

LA SECURITE DES BARRAGES

**Exposé présenté à la 5ème Section du Conseil Général
du G.R.E.F. par M.J. DUNGLAS - I.C.G.R.E.F. - Directeur
Scientifique du CEMAGREF (1)**

--o--

I - LA SECURITE DES BARRAGES : UNE DOCTRINE EN EVOLUTION

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) définit comme barrage, toute barrière, tout remblai (y compris les barrages de stériles miniers) ou tout ouvrage qui retient ou peut retenir de l'eau, y compris les ouvrages annexes, la fondation et les appuis ainsi que l'équipement électrique et mécanique indépendamment de la destination de l'eau stockée. Pour la CIGB tout ouvrage mesurant plus de 15 m de haut par rapport à sa fondation la plus basse est un "grand barrage".

Il est clair que l'irrigation, les besoins humains, industriels, agricoles, la production d'énergie, la protection contre les crues, et de façon plus générale la régulation des débits des cours d'eau prennent une importance croissante et deviennent des éléments essentiels du développement social et économique de la plupart des nations.

Le nombre, l'importance, la sophistication technique des ouvrages augmentent au fil des années. Des sites de plus en plus difficiles sont exploités. Dans ces conditions, la rupture d'un barrage et l'onde de submersion qui en résulte prend toujours l'allure d'une catastrophe. Même si les désordres n'aboutissent pas à une rupture, la simple indisponibilité des ouvrages peut avoir des conséquences économiques très graves et entraîner une détérioration importante de l'environnement.

L'étude de la sécurité nécessite une approche à deux niveaux : celui du risque, et celui de la sûreté des ouvrages.

1. La notion de risque. Elle est elle-même complexe et en évolution.

Dans le langage des assureurs, le risque est une probabilité d'occurrence d'un événement aléatoire pouvant provoquer certains dommages ; c'est parallèlement l'intensité du dommage causé par cet incident. Intuitivement le risque est une combinaison des deux et très souvent il est quantifié sous la forme du produit d'une probabilité par l'expression numérique (en monnaie, en vies humaines ...) du dommage.

Dans l'histoire des assurances, les accidents naturels ou résultant de l'activité humaine étaient autrefois considérés comme ayant un caractère de fatalité et étaient surnommés "Acts of God".

Depuis une quarantaine d'années, une évolution irréversible des mentalités conduit à considérer tout accident ou toute catastrophe comme inacceptable. Chacun de ces événements fait maintenant systématiquement l'objet de protestations et d'accusations visant une entreprise, la société ou les pouvoirs publics. Pour le citoyen moyen et maintenant pour la justice il y a toujours un "responsable".

Au niveau individuel, il est d'observation courante que chacun pris isolément se croit volontiers plus adroit et plus chanceux que la moyenne vis à vis du risque. L'exemple le plus évident de ce comportement est celui de l'automobiliste.

(1) Reproduit dans le bulletin du C.I.E.H. avec l'aimable autorisation du Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 30 Rue Las Cases - 75007 PARIS, France.

Au niveau collectif la notion de prévention est trop souvent négligée surtout lorsqu'elle coûte cher. Néanmoins, quand le poids en retombe sur le gouvernement ou une entreprise publique, beaucoup réclament une sécurité "absolue" sans se rendre compte qu'un tel concept est hors de portée puisque d'un prix "infini".

Notons également que dans cette psychologie, l'assurance qui agit seulement sur la compensation des effets, joue un rôle pervers lorsqu'elle tend à réduire la prévention, coûteuse à priori, alors que les dommages résultant de l'accident sont bien remboursés.

Une notion émerge peu à peu chez les professionnels : celle du sentiment subjectif du risque. Disons sur ce point que les faibles probabilités, comme les très grandes sont très mal appréhendées.

Dans ce fil de pensées, on peut très bien appliquer aux barrages ce que le Pr. TELLER disait des risques nucléaires : "Le produit d'une probabilité très faible par un dommage potentiel très grand, tous deux mal connus, peut donner n'importe quelle quantité".

Les études récentes de risque les plus approfondies ont été réalisées aux USA par la Commission dirigée par le Pr. RASMUSSEN sur les réacteurs nucléaires à eau. Elles ont eu le mérite d'y intégrer (dans une certaine mesure) les défaillances humaines. Les risques nucléaires (en grande partie évalués à partir de calculs) y sont comparés systématiquement avec d'autres types de catastrophes d'origine naturelle ou artificielle.

Les courbes fréquences des accidents (Nombre par an) entraînant un nombre de décès supérieur à N, correspondant, sont reproduites dans les figures 1 et 2. Elles sont, bien entendu, susceptibles d'être critiquées. Elles ont toutefois le mérite de situer les ordres de grandeur.

On y voit que les risques liés aux barrages se situent pour un nombre de victimes potentielles inférieur à 100 nettement en-dessous de ceux dus aux incendies, aux explosions et aux catastrophes aériennes. Par contre la courbe est relativement peu plongeante quand le nombre de victimes augmente.

A titre de comparaison rappelons simplement qu'un européen a, en un an, une probabilité d'être tué par un accident individuel (essentiellement du fait des accidents d'automobiles) d'environ 3 à 4/10.000. La probabilité liée à l'ensemble des accidents collectifs (en y incluant les barrages) est de l'ordre de 10^{-6} pour un an.

Néanmoins et pour des raisons psychologiques variées, dans la plupart des esprits, la catastrophe est beaucoup plus crainte que l'accident individuel.

Toutefois, dans le cas des barrages (comme dans celui de n'importe quelle autre installation technique) le problème doit être analysé plus finement et, au cas par cas. Seule une faible fraction de la population est menacée directement par la rupture d'un barrage ; le risque qu'elle court ainsi est donc sensiblement plus élevé. Ce sentiment est assez fortement ressenti dans les agglomérations situées à l'aval immédiat des ouvrages.

.../...

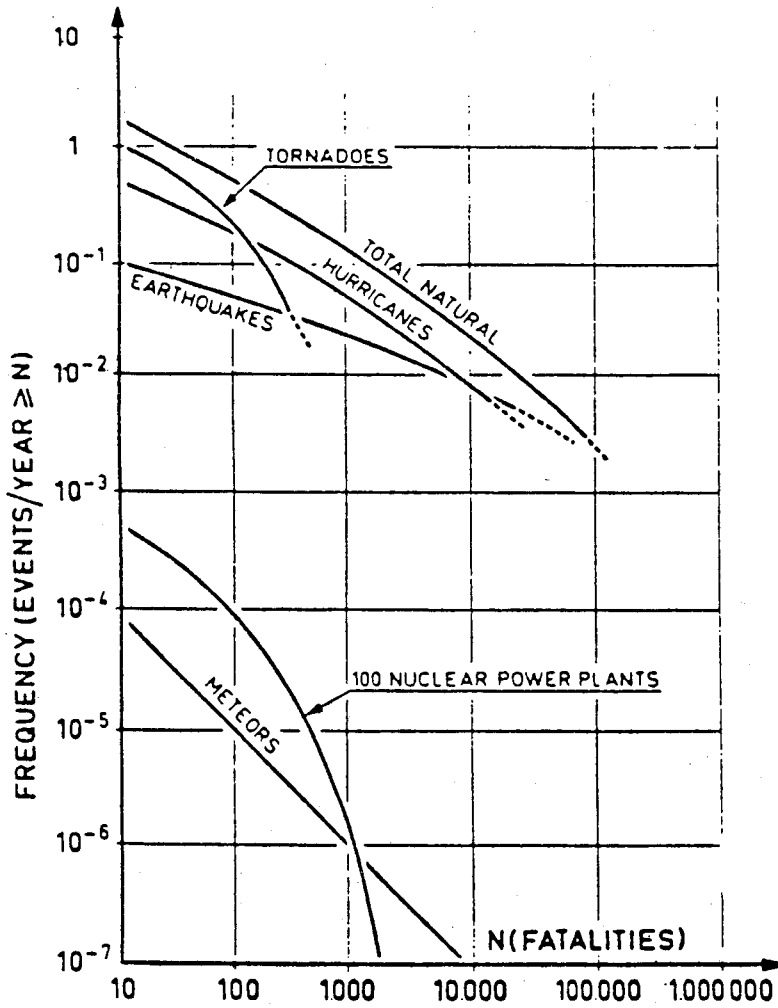


Fig. 1 - Fréquence des accidents d'origine naturelle entraînant un nombre de décès supérieur à N.

