d'analyse statistique a été réalisé, en traitant séparément les barrages en béton, en maçonnerie et les barrages en remblai, les ouvrages annexes et les réservoirs. L'ensemble des données recueillies lors de l'enquête est disponible, ainsi que les questionnaires et la liste des codes utilisés pour le type de barrage, le type de détérioration, les causes de rupture, etc. Les origines des données sont : « Leçons tirées des accidents de barrage » (ICOLD et USCOLD) et les réponses des comités nationaux aux questionnaires. Ce document est référencé ci-après sous le nom "DDAR".

Bulletin 99 - Rupture de barrages - analyse statistique (1995) : Ce bulletin est une mise à jour de l'analyse statistique de «Leçons tirées des accidents de barrage», mais seulement pour les cas de ruptures. Les 179 ruptures répertoriées sont présentées dans un tableau qui ne donne que des informations synthétiques sur chaque barrage. Il n'y a pas de description détaillée des différentes ruptures. Ce document est référencé ci-après sous le nom "B99".

D'autres publications de la CIGB ont traité de ce thème des incidents de barrages sans que cela ne soit l'objectif principal de ces bulletins. Les plus marquantes sont :

- Bulletin 82 (Choix de la crue de projet – 1992) ;
- Bulletin 109 (Barrages de moins de 30 m de hauteur – Economie et sécurité - 1997) ;
- Bulletin 120 (Aspects de conception parasismique des barrages - 2001).

dans lesquelles on décrit des incidents de barrages, en lien avec le thème principal du bulletin. Plusieurs questions de congrès (Q49, Q71, Q75) ont été consacrées à ce sujet avec des rapports traitant d'incidents de barrages et d'ouvrages annexes.

Des comités nationaux ou des organismes gouvernementaux ont également publié des rapports axés sur les incidents de barrages dans leur pays, parmi les plus importants :

- USCOLD Lessons from dam incidents USA I (1975) et USA II (1988);
- Dams and Public Safety - Jansen, Robert B.. A Water Resources Technical Publication., U.S. Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Denver, CO, 1980
- DEFRA - Environment Agency - Evidence report, Lessons from historical dam incidents: Delivering Benefits through evidence - August 2011.

C. 1

Enfin, il y a des bases de données dans plusieurs pays, par exemple la "National Performance of Dams Program Data Base (Stanford University)" (<https://npdp.stanford.edu/>) aux États-Unis ou la base de données (<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/about-us/the-aria-database>) en France (pour tous les incidents industriels, y compris les barrages).

2.2. DÉVELOPPEMENT D'UNE BASE CIGB DES INCIDENTS DE BARRAGES

Une des missions du Comité de la sécurité des barrages de la CIGB est la mise à jour régulière de la liste des incidents de barrages avec de nouveaux cas, ce qui n'est pratiquement réalisable qu'au travers d'enquêtes. Or ces enquêtes deviennent aujourd'hui peu efficaces pour collecter des données qui peuvent être obtenues plus facilement grâce aux nouvelles technologies de l'information. Avant de créer un tel outil de collecte, il a paru pertinent de développer au préalable une base de données des cas existants répertoriés dans les publications de la CIGB. Cette tâche a été entreprise ces dernières années et est maintenant terminée. Cela représente 1188 cas, chaque enregistrement contenant les mêmes informations que les documents originaux. L'objectif principal de cette base est de donner à la communauté des barrages un outil fournissant une liste aussi exhaustive que possible des incidents de barrage. On ne cherche pas à disposer d'informations détaillées mais plutôt à fournir pour chaque incident des éléments de base et des références pertinentes, dont beaucoup sont maintenant disponibles sur Internet.

Cela permet d'effectuer des analyses statistiques (similaires à celles des publications CIGB citées au 2.1) avec une source fiable (autant que possible) des incidents de barrages permettant le tri par type de barrages, pays, période, etc., afin d'étudier plus en détail les cas relatifs à un thème spécifique. De toute évidence, ces études détaillées ne peuvent pas être entreprises avec les seules données disponibles dans la base mais doivent s'appuyer sur des recherches spécifiques, sur des rapports, des articles, etc.

2.3. PÉRIMÈTRE DE LA BASE DE DONNÉES

Une base de données contient principalement des nombres et des codes, permettant de faire des requêtes et des analyses ; une courte description, des images et des schémas peuvent être ajoutés, avec ou sans capacité de tri (recherche d'un mot dans un texte, etc.).

