Risques associés aux barrages

Risks associated with storage dams

André Goubet

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
Président du Comité Technique permanent des Barrages

Fin 1977, la France comptait 353 "grands barrages", c'est-à-dire 353 ouvrages mesurant plus de 15 m de haut au-dessus de leur fondation la plus basse⁽¹⁾.

Ces ouvrages, ainsi que certains barrages de taille plus réduite, font peser sur la population située à l'aval un risque, certes très faible, mais qu'il serait aussi regrettable de négliger totalement que de surestimer.

Bien qu'il soit toujours délicat, notamment au plan psychologique, d'apprécier les risques de très faible probabilité mais de grande ampleur, il est néanmoins préférable de cerner le plus possible le problème plutôt que de prendre des décisions regrettables sur des bases éventuellement grossièrement inexacts⁽²⁾.

Tel est l'objectif recherché dans cette note.

La quasi totalité des pays du monde possédant des barrages importants sont regroupés dans la "Commission Internationale des Grands Barrages" qui a rassemblé dans un "Registre Mondial" la quasi intégralité des grands barrages existants dans le monde, Chine exclue⁽³⁾.

Par ailleurs, la Commission a procédé en 1965 à un recensement aussi exhaustif que possible des incidents ou accidents (et donc des ruptures) ayant affecté les grands barrages, recensement ayant porté sur 96 % des barrages existant dans le monde (Chine exclue) à l'époque.

(1) Sur ce total, 202 étaient utilisés à la production d'électricité, parmi lesquels 128 mesuraient plus de 20 m de haut au-dessus du fond de la vallée; 64 de ces 128 ayant une capacité de plus de 15 millions de mètres cubes.

(2) Une difficulté analogue se présente d'ailleurs pour les différents risques qu'une terminologie moderne, à mon avis regrettable, qualifié de "risques majeurs".

(3) Ce pays a adhéré récemment et le registre ne fait mention que des 500 ouvrages pris parmi les principaux.

D'autre part, la littérature technique en langue française et anglaise est suffisamment complète pour que l'on puisse admettre qu'aucune des ruptures survenue depuis 1965 n'ait échappé à l'examen des services d'E.D.F. qui ont bien voulu sur ce point compléter mes informations.

Dans ces conditions, on peut comparer le nombre des grands barrages mis en service jusqu'à fin 1977 (le registre mondial s'arrête pour le moment à cette date) et les ruptures survenues pour en déduire une fréquence empirique⁽⁴⁾.

Ceci ne signifie évidemment pas que la rupture d'un barrage de moindre importance serait sans conséquence grave⁽⁵⁾.

Qu'est-ce qu'un barrage ?

Dans l'esprit des Français un barrage est généralement un ouvrage en béton —encore que beaucoup connaissent

(4) J'ai toutefois, dans la mesure du possible, tenu compte des ruptures constatées jusque fin 1979, en estimant approximativement le nombre actuel des grands barrages en service.

(5) Dernièrement, aux U.S.A., la disparition, à la suite d'une crue survenue au cours de la nuit, du barrage de Kelly Barnes Lake (Toccoa, Georgie) fit 37 victimes bien qu'il n'ait eu que 9 m de haut ;

- toujours aux U.S.A., le barrage d'Austin, bien que n'ayant que 14 m de haut et ne retenant que 0,75 million de m³ d'eau, entraîna la mort de plus de 100 personnes lorsqu'il se rompit le 11 septembre 1911;

- enfin, l'une des plus grandes catastrophes des derniers siècles, et sans doute de tous les temps, en matière de barrages, (2 à 4 000 morts selon les sources), fut causée par le barrage de South Fork River (Pennsylvanie) qui, bien que classé dans les "grands barrages" n'avait qu'une hauteur modeste : 21,9 m au-dessus des fondations.

Serre Ponçon— qui barre une vallée de montagne et permet de produire de l'électricité.

Cette vision, qui n'est pas inexacte en ce qui concerne notre pays est tout à fait erronée au niveau mondial.

En fait, les barrages —et les premiers existaient voici 5 000 ans— étaient, à l'origine destinés aux besoins agricoles (ou à l'alimentation en eau des populations) puis, à une époque beaucoup plus récente, sont apparus les barrages associés aux canaux de navigation (pour alimenter les biefs de partage, par exemple) ou à différentes activités industrielles (barrages britanniques du XIX^e siècle), ensuite à la production d'électricité et, enfin, aux loisirs. Les barrages écrêteurs de crue, qui se multiplient à notre époque (amélioration de la protection des agglomérations) semblent avoir existé dès les premiers siècles de notre ère.

C'est ainsi qu'au début de ce siècle, la moitié des barrages mondiaux⁽⁶⁾ étaient situés au Japon, où le plus ancien ouvrage a près d'un millénaire; les barrages japonais étaient tous construits en terre et étaient indispensables à la culture du riz. La Grande Bretagne pour sa part, en abritait près du quart, presque tous en terre également.

Sur 805 barrages antérieurs à 1900, plus de 700 étaient des barrages en terre ou en enrochements, encore que les Romains puis les Arabes, aient réalisé un certain nombre d'ouvrages en maçonnerie⁽⁷⁾.

Encore aujourd'hui, la grande majorité des barrages sont des ouvrages constitués par des remblais (terre ou enrochement).

Recensement des "grands barrages" existant dans le monde

Le Registre mondial mentionnait, à la fin de 1977, 15 628 ouvrages (Chine exclue). Pour quelques rares

pays toutefois, dont aucun ne comporte un grand nombre d'ouvrages, le recensement s'arrête à fin 1974, fin 1971, voire fin 69.

A côté des grands barrages proprement dits (c'est-à-dire des ouvrages de plus de 15 m au-dessus des fondations), le Registre peut mentionner des barrages de moindre hauteur, mais présentant un intérêt particulier (longueur, capacité, etc.). Les divers pays usent très différemment de cette faculté. Et si le tiers des 5 618 barrages mentionnés par les USA ont moins de 15 m (ou une hauteur non précisée, mais sans doute faible), les 2 003 ouvrages japonais inscrits au registre ont tous plus de 15 m.

De manière à dégager une base de référence homogène, j'ai décompté dans l'annexe 1, pour chaque pays, les barrages de hauteur inférieure à 15 m, non précisée et supérieure à 15 m.

Les conclusions de cette annexe sont les suivantes :

	< 15 m	hauteur indéterminée	> 15 m	Total
USA	1 187	717	3 714	5 618
Japon	0	0	2 003	2 003
Europe de l'Ouest ⁽⁸⁾	310	33	2 566	2 909
Reste du monde (Chine exclue)	651	44	4 403	5 098
Total	2 048	794	12 686	15 628

Il est en fait à peu près sûr qu'un certain nombre d'ouvrages n'ont pas été mentionnés. Et si la valeur de 15 628 est nettement excessive, celle de 12 686 est un peu minorée.

Recensement des ruptures de grands barrages

La Commission Internationale des Grands Barrages a publié en 1974 un document intitulé "Leçons tirées des accidents de barrages" à la suite d'un recensement quasi exhaustif de toutes les ruptures d'ouvrages connues jusqu'en 1965. Les nombreux tableaux statistiques de ce document présentaient un certain nombre d'erreurs matérielles qui ont été redressées par Niklaus Schnitter, dans un article "Sûreté statistique des barrages" paru dans la revue "Wasser Energie Luft" n° 5 — 1976.

Par ailleurs, EDF m'a signalé quelques adjonctions ou suppressions complémentaires.

L'annexe 2 est déduite de l'ouvrage de la Commission, compte tenu notamment des remarques de M. Schnitter et d'EDF.

L'annexe 3 recense toutes les ruptures postérieures à 1965 dont j'ai pu avoir connaissance.

N'ont pas été pris en compte quelques accidents, parfois graves, ayant affecté des barrages constitués de stériles miniers qui étaient en fait des dépôts mis en place sans faire intervenir la technologie de construction des barrages en remblais.

(6) En considérant le monde à l'exclusion de la Chine.

(7) On peut citer par exemple, pour mémoire, les barrages-voutes suivants :

nom	pays	date de construction	hauteur
Baume	France	romaine	12 m (?) ruines découvertes au 18 ^e siècle
Dara	Turquie	env. 550	? en ruines
Kabar	Iran	env. 1 300	26 m existe toujours
Kurit	Iran	env. 1 300	60 m surélevé de 3 m en 1850 - en service
Abbas	Iran	env. 1300	20 m partiellement rompu et séparé au 16 ^e /17 ^e
Almansa	Espagne	1384-1586	15/21 m encore en service
Tibi	Espagne	1580 à 1594	42 m encore en service
Elche	Espagne	1632	23 m encore en service
Ponte Alto	Italie	1611 à 1887	5 à 39 m, barrage surélevé 7 fois.

On peut également signaler en Espagne le barrage Almonacid sur l'Aguasvivas du 13^e siècle (barrage en maçonnerie de 29 m de haut, surélevé ensuite d'un mètre et aujourd'hui envasé).