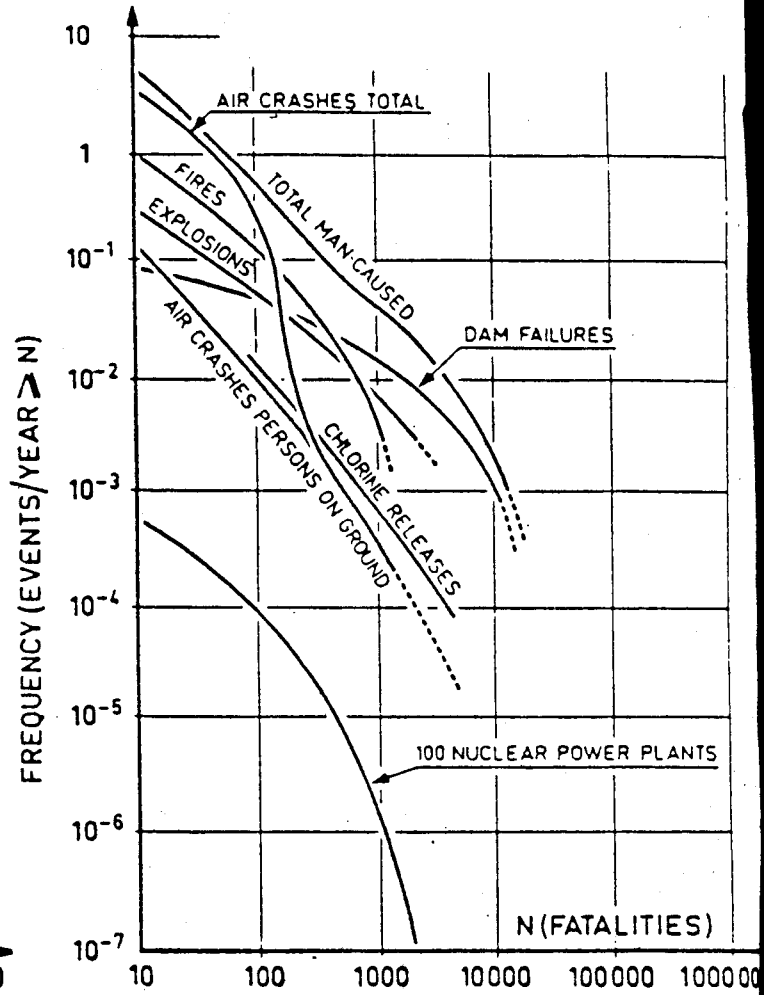


Fig. 2 - Fréquence des accidents d'origine humaine entraînant un nombre de décès supérieur à N.

.../...

La répartition suivant la hauteur est la suivante :

15 < h < 30	30 < h < 60	60 < h < 100	100 < h < 150	150 < h < 200	< h > 200
27.813	5.537	1.095	276	53	24
80 %	16 %	3 %	0,8 %	0,15 %	0,07

La répartition par type pour chaque tranche de hauteur est donnée dans le tableau ci-dessous.

Type	15-30m	30-60m	60-100m	100-150m	150-200m	200m
Terre-Enrochement	88.32%	66.05%	43.56%	42.03%	39.62%	25.00%
Béton Poids	7.99%	23.37%	32.97%	23.55%	15.09%	16.67%
Béton Voûte	2.79%	7.73%	18.63%	30.07%	45.29%	54.17%
Béton Contreforts	0.63%	1.97%	3.65%	4.35%	0.00%	0.00%
Béton Voûtes multiples	0.27%	0.87%	1.19%	0.00%	0.00%	4.16%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

.../...

Un des principaux éléments d'une politique de la sécurité est la gestion du risque. Plusieurs stratégies sont ainsi possibles : minimiser les pertes en vie humaine, minimiser les coûts, tenir compte des risques dits irréductibles (c'est-à-dire de ce qui se produirait de toutes façons, même en l'absence de barrage). La question est alors : dans le cadre d'un budget déterminé de sécurité quelle stratégie choisir, pour rendre le risque minimum ?

2. La notion de sûreté

Elle recouvre l'ensemble des dispositions de conception, de construction, d'exploitation et de surveillance prise pour protéger les zones menacées avec leur population, l'ouvrage et les personnels d'exploitation, et éviter tous les inconvénients liés à un arrêt de fonctionnement.

Une politique de sûreté commence au niveau des études, des spécifications. Elle se poursuit par les contrôles de construction, les essais de qualification et de réception. Elle intègre les essais de mise en eau. Elle conduit à analyser non seulement un fonctionnement normal mais aussi un fonctionnement perturbé en circonstances exceptionnelles. Elle amène à imaginer divers types d'incidents et d'accidents et divers types d'agressions (naturelles et artificielles). Une analyse des risques de sabotage s'avère indispensable. Certains types d'ouvrages y sont beaucoup plus sensibles que d'autres.

II - LES RUPTURES DE BARRAGES ET LEUR STATISTIQUE

1. Nombre total d'ouvrages

Le registre mondial des barrages donnait pour 1982 un total d'ouvrages de hauteur supérieure à 15 m de 34.798 pour l'ensemble du monde y compris la Chine (ce pays représentant à lui seul 18.595 barrages).

La répartition dans le reste du monde était de :

Etats Unis	: 5.338
Japon	: 2.142
Europe	: 3.800
Reste du monde (Chine exclue)	: <u>4.923</u>
	16.203

.../...

2. Recensement et statistiques des ruptures

M. GOUBET, Président du Comité Technique Permanent des Barrages, a réalisé en 1979 une étude très complète sur les ruptures basée sur les publications de la Commission Internationale des Grands Barrages et sur des éléments d'informations complémentaires venant en particulier d'E.D.F.

L'essentiel des tableaux ci-dessous proviennent de cette étude.

Par ailleurs, la CIGB a publié en décembre 1983 un ouvrage extrêmement détaillé de 360 pages sur les détériorations et ruptures.

M. GOUBET a recensé 125 ruptures sur un échantillon de 15.000 ouvrages (hors Chine), soit un pourcentage d'environ 0,8 %. D'après la CIGB les cas de ruptures représentent environ 10 % des détériorations graves constatées.

L'étude de M. GOUBET donne finalement les statistiques suivantes :

2.1. Il y a en moyenne, et très approximativement 1,5 rupture par an sur l'échantillonnage de 15.000 ouvrages considérés. La fréquence de l'événement "rupture d'un barrage dans l'ensemble mondial des ouvrages" est donc de 10^{-4} /an. En fait de nombreux paramètres jouent.

2.2. L'âge des ouvrages accidentés et leur date de construction sont déterminants.

Fréquence exprimée en 10^{-4}							
Année de mise en service	Nombre d'années entre la mise en service et la rupture						
	Pendant la construction	0 à 5	6 à 10	11 à 20	21 à 40	41 à 60	> 60
< 1900	30	23	8	5	4	1	1
1900 à 09	0	37	10	3	0	1	
1910 à 19	33	31	3	3	1	4	
1920 à 29	10	23	0	3	0,5		
1930 à 39	20	2	0	0	0		
1940 à 49	20	8	0	1	1		
1950 à 59	0	4	1	2			
1960 à 69	11	4	0	2			
1970 à 78	7	0,7					
Total	11	9	2	2	1	2	

L'examen du tableau permet de constater que :

- les ruptures en cours de construction sont sensiblement moins fréquentes sur les barrages récents. On prend maintenant beaucoup plus de précautions durant cette période ;
- les risques les plus importants se situent pendant les cinq premières années. Le premier remplissage est vraiment une période critique ;
- la fiabilité globale est largement supérieure sur les barrages récents ;
- les barrages anciens, bien conçus sont sûrs.