Pour les incidents du barrage inclus dans la base, les règles sont les mêmes que celles utilisées dans le registre mondial des barrages de la CIGB, c'est-à-dire que ce sont des barrages où $H > 15$ m OU ($H > 5$ m ET $V > 3.10^6$ m³). Des barrages plus petits peuvent être inclus dans la base, à condition qu'ils soient

porteurs d'enseignements. Cela implique évidemment que ces incidents de petits barrages soient bien documentés.

Les barrages de stériles miniers ne sont pas inclus dans la base de données, la priorité étant de développer cette base pour les barrages classiques. On pourrait envisager d'ajouter ces barrages plus tard, en coopération avec le Comité CIGB concerné ; cela entraînerait probablement l'ajout de champs spécifiques pour décrire correctement ces barrages.

Chaque enregistrement est relatif à un accident (et non à un barrage). Cela signifie que plusieurs enregistrements peuvent concerner le même barrage si plusieurs incidents s'y sont produits. Comme dans LFDI, il y a deux types d'incidents : rupture (F) ou accident (A). Une rupture est un incident catastrophique caractérisé par la libération incontrôlée de l'eau de la retenue ou par une atteinte majeure à l'intégrité du barrage. Un accident est un type d'incident moins catastrophique défini par un dysfonctionnement ou un comportement en dehors des hypothèses de conception ou altérant la fonction essentielle de rétention de l'eau. Les incidents liés aux ouvrages « de sécurité » (évacuateurs de crue, vannes, vidanges de fond) peuvent également être introduits dans la base de données. Des exemples de ces incidents sont les ruptures de vannes ou des dysfonctionnements importants sur ces structures.

3. DEFINITION DES DONNÉES

Les différents champs concernent les caractéristiques du barrage, les caractéristiques et les conséquences de l'incident, les causes de l'incident, les mesures correctives, des photos et schémas, et les références.

Les caractéristiques des barrages sont similaires à celles du registre mondial des barrages et comprennent le pays, l'année d'achèvement, la rivière, la ville la plus proche, le but de l'aménagement, le type de barrage, la hauteur, la longueur de la crête, le type de fondation, le volume du corps du barrage, la capacité du réservoir. Pour les barrages « rigides » on a distingué les barrages en maçonnerie et ceux en béton ; par exemple PG (M) pour un barrage poids en maçonnerie.

Certains barrages se composent de plusieurs tronçons longitudinaux de types différents. Dans ces cas, plusieurs codes (deux en général) sont indiqués et il est donc nécessaire de lire la description du cas pour savoir dans quelle partie du barrage a eu lieu l'incident.

Environ 2/3 des barrages listés dans la base de données sont également répertoriés dans le registre mondial des barrages de la CIGB ; dans la mesure du possible, les données de cette section « caractéristiques générales » sont alors celles du registre. Lorsque des écarts importants entre les différentes sources de

C. 1

données sont identifiés, on le signale dans un champ spécifique "Informations sur les données". Ces écarts s'expliquent parfois lorsque des travaux de réparation conséquents ont été réalisés après l'incident.

3.1. CARACTÉRISTIQUE DES INCIDENTS

Les informations de cette section sont : l'année de l'incident ; la période de l'incident (pendant la construction, le premier remplissage, etc.) ; le type d'incident (F ou A) ; le mode d'incident ; sa cause et une description.

Des causes d'incidents sont indiquées dans DDAR et B99 mais sont en fait un mélange de causes et de modes et mécanismes de défaillance. Afin de trier les différents cas intéressants selon les modes de défaillance et les causes de l'incident, de nouveaux champs ont été ajoutés dans la base et renseignés manuellement.

Les principaux modes de défaillance considérés sont : submersion de la crête - érosion externe ; érosion interne ; défaillance structurelle du corps du barrage ; défaillance de la fondation, etc.

Les causes des incidents ont été divisées en deux catégories : les causes principales, principalement liées aux problèmes organisationnels ou aux aspects humains (mauvaise conception ; mauvaise construction ; fonctionnement inapproprié ; mauvaise maintenance et surveillance, etc.) et les causes secondaires liées à des causes externes (risques naturels) et à des causes internes (problèmes techniques, barrières de défense inefficaces). Ces causes secondaires sont : problèmes géotechniques ; crues majeures ou insuffisance de l'évacuateur ; séisme majeur ; vieillissement des matériaux ; dysfonctionnement ou défaillance des équipements hydromécaniques ; problèmes structurels, etc.