(8) Europe des 9, Espagne & Portugal, Autriche et Suisse, Norvège, Suède et Finlande.

Par ailleurs certaines ruptures ont sans doute été omises mais elles sont vraisemblablement en nombre très faible.

Risques de ruptures de barrages

On peut très grossièrement considérer qu'il y a chaque année 1,5 rupture⁽⁹⁾ de barrages pour un ensemble qui approche actuellement 15 000 ouvrages et que le risque de rupture est donc de 10^{-4} par année et par barrage.

Une telle appréciation est sans utilité pratique parce que trop globale. Il faut examiner les variations de ce risque en fonction de l'âge de l'ouvrage, de sa nature, voire du pays où il a été construit, et du type de risque.

Variation en fonction de l'âge des ouvrages et de leur date de construction

Les 129 ruptures répertoriées se répartissent ainsi en fonction de l'année de mise en service du barrage d'une part, du nombre d'années qui sépare la mise en service de la rupture, d'autre part.

année de mise en service	Nombre d'années entre la mise en service et la rupture							(1) total	Nbre de barrages mis en service dans la période
	pendant la construction	0 à 5	6 à 10	11 à 20	21 à 40	41 à 60	> 60		
< 1900	2	12	4	5	8	3	4	36	861
1900 à 09	0	7	2	1	0	1		11	309
1910 à 19	2	9	1	2	1	5		18	534
1920 à 29	1	11	0	3	1			15	869
1930 à 39	2	1	0	0	0			1	986
1940 à 49	2	4	0	1	2			7	903
1950 à 59	0	5	1	3				9	2 354
1960 à 69	4	5	0	2				7	3 562
1970 à 79	2	4	1					5	3 400
Total	15	58	9	17	12	9	4	109	13 778
âge du barrage non connu = 5 ruptures									
(1) Pour les ruptures postérieures à la construction. (2) 2 308 sont mentionnés au registre pour la période 1970-77 mais les omissions sont assez fréquentes.									

Il est bien évident qu'un certain nombre de ruptures survenues au 17^e, au 18^e ou même au 19^e siècle ont été omises. Par ailleurs il y a une certaine ambiguïté dans le choix des ruptures pendant la construction : je n'ai pas par exemple tenu compte d'un certain nombre d'incidents mettant en cause la stabilité de l'ouvrage en l'absence d'eau car ils n'entraînent pas de risques pour l'aval.

Ce tableau permet de constater approximativement les fréquences empiriques de rupture suivantes (fréquence par année-barrage).

(9) 20 recensées au cours des 13 dernières années.

Pour tenir compte des 5 ruptures pour lesquelles on ne dispose que de renseignements incomplets, j'ai majoré forfaitairement les valeurs de 5 %⁽¹⁰⁾.

Année de mise en service	Fréquence exprimée en 10^{-4}						
	Nombre d'années entre la mise en service et la rupture						
	Pendant la construction (1)	0 à 5	6 à 10	11 à 20	21 à 40	41 à 60	> 60
< 1900	20	29	10	6	5	2	1
1900 à 09	0	47	14	3	0	2	
1910 à 19	40	35	4	4	1	5	
1920 à 29	10	27	0	4	0,6		X
1930 à 39	20	2	0	0	0		X
1940 à 49	20	9	0	1	1	X	X
1950 à 59	0	4	0,9	1		X	X
1960 à 69	10	3	0	0,6	X	X	X
1970 à 79	6	2	0,6	X	X	X	X
Total	11	9	2	2	1	2	

(1) Fréquence par barrage construit.

Chacune des cases élémentaires de ce tableau correspond à un échantillon d'observation trop réduit pour que l'on puisse assimiler sans précautions, fréquence et probabilité, mais des regroupements permettent de dégager des résultats intéressants (dont certains seront plus amplement développés plus loin, sous le titre "variation en fonction du type de rupture").

a) Ruptures de barrages pendant la construction : on admet volontairement pendant la construction des risques de submersion, car les conséquences sont bien inférieures à celle de la rupture d'une retenue pleine ; les précautions prises semblent toutefois s'être accrues progressivement : 1 barrage sur 300 avant 1900, 1 sur 600 entre 1900 et 1959, 1 sur 1 600 depuis 1950 se sont rompus avant la mise en service.

b) Bien que les ouvrages réalisés soient de plus en plus grande taille, l'amélioration de la technologie permet d'obtenir des fiabilités croissantes : la fréquence des ruptures au cours des 10 premières années de vie d'un barrage est passé de 1,6 % (avant 1900) à 1 % (entre 1900 et 1950) et 0,2 % (depuis 1950).

c) Approximativement les risques de rupture sont de même importance pendant les 5 premières années que pendant tout le reste de la vie de l'ouvrage. L'on constate que 41 ruptures de barrage en service (sur 110) se sont produites lors du premier remplissage de l'ouvrage⁽¹¹⁾. Les erreurs commises lors de la conception ou de la construction sont en fait très rapidement

(10) Pour passer du 1^{er} nombre de la colonne 3 du tableau précédent à son homologue du tableau ci-après, on effectue le calcul suivant

$$\frac{12 \text{ ruptures} \times 1,05 \times 10^4}{861 \text{ barrages} \times 5 \text{ ans}}$$

(11) Le remplissage complet peut n'intervenir que plusieurs années après la mise en service de l'ouvrage. Sur les 41 ruptures survenues au 1^{er} remplissage, 4 sont intervenues 5, 7, 11 et 12 ans après la mise en service (Malpasset et Bouzey en France, Puente en Espagne, Bilberry en Grande Bretagne).

sanctionnées, soit lors de ce premier remplissage, soit dans les années qui suivent immédiatement : plus du 1/4 des ruptures consécutives à des submersions sont survenues les 5 premières années, ainsi qu'un cinquième des autres ruptures.

d) Il résulte du rapprochement des deux points précédents que les anciens barrages bien que conçus à une époque où la technologie était parfois sommaire, sont sûrs : un ouvrage construit en 1900 et qui a tenu depuis 80 ans est à peu près aussi sûr qu'un barrage mis en service aujourd'hui. Il ne faudrait toutefois pas déduire de cette remarque qu'un barrage ne vieillit pas ; nous verrons en particulier que plusieurs des barrages américains rompus en exploitation utilisaient des matériaux périssables (bois, fer...) dont on ne pouvait attendre un bon vieillissement. Par ailleurs, le fait qu'un barrage n'ait pas été submergé pendant ses 80 premières années ne suffit pas à prouver que ses évacuateurs de crue soient suffisants.

Variation en fonction du pays d'implantation

Parmi les pays possédant de nombreux barrages, l'on peut distinguer 4 grands groupes :

- les U.S.A.
- le Japon,
- l'Europe de l'Ouest (définition donnée ci-dessus),
- le reste du Monde (Chine exclue).

La répartition des ruptures survenues sur des ouvrages construits postérieurement à 1900 est la suivante (y compris ruptures en cours de construction).

	Barrages mis en service entre 1900 et 1974	Ruptures correspondantes
U.S.A.	3 659	46 à 48
Japon	1 529	4
Europe	2 335	7
Reste du Monde (Chine exclue)	4 303	28 à 31

On ne peut qu'être surpris par la disproportion qui existe entre les fréquences d'accident aux U.S.A. et dans le reste du monde. On peut certes admettre que les ruptures y sont particulièrement bien recensées. Il faudrait toutefois admettre que les 4/5 des ruptures survenues en Europe occidentale depuis le début du siècle aient disparu des souvenirs des spécialistes pour que la situation y soit analogue à celle des U.S.A.

Une telle hypothèse est invraisemblable et il faut bien admettre une différence profonde entre les U.S.A. et l'Europe, le Japon semblant être dans une situation très proche de cette dernière.

Pourquoi une telle disproportion qui ne peut manquer de surprendre, compte tenu de la qualité de la technologie américaine dans de nombreux domaines ?

Plusieurs motifs justifient la différence constatée : certaines zones des U.S.A. sont (ou étaient) très peu peuplées et la rupture de certains ouvrages ne présentait pas de conséquences graves ; une construction soignée ne s'imposait donc pas ; on peut noter à ce sujet que 6 des barrages récents (postérieurs à 1900) se sont rompus

2 fois ; il est vraisemblable qu'un tel risque n'a été accepté que dans la mesure où la rupture de ces ouvrages ne portait qu'une atteinte limitée aux biens ou aux personnes situées à l'aval.

On peut à ce sujet noter que le Japon, pays à forte densité de population, a un taux de rupture très voisin du taux européen et beaucoup plus faible que le taux américain.

Par ailleurs, et ceci est particulièrement vrai pour les ouvrages en terre nombreux aux U.S.A. et très sensibles aux déversements par dessus la crête, de nombreux ouvrages sont emportés par les crues ; il importe donc d'avoir une bonne connaissance de celles-ci au moment de la conception de l'ouvrage ; or, elles sont particulièrement difficiles à déterminer dans les zones semi arides où la pluviométrie est très irrégulière. C'est précisément ce genre de climat qui règne sur une partie des U.S.A. ouverte depuis peu de temps à la civilisation et aux mesures hydrologiques.