Toutefois il faut se rappeler qu'un barrage vieillit et que certains de ses organes doivent être revus (en particulier les évacuateurs de crues).

2.3. La statistique des ruptures varie également beaucoup suivant la zone géographique.

Le tableau ci-dessus donne le nombre de ruptures sur des ouvrages construits depuis 1900.

	Barrages mis en service entre 1900 et 1974	Ruptures correspondantes
U S A	3.407	46 à 48
Japon	1.464	4
Europe	2.177	6
Reste du Monde (Chine exclue)	3.776	25 à 28

Les Etats Unis y apparaissent comme particulièrement exposés. La raison essentielle est que beaucoup de barrages y ont été construits dans des régions peu peuplées, là où une construction soignée ne s'imposait pas, et dans le cadre de connaissances hydrologiques plus que succinctes.

L'Europe et le Japon présentent des densités de population beaucoup plus fortes et les crues surtout et depuis plus longtemps, y étaient beaucoup mieux connues. Les techniques de construction y ont donc été plus élaborées.

.../...

2.4. Influence du type de barrages

On peut, très globalement, diviser les barrages en deux grands types :

- . Remblai (terre, enrochements)
- . Maçonnerie et Béton (poids, voûtes, contreforts).

Les mécanismes de rupture sont radicalement différents dans les deux cas, les premiers étant plus sensibles aux submersions (déversement) et à l'apparition des renards.

Le tableau du nombre des ruptures montre néanmoins que les fréquences ne sont pas très dissemblables dans les deux types.

	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	8 ou 9	3
Japon	851	613	-	3	1	-
Europe	715	1.462	-	1	5	-
	4.103	2.683	262	42 ou 43	14 ou 15	3

2.5. Les 3 grands types de ruptures

Les ruptures peuvent se classer en 3 grandes catégories :

2.5.1. Les ruptures au 1er remplissage. Elles représentent 37 % des ruptures constatées après construction. Elles ont lieu en général avant 3 ans mais parfois le remplissage prend beaucoup plus de temps (12 ans). En fait les 2/3 de ces ruptures sont intervenues avant 1929. Sur les 12 ruptures constatées depuis, 10 ont touché des barrages en remblai.

2.5.2. Les ruptures par submersion.

Elles représentent également 37 % du total.

La moitié de ces accidents est intervenue avant 1930 et pour la moitié de ceux-ci il s'agissait de barrages jeunes de moins de 10 ans ce qui indique une méconnaissance certaine de l'hydrologie.

.../...

Près de la moitié de ces ruptures ont eu lieu aux Etats Unis.

Cette cause de rupture a très sensiblement diminué pour les barrages récents.

2.5.3. Ruptures en exploitation.

Elles représentent 26 % du total et sauf dans deux cas ont touché presque uniquement des barrages en remblai.

Près de la moitié de ces ruptures concernent des barrages américains construits avant 1930, avec des matériaux vieillissant facilement et souvent dimensionnés au plus juste.

Dans les autres cas, la cause de l'accident réside dans le manque d'entretien et de surveillance.

Il faut remarquer qu'à ce stade seuls 2 barrages en béton se sont rompus, en exploitation, depuis 50 ans (pour un total d'environ 100.000 années barrages). Pendant la même période 13 barrages en remblai ont cédé mais 2 seulement pour l'ensemble Europe-Japon auquel il faut faire correspondre environ 150.000 années barrages.

Au total, toutes causes confondues, pour cet ensemble Europe-Japon, la fréquence globale est de l'ordre de 1 pour 50.000 années-barrages.

Pour la France, cela donnerait une fréquence d'en moyenne une rupture tous les 100 à 200 ans.

3. Principales catastrophes récentes

1864	Dale Dyke (G.B.)	Terre -29 m (glissement du talus)	250 morts
1868	Iruka (Japon)	Terre	1200 morts
1892	Puentes (Espagne)	Maçonnerie Poids 69 m (Renard)	608 morts
1895	Bouzey (France)	Maçonnerie Poids 15 m	86 à 100 morts
1889	South Fork River (U.S.A.)	Terre 21,9 m (submersion)	2000 à 4000 morts
1911	Austin (U.S.A.)	Maçonnerie Poids 14 m	100 à 700 morts
1923	Gleno (Italie)	Béton Contreforts 22 m (rupture de fondation)	100 à 600 morts

.../...

1928	Saint Francis (U.S.A.)	Béton Poids 62 m (rupture des appuis)	400 à 2000 morts
1959	Vega de Terra (Espagne)	Contreforts 34 m (cisaillement des contreforts)	144 à 400 morts
1959	Malpasset (France)	Voûte mince 66 m (rupture de fondation)	421 morts
1960	Oros (Brésil)	Terre 36 m construction (submersion)	1000 morts
1961	Hyokiri (Corée)	non répertorié h < 15 m	250 morts
1961	Babû Yar (U.R.S.S.)	h < 15 m	145 morts
1963	Variont (Italie)	Voûte 262 m (glissement de terrain dans la réserve)	1925 morts
1967	Nanaksagar (Inde)	Terre 15,6 m (renard)	100 morts
1967	Sempor (In donesie)	Enrochements 53,6 m chantier	200 morts
1976	Del Monte (Colombie)	(rupture d'une vanne)	80 morts
1976	Santos Thomas (Philippines)	Terre (crue - typhon submersion chantier)	80 morts
1976	Teton (U.S.A.)	Terre 93 m (renard)	11 morts
1979	Machhu II (Inde)	Béton et Terre 26 m (submersion)	2000 morts
1985	Tesero (Italie)	Terre 20 m - Stériles (rupture de talus)	200 morts

III - DESCRIPTION DE 4 ACCIDENTS IMPORTANTS

1. MALPASSET (2.12.1959). Ce barrage était une voûte mince à double courbure de 66 m de haut construite sur le Reyran rivière cotière proche de Fréjus (Var), formant un réservoir de $60.10^6 m^3$.

.../...

La fondation était un gneiss légèrement fissuré et altéré. Le barrage avait été construit en accord avec les règles de l'époque en particulier au niveau des taux de contraintes et de la résistance du béton.

La rupture qui a eu lieu en pleine nuit a été quasiment instantanée et n'a laissé que quelques vestiges de béton en rive droite. Le barrage s'est rompu sur toute sa hauteur comme une porte qui s'ouvre.

Malpasset est la seule voûte accidentée en service normal ce qui n'a pas facilité les investigations.

La première explication donnée a été le glissement le long d'une faille existant sous la rive gauche et apparaissant en surface à l'aval.

L'explication a été complétée un peu plus tard par la considération de pressions hydrauliques.

Sous la rive gauche, la poussée de l'arc pratiquement parallèle au feuilletage du gneiss n'a pu se dissiper dans l'appui : elle est restée concentrée jusqu'à la faille. La poussée s'accroissant le gneiss est devenu de plus en plus imperméable créant une sorte de barrage souterrain supportant une pression hydraulique interstitielle au moins égale à celle du niveau du réservoir (et peut être supérieure compte tenu de la saturation du massif due aux pluies). Il en est résulté une poussée vers le haut qui a fait finalement sauter une partie de la fondation inférieure R.G. (Fig. 3).

La fondation n'était pas drainée (aucun barrage voûte à l'époque n'avait de drainage) mais il n'est pas certain qu'un drainage eut évité l'accident.

Les propriétés particulières de perméabilité et de compressibilité du gneiss ont joué un rôle important dans cette catastrophe. Son étude a permis de mettre au point une méthode de calcul de stabilité d'un massif rocheux de fondation fissurée soumis à des pressions hydrostatiques. Les programmes de calcul actuels permettent d'intégrer cette circonstance et de tenir compte de modules d'élasticité très variables du rocher.