3.2. CONSÉQUENCES DE L'INCIDENT, MESURES CORRECTIVES ET DIVERS

Cette section donne le nombre de victimes et les mesures correctives : 60 différents types de mesures sont identifiés et permettent d'avoir des informations sur ce qui a été fait après l'incident (de l'abandon du barrage à des réparations mineures selon la nature de l'incident).

On indique également des références fiables (livres, articles, etc.), donnant des informations plus détaillées. Pour les incidents récents, il existe de nombreuses références Internet mais qui ne sont souvent pas fiables sur le plan technique. Il vaut donc mieux limiter les liens hypertextes vers des sites Web "officiels".

Des photos et des schémas peuvent être entrés dans la base. Toutes les photos et schémas de LFDI ont été scannés et disponibles dans cette section.

4. CONTENU DE LA BASE DE DONNÉES

La base contient donc tous les cas d'accidents et de ruptures publiés dans les trois publications mentionnées ci-dessus (LFDI, DDAR et B99). Cela représente 1188 enregistrements dans lesquels toutes les informations numériques, descriptions et graphiques des documents initiaux ont été conservés. De nombreux cas sont présents dans les différentes publications, avec parfois des valeurs différentes. C'est en général la valeur du document le plus récent qui a alors été retenue.

En parallèle à ce travail de reprise de données « officielles » de la CIGB des cas de ruptures récentes ont été ajoutés. En effet le dernier cas répertorié dans les publications CIGB date de 1991 et il est important de compléter maintenant ces données par des cas d'incidents survenus depuis cette date. Environ 120 cas ont ainsi été ajoutés dans la base, dont près de 40 sont d'ailleurs antérieurs à 1990 mais n'avaient pas été identifiés lors des enquêtes ayant servi à l'élaboration des documents CIGB. Ces 120 cas proviennent essentiellement des membres du Comité sécurité des barrages, qui ont vérifié et complété les listes de cas répertoriés pour leurs pays respectifs. On obtient ainsi 1374 enregistrements dont 305 ruptures, soit 87 nouveaux cas de ruptures. Le tableau ci-dessous récapitule la répartition de ces ruptures suivant leur source et en comptabilisant séparément les barrages rigides (béton ou maçonnerie) et les barrages meubles.

Tableau 1
Répartition des cas de ruptures

	TYPE DE BARRAGE		TOTAL (*)
	PG/VA/..	ER/TE/..	
Publications CIGB	40	173	218
Nouveaux cas avant 1991	6	23	38
Nouveaux cas après 1991	3	41	49
Total	49	237	305

(*) Ce total inclut quelques barrages dont le type est "indéfini"

Un premier enseignement de ce tableau concerne le nombre de ruptures depuis 1991 (49) qui représentent près de 20% du total. Comme les ruptures sont recensées depuis 1900 environ, cela signifie que le nombre moyen de ruptures par an est globalement constant, ce qui est à nuancer évidemment par deux considérations :

C. 1

- le parc de barrages n'a cessé de croître, et le taux « ruptures /nombre de barrages » est donc en baisse,
- les ruptures sont mieux déclarées.

Un autre constat concerne la répartition des ruptures entre barrages rigides et barrages en remblai. Cette répartition est égale à 20/80 avant 1990 et 10/90 après 1990. Le taux de ruptures des barrages rigides a donc significativement diminué sans doute en raison du moindre nombre de barrages de ce type construits ces dernières décennies, et au fait que leurs ruptures interviennent souvent dans les premières années d'exploitation.

5. ANALYSES STATISTIQUES

5.1. CONTENU DE LA BASE

Le bulletin 99 est la dernière publication CIGB qui fasse état de statistiques sur les ruptures de barrages. Ces statistiques concernaient les taux de ruptures en fonction des types de barrages et de leurs âges. On peut en retenir les données essentielles suivantes (avant 1990) :

Tableau 2
Statistiques des types de barrages à travers le monde et des ruptures associées à cette typologie (avant 1990)

Barrages en béton	barrages de plus de 20 m : 2 ruptures ; aucune en crue barrages de moins de 20 m : 8 ruptures, dont 2 en crues
Barrages en maçonnerie	20 ruptures dont 18 pour des barrages de 20 à 50 m de hauteur ; dont 5 par crue.
Barrages en remblai (hors Chine)	140 ruptures dont 20 par crues en construction et 60 par crues en service. De très nombreuses ruptures en crue pour les « petits » barrages en remblai.