Enfin, mais ceci peut sans doute être rapproché des motifs mentionnés ci-dessus, il semble à la lecture de nombreux documents américains que beaucoup d'ouvrages ont été construits dans ce pays avec l'audace propre à l'esprit pionnier, sans la participation du moindre ingénieur.

Le Registre mondial mentionne 55 grands barrages américains antérieurs à 1900, 19 ruptures ont affecté des grands barrages américains de cette période. Même en admettant que la liste des 55 noms soit incomplète, le rapprochement de ces 2 nombres se passe de commentaires !!

A l'opposé, les barrages japonais, dont une grande partie des barrages en terre a été réalisée à une époque où l'on ignorait les théories modernes de la mécanique des sols, ont été bâtis dans un pays de très ancienne civilisation où les crues étaient sans doute beaucoup mieux connues qu'aux U.S.A. et selon des pratiques rodées par un millénaire d'empirisme ; nos constructeurs de cathédrales ont su également réaliser, sans l'appui des techniques de calcul moderne, des ouvrages qui défient les siècles.

Il convient aussi de noter que les barrages construits aux Indes par l'Angleterre ont été affectés de très nombreuses ruptures dont le taux est encore supérieur à celui des U.S.A.

Par ailleurs 7 des 38 ruptures ayant affecté des barrages antérieurs à 1900 sont survenues sur des ouvrages construits par les Français en Algérie, pays dont l'hydrologie était très mal connue à l'époque de la construction des ouvrages.

Si on se limite aux barrages récents, mis en service après 1950, on peut comparer les résultats suivants :

Barrages mis en service de 1950 à 1977 inclus :

U.S.A. : 2 516 barrages⁽¹²⁾

Japon : 850 "

Europe : 1 549 "

(12) Il semble en fait qu'une centaine d'ouvrages ne soient pas mentionnés au registre en ce qui concerne les U.S.A.

dont :

Autriche	: 36	Allemagne	: 68
Finlande	: 35	France	: 208
Grande-Bretagne	: 141	Italie	: 204
Espagne	: 431	Norvège	: 166
Portugal	: 40	Suède	: 104
Suisse	: 91	Divers	: 25

Ruptures survenues sur ces barrages :

U.S.A. : 7 ruptures

Japon : 0 "

Europe : 3 "

Pour cette période, dont les états statistiques, limités aux pays considérés, sont sans doute très valables, la différence des résultats constatés est, en dépit de l'importance relativement limitée des échantillons considérés (environ 40 000 années pour les barrages aux U.S.A. d'une part, en Europe et au Japon d'autre part), significative.

Variation en fonction des types de barrages

Les ouvrages en remblais d'une part (généralement barrages en terre, quelquefois barrages en enrochements) et les barrages en maçonnerie de différentes natures, peuvent se rompre selon des mécanismes différents. Les premiers sont en particulier beaucoup plus sensibles que les seconds aux déversements lors des crues et aux écoulements (renards) à travers le barrage.

A première vue, et si l'on considère globalement l'ensemble des barrages mondiaux, les barrages en remblais semblent beaucoup moins sûrs que les autres.

Cette apparence est trompeuse et provient essentiellement du fait que la majeure partie des barrages des Etats-Unis sont en terre, or les ouvrages de ce pays ont été affectés par un nombre de ruptures particulièrement grand.

En fait, si l'on compare les ruptures ayant affecté chacune de ces catégories d'ouvrage aux U.S.A. d'une part, dans l'ensemble "Europe + Japon" d'autre part, on n'observe pas de différence significative ainsi qu'il résulte du tableau suivant :

	Barrages mis en service entre 1900 et 1974			Ruptures correspondantes		
	Remblai	Maçonnerie	divers	Remblai	Maçonnerie	divers ou non précisé
U.S.A.	2 537	608	262	38 ou 39 ⁽²⁾	8 ou 9	3
Japon	851	613	—	3	1	—
Europe	715	1 462	—	1	5	—
	4 103	2 683 ⁽¹⁾	262	42 ou 43	14 ou 15	3

(1) En 1830, sur 500 barrages répertoriés, 16 seulement étaient en maçonnerie ; 20 ans plus tard, on n'en comptait encore que 22 sur 579 ; bien que les Romains et les Arabes aient réalisé des ouvrages en maçonnerie depuis plus de 1 000 ans, les barrages en maçonnerie réalisés entre 1850 et 1900 étaient des prototypes qui ont malheureusement été à l'origine de certains déboires.

(2) Sans compter Teton, postérieur à 1974.

Variation en fonction du type de rupture

Les 114 ruptures constatées (en dehors des ruptures pendant la construction) se divisent en 3 grandes catégories :

- ruptures au premier remplissage (44)
- ruptures par submersion (crues) (43)
- ruptures en service normal (27)

A noter qu'aucune n'est imputable à un séisme. (Un tremblement de terre a toutefois rompu en 1978 un remblai important constitué par des stériles miniers et non repris dans nos statistiques).

Ruptures au premier remplissage

Ces ruptures interviennent généralement avant 3 ans, mais dans 4 cas, par suite d'un remplissage très lent, elles sont intervenues au bout de 5 — 7 — 11 et 12 ans !

On peut répartir ces ruptures selon la date de la catastrophe et l'emplacement du barrage.

	Europe + Japon	U.S.A.	Autres	Total
avant 1900	5	3	4	12
1900 à 1919	7	15	8	30
1920 à 1929	2	4	2	8
1930 à 1939		1		1
1940 à 1949		1		1
1950 à 1959	2	7	2	14
1960 à 1969		2	1	3
1970 à 1979		2	2	4
	9	22	13	44

Dans chacune des 3 zones géographiques on constate que les 2/3 des ruptures sont intervenues avant 1929 (et correspondent à environ 3 000 barrages réalisés dans le monde) alors que le dernier tiers, survenu après 1930, peut être associé à la construction de 10 000 barrages environ. Soit 1 % avant 1930 et 1 %_c depuis lors.

Le progrès est spectaculaire, qu'il soit dû à une meilleure prévision du comportement des barrages et de leurs appuis ou à une plus grande prudence lors du remplissage.

Mais ici également, et bien que les U.S.A. n'aient pas construit sensiblement plus de barrages que l'Europe de l'Ouest et le Japon réunis (ils en avaient même sensiblement moins en service en 1930) le pourcentage de rupture par barrage mis en service y est près de 3 fois plus important.

On peut également noter que 12 des 14 ruptures survenues depuis 1930 ont affecté des ouvrages en remblais (terre ou enrochement) ; mais depuis 50 ans, la majorité des barrages ont été réalisés en remblais surtout aux Etats-Unis.

Ruptures par submersion

Outre l'établissement d'un tableau analogue à celui dressé plus haut, il est intéressant de considérer l'âge des barrages lors de leur rupture :

Année de rupture	Europe + Japon	U.S.A.	Autres	Total
avant 1900	1	3	3	7
1900 à 1919		6	1	7
1920 à 1929		5	2	7
1930 à 1939	1	2	0	3
1940 à 1949		1	1	2
1950 à 1959	2	1	0	3
1960 à 1969	1	1	5	7
1970 à 1979		1	6	7
	5	20	18	43

barrages âgés de moins de 5 ans : 12 dont 7 aux U.S.A. avant 1930	
" de 6 à 10 ans : 4 dont 2 aux U.S.A. au XIX ^e siècle	
" de plus de 10 ans : 24	
âge non connu	3
	43

Il convient de rappeler qu'en matière de dimensionnement des évacuateurs, on peut améliorer la situation d'anciens barrages pour tenir compte de l'évolution des connaissances ou des pratiques et qu'il n'y a donc pas lieu de distinguer, parmi les barrages en service aujourd'hui, les ouvrages anciens et les ouvrages récents.

L'on constate que la moitié des ruptures est survenue avant 1930 alors que seul le 1/4 des ouvrages actuels étaient en service ; mieux, sur les 21 ruptures constatées avant 1931, la moitié intéresse des ouvrages jeunes (9 de moins de 5 ans, 3 de 5 à 10 ans). Bien qu'une crue tout à fait exceptionnelle puisse survenir immédiatement après la mise en service d'un ouvrage, il est évident que la très grande majorité de ces 12 ruptures correspond à des barrages dont les évacuateurs de crue avaient été notoirement sous dimensionnés, soit par méconnaissance de l'hydrologie, soit par imprudence des projecteurs.

Cette cause de rupture a sensiblement diminué depuis 1930 et il en résulte une amélioration sensible de la sécurité des barrages⁽¹³⁾. A noter que l'Europe de l'Ouest et le Japon, pays de vieille civilisation, dont le régime des cours d'eau était mieux connu et où la densité de la population imposait une prudence plus grande, ont toujours été moins sujets aux risques de submersion.

Ruptures en exploitation

Il convient de noter tout d'abord que 25 des 27 ruptures ont affecté des barrages en remblais (terre ou enrochement) et deux seulement un barrage en béton dont un construit au XIX^e siècle.