2. VAIONT (9.10.1963)

Le barrage était une haute voûte de 262 m sur la rivière Vaiont affluent de la Piave dans la partie sud des Dolomites (Italie du Nord). Le volume du réservoir était de $169 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

L'accident a été provoqué par un énorme glissement de terrain mobilisant $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de roc et de terre. Le glissement a commencé assez tôt à la mise en eau. A certains moments la vitesse a atteint 8 à 10 cm par jour.

La géométrie générale du glissement a été très complexe. Le premier diagnostic a eu lieu 4 ans et demi avant et 2 an 1/2 avant la catastrophe on savait qu'il s'agissait d'un glissement important. Toutefois ni son importance, ni sa cinématique n'avaient été soupçonnées. Le jour de la rupture la vitesse de déplacement a atteint 25 cm/s.

.../...

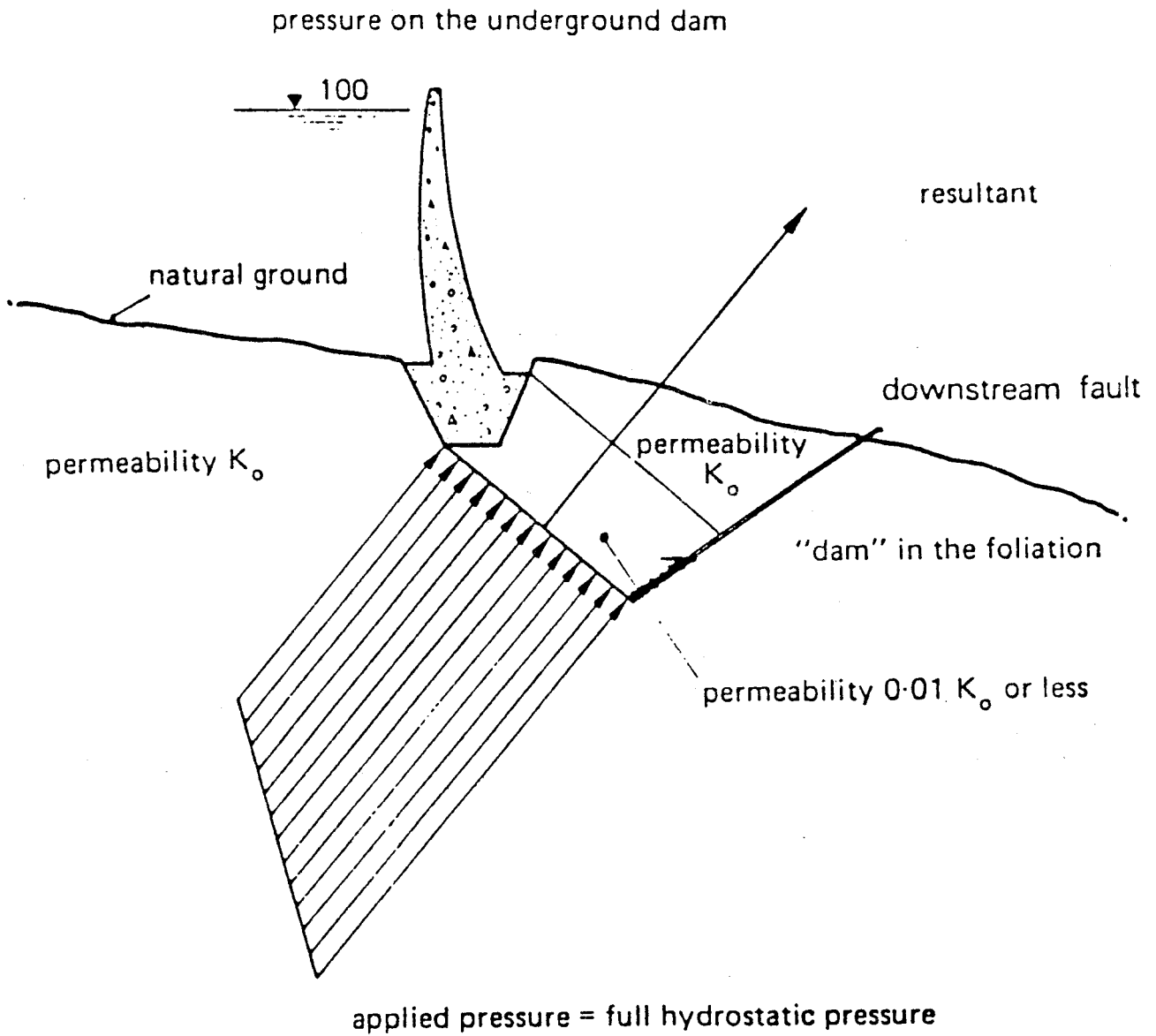


Fig. 3

Système de forces d'origine hydraulique sous la fondation du barrage de MALPASSET.

Extrait de l'exposé de M. LONDE au "International Workshop on Dam Failures" Purdue University LAFAYETTE INDIANA - Août 1985
Publié par WATER POWER and DAM CONSTRUCTION - Novembre 1985

En fait il s'est agi de la réactivation d'un très ancien glissement par le fait de la mise en eau. Le jour de l'accident le niveau avait été abaissé à 23 m en-dessous du niveau des plus hautes eaux.

La masse de roc est arrivée à 160 m au-dessus du barrage à peu près 50 m à l'amont de celui-ci avant de tomber dans la retenue.

Un volume d'eau d'environ 115.10^6 m³ d'eau fut déplacé. A l'amont l'eau monta de plus de 260 m. A l'aval elle déferla par dessus la crête du barrage qui fut emportée sur une hauteur de quelques mètres. Le flot s'écoula ensuite dans la vallée ; il y eut 1925 victimes.

Le barrage lui-même supporta plusieurs fois sa charge nominale sans se rompre, seules quelques craquelures apparaissant au niveau des appuis.

Le problème posé par Valont est avant tout celui de la gestion d'une catastrophe en évolution lente.

3. TETON (5.6.1976)

Le barrage de TETON est un barrage en terre à zones sur la Teton River à 21 km de la Ville de Rexburg dans l'Idaho (U.S.A.). Il s'agissait d'un important ouvrage de 93 m de haut et de 525 m d'épaisseur en pied. Il était muni d'un noyau imperméable en silt éolien. La capacité de la retenue était de 356.10^6 m³.

La fondation est formée d'un tuf rhyolitique très fissuré et donc fortement perméable. Un rideau d'injection de grande ampleur avait été mis en place. Toutefois l'extrême perméabilité en rive droite avait conduit les concepteurs à prévoir une tranchée d'ancrage de 21 m de profondeur remplie avec le matériau du noyau. Ce silt s'est révélé fortement érodable. Aucune liaison n'était prévue entre les différents matériaux ni entre le silt et le rocher.

La rupture s'est produite par un renard en rive droite au contact barrage-appui. Un premier écoulement a été remarqué d'environ 50 l/s à 40 m sous la crête du barrage à 7h du matin.

Une demi-heure plus tard une source d'eau chargée, de 400 à 600 l/s apparaît 50 m plus bas.

A 9h 10, les deux sources se développent et une gouttière d'érosion apparaît en rive droite. La source basse atteint 1,1 m³/s.

A 10h 30, la source haute atteint 0,5 m³/s, la gouttière d'érosion s'accroît.

A 10h 40, l'ordre d'évacuation est donné à l'aval. Un vortex apparaît dans la retenue à 11h. A 11h 50 le tunnel d'érosion atteint la crête qui s'effondra 5 mn plus tard. A 11h 57 la brèche est formée et le réservoir se vide. Le débit atteint alors 70.000 m³/s. La brèche a 350 m de large et représente 40 % du volume de la digue.

.../...