En se limitant aux barrages de plus de 20 m on décompte depuis 1990 :

- 2 ruptures de barrages en béton : Shih Kang (1999) et Camara (2004) ;
- 1 rupture de barrage en maçonnerie (Orjales en 1994) ;
- Plus de 40 ruptures de barrages en remblai parmi lesquels Gouhou (1993 – 288 victimes), El Guapo (1999).

5.2. EXEMPLE D'ANALYSE DES MODES DE RUPTURE ET DES CAUSES

Les nouvelles informations disponibles dans la base sur les modes de rupture et leurs causes permettent d'établir des statistiques orientées vers des

problématiques spécifiques. A titre d'exemple on peut analyser le mode de rupture par submersion et les causes de ces ruptures. Cela représente 121 cas dans la base que l'on a classés par type de barrages et périodes de la rupture (Figure 1).

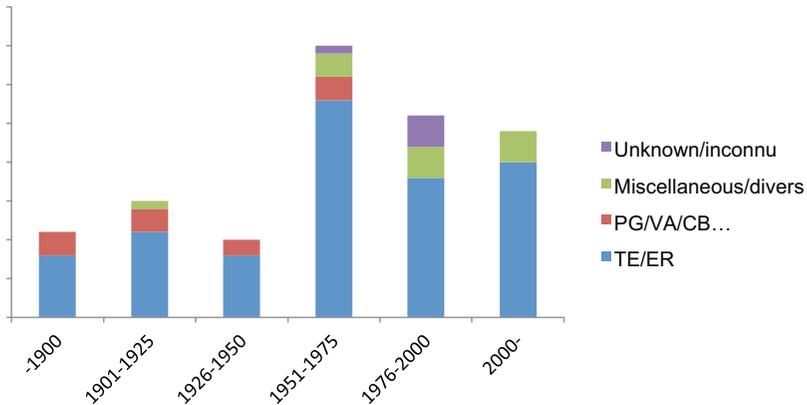


Fig. 1

Cas de rupture par submersion, par période de rupture et type de barrages
Failure by overtopping, sorted by failure time and by type of dams

On constate que le nombre de ruptures recensées est significativement plus important depuis les années 1950, mais cela est vraisemblablement dû à une meilleure déclaration des accidents.

Les types de barrages concernés sur ces mêmes périodes sont reportés en distinguant trois grandes catégories de barrages : les ouvrages en remblai ou enrochement (TE/ER), les ouvrages « Rigides » (voûtes ou poids), et les ouvrages mixtes, constitués d'un ouvrage en béton prolongé par un ou des ouvrages de fermeture en remblai. On constate la forte représentation des ouvrages en remblai : environ 80% du total de manière régulière quelle que soit la période de la rupture, et 100% aujourd'hui si on y ajoute les ouvrages mixtes. Quelques ouvrages rigides (essentiellement d'ailleurs des ouvrages anciens en maçonnerie) se sont rompus par déversement et représentent 20% des ruptures, mais il n'y en a plus après 1975.

Les causes de ces ruptures sont inégalement renseignées, mais permettent cependant d'évaluer la répartition entre deux causes majeures : une mauvaise conception (principalement la justification hydrologique et dans une moindre mesure les aspects hydrauliques et structurels) ou des défauts d'exploitation regroupant les actions inappropriées et les défaillances des organes. Cette distinction est volontairement simplificatrice mais cherche à bien discriminer ce qui relève de l'insuffisance « hydrologique » par rapport à ce qui relève d'un dysfonctionnement en exploitation. La Figure 2 permet de visualiser l'importance relative de ces deux causes pour les cas où elles sont connues.

C. 1

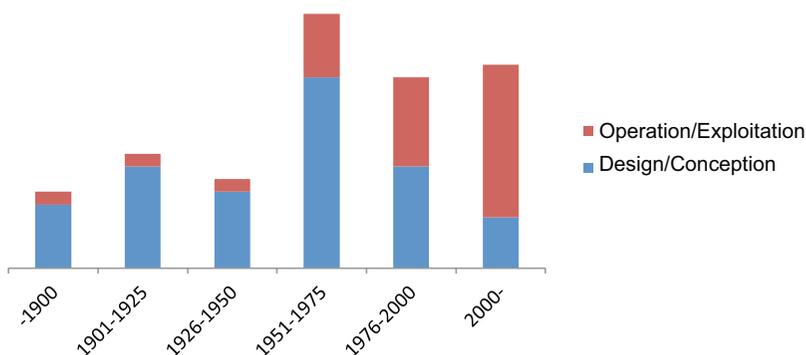


Fig. 2

Cas de ruptures par submersion, classés par dates et causes
Failures by overtopping, sorted by failure time and by cause