(13) Mais le barrage de Bolan, au Pakistan, emporté en 1976 après 15 ans d'exploitation, n'avait pas de déversoir de crue !

Ces ruptures résultent d'une évolution défavorable de certains éléments d'ouvrage (ou de ses appuis) qui avaient subi avec succès un premier remplissage (vieillessement, mauvais entretien, etc.).

Nous allons voir de plus qu'en fait le vieillissement n'apparaît pas comme un motif déterminant et qu'il s'agit souvent d'un défaut d'entretien manifeste d'un type d'ouvrage plus fragile que les barrages en béton.

Ici aussi, il est bon de dresser les 2 tableaux établis comme précédemment.

Année de rupture	Europe + Japon	U.S.A.	Autres	Total
avant 1900		2		2
1900 à 1919		9		9
1920 à 1929		2		2
1930 à 1939		1	1	2
1940 à 1949		1		1
1950 à 1959	1	2		3
1960 à 1969		3	3	6
1970 à 1979		2		2
	1	22	4	27

barrages âgés de moins de 5 ans : 5 dont 4 aux U.S.A., tous avant 1909	
barrages âgés de 5 à 10 ans : 4, tous aux U.S.A., dont 3 avant 1921	
barrages âgés de plus de 10 ans : 16	
âge non connu	2
	27

Plus encore que pour les 2 autres catégories d'ouvrages, le caractère spécifique des ouvrages américains est manifeste.

Plus marquant encore est le fait que sur 12 barrages américains rompus avant 1921, 8 avaient moins de 10 ans. En fait ceci correspond à une situation révolue, caractéristique des conditions dans lesquelles s'est effectué le développement des U.S.A., et qui n'a plus aujourd'hui qu'un intérêt historique. Des barrages sommaires, dont les responsables n'avaient parfois aucune connaissance technique, ont été mis en place en utilisant des matériaux susceptibles de vieillir rapidement : charpentes en bois ou métalliques, palplanches, gabions en bois... Pour des raisons d'économie ou de rapidité, ces ouvrages étaient en outre parfois dimensionnés au plus juste⁽¹⁴⁾. Ils avaient davantage le caractère de batardeaux provisoires que de barrages définitifs et auraient dû être supprimés rapidement.

C'est pourquoi il est préférable de n'examiner que les 15 ruptures survenues au cours des 50 dernières années. Avec 9 ruptures sur 15, les U.S.A. se mettent ici encore en vedette ; ils subissent encore les conséquences (et continueront à les subir) de l'"époque héroïque" car si de nombreux ouvrages se sont rompus avant d'atteindre l'âge de 10 ans, d'autres, conçus et réalisés un peu moins sommairement, mais d'une façon néanmoins peu sûre, continuent à se rompre à un âge,

(14) De même que des barrages en terre à talus très raides et qui se sont également rompus.

qui pour un barrage, n'a rien de particulièrement élevé. On peut par exemple citer le barrage de Cazdero, à charpente en bois et enrochement, rompu en 1937 à 31 ans (défaillance des appuis des pièces en bois).

Mais le plus souvent la cause de la rupture, que ce soit aux U.S.A. ou ailleurs, se trouve dans un manque d'entretien ou de surveillance ; les quelques exemples suivants le mettent en évidence :

- Bon Accord (Afrique du Sud — achevé en 1925 — rompu en 1937 — saturation du talus en terre par les fuites provenant d'une conduite de pompage).
- Emery (U.S.A. — achevé en 1850 — rompu en 1966)
- Mill Creeck C (U.S.A. — achevé en 1899 — rompu en 1957)
- Toreson (U.S.A. — achevé en 1898 — rompu en 1953)
- White Brook (upper) (U.S.A. — achevé en 1942 — surélevé en 1949 — rompu en 1972) : le pourrissement d'entretoises en bois entraîne un déplacement des bajoyers de l'évacuateur de crue, et l'apparition d'un renard le long de celui ci.

Conclusions sur les risques de ruptures

Nous venons de constater que les risques de défaillance s'étaient très sensiblement réduits depuis un siècle. Pour les barrages construits ou en service aujourd'hui au Japon et dans l'Europe de l'Ouest, les risques peuvent être très grossièrement appréciés de la façon suivante :

- pendant la construction : le risque est d'environ 0,5 pour 1000 ; cette rupture présente une importance limitée dans la mesure où la cuvette est loin d'être complètement remplie et où l'alerte peut être donnée dans des délais très brefs. Toutefois 2 ruptures survenues récemment en Indonésie et aux Philippines ont causé de nombreuses victimes ;
- pendant le premier remplissage : des progrès spectaculaires ont été faits depuis le début du siècle. Et avec seulement 14 ruptures sur un total de 50, constatées depuis 50 ans à travers le monde sur les barrages terminés, les ruptures au premier remplissage ont cessé d'être la cause essentielle des ruptures (avant 1930, il y en avait eu 30 sur 64). Depuis 50 ans, 1 ouvrage sur 1000 s'est rompu au premier remplissage. Le risque est très certainement beaucoup plus faible au Japon ou en Europe de l'Ouest où l'on peut retenir une estimation de 0,5 pour mille ;
- par submersion : ici aussi une différence très nette apparaît, à l'échelle mondiale, entre les 50 dernières années et la période précédente, mais surtout à cause du poids des Etats-Unis. L'évolution est moins nette dans les pays de vieille civilisation que constituent le Japon et l'Europe de l'Ouest : 5 submersions ont été observées dans ces pays pour un ensemble qui comportait 805 barrages au début du siècle et 4569 en 1977. Le nombre d'années-barrages observé total dépasse 200 000, ce qui correspond en moyenne à une rupture par submersion tous les 40 000 ans. Toutefois, compte tenu des améliorations apportées aux évacuateurs de crue d'un certain nombre de barrages existants et d'une

exigence accrue pour les ouvrages récents, le risque actuel est sans doute inférieur ;

- par rupture en exploitation : à l'échelle mondiale, l'importance relative de ce type de rupture semble s'accroître par suite de la régression des deux autres : 14 ruptures sur 50 depuis 50 ans contre 13 sur 64, avant 1930. Mais il convient tout d'abord de remarquer qu'une seule rupture en exploitation sur 27 a affecté un ouvrage en béton ou en maçonnerie (construit d'ailleurs aux U.S.A. au 19^e siècle) et que la majorité des barrages français sont en béton. S'il ne faut certes pas en déduire que ce type d'ouvrage est indestructible, et que l'entretien ou la surveillance sont superflus, on peut néanmoins en conclure qu'il est moins fragile que les ouvrages en enrochement et surtout en terre.

Cette rupture peut être associée à un ensemble de 3 à 4 000 barrages en béton existants dans le monde et correspondant à environ 100 000 années-barrages. On pourrait sans doute prétendre que les barrages européens ou japonais sont mieux conçus et entretenus que le barrage en béton rompu et que leur probabilité de rupture est sensiblement inférieure.

Quant aux 13 ruptures survenues depuis 50 ans sur des ouvrages en remblai, dans la mesure où elles ont affecté pour l'essentiel des ouvrages des U.S.A. souvent réalisés au début du siècle dans des conditions manifestement peu recommandables, il est difficile d'en tirer un enseignement statistique. On peut toutefois observer que dans l'ensemble "Europe de l'Ouest + Japon" on ne connaît que 1 rupture en exploitation pour un ensemble qui comportait 650 barrages en remblai environ au début de ce siècle et près de 2400 en 1974 et qui correspond à environ 150 000 années-barrages. Ce qui semblerait montrer que, dès lors qu'ils sont bien entretenus, les barrages en remblai ne présentent eux aussi que des risques insignifiants ;

- risque total : à un risque de rupture pendant la construction de 0,5 pour mille barrages réalisés, on peut donc aujourd'hui, en Europe de l'Ouest et au Japon, ajouter un risque de rupture au premier remplissage de 0,5 à 1 pour mille également, puis en cours de service un risque de rupture par submersion inférieur à 1 pour 50 000 années-barrages et un risque de rupture pour une autre cause de l'ordre de 1 pour 100 à 200 000 années-barrages, soit en tout, un risque global de l'ordre de 1 pour 50 000 années-barrages.

Ceci correspond, pour la France, à une rupture de grands barrages tous les 1 ou 2 siècles (une fois la première mise en eau effectuée) et, pour l'Europe de l'Ouest, tous les 20 ans⁽¹⁵⁾. Il y a une bonne concordance entre cette observation et le fait que les deux dernières ruptures d'ouvrages survenues après la mise en service aient eu lieu en Europe de l'Ouest en 1944 (Bilberry en Angleterre) et en 1935 (Zerbino en Italie).

Il faut évidemment tenir compte en outre du nombre de ruptures susceptibles d'affecter de nouveaux barrages pendant leur construction et leur mise en eau.

(15) Pour les seuls "grands" barrages.