L'ampleur de la catastrophe (qui n'a toutefois fait que 11 morts) a entraîné des études approfondies. Celles-ci n'ont pas permis de dégager de façon certaine la cause du phénomène. Plusieurs mécanismes ont été proposés qui ont d'ailleurs pu jouer corrélativement :

- fuite à travers le rideau d'étanchéité au ras de la tranchée ;
- fracturation hydraulique et tassement différentiel dans la tranchée ;
- fuite à la jonction tranchée-fondation ;
- effondrement d'une couche mal compactée lors de l'humidification à la mise en eau ;
- existence d'une zone jointive, à la base, saturée d'eau à la construction (peu probable).

A noter que lors de l'excavation de la tranchée en rive droite, de larges fissures ont été mises en évidence. Elles n'ont malheureusement pas été traitées sur toute la hauteur.

D'importantes critiques ont été faites sur la conception, le choix des matériaux, le manque d'instruments de contrôle, le suivi de chantier.

Par contre il faut souligner la remarquable organisation de l'alerte et de l'évacuation des zones aval.

4. TESERO (19.7.1985)

Nous sommes ici en présence de 2 petits barrages en terre, d'environ 20 m de haut, le premier situé immédiatement à l'amont du second et retenant au total, un volume de boue de 300.000 m³ (surmonté de 2 à 3 m d'eau). Il s'agissait en fait de bassins de décantation pour stériles miniers. La zone est située dans le nord de l'Italie dans la région de Trente.

Les barrages, de forme incurvée, reposaient sur les flancs d'une vallée couverte de moraines. Ils étaient probablement de construction assez frustre avec une pente aval de 1/1,5 très raide. Les digues étaient réhaussées au fur et à mesure du remplissage.

Un effondrement brutal par glissement du talus aval du barrage amont entraîna un déferlement de boue dans le réservoir aval qui céda à son tour. Les 300.000 m³ de boue envahirent alors la vallée sur 4 km, jusqu'à Tesero, tuant au moins 200 personnes.

Les investigations techniques donnent lieu encore à de très vives discussions. Il semble que la rupture soit due à la conjonction d'une structure insuffisante, de l'occurrence de très fortes pluies ayant pratiquement saturé tout l'ouvrage et d'un rythme trop rapide du remplissage n'ayant pas permis une consolidation suffisante du dépôt qui s'est d'ailleurs littéralement "liquéfié".

Ce cas très particulier met en évidence le danger potentiel de petits ouvrages exécutés sans étude sérieuse, non surveillés et probablement exploités sans une bonne connaissance des règles de l'art.

.../...

IV - LES PRINCIPALES CAUSES DE RUPTURE

Elles se révèlent, à partir des statistiques de la C.I.G.B., être les suivantes :

1. Barrages en terre et en enrochements

- Submersion du barrage par une crue provenant soit d'une sous-estimation de la crue de projet, soit du mauvais fonctionnement des vannes ;
- Renard aux contacts barrage-fondations ou barrage-ouvrages annexes. Renards dus aux insuffisances des systèmes filtres-drains, à la présence d'argiles dispersives ou d'argiles qui se fissurent ;
- Ruptures et glissements dûs à des insuffisances de profil, ou à des excès de pression interstitielle ;
- Hétérogénéité ou insuffisance de fondation entraînant renards ou glissements ;
- Tassements excessifs avec fissuration ;
- Liquéfaction d'éléments du remblai par des phénomènes mécaniques (séismes - vibrations) ou hydrauliques.

2. Barrages en béton

- Insuffisance de résistance et discontinuité dans les fondations ;
- Sous-pression dans les fondations - absence ou insuffisance de drainage ;
- Défaut de stabilité dû à un profil insuffisant ;
- Renard dans les fondations ;
- Tassement excessif ou différentiel des fondations ;
- Gonflement du béton (qui a été à l'origine d'incidents très sérieux sur des barrages anciens).

Dans un certain nombre de cas des erreurs humaines manifestes ont été commises tant au niveau des études, des reconnaissances, qu'à celui de la construction ou dans le cadre d'une mauvaise exploitation.

Une rupture est un phénomène ayant souvent des causes multiples et qui commence par l'apparition d'une anomalie non relevée.

Quelle que soit l'importance du barrage, la sûreté ne peut être assurée que par l'intervention d'ingénieurs compétents menant des études complètes et correctes, d'entrepreneurs efficaces maîtrisant parfaitement leur chantier et dans le cadre d'une exploitation attentive et d'un suivi scrupuleux.

.../...

3. Séismes

Contrairement à ce que l'on pourrait craindre les séismes ne représentent pas statistiquement un danger significatif. Les séismes ont causé de nombreux dégâts mineurs : tassements, déformations, fissures et parfois des détériorations très importantes (un fort séisme a sérieusement endommagé, en Californie, les deux barrages en terre "Upper" et "Lower" de San Fernando en février 1971. Son épicentre était à 15 km des réservoirs. Le même séisme a entraîné un important glissement de terrain dans la retenue des Pacoïma sans que le barrage voûte de 113 m de haut subisse de réels dégâts). Toutefois ils n'ont jamais entraîné directement une destruction totale (sauf, ponctuellement dans le cas de petits ouvrages en remblai). Néanmoins l'importance psychologique du risque sismique reste primordiale.

L'étude de la séismicité a fait d'énormes progrès depuis quelques décennies. De nombreuses observations ont pu être faites du comportement réels d'ouvrages aux séismes. Des progrès également très importants ont été réalisés au niveau des méthodes de calcul et des essais sur modèles.

Les barrages construits suivant ces méthodes sont incontestablement des ouvrages résistant bien aux secousses sismiques.

Un aspect non moins intéressant est celui des séismes induits par les grands barrages réservoirs. Un certain nombre de cas très précis ont pu être relevés à l'étranger (en particulier en Inde). En France sur 20 ouvrages de plus de 75 m de haut et plus de 100.10^6 m³ de retenue, seul le barrage de MONTEYNARD (sur le Drac) semble avoir induit avec certitude un séisme ; une faible présomption existe pour VOUGLENS (sur l'Ain) et GRANDVAL (sur la Truyère).

V - LA SURETÉ EST D'ABORD LE FAIT D'UN BON PROJET

La conception des projets de barrages représente une somme de méthodes et de techniques tout à fait considérable. L'ensemble des livres et publications qui les décrivent remplissent des bibliothèques. L'état de l'art est en constante évolution en particulier du fait de l'énorme augmentation de la puissance de calcul.

Il est évidemment impossible dans le cadre d'une note succincte d'aborder, ne serait-ce que par un simple survol l'ensemble de ces méthodes : on se contentera donc de quelques éléments de réflexion sur quelques points essentiels. On rappellera qu'un bon concepteur est un ingénieur ayant non seulement des connaissances techniques suffisantes mais également un jugement sûr basé sur l'expérience. Cette compétence et cette expérience doivent être non seulement entretenues mais élargies tout le long de la vie professionnelle. Cela ne peut se faire que par des contacts et des échanges d'information constants avec les entreprises chargées des travaux et les gestionnaires qui exploitent l'ouvrage.

On a vu que les erreurs humaines intervenaient fréquemment dans l'enchaînement des causes aboutissant aux catastrophes. La compétence des personnes et le sentiment qu'elles ont de leur niveau de responsabilité représentent ici l'élément essentiel de la sécurité.

.../...

Dans ce cadre il apparaît tout à fait évident que les études préalables ne devront jamais et sous aucun prétexte être rognées ou interrompues. Même si l'on fait jouer la loi du marché et la concurrence dans le choix d'un maître d'oeuvre il faudra toujours placer au premier plan compétence expérience et potentiel scientifique et technique.

1. Etudes hydrologiques et hydrauliques

La crue de projet est la crue maximale que l'on prend en compte pour calculer les organes d'évacuation.

Cette crue s'évalue à partir de données hydrologiques et pluviométriques, des caractéristiques du bassin versant et de la retenue.

Ce problème ne peut en aucun cas être considéré comme totalement dominé par l'ensemble des concepteurs dans toutes les régions du globe. L'accident récent de MACCHU II (1979) a été provoqué par l'occurrence d'une crue largement supérieure à celle prévue, quelques années après la fin de la construction du barrage.