Il est très intéressant de noter que jusque dans les années 1975 l'essentiel des ruptures (près de 90% en moyenne) sont causées par une débitance insuffisante de l'évacuateur, ce qui semble assez normal au vu des hypothèses hydrologiques prises en compte à l'époque. Depuis 1975 cette cause de rupture diminue pour ne représenter que 25% des cas depuis les années 2000. La cause majeure de rupture par submersion ces dernières années concerne donc le fonctionnement de l'évacuateur

6. CONCLUSION

La collecte et l'analyse des incidents de barrages est une nécessité pour améliorer la connaissance de ces ouvrages et leur niveau de sûreté, en se basant sur l'expérience. La CIGB a édité plusieurs publications sur ce sujet qui ont été récemment numérisées et introduites dans une base de données. Une cinquantaine de nouveaux cas de ruptures survenus depuis 1990 y ont été ajoutés. La synthèse et l'analyse sont maintenant plus faciles et l'ajout d'information sur les modes et les causes de rupture permet des analyses statistiques ciblées. Cette base de données est en outre un outil approprié pour la mise à jour de nouveaux cas et devrait prochainement être mise à disposition des comités nationaux sur le site de la CIGB au même titre que le registre mondial des barrages.

ENGLISH Version

1. INTRODUCTION

This report describes ICOLD publications addressing dam incidents and details the available information. A database gathering all this information has been developed and allows a more efficient use of these data. Statistical results, crossing the types of dams, the failure modes, the age of the dams at failure time, etc. illustrate the potential uses of this base.

2. ICOLD PUBLICATIONS

2.1. CONTEXT

In all hazardous industries, incident analysis is an important tool to improve safety. Understanding the causes of incident makes it possible to change what was identified as a weakness, either in the design, the construction or the operation of industrial plants. Dams obey to the same rules and it is the reason why ICOLD has always been involved in Dam Incident collection and analysis. ICOLD has on three occasions launched worldwide surveys to collect the largest amount of information on dam incidents. The nineteen seventies saw the appearance of "Lessons from Dams Incidents", the eighties produced "Deterioration of Dams and reservoirs" (1983), and in 1995 was issued "Dam failures statistical analysis" (bulletin 99). These three publications can be described as follow:

Lessons from Dam Incidents (1974): 266 cases of "large dams" incidents (before 1-1-1966) are listed among which about 70 are failures; each case is documented, in English and in French, with a short description of the dam characteristics, the condition of the failure, the consequences, and remedial measures if so. At the beginning of the bulletin, a lot of statistical analyses are presented, according to the ages, the types, etc..., of the affected dams. Furthermore, several articles give more detailed information on 11 "famous" failures (Malpasset, St Francis, etc.) and other articles provide recommendations about the design of dams and their foundations. This document is referenced hereafter as "LFDI".

Deterioration of Dams and Reservoir - Examples and their Analysis (1983): This publication is an actualization of "Lessons from dam incidents" and its content is similar; it describes 1105 deterioration cases, among which 107 are failures. A very important work of statistical analysis is included, dealing separately with concrete and masonry dams, embankment dams, appurtenant works and reservoirs. All the data gathered after the inquiry is available; the questionnaires

C. 1

and the different codes used for dam type, deterioration type, failure causes, etc. are also available. The origins of data are: Lessons from dam incidents (ICOLD and USCOLD) and response of National Committees to the questionnaires. This document is referenced hereafter as "DDAR"

Bulletin 99: Statistical analysis of dam failure (1995): This bulletin is an update in 1995 of the statistical analysis of "Lessons from Dam Incidents", but only for failures cases. A table of 179 failures is presented, with synthetic information on each dam. There is no detailed description of the different failures in the bulletin. This document is referenced hereafter as "B99".

Several other ICOLD publications addressed this topic of dam incidents, but not as the main objective. The more interesting are:

- Bulletin 82 (Selection of design flood – 1992) ;
- Bulletin 109 (Dams less than 30 m high - Cost savings and safety improvements - 1997)
- Bulletin 120 (Design features of dams to resist seismic ground motion - 2001)

where several dam incidents are described, in relation with the main scope of the bulletin. Several congress Questions (Q49, Q71, Q75) were devoted to this topic and articles can then be found in these questions about specific dam or appurtenants works incidents.