Victimes causées par les ruptures

A ma connaissance, aucun recensement exhaustif n'a été tenté, mais un certain nombre d'éléments mérite d'être signalé : sans aller jusqu'à prétendre que la hauteur et la capacité du barrage sont sans importance sur le nombre de victimes, on peut noter que le barrage de South Fork River à l'origine de la catastrophe la plus grave (2 à 4 000 morts) avait seulement 21,9 m au-dessus de la fondation la plus basse et ne contenait que 18,5 millions de m³ alors que la rupture du barrage de Teton —analogue à celui de Serre Ponçon— n'a fait que 11 victimes.

Le peuplement de la vallée située à l'aval joue évidemment un rôle essentiel, mais il semble qu'en fait l'élément fondamental de la dimension de la catastrophe soit l'existence ou non d'une alerte préalable, même si elle n'est donnée que très peu de temps avant.

Pendant la guerre 2 barrages ont été détruits dans la Rhur ; la rupture du barrage de la Möhne fit 1 200 morts (116 millions de m³ libérés, débit initial estimé à 8 000 m³/s), celui de l'Eder, 68 seulement (160 millions de m³ libérés, débit initial estimé à 8 500 m³/s), mais dans le second cas, il semble que la population ait pu être partiellement alertée, les réseaux téléphoniques étant restés pour partie en service.

On peut de même opposer les 400 à 2 000 morts causés par la rupture du barrage de San Francis à minuit (en 1927) et les 11 morts victimes du Teton qui s'est rompu à midi et pour lequel l'alerte a été donnée à temps.

Les accidents les plus catastrophiques dont j'ai trouvé mention sont les suivants :

Macchu 2 (Inde)

- rompu en août 1979 par submersion
- 26 m au-dessus de la fondation
- 100 hm³
- plusieurs milliers de morts.

South Fork River (Pennsylvanie — USA)

- rompu vers 3 h le 31/5/1889
- 21,9 m au-dessus de la fondation la plus basse
- 18,5 hm³ de capacité
- barrage en terre emporté par une crue
- 2 000 à 4 000 morts selon les auteurs.

Iruka (Japon)

- rompu en 1868
- 1 200 morts.

Saint Francis (Californie — USA)

- rompu à minuit le 12/3/1928
- 47 hm³
- barrage-poids en béton
- 400 à 2 000 morts selon les auteurs.

Oros (Brésil)

- rompu en 1960
- 1 000 morts.

Puentes (Espagne)

- rompu le 30/4/1802
- 50 m au-dessus du sol
- barrage-poids
- 608 morts.

Malpasset (France)

- rompu le 2/12/1959 à 21 h
- 66,5 m de haut
- voûte
- 421 morts.

Austin (USA)

- rompu le 11/9/1911
- 14 m de haut
- 0,75 hm³
- barrage-poids
- 80 à plus de 700 morts selon les sources.

Vega de Terra (Espagne)

- rompu en 1959
- 34 m de haut
- 8 hm³
- barrage à contreforts
- 144 à près de 400 morts selon les sources.

Quebrada La Chapa (Colombie)

(p.m. : barrage naturel)

- rompu en 1963
- 250 morts.

Hyokiri (Corée)

- rompu en 1961
- 250 morts.

Dale Dyke (G.B.)

- rompu en 1864
- 250 morts.

Canyon Lake (USA — Dakota du Sud)

- rompu en juin 1972 (à la suite de fortes pluies)
- 230 morts.

Sempor (Indonésie)

- rompu en décembre 1967 (en cours de chantier)
- barrage en enrochement
- 200 morts.

Gleno (Italie)

- rompu le 1/12/1923
- 15 m au-dessus du sol (22 au-dessus des fondations)
- barrage à contreforts
- plus de 100 à 600 morts selon les sources.

Buffalo Creeck (USA — Virginie occidentale)

- rompu en février 1972 suite à fortes pluies
- (retenue d'eau usée)
- 125 morts.

Bouzey (France)

- rompu le 27/4/1895
- 15 m au-dessus du sol (22 au-dessus des fondations)
- barrage-poids
- 86 à plus de 100 morts selon les sources.

Babü Yar (URSS)

(p.m. : barrage vraisemblablement < 15 m)

- rompu en 1961
- 145 morts.

Nanaksagar (Inde)

- rompu le 7/9/1967
- 15,6 m de haut
- barrage en terre
- 100 morts.

Del Monte (Colombie)

- rompu en octobre 1976
- 80 morts.

Santo Thomas (Philippines)

- rompu en 1976 (crue sur le chantier)
- barrage en terre
- 80 morts.

A ces catastrophes, on peut ajouter celle de Vajont (Italie) qui, bien qu'elle ne soit pas imputable à une rupture de barrage, causa environ 2 000 morts.

J'emprunte à Niklaus Schnitter le passage suivant :

“La gravité des ruptures de barrage peut se juger au nombre de morts. Le nombre de morts n'était indiqué que dans 40 % des cas⁽¹⁶⁾, mais on peut supposer que les grandes catastrophes n'ont pas été passées sous silence et qu'elles sont toutes comprises dans ces 40 %. Il est possible, dans ces conditions, d'établir une relation entre le nombre des grandes catastrophes et le nombre total de ruptures. D'autre part, parmi ces 40 % de cas de rupture, la moitié ne fit aucun mort d'après les compte-rendus. Grâce à ces éléments d'information, il a été possible de déterminer la distribution de fréquence des morts par rupture de barrage” :

Ce graphique, valable à l'échelle du monde, est peut-être optimiste en ce qui concerne les barrages construits dans des pays à densité de population élevée.

On doit toutefois noter qu'une rupture de barrage est très loin d'entraîner nécessairement des pertes en vie humaine et que la rupture du barrage de Malpasset, qui a endeuillé notre pays, constitue environ la 7^e catastrophe (par ordre d'importance) connue au monde.

Bien que cela n'ait pas grand sens, on pourrait déduire de ce graphique qu'en moyenne une rupture de “grand barrage” est à l'origine d'une cinquantaine de mort⁽¹⁷⁾.

(16) Dans les fiches relatives aux accidents recensés en 1965 par la Commission Internationale des Grands Barrages.

(17) On peut également rappeler à combien ont été évalués les dommages matériels associés à quelques ruptures :

Teton	400 ou 450 millions dollars US	(1976)
Johnstown	100	“
Malpasset	68	“
Euclides de Cunha	} 60 millions dollars US	
Armando Salles de Oliveira		
Baldwin Hills	50 millions dollars US	
Pardo	20	“
Buffalo Creeks	50	(1972)
Canyon Lake	100	(1972)

Signes précurseurs des ruptures

Nous venons de voir le rôle fondamental que peut jouer l'alerte pour réduire les pertes en vies humaines. Il est donc important de savoir si un barrage “prévient” de sa rupture.

Dans de nombreux cas, personne ne se trouvait sur les lieux dans les heures qui ont précédé la rupture (ou, ce qui revient au même, les témoins sont morts dans l'accident) et l'on ne connaît pas, ou mal, l'enchaînement des circonstances qui ont conduit à la catastrophe.

Nous examinerons successivement les 3 grandes catégories de rupture (1^{ère} mise en eau, submersion, rupture en cours d'exploitation) sachant que les ruptures en cours de travaux ne causent généralement que peu de morts (en dépit des 2 exemples malheureux de Sempor et de Santo Thomas).

1) *Première mise en eau* : à condition de procéder à un remplissage progressif et de suivre attentivement l'évolution du barrage, de ses appuis et des fondations, on devrait vraisemblablement constater, au moins quelques heures à l'avance, l'approche d'une éventuelle rupture. Quelques cas célèbres permettent de le penser :

- pour le barrage du Puentes, en 1802, un messager court avertir la population mais est rattrapé par les flots,
- au barrage de St-Francis (1928) les fuites augmentent fortement pendant l'après-midi (destruction à minuit) et notamment le barrage se vide de 10 cm dans la 1/2 heure précédant la rupture,
- pour Malpasset (1959) l'on n'avait pas su interpréter, à l'époque, les signes avertisseurs, mais ceux-ci ont manifestement existé (de plus le remplissage a été rapide),
- au barrage de Teton (1976) les ouvriers présents ont constaté le début de la destruction et ont eu le temps de donner l'alerte.

2) *Submersion* : le signal d'alerte est essentiellement constitué par la pluie ; dans les bassins importants la montée de la crue est suffisamment lente pour que l'alerte soit donnée en temps utile ; pour les barrages contrôlant de petits bassins versants (de l'ordre de la centaine de kilomètres carrés) et qui souvent ne sont pas gardiennés, l'alerte sera d'autant plus difficile à organiser que la crue peut être consécutive à un orage relativement localisé au bassin de la retenue et sur lequel l'attention n'est pas immédiatement attirée.

Dans ce cas, et surtout s'il s'agit d'ouvrage en remblai, les ouvrages d'évacuation doivent être dimensionnés d'une façon particulièrement prudente et ne pas comporter d'organes mobiles (à moins que ceux-ci ne soient automatiquement asservis au niveau amont).