Un débit de crue étant une grandeur aléatoire il est normal de la traiter par une approche probabiliste.

La simple extrapolation par une loi de type GUMBEL d'une série de débits (qui portent sur plusieurs dizaines d'années) est absolument insuffisante pour aboutir à des résultats corrects avec la probabilité de 10^{-4} qui est maintenant à peu près admise, par tous (sans que ce choix qui est plutôt une "bonne pratique" ait des motivations exclusivement rationnelles).

Pour pallier cette défaillance, les hydrologues américains ont défini la "Précipitation Maximale Probable" et la "Crue Maximale Probable" mais beaucoup considèrent ces concepts comme délicats à manipuler et même illusoire.

Finalement, la statistique des pluies contenant beaucoup plus d'informations que celle des débits, il apparaît maintenant que seules les méthodes utilisant le gradex des pluies permet au projeteur de fixer de façon relativement précise les débits extrêmes correspondant à ces faibles probabilités.

On considère d'autre part que la prise en compte de l'amortissement dû à la retenue ne devrait être admis que dans les cas les plus favorables (barrage peu sensible, crue de projet calculable avec une bonne approximation).

En cas d'insuffisance de données on peut être amené à augmenter de façon sensible, par un coefficient de sécurité à discuter, la valeur calculée de la crue de projet. On peut aussi rendre le barrage capable de la supporter (en lui donnant une certaine capacité de déversement ou par un déversoir fusible).

Les calculs hydrauliques des ouvrages d'évacuation doivent toujours être effectués avec des valeurs "conservatrices". Les logiciels utilisés doivent être éprouvés ; il ne faut pas hésiter à utiliser en cas de besoin des modèles physiques. Pour les barrages en remblai on choisira plutôt des déversoirs à surface libre de préférence à des évacuateurs en galerie.

Le calcul de l'écoulement de la crue à l'aval fait partie du projet.

La conception des évacuateurs est un problème complexe. Pour les débits importants et les fortes charges les problèmes de dissipation d'énergie et d'érosion peuvent prendre d'énormes proportions et des erreurs même relativement minimes amener des dégâts gigantesques (accident de l'évacuateur du barrage de TARBELA sur l'Indus au Pakistan en Août 1974).

Les vannes, leur automaticité, leur mise en oeuvre doivent faire l'objet de soins attentifs et doivent être manipulables avec efficacité dans les circonstances les plus défavorables.

Les déversoirs fusibles ne représentent pas forcément une panacée. Il arrive qu'ils ne cèdent pas ; ils peuvent créer des ondes de crues dangereuses.

2. Reconnaissance, étude et traitement des fondations

Un pourcentage important des ruptures est dû à l'inadéquation des fondations. L'étude géotechnique de la fondation et de la cuvette du réservoir est une partie très importante du projet.

La fondation doit supporter et diffuser dans le terrain les contraintes mécaniques induites par l'ouvrage. Elle doit également, moyennant imperméabilisation et drainage, dissiper les charges hydrauliques, limiter les pressions interstitielles et les fuites, empêcher la formation de renards.

L'application de la géologie et de la mécanique des roches aux barrages a fait dans les dernières années des progrès considérables. Il en est de même des méthodes de prospection géophysique, de la technique des sondages et de nombreux appareils de mesure et d'auscultation "in situ".

Les progrès de la mécanique des sols ont été plus grands encore.

Les techniques de traitement des massifs de fondation visant à les imperméabiliser et à les consolider donnent aux concepteurs des possibilités nouvelles très étendues.

3. Calcul et Conception des Structures

Le barrage poids en maçonnerie de BOUZEY s'est rompu en 1895 par défaut de stabilité (après un premier accident en 1884). Maurice LEVY en a, à l'époque, tiré une règle célèbre relative au profil de ce type de barrage ; cette rupture a montré parallèlement l'énorme importance des pressions hydrauliques internes et donc des drainages.

Les résistances mécaniques des différents matériaux utilisés se sont régulièrement améliorées, en particulier dans le domaine des bétons et des terres. De nouveaux matériaux sont apparus : les géotextiles, les géomembranes, les bétons compactés au rouleau ...

Parallèlement des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la conception et des calculs.

.../...

2. La tenue des batardeaux et la protection du chantier contre une crue est une des préoccupations majeures des projeteurs. Durant la construction la capacité d'évacuation de crues est faible. Certes, la durée du chantier est limitée mais le risque correspondant n'est pas négligeable comme l'ont montré un certain nombre d'accidents (par exemple OROS en 1960 indiqué en III).

3. Contacts, concepteurs - entrepreneurs

Ces contacts doivent être étroits même si le bureau d'études n'est pas chargé du contrôle des travaux.

La compatibilité des matériaux, matériels et techniques de construction avec les spécifications du projet doit être assurée et contrôlée.

Toute modification au projet initial décidée "in situ" pour quelque raison que ce soit doit être effectuée exclusivement par le concepteur.

4. Contrôle et inspection des travaux

Le contrôle doit être effectué sous la direction d'un ingénieur en barrages ayant une bonne expérience de généraliste, à la fois en matière d'études et de construction. Un contact étroit doit être maintenu avec le bureau d'études pendant toute la durée des travaux ; toute situation particulière, défectuosité, modification des conditions doit être immédiatement signalée. Il semble que dans le cas de la catastrophe de TETON cette règle n'ait pas été scrupuleusement suivie.

Il est évident que le contrôle en continu de la qualité des travaux et des matériaux et des structures géologiques découvertes par les fouilles est un élément essentiel pour la vie de l'ouvrage.

Ce contrôle s'accompagne d'un certain nombre de mesures de déformations, de pressions, de débits. Pour gérer tout cela le contrôleur doit être totalement indépendant de l'entrepreneur et disposer d'une organisation efficace et précise.

Bien entendu, les informations doivent être transmises dans les meilleurs délais au bureau d'étude.

Tout phénomène ou situation exceptionnels doivent entraîner une inspection spéciale. De telles situations peuvent résulter de sinistres naturels, d'états critiques dus aux travaux et menaçant des tiers, d'émeutes ou d'agressions criminelles. Elles nécessitent la préparation de plans d'urgence donnant lieu à instructions détaillées.

La surveillance des crues est un élément important du dispositif.

VII - LA SURETÉ PAR L'AUSCULTATION, LA SURVEILLANCE ET LE PILOTAGE DES OUVRAGES.

1. Auscultation. La doctrine et la technologie de l'auscultation ont fait l'objet d'une énorme masse d'études, de publications, et d'un éventail très vaste de réalisations.

.../...

La sûreté des ouvrages dépend en effet essentiellement, en opération, du soin avec lequel leur comportement est suivi.

Il faut s'assurer constamment que le barrage réagit comme prévu, ou bien déceler et interpréter les écarts susceptibles de se manifester. Ce contrôle porte évidemment à la fois sur la structure et sur sa fondation.

La simple surveillance visuelle est à elle seule déjà un élément considérable (c'est ainsi qu'a été décelée la première apparition du renard qui a détruit TETON). L'inspection des parties immergées fait partie de cette surveillance.

L'examen des dispositifs de drainage et de décharge des sous-pressions, le contrôle de leurs débits sont également des mesures faciles à mettre en oeuvre.

La surveillance s'étend bien entendu à l'ensemble du matériel électrique et mécanique, ainsi qu'au matériel de transmission et aux générateurs d'énergie quand il existe un dispositif d'alerte.

La gamme des matériels d'auscultation est vaste. Les déplacements d'ensemble sont mesurés par des dispositifs topographiques. Les pendules, élongamètres, tassomètres, clinomètres, extensomètres, téléniveaux, sondes diverses ... permettent la mesure des déformations relatives. Les températures sont suivies au niveau de l'eau de la retenue, du corps des barrages, des eaux de percolation.

Un large choix de piézomètres permet le suivi des pressions interstitielles dans l'ouvrage et dans tous les types de fondations.