Some National committees or governmental bodies have published reports focused on the dam incidents in their countries, the more important being:

- USCOLD Lessons from dam incidents USA I (1975) et USA II (1988);
- Dams and Public Safety - Jansen, Robert B.. A Water Resources Technical Publication., U.S. Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Denver, CO, 1980;
- DEFRA - Environment Agency - Evidence report, Lessons from historical dam incidents: Delivering Benefits through evidence - August 2011.

Finally there are existing numerical data base in several countries, as "National Performance of Dams Program Data Base (Stanford University)" (<https://npdp.stanford.edu/>) in the US, ARIA Data Base (<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/about-us/the-aria-database/?lang=en>) in France (for all industrial incident, including dams).

2.2. DEVELOPING AN ICOLD DATA BASE ON DAM INCIDENTS

The ICOLD Dam Safety Committee has the task to regularly update the dam incidents list with new cases but it appears difficult to achieve without traditional

questionnaires and inquiries. On the other hand, these inquiries become nowadays inappropriate to collect data which can be obtained more easily on line through newly available information technologies. Before developing such a tool it seems however relevant to develop a data base with the existing cases known through the ICOLD publications. This task was undertaken these last years and is now completed. It represents 1188 cases, each case record giving the same information as the original documents. The main objective of this base is to give the dam community a tool providing a list, as exhaustive as possible, of dam incidents. It is not sought to have detailed information for each incident records; rather the data base will give known references, many of them being now available on the Internet.

This allows performing statistical analysis (similar to previous analysis by ICOLD publications mentioned in 2.1) with a reliable (as much as possible) source of dam incidents making it possible to sort by type of dams, countries, period, etc, in order to study in more details the cases related to some particular question. Obviously these detailed studies cannot be undertaken only with the data available in the base but must rely on specific research of reports, articles, etc.

2.3. DATA BASE PERIMETER

Typically, a data base contains mainly numbers or codes in order to make sorting analysis; short description, pictures and drawings may be included, with or without sorting capabilities (research of a word in a text, etc.).

The rules for dam incidents to be included in the base are the same than those used in the ICOLD World Register of Dams (WRD) i.e. the dam is $H > 15$ m OR ($H > 5$ m AND $V > 3.10^6$ m³). However smaller dams may exceptionally be included in the base, provided that useful lessons can be learnt; this implies that these smaller dams' history cases are well documented.

Tailing dams are not presently included in the database, the priority being to develop the database for dams. It could be considered to add tailing dams later, with cooperation with the relevant ICOLD Committee; this would probably lead to add specific fields to properly describe these structures.

Each record in the base is related to an incident (and not to a dam). It means that several records may concern the same dam if several incidents occurred on this dam.

As in LFDI two types of incidents are considered: failure (F) and accident (A). A failure is a catastrophic type of incident characterized by the uncontrolled release of impounded water or by a major loss of dam integrity. An accident is a lesser catastrophic type of incident defined by malfunction or abnormality outside the design assumptions and parameters which adversely affect the dam's primary function of impounding water. Accidents related to safety appurtenant

C. 1

works (spillway, gates, bottom outlet) can also be introduced in the database. Examples of these accidents could be gates failure or important disorders on these structures.

3. DATA DEFINITION

The different fields concern the dam characteristic, the incident characteristics and consequences, the incident causes, remedial measures, images and references.

Dam characteristics are similar to the World register of dams and include country, year of completion, river, nearest town, scheme purpose, dam type, height, length of the crest, foundation type, dam body volume, reservoir capacity. For dam type the concrete and masonry dam have been given a specific code: for example PG(M) for a masonry gravity dam.

Some dams consist of several longitudinal sections each with different types. In these cases several (in many cases two) codes are indicated and it is therefore necessary to read the case description to know in which dam section the incident took place.

About 2/3 of the dams in the incident data base are also listed in the ICOLD World Register of Dams (WRD) and, as far as possible, the data of this section are then those of the WRD. When important gaps between the different data sources are identified this is documented in a specific field "Data Information". These gaps are often explained when important repair works have taken place after the incident.

3.1. FAILURE CHARACTERISTICS

The information available in this section is: year of incident, incident time (during construction, first filling, etc.), incident type (F or A), incident mode, incident cause, and description of the incident.

Incident causes were already mentioned in DDAR and B99 but was in fact a mix of causes and failure modes and mechanisms. In order to sort the different interesting cases according to failure modes and failure causes, new fields have been considered and the information has been added manually in the data base.

The failure modes considered are: overtopping – external erosion; internal erosion; structural failure of the dam body; foundation failure, etc.