Il est toutefois à noter que même les ouvrages en remblai supportent souvent des déversements importants avant de se rompre : à South Fork River (en 1889 aux U.S.A.) le barrage déverse plusieurs heures avant de se rompre en 1/2 heure ; à Euclides de Cunha (en 1977 au Brésil) un barrage homogène en terre déverse 7 h avant de se rompre, la lame déversante atteignant au moins 1,26 m.

3) *Rupture en service* : on connaît quelques rares cas, parmi les incidents n'ayant pas donné lieu à rupture, où les phénomènes dangereux se sont manifestés prati-

quement instantanément (glissement du talus aval d'un barrage en terre aux U.S.A., éboulement rocheux à l'aval d'un barrage en Autriche). Toutefois, dans de nombreux cas des signes précurseurs se sont manifestés. Ils se manifesteront aujourd'hui, compte tenu du développement des moyens de contrôle et de surveillance, dans la très grande généralité des cas. On peut par exemple citer les cas des ruptures suivantes :

- Baldwin Hills (1963 — U.S.A.) rompu à la suite de mouvements de terrains qui se sont étendus sur plusieurs années;
- Greenlick (1904 — U.S.A.) rompu à la suite d'une fuite importante qui avait constamment augmenté pendant ses 3 années de vie;
- Julesburg (1910 — U.S.A.) idem;
- Sinker Creek (1943 — U.S.A.), fuite importante et saturation progressive du talus aval;
- La Laguna (1969 — Mexique) rompu à la suite d'un lent mouvement du sous-sol;
- Walter Bouldin (1967 — U.S.A.) rompu à la suite d'un glissement progressif du talus amont.

Conclusion

Cette étude permet d'affirmer qu'en moyenne un barrage est un ouvrage très sûr qui ne fait pas courir de risque déraisonnable à la population, même dans les pays qui attribuent un prix élevé à la vie humaine.

Il y a lieu en particulier de noter les progrès sensibles constatés depuis une cinquantaine d'années.

Mais il ne faudrait pas en tirer une fausse impression de sécurité et oublier que ce résultat n'a été atteint que grâce aux grandes précautions prises à tous les stades : conception, réalisation et exploitation.

Des progrès peuvent certainement encore être obtenus ; il convient donc de poursuivre les efforts actuels et de ne pas relâcher l'attention apportée tant à la construction qu'à l'exploitation des barrages.

ANNEXE 1 ANALYSE DU REGISTRE MONDIAL DES BARRAGES

Le Registre Mondial des Barrages regroupe, à fin 1977, tous les grands barrages des 71 pays membres de la Commission Internationale des Grands Barrages (c'est-à-dire de la quasi totalité des pays possédant de tels ouvrages) et même d'un certain nombre de pays non membres (Angola, Mozambique, ...). Toutefois dans le cas de la Chine, qui n'a adhéré qu'en 1974 à la Commission, le Registre ne comporte qu'une liste de 500 ouvrages pris parmi les plus importants.

Ce Registre ne comporte en principe que les ouvrages "de plus de 15 m de hauteur, mesure prise de la partie la plus basse de la surface générale des fondations jusqu'à la crête".

Toutefois des barrages de 10 à 15 m peuvent figurer s'ils présentent un intérêt particulier (longueur, largeur, capacité importante, etc. ...).

L'on constate qu'en fait les différents états ont utilisé de façons très diverses cette possibilité d'extension, certains mentionnant même des ouvrages de moins de 10 m, exclus en principe du Registre. Si la totalité des 2 003 barrages japonais ont plus de 15 m, une large part des 5 618 ouvrages américains ont moins de 15 m (ou ont une hauteur non précisée).

Pour procéder à une étude statistique tant soit peu précise, il était donc nécessaire de ne retenir, dans la liste du Registre mondial, que les ouvrages d'une hauteur effectivement égale ou supérieure à 15 m.

Cette annexe présente les résultats obtenus.

Etats Unis

Les Etats-Unis occupant le 1/3 du Registre mondial (hors Chine) et ayant présenté par ailleurs une très forte proportion de petits ouvrages, il convenait d'examiner plus particulièrement les tableaux correspondants qui permettent de dégager les résultats ci-après :

années de mise en service	< 15 m	barrages de hauteur non précisée	≥ 15 m	Total
avant 1900	37	42	55	134
1900 à 1909	47	37	106	190
1910 à 1919	47	69	212	328
1920 à 1929	54	47	302	403
1930 à 1939	57	101	285	443
1940 à 1949	53	38	238	329
1950 à 1959	244	57	576	877
1960 à 1969	491	237	1 142	1 890
1970 à 1977	157	69	798	1 024
Total	1 187	717	3 714	5 618

Ainsi plus du tiers des barrages des Etats-Unis inscrits au Registre ont moins de 15 m ou sont de hauteur non précisée (et, semble-t-il, la plupart du temps inférieure à 15 m).

Le redressement à opérer est particulièrement important, s'agissant des barrages antérieurs à 1900⁽¹⁸⁾.

Signalons par ailleurs que les U.S.A. ont présenté à la Commission un tableau statistique portant théoriquement sur les barrages du Registre et les regroupant par type, âge et hauteur. En fait cette statistique porte sur un total de 6 433 ouvrages (qui comprend manifestement de nombreux barrages inférieurs à 15 m) contre 5 366 inscrits au Registre. Aucune explication de cette différence n'est fournie.

L'analyse des indications figurant au Registre permet de dresser, pour les seuls ouvrages de plus de 15 m le tableau récapitulatif suivant, à comparer au tableau fourni par les U.S.A. et reproduit ensuite.

(18) Par ailleurs les tableaux signalent la construction de barrages de

- 274 m en 1850 (pour une capacité de 800 000 m³)
- 122 m en 1884 (pour une capacité de 200 000 m³)
- 84 m en 1887 (pour une capacité de 1,5 millions de m³)
- 205 m en 1896 (pour une longueur en crête de 75 m)

Ces valeurs sont évidemment erronées et j'ai supposé qu'il fallait les diviser par 10. D'autres erreurs de cette nature subsistent, tel vraisemblablement ce barrage de 82 m de haut et de 416 m de longueur en crête, mis en service en 1905 et ne contenant que 7 millions de m³.

T y p e	Total						P é r i o d e d' a c h è v e m e n t														
		jusqu'en 1950					1951 - 1971					1972 - 1974					1975 - 1977				
		h a u t e u r																			
		≤30	31-60	61-100	101-150	>150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	>150
terre (1)	2 524	404	140	25	3	-	1 150	199	63	9	7	286	45	12	3	-	142	28	6	1	1
enrochement (2)	118	25	17	5	1	-	12	20	13	8	-	7	3	1	2	-	-	2	1	1	-
terre/enroch. (3)	153	25	10	4	1	-	35	24	8	1	-	18	8	4	1	-	4	7	2	1	-
remblais (1+2+3)	2 795	454	167	34	5	-	1 197	243	84	18	7	311	56	17	6	-	146	37	9	3	1
poids (4)	376	149	86	25	3	2	59	21	17	4	-	2	3	-	1	1	-	2	1	-	-
contreforts (5)	58	45	10	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
voute (6)	148	35	38	26	5	2	6	13	10	3	7	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-
voute-multiple (7)	38	14	15	4	1	-	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
div.maçonnerie (8)	12	6	3	2	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maçonneries (4&8)	632	249	152	58	9	4	68	36	29	7	7	3	3	-	1	1	-	3	2	-	-
mixtes & divers (9)	287	72	35	5	-	-	51	31	21	3	-	20	15	12	3	-	4	10	3	1	1
total (1 à 9)	3 714	775	354	97	14	4	1 316	310	134	28	14	334	74	29	10	1	150	50	14	4	2
		←----- 1 244 -----→					←----- 1 802 -----→					←----- 448 -----→					←----- 220 -----→				

Ty p e	Total	jusqu'en 1950					P é r i o d e d' a c h è v e m e n t 1951 - 1971					1972 - 1974					1 975 - 1977				
							h a u t e u r														
		≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150	≤ 30	31-60	61-100	101-150	> 150
terre (1)	5 278	1 227	162	29	3	6	2 733	281	82	17	11	429	65	28	5	-	150	36	9	4	1
enrochement (2)	201	55	17	8	2	-	42	21	17	4	1	8	4	2	3	-	4	7	3	2	1
remblais (1 + 2)	5 479	1 282	179	37	5	6	2 775	302	99	21	12	437	69	30	8	-	154	43	12	6	2
poids (3)	723	405	91	26	3	3	118	32	22	6	1	5	7	-	1	1	-	1	1	-	-
contreforts (4)	31	25	5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
voute (5)	169	58	36	25	4	2	10	9	13	3	6	2	-	-	-	-	-	1	-	-	-
voute-multiple(6)	31	13	12	3	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maçonneries(3 à 6)	950	501	144	52	7	5	128	43	37	9	7	7	7	-	1	1	-	2	1	-	-
total (1 à 6)	6 433	1 783	323	91	12	11	2 903	345	136	30	19	444	76	30	9	1	154	45	13	6	2
		←----- 2 220 -----→					←----- 3 433 -----→					←----- 560 -----→					←----- 220 -----→				

Remarque : ce tableau est déduit de la deuxième mise à jour du Registre Mondial

Ces tableaux sont assez cohérents sauf sur 2 points :

- en ce qui concerne les barrages de moins de 30 m, pour les motifs déjà indiqués ;
- en ce qui concerne les barrages de plus de 150 m antérieurs à 1950 : les erreurs manifestes signalées dans le renvoi de bas de page (18) expliquent au moins en partie cet écart.