Les seismomètres mesurent la réponse des ouvrages aux tremblements de terre.

Il est souhaitable que le projeteur soit associé à l'auscultation et aux inspections. Le programme correspondant doit être mis au point avec son concours.

En France les procédures de surveillance et d'auscultation sont détaillées dans des textes réglementaires (cf. X 2).

2. Interprétation et suivi

Toutes ces mesures doivent être interprétées dans les meilleurs délais.

Depuis une vingtaine d'années les services de surveillance de E.D.F. ont mis en place un puissant outil informatique qui permet de contrôler la périodicité et la réversibilité des phénomènes observés et de détecter toute déviation par rapport au comportement prévu et normal.

A partir des mêmes principes de base et d'équations de comportement du même type le CEMAGREF a mis au point un logiciel dérivé de celui utilisé par EDF et qui fonctionne actuellement en surveillance d'une série de barrages dépendant des services extérieurs du Ministère de l'Agriculture.

.../...

Les systèmes informatiques ainsi mis au point qui sont de remarquables outils (d'ailleurs perfectibles) ne peuvent évidemment être efficaces que dans le cadre d'un service organisé, alimenté en données fiables au niveau de chaque ouvrage, et retournant ses interprétations à un gestionnaire capable de réagir immédiatement à toute situation critique.

3. Opérations, spécialement en période critique.

L'essentiel des précautions à prendre et des conduites à tenir est détaillé dans les textes réglementaires français (cf. IX et X).

3.1. Premier remplissage. C'est la phase critique par excellence.

Le comportement de l'ouvrage y est suivi à tous niveaux avec une grande attention (en y incluant si besoin est les manifestations de sismicité induite).

3.2. La vigilance est également particulièrement renforcée en cas de menace grave.

En cas de danger imminent ou d'accident important, des actions sont à entreprendre immédiatement pour mettre en alerte et protéger les populations à l'aval.

Parallèlement, le pilotage du barrage pendant les périodes critiques doit faire l'objet d'une préparation intensive :

- mise en place de consignes claires diffusées à tous les niveaux ;
- formation continue du personnel d'exploitation ;
- entretien soigneux du matériel d'exploitation, d'auscultation, de surveillance, de transmission et des sources d'énergie (au moment de la catastrophe de MACCHU II, une vanne, sur dix, était hors d'état de fonctionnement et deux autres ont mal fonctionné).

Rappelons que même sans mener jusqu'à des ruptures, des manoeuvres intempestives peuvent gravement endommager un ouvrage ou ses organes annexes.

VIII - LA SURETÉ PAR L'ENTRETIEN, LA REPRISE, LE RENFORCEMENT DES OUVRAGES.

Il va de soi que l'entretien courant visant à maintenir dans un état pleinement opérationnel tous les organes du barrage est un élément essentiel de sa longévité et donc de sa sécurité.

.../...

La surveillance et l'auscultation peuvent évidemment amener à décider d'importantes réparations, voire des reprises complètes. Les progrès dans les méthodes de calcul peuvent également conduire à des modifications profondes en particulier au niveau des dispositifs évacuateurs de crue.

Ces réparations et reprises donnent lieu aux mêmes réflexions et considérations qu'une construction neuve.

Il est intéressant de rappeler que, dans les 30 dernières années, de graves désordres ont été constatés sur un certain nombre de grands barrages français et ont amené des réparations importantes. On peut citer, entre autres, les cas suivants :

- Barrage voûte de TOLLA en Corse qui s'est fissuré et a été très sérieusement renforcé ;
- Barrage de GRANDVAL où les contreforts ont été allongés par des plots supplémentaires ;
- Barrage voûte de HAUTEFAGE (sur un affluent de la Dordogne) qui s'est fissuré à la base des plots ; cette fissuration s'est stabilisée, conformément aux prévisions des calculs, et fait l'objet d'une surveillance approfondie ;
- Barrage voûte du GAGE (aménagement de Montpezat - Massif Central) où de nombreuses fissures sont apparues à la base des plots. Le barrage a été mis hors service et remplacé par un autre ouvrage ;
- Barrage en terre de GIFFAUMONT (élément du réservoir Marne) qui s'est fissuré en crête de digue et s'est déformé en pied. Il a été stabilisé par des recharges stabilisatrices contre le talus aval.

IX - LE PLAN D'ALERTE - PRINCIPAUX ASPECTS TECHNIQUES.

Le plan d'alerte est une pièce essentielle du dispositif réglementaire français examiné plus loin.

L'un de ses éléments fondamentaux est la carte des zones d'inondation menacées par l'onde de submersion occasionnée par la rupture de l'ouvrage, avec les temps d'arrivée du front d'onde, les temps d'arrivée de la hauteur d'eau maximale et l'ampleur de celle-ci.

Il comprend également l'implantation du local de surveillance des ouvrages et les dispositifs techniques d'alerte aux populations.

1. Caractéristiques de l'onde de submersion.

Les ingénieurs disposent d'un ensemble de moyens pour les établir.

.../...

1.1. Calcul sur ordinateur

Le laboratoire de Chatou d'EDF ainsi que COYNE et BELIER, la SOGREAH et le CEMAGREF ont mis au point depuis quelques années des programmes de calcul (appelés maintenant le plus souvent "codes de calcul") des écoulements non permanents monodimensionnels ("filaires") des ondes de submersion dues aux ruptures de barrages. Ces calculs prennent en charge la description de l'onde depuis la rupture ainsi que les phénomènes produits par les diverses singularités rencontrées le long de la vallée.

Le démarrage de l'onde dépend directement du mode d'effacement de l'ouvrage.

On sait que la rupture d'un barrage provient d'un enchaînement de causes qui peuvent être en oeuvre pendant un temps plus ou moins long. Toutefois, la rupture proprement dite dépend du type de barrage. Les ouvrages en béton se rompent en général de façon quasi instantanée et libèrent l'eau en quelques secondes (parfois avec une sorte d'explosion). Les barrages en remblai s'effacent au contraire très progressivement par une érosion.

Conditions initiales en rupture instantanée

Il existe dans ce cas des solutions analytiques suivant l'état de la vallée à l'aval : fond sec, solution de RITTER ; fond mouillé, solution de STOKER.

Conditions initiales en rupture progressive

Le L.N.H. de Chatou a mis au point deux méthodes de calcul correspondant respectivement au cas du renard et à celui de la surverse.

Le calcul de l'évolution du renard part d'une galerie cylindrique traversant le remblai à sa base et entraînant un débit solide évalué à partir de la loi de MEYER-PETER. Ce calcul amène en général à une brèche d'une hauteur du même ordre de grandeur que la hauteur du barrage. La méthode a été corroborée par l'étude de cas réels.

Le cas de la surverse est traité en partant d'une submersion localisée ou générale, en utilisant la même loi mais en tenant compte du charriage dans l'écoulement aval. La méthode a également été mise au point par comparaison à certaines observations et à des modèles physiques.

Dans tous les cas la loi de débit est évidemment beaucoup plus amortie qu'en cas de rupture instantanée, le renard étant toutefois la circonstance la plus sévère.

Propagation dans la vallée

Le modèle le plus utilisé actuellement est monodimensionnel c'est-à-dire qu'il ne prend en compte qu'une vitesse moyenne dans la section droite. Les équations de base sont celles de BARRE de SAINT-VENANT, intégrées numériquement par une méthode classique avec un pas spatial de 100 m.

.../...

Le calcul peut être mené soit sur fond initialement sec, soit en superposition à une crue (mascaret). Un changement brutal des caractéristiques de la vallée peut conduire à l'apparition de ressauts.

Quand l'onde atteint un autre barrage à l'aval, l'hypothèse suivante est en général retenue :

- effacement des barrages en béton poids, contreforts, voûtes multiples et des ouvrages en remblai ;
- déversement par dessus les barrages-voûtes ;

Toutefois plusieurs comportements possibles de rupture après déversement sont disponibles dans le code de calcul.