The incident causes were splitted in two categories, the main causes, mainly linked to organizational issues or human aspects (bad design; bad construction; inappropriate operation; poor maintenance and surveillance, etc.) and the secondary causes related to external causes (natural hazards) and internal causes (technical issues, ineffective barriers of defence). These secondary causes are: geotechnical issues; major flood or insufficient discharge capacity; major earthquake; material ageing; hydro mechanical equipment dysfunction or failure; structural issues, etc.

3.2. FAILURE CONSEQUENCES AND REMEDIAL MEASURES, OTHER

This section includes mainly the number of fatalities and the remedial measures: about 60 different remedial measures types make it possible to have information of what has been done after the incident (from dam abandon to minor repairs according to the nature of the incident).

Reliable references as books, articles, etc. where more information can be found are indicated. For recent failures there are a lot of Internet references but which are often not reliable on a technical point of view. It is then wise to limit the hyperlink possibilities to "official" websites.

Photos and technical drawings can be provided. All the photos and sketches from LFDI have been scanned and are referenced in this field.

4. DATA BASE CONTENT

The database therefore contains all cases of accidents and failures published in the three publications mentioned above (LFDI, DDAR and B99). This represents 1188 records in which all the numerical information, descriptions and graphs of the original documents have been included. Many cases are present in these different publications, sometimes with different values. In general, the value of the most recent document was retained.

In parallel to this work of recovering "official" ICOLD data, recent failure cases have been added. Indeed, the last case listed in the ICOLD publications dates from 1991 and it is important to supplement these data now with incidents that have occurred since that date. Therefore approximately 120 cases were added to the database, of which nearly 40 were prior to 1990 but were not identified in the surveys used in the preparation of ICOLD documents. These 120 cases come mainly from the members of the Dam Safety Committee, who checked and completed the lists of cases listed for their respective countries. In this way, 1374 records are now listed, including 305 failures, so 87 new cases of failures.

C. 1

The table 1 below summarizes the distribution of these failures according to their source and separately accounting for rigid dams (concrete or masonry) and embankment dams.

A first lesson of this table is the number of failures since 1991 (49), which account for nearly 20% of the total. Since failures have been recorded since about 1900, this means that the average number of failures per year is globally constant; this is to be nuanced by two considerations:

- the number of dams has been steadily increasing, and the rate of "failures / number of dams" is therefore decreasing,
- failures are better reported nowadays.

Table 3
Breakdown of failure cases

	DAM TYPE		TOTAL (*)
	PG/VA/..	ER/TE/..	
ICOLD Publications	40	173	218
New cases before 1991	6	23	38
New cases after 1991	3	41	49
Total	49	237	305

(*) This total includes some dams whose type is not defined

Another observation concerns the distribution of failures between rigid and embankment dams. This distribution is equal to 20/80 before 1990 and 10/90 after 1990. The rate of failures of rigid dams has therefore decreased significantly due to the smaller number of dams of this type built in recent decades and the fact that their failures often occur during the first years of operation.

5. STATISTICAL ANALYSIS

5.1. BASE CONTENT

Bulletin 99 is the latest ICOLD publication that provides statistics on dam failures. These statistics linked failure rates according to the types of dams and their ages. The following essential data (before 1990) can be recalled:

Table 2
 Statistics of the types of dams around the world and the failures associated with this typology (before 1990)

Concrete dams	dams over 20 m; 2 failures; none during flood dams less than 20 m: 8 failures, including 2 in floods
Masonry dams	20 failures, including 18 for dams 20 to 50 m high; including 5 per flood.
Embankment dams (without China)	140 failures of which 20 during flood in construction and 60 floods in operation. Numerous "flood failures" for "small" embankment dams.

By limiting to dams of more than 20 m, it has been counted since 1990:

- 2 failures of concrete dams: Shih Kang (1999) and Camara (2004);
- 1 masonry dam failure (Orjales in 1994);
- More than 40 embankment dams failures among which Gouhou (1993 - 288 fatalities), El Guapo (1999).

5.2. EXAMPLE OF FAILURE MODES AND CAUSES ANALYSIS

The new information available in the database on failure modes and failure causes make it possible to establish statistics focused towards specific aspects. For example, it is possible to analyze the overtopping failure mode and the causes of these failures. This represents 121 cases in the database which were classified by type of dams and periods of failure (Figure 1).