Autres pays

Certains pays, dont le Japon, qui, avec 2 003 ouvrages en service à la fin de 1977, est le deuxième pays au monde (Chine exclue), ne font figurer exclusivement que des barrages de plus de 15 m.

D'autres présentent un grand nombre d'ouvrages inférieurs à 15 m.

Une analyse du Registre conduit aux résultats suivants :

	fin période consi- dérée	< 15 m	non précisée	≥ 15 m	total	dont anté- rieurs à 1900	< 15 m	non précisée	≥ 15 m	total
Afrique du Sud	1977	29	3	285	317		—	—	1	1
Albanie	1971	2	—	23	25		—	—	—	—
Algérie	1977	1	—	20	21		—	—	3	3
Allemagne	1977	18	—	111	129		—	—	7	7
Argentine	1977	3	—	79	82		—	—	—	—
Australie	1977	28	2	288	318		5	1	26	32
Autriche	1977	—	—	53	53		—	—	—	—
Belgique	1977	1	—	10	11		—	—	—	—
Brésil	1977	48	3	332	383		—	—	—	—
Bulgarie	1969	1	—	65	66		—	—	—	—
Canada	1977	116	1	388	505		2	—	1	3
Chili	1977	4	1	54	59		1	—	1	2
Chypre	1977	2	—	25	27		—	—	—	—
Colombie	1977	—	—	28	28		—	—	—	—
Corée	1977	7	4	745	846		—	—	—	—
Costa Rica	1977	—	—	3	3		—	—	—	—
Côte d'Ivoire	1977	—	—	3	3		—	—	—	—
Danemark	1977	3	—	3	6		—	—	—	—
Egypte	1974	—	—	3	3		—	—	—	—
Equateur	1977	—	—	4	4		—	—	—	—
Espagne	1977	18	10	613	804		29	1	20	50
Finlande	1977	6	—	43	49		—	—	—	—
France	1977	13	18	353	384		—	8	26	34
Ghana	1971	—	—	3	3		—	—	—	—
Gde Bretagne	1977	78	1	444	523		43	1	168	212
Grèce	1977	—	—	9	9		—	—	—	—
Hongrie	1977	2	—	2	4		—	—	1	1
Inde	1977	80	17	658	755		2	4	33	39
Indonésie	1971	—	—	19	19		—	—	—	—
Irak	1977	1	—	4	5		—	—	—	—
Iran	1977	—	—	15	15		—	—	—	—
Irlande	1977	—	4	11	15		—	3	—	3
Islande	1977	2	—	7	9		—	—	—	—
Italie	1977	10	—	392	402		—	—	7	7
Japon	1977	—	—	2 003	2 003		—	—	474	474
Jordanie	1972	—	—	3	3		—	—	—	—
Liban	1974	—	—	5	5		—	—	—	—
Luxembourg	1977	—	—	3	3		—	—	—	—
Malaisie	1977	—	2	12	14		—	2	—	2
Maroc	1977	—	—	23	23		—	—	—	—
Mexique	1977	89	—	342	431		9	—	6	15
Nigéria	1974	1	—	4	5		—	—	—	—
Norvège	1977	—	—	212	212		—	—	1	1
Nelle Zélande	1977	2	—	64	66		—	—	1	1
Pakistan	1971	1	—	29	30		1	—	—	1
Paraguay	1974	—	—	1	1		—	—	—	—
Pays Bas	1977	—	—	7	7		—	—	—	—
Pérou	1971	21	6	27	54		11	6	8	25
Philippines	1977	—	—	8	8		—	—	—	—
Pologne	1977	—	1	19	20		—	—	—	—
Portugal	1977	—	—	52	52		—	—	—	—
République Dominicaine	1977	—	—	2	2		—	—	—	—
Rhodésie	1974	3	—	64	67		—	—	—	—
Roumanie	1977	15	—	64	79		—	—	—	—
Soudan	1974	—	—	4	4		—	—	—	—
Sri Lanka	1977	29	—	35	64		10	—	3	13
Suède	1977	—	—	133	133		—	—	—	—
Suisse	1977	—	—	126	126		—	—	2	2
Syrie	1972	—	—	12	12		—	—	—	—

	fin période consi- dérée	< 15 m	non précisée	≥ 15 m	total	dont anté- rieurs à 1900	< 15 m	non précisée	≥ 15 m	total
Tchécoslovaquie	1977	10	—	115	125		3	—	11	14
Thaïlande	1977	29	—	26	55		—	—	—	—
Tunisie	1977	—	—	20	20		—	—	—	—
Turquie	1977	6	—	63	69		5	—	2	7
U.R.S.S.	1977	—	—	71	71		—	—	—	—
Uruguay	1977	—	—	5	5		—	—	—	—
Vénézuela	1977	12	2	35	49		1	—	—	1
Yougoslavie	1977	9	1	82	92		—	—	1	1
Zambie	1977	—	—	3	3		—	—	—	—
Total des pays membres (hors Chine & USA)		953	76	8 769	9 798		122	26	803	951
Pays non membres		8	1	203	212		—	—	2	2
Total général (hors Chine & USA)		961	77	8 972	10 010		122	26	805	953

ANNEXE 2

RUPTURES DE GRANDS BARRAGES ANTÉRIEURES AU 31/12/65

Cette liste est pour l'essentiel déduite de l'ouvrage "Leçons tirées des accidents de barrages" publié par la Commission Internationale des Grands Barrages, compte tenu des corrections apportées par Niklaus Schnitter dans l'article "Sûreté statistique des barrages" paru dans la revue Wasser — Energie — Luft n° 5 — 1976.

J'ai en outre introduit des renseignements tirés de l'exposé "Hazards and Risks to third parties from dams" présenté le 11/9/1978 par R.E. Coxon et F.N. Griffiths devant le Comité Britannique des Grands Barrages.

J'ai également pris en considération une communication espagnole présentée au Congrès de New Delhi (1979) de la C.I.G.B. ainsi qu'une communication indienne.

J'ai tenu également compte des recherches effectuées par le Service de la Production Hydraulique d'E.D.F. sur certains cas litigieux.

Ces trois dernières sources d'information m'ont conduit à apporter les modifications suivantes à la liste de la C.I.G.B. modifiée par Schnitter :

12 suppressions correspondant à :

— 5 accidents sans ruptures : Redbank Creek en Australie, les 2 premiers accidents de Castlewood, le 2^e accident de Sweetwater (U.S.A.) et le 2^e accident de Bilberry (G.B.) ;

— 7 barrages inférieurs à 15 m : Goodrich (rompu 2 fois), Grass Valley, Hatchtown (2 premières ruptures), Lima Alamo, tous aux U.S.A. (le barrage d'Alamo, ajouté par Schnitter s'est vidé progressivement par ses fondations sans que le barrage ait été avarié).

7 adjonctions : Iruka au Japon, Bayless (1^{ère} rupture en 1910), Cazadero et Gallinas aux U.S.A. (l'enquête de la C.I.G.B. comportait effectivement l'erreur relevée par Schnitter, mais un barrage en maçonnerie et bois construit en 1910 a vu sa partie en bois emportée par une crue en 1957), Oros au Brésil (barrage en cours de construction submergé par une crue), Hyokiri en Corée (bien que ce barrage ait peut-être une hauteur inférieure à 15 m ; l'enquête de la C.I.G.B. ne portait pas sur ce pays), Torrejon Tajo en Espagne (rupture d'une vanne en cours de construction : 30 morts).

Pays	Nom du barrage	Mentionné au registre mondial	Année d'achèvement	Année de la rupture	Volume (Mm ³)	Hauteur (m)	Type de barrage
Algérie	Cheurfas	oui	1882	1885	17	42	poids
"	Fergoug	non	1871	1872	30	43	poids
"	"	"	1871	1881	"	"	"
"	"	"	1885	1927	"	"	"
"	St-Lucien	non	1861	1862	2	27	terre
"	Sig	non	1858	1885	4	21	poids
"	Tabia	non	1876	1876	?	25	terre ⁽¹⁾
Australie	Briseis	oui	1934	1929	?	27	terre ⁽¹⁾
Brésil	Oros	?	1962	1960			terre ⁽¹⁾
Canada	Scott Falls	non	1921	1923	11	15	poids
Colombie	La Regadera	oui	1938	1937	4	37	terre ⁽²⁾
Corée	Hyokiri			1961			
Tchécoslovaquie	Bila Desna	non	1915	1916	0	17	terre
France	Bouzey	non	1888	1895	7	22	poids
"	Malpasset	non	1954	1959	47	66	voûte
Gde Bretagne	Bilberry	non	1840	1852	2	32	terre
"	Dale Dike	non	1863	1864	3	29	terre
"	Rhodesworth	oui	1855	1852	2	29	terre ⁽³⁾
"	Torside	oui	1855	1854	7	38	terre ⁽³⁾
"	Woodhead	non	1851	1851	5	28	terre
Inde	Ahraura	oui	1953	1953	61	26	terre
"	Kaddam	non	1957	1958	215	41	terre
"	Kedar Nala	non	1964	1964	17	20	terre
"	Khadakwvasla	oui	1879	1961	137	32	poids
"							rupture en
"							série entraînée
"							par celle de Panshet
"	Kharagpur	non	1956	1961	55	24	terre
"	Kundli	non	1924	1925	0	45	poids
"	Lower Khajuri	non	1949	1949	43	16	poids
"	Pagara	oui	1927	1943	166	30	terre ⁽¹⁾
"	Panshet	non	1961	1961	212	49	poids
"	Tigra	non	1917	1917	124	28	poids
"	Waghad	oui	1883	1883	17	32	terre
Italie	Gleno	non	1923	1923	5	49	contreforts
"	Zerbino	non	1924	1935	10	16	poids
Japon	Ashizawa	non	1912	1956	?	15	terre
"	Heiwaike	non	1949	1951	?	20	terre
"	Iruka	non	1633	1868			
"	Kogoetameike	non	1807	1959	?	16	terre
"	Komoro	non	1927	1928	?	16	contreforts
"	Ogayarindo Tameike	oui	1944	1963	?	19	terre
Afrique du Sud	Bon Accord	oui	1925	1937	31	18	terre
Espagne	Puentes	non	1791	1802	?	50	poids
"	Vega de Tera	non	1956	1959	7	34	contreforts
"	Terrejon Tajo	oui	1967	1965	62	176	poids
Suède	Selsfors	oui	1944	1943	?	21	contreforts ⁽⁴⁾
Turquie	Emali 1	oui	1893	1916	2	18	poids
Yougoslavie	Ovcar Banja	oui	1952	1965	3	27	terre
U.S.A.	Anaconda	non	1898	1938	?	22	terre
"	Angels	non	1895	1895	?	16	poids
"	Apishapa	oui	1920	1923	23	35	terre
"	Ashley Dam	oui	1908	1909	?	18	contreforts
"	Austin	non	1893	1900	21	21	poids
"	Baldwin Hills	oui	1951	1963	1	80	terre
"	Balsam	non	1927	1929	?	18	terre
"	Bayless	non	(1909	1910)			poids
"	"	"	(1909	1911)	1	15	poids
"	Black Rock	oui	1907	1909	19	21	enrochement
"	Bully Creek	non	1913	1925	20	38	enrochement
"	Castlewood	non	1890	1933	4	28	enrochement
"	Cazadero	?	1906	1965			enroc. & bois
"	Chamberslake	non	1885	1891	10	17	terre
"	"	"	1892	1907			
"	Corpus Chris	oui	1930	1930	?	32	terre
"	Cuba réservoir	non	1851	1868	?	16	terre
"	Dykstra	non	?	1926	?	15	terre
"	Elwha	oui	1911	1912	41	34	contreforts ⁽²⁾
"	English	non	1878	1883	60	31	divers
"	Fred Burr	oui	1947	1948	1	18	terre
"	Gallinas	?	1910	1957			
"	Graham Lake	non	1922	1923	197	34	terre

Pays	Nom du barrage	Mentionné au registre mondial	Année d'achèvement	Année de la rupture	Volume (Mm ³)	Hauteur (m)	Type de barrage
"	Greenlick	oui	1901	1904	1	19	terre
"	Hatchtown	non	1908	1914	15	19	terre
"	Hauser Lake	non	1906	1908	?	21	divers
"	Hebron	non	(1913	1914)	?	17	terre
"	"		(1913	1942)			
"	Jenning D 3	non	1962	1963	?	21	terre
"	Julesburg	oui	1903	1910	30	16	terre
"	Lake Francis	non	1899	1899	1	15	terre
"	Lake Lanier	non	1925	1926	?	19	voûte
"	Lake Tox a way	non	1902	1916	13	19	terre
"	Lake Vera	non	1880	1905	?	15	enrochement
"	Little Deer Creek	non	1962	1963	2	26	terre
"	Littlefield	oui	1929	1929	?	37	enrochement ⁽⁵⁾
"	Long Tom	non	1915	1916	?	18	terre
"	Lookoutshoal	oui	1915	1916	49	25	terre
"	Lower Otay	non	1897	1916	52	41	remblais
"	Lyman	non	1913	1915	44	20	terre
"	Mammoth	non	1916	1917	14	23	terre ⁽⁶⁾
"	Mac Mahon Gull	oui	1924	1926	?	17	terre
"	Mill Creek C	oui	1899	1957	?	20	divers
"	Moyie River	non	?	1926	?	16	voûte
"	Owen	oui	1915	1914	60	17	terre
"	Owerholser	non	1920	1923	19	17	contrefort
"	St. Francis	non	1926	1928	47	56	poids
"	Schaeffer	oui	1911	1921	?	30	terre
"	Sepulveda	non	1914	1914	?	20	terre
"	Sinker Creek	non	1921	1943	3	21	terre
"	Snake Ravine	non	1898	1898	?	20	terre
"	South Fork	non	1852	1889	19	22	terre
"	Stockton Creek	oui	1949	1950	1	33	terre
"	Stony River	non	1913	1914	7	16	contrefort
"	Sweet Water M	oui	1888	1916	?	35	poids & terre ⁽²⁾
"	Swift	oui	1914	1964	37	48	enrochement
"	Toreson	non	1898	1953	1	15	terre
"	Utica Res. N 3	non	1873	1902	?	21	terre
"	Wagner Creek	non	1918	1938	1	15	terre
"	Walnut Grove	non	1888	1890	11	34	enrochement
"	Wisconsin Dells	oui	1909	1911	25	18	enrochement
"	Wyandotte County	oui	1941	1937	9	28	terre ⁽⁷⁾

TOTAL : 108 ruptures ayant affecté 103 barrages

- (1) rupture en cours de construction (déversement)
 (2) rupture en cours de construction (renard en fondation)
 (3) rupture en cours de construction
 (4) renard en fondation provoque effondrement partiel en cours de construction.
 (5) accident en cours de construction (renard dans corps de l'ouvrage)
 (6) accident en cours de construction (renard)
 (7) digue de terre, prolongeant le barrage, enlevée par une crue

ANNEXE 3

Nom du barrage	Pays	Date d'achèvement	Hauteur	Type	Date de rupture	Cause de la rupture
Pardo	Argentine	1940	15 m	Enroch.	12/69	Crue Défaut d'entretien
Armando Salles de Oliveira	Bésilil	1958	41 ou 32 m	Terre	20/01/77	Submersion
Euclydes de Cunha	Bésilil	1960	63 m	Terre	20/01/77	Submersion
Del Monte	Colombie	Non répertorié			10/76	Rupture d'une vanne (80 morts)
Odiel	Espagne	1970 (?)	35 m	Enroch.	1970	(1) Renard (100 morts)
Nanaksagar	Inde	1962	15,6 m	Terre	07/09/67	
Chitauni	Inde	Non répertorié		Enroch.	68	
Dhanibara	Inde	1975	20,7 ⁽²⁾ m	Terre	04/06/76	Submerslon
Manivali	Inde	1976	18,4 ⁽²⁾ m	Terre	19/07/76	1 ^{er} remplissage
Macchu 2	Inde	1973	26 m	Terre	08/79	Submersion
Sempor	Indonésie	commencé en 1967	53,65 m	Enroch.	12/67	Rupture en cours de chantier (200 morts)
Wadigatara	Lybie	1975 (?)	39 m	Terre	1975	Renard
La Laguna	Mexique	1912	17 m	Terre	1969	1 ^{er} remplissage
Bolan	Pakistan	1961	19 m	Terre	09/76	Renard
Santo Thomas	Philippines	commencé en 1975		Terre	1976	Submersion
Emery	U.S.A.	1850	15,30 m	Terre	1966	Crue (typhon sur le chantier (80 morts))
Whitewater Brook (Upper)	U.S.A.	1943	18,6 m	Terre	04/05/72	Renard
Sheep Creek	U.S.A.	1969	18 m	Terre	08/05/70	(corrosion conduite) Affouillements le long du chenal de déversement
Lake Barcroft	U.S.A.	1913	21 m	Poids et terre	21/06/72	Renard le long de la conduite d'évacuation des crues
Walter Bouldin	U.S.A.	1967	50 m	Terre	10/02/75	Brèche dans partie terre (crue)
Teton	U.S.A.	1976	120 m	Terre	05/06/76	? — Attribué à un glissement progressif du talus amont
TOTAL : 21 ruptures ayant affecté 21 barrages.						

(1) rupture en cours de construction (après rupture du batardeau)
(2) au-dessus du thalweg.