Ce calcul de déversement est un des points les plus délicats de la méthode.

Les confluent sont traités de façon relativement simplifiée avec des débits latéraux extraits de la zone d'échange et injectés dans l'affluent.

Le modèle monodimensionnel peut être en défaut dans le cas d'une vallée large et plate, la vitesse en chaque point n'étant plus parallèle à la direction de la vallée. Il faut alors utiliser un système d'équations plus compliqué quoique négligeant encore les forces verticales de viscosité turbulente et les forces de CORIOLIS. La résolution est beaucoup plus laborieuse et est effectuée en décomposant le système en 3 grandes séries (convection - diffusion - propagation). Elle nécessite également la décomposition de la zone en une grille à mailles orthogonales. Il s'agit donc d'un calcul lourd nécessitant des moyens informatiques puissants et mis seulement en oeuvre dans les cas complexes ayant un caractère bidimensionnel marqué.

Malgré tous leur perfectionnements, ces calculs comportent d'importantes approximations physiques (topographiques, de coefficients de rugosité, dans les devers), et de calcul. Par ailleurs, compte tenu de l'ampleur des débits, il est difficile de les étalonner. Pour ces raisons les résultats en sont affectés de majorations forfaitaires des niveaux et de minoration des temps d'arrivée.

Les cartes d'inondations sont établies jusqu'à une zone où les niveaux correspondent à celui de la plus grande crue naturelle connue.

1.2. Modèles physiques

Quand la vallée est trop accidentée ou bien a une pente trop forte, les équations de BARRE de SAINT-VENANT ne sont plus représentatives et il faut réaliser un modèle physique en similitude de FROUDE sans distorsion (en général à l'échelle de 1/500). La loi de débit en fonction du temps est mesurée à l'aval et est réinjectée dans le modèle mathématique qui simule la suite de l'écoulement.

.../...

2. Local de surveillance.

Prévu par les textes réglementaires, son rôle est essentiel en cas de situation critique. Il doit évidemment se trouver hors d'atteinte de l'onde de submersion et permettre une vue directe sur le parement aval du barrage. Il est équipé de sources d'énergie, de batteries de projecteurs et du système de transmission de l'alerte. Le choix d'une implantation correcte se heurte assez souvent à des difficultés non négligeables.

3. Dispositif technique d'alerte.

Dans le règlement français (cf. X) ce dispositif est destiné à donner l'alerte :

- à la population dans la zone dite "du quart d'heure" ;
- à l'autorité préfectorale.

La zone dite du quart d'heure est la portion de vallée, immédiatement à l'aval du barrage, qui est balayée et inondée dans le quart d'heure suivant la rupture.

Dans cette zone de sécurité immédiate l'alerte est directement commandée depuis le local de surveillance du barrage. L'alerte est donnée par des sirènes judicieusement disposées et munies d'un système de télécommande très fiable. Elles sont alimentées par des bouteilles d'azote comprimé. Cette couverture sonore protège tous les lieux habités de la zone.

La zone du quart d'heure peut s'étendre suivant la topographie de la vallée jusqu'à 20 km à l'aval du barrage.

Au delà de cette zone, l'alerte est transmise par les autorités préfectorales qui engagent alors immédiatement le plan ORSEC correspondant.

Bien entendu les liaisons font l'objet d'un soin particulier et comportent en général 2 systèmes (ou plus) complètement redondants.

4. Consignes d'application

Dans la notification du plan d'alerte aux autorités, l'exploitant établit une consigne d'application. Cette consigne précise les modalités de l'application du plan et prévoit :

- les dispositions pratiques à prendre suivant les degrés de vigilance ;
- les modalités pratiques de l'utilisation des dispositifs d'alerte et de fin d'alerte ;
- les essais périodiques du dispositif et les opérations d'entretien ;
- l'inspection et le contrôle ;
- la périodicité et les modalités de mise à jour.

X - LA LEGISLATION FRANCAISE EN MATIERE DE SECURITE DE BARRAGES

La rupture du barrage de MALRASSET a entraîné une prise de conscience des risques liés aux barrages et a amené les pouvoirs publics à reprendre complètement les textes antérieurs.

Les orientations prises forment un ensemble complet et très cohérent ; elles concernent 3 grands axes.

I. Le Comité Technique Permanent des Barrages (CTPB)

Il a été créé par décret du 13 juin 1966 (J.O. du 17.6.1966) et son fonctionnement est décrit dans un arrêté en date du 30 décembre 1966 (J.O. du 7.1.1967). Les procédures de fonctionnement ont été précisées par des circulaires en 1967 et 1975.

Ce Comité est un organisme consultatif interministériel de huit membres comprenant :

- six fonctionnaires relevant des Ministères chargés de l'Industrie, de l'Aménagement du Territoire et de l'Équipement, et de l'Agriculture ;
- deux personnalités hautement qualifiées par leurs études et travaux en matière de barrages.

Le Comité est présidé par l'un des deux fonctionnaires relevant du Ministère chargé de l'Industrie.

Le Comité est d'abord appelé à donner son avis, à la demande du Ministre intéressé, sur les barrages à construire.

Le CTPB doit être obligatoirement consulté pour les ouvrages d'une hauteur au moins égale à 20 m au-dessus du point le plus bas du terrain naturel. Il peut être également consulté si les 3 critères suivants sont simultanément vérifiés : hauteur supérieure à 10 m, hauteur par rapport au point le plus bas des fondations au moins égale à 20 m, et incidence importante sur la sécurité publique.

La consultation intervient à deux stades : le dossier préliminaire qui correspond à l'avant projet sommaire et le dossier définitif qui reprend les études réalisées et une description détaillée, avec justifications, de l'ensemble de l'ouvrage. Au niveau de la conduite des travaux l'accent est mis sur la désignation de la personne physique chargée de la direction de la surveillance et du contrôle des travaux.

Toute modification importante ou tous problèmes techniques amènent obligatoirement à solliciter l'avis du Comité.

Le Comité est également informé des conditions de réalisation et de première mise en eau.

L'avis du Comité est transmis au Ministre intéressé qui le retransmet au service de l'Administration chargé du contrôle qui en fait assurer l'exécution par le Maître d'ouvrage.

.../...

Le CTPB est obligatoirement consulté sur les dispositions techniques contenues dans les projets de loi, les actes réglementaires et les instructions ministérielles concernant les barrages.

2. L'Inspection et la surveillance des barrages intéressant la sécurité publique

Ce point a fait l'objet de la circulaire interministérielle n° 7015 du 14 Août 1970 (modifiée par la circulaire 8562 du 29 septembre 1983).

Elle s'applique à tous les barrages dont la rupture aurait des répercussions graves pour les personnes. Elle définit l'ensemble des opérations de surveillance et d'auscultation à effectuer lors de la première mise en eau et en cours d'exploitation. Elle précise la nature du dossier que doit tenir le service de contrôle et celui du propriétaire ou du concessionnaire.

Elle définit également les charges du directeur des travaux pendant le chantier et à la première mise en eau.

Cette première mise en eau étant une phase essentielle la vitesse de montée du plan d'eau doit être limitée en agissant sur les organes d'évacuation. Les mesures topographiques sont alors au minimum mensuelles et hebdomadaires pour les autres dispositifs.

La surveillance de l'ouvrage par l'exploitant est précisée à la fois en ce qui concerne la nature, la périodicité des mesures et leur interprétation. Les visites sont hebdomadaires, les mesures simples bimensuelles ou mensuelles, les mesures complexes au moins annuelles.

Tout barrage intéressant la santé publique doit faire l'objet de visites annuelles et décennales par le service de contrôle.

Enfin, la circulaire détaille la procédure à suivre pour les ouvrages anciens.

3. Protection des populations à l'aval des barrages

Le décret du 16 mai 1968 et ses textes d'application décrivent les mesures de surveillance et d'alerte destinés à faciliter la protection des populations à l'aval de certains aménagements