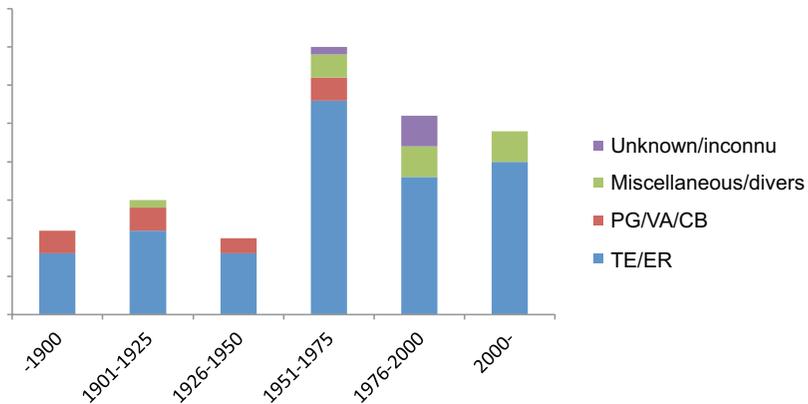


Fig. 3
 Failure by overtopping, sorted by failure time and by type of dams

C. 1

It can be seen that the number of failures recorded is significantly higher since the 1950s, but this is probably due to a better incidents reporting.

The types of dams concerned over the same periods are reported by distinguishing three main categories of dams: embankment or rockfill structures (TE / ER), "Rigid" (arch or gravity) and "mixed structures", a concrete structure comprising a spillway prolonged by one or more embankment closure structures. There is a strong representation of the embankments: about 80% of the total regularly, regardless of the period of the failure, and 100% today if the "mixed structures" are accounted for. Some rigid structures (mainly old masonry dams) failed by overtopping and account for 20% of the failures, but there are no more after 1975.

The causes of these failures are unequally ascertained, but they make it possible to assess the proportion between two major causes: poor design (mainly hydrological justification and, to a lesser extent, hydraulic and structural aspects) or operational defects regrouping inappropriate operation and equipment failure to work properly. This distinction is deliberately simplistic, but seeks to better discriminate what falls under the "hydrological" insufficiency to what is a dysfunction in operation. Figure 2 shows the relative importance of these two causes in the cases where they are known.

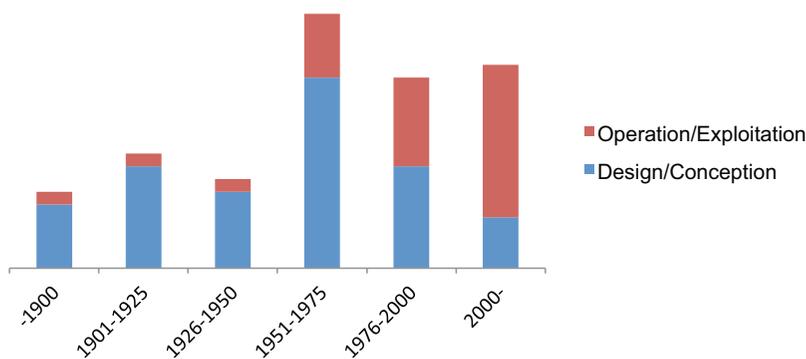


Fig. 4
Failures by overtopping, sorted by failure time and by cause

It is very interesting to note that until the 1975s most of the failures (about 90% on average) are caused by insufficient capacity of the spillway, which seems quite normal in view of the hydrological assumptions taken into account at the time. Since 1975 this cause of failure has decreased to represent only 25% of cases since the 2000s. The main cause of failure by overtopping in recent years therefore concerns the operation of the spillway.

6. CONCLUSION

The collection and analysis of dam incidents is a necessity to improve the knowledge of these structures and their level of safety, based on experience. ICOLD has published several publications on this subject which have recently been digitized and entered into a database. Some 50 new cases of failures since 1990 have been added. Synthesis and analysis are now easier and the addition of information on modes and causes of failure allows for focused statistical analyzes. This database is also an appropriate tool for updating new cases and should soon be made available to National Committees on the ICOLD website in the same way as the World Register of Dams.

REFERENCES

- [1] CIGB-ICOLD Lessons from dam incidents, Leçons tirées des accidents de barrages - 1974.
- [2] CIGB-ICOLD Deterioration of Dams and Reservoirs – Examples and their analysis – Détérioration de barrages et réservoirs – Recueil de cas et analyse, 1983.
- [3] CIGB-ICOLD Bulletin 99 Statistical analysis of dam failure, Ruptures de barrages, analyse statistique - 1995
- [4] CIGB-ICOLD Bulletin 109 Dams less than 30 m high - Cost savings and safety improvements, Barrages de moins de 30 m de hauteur – Economies et sécurité, 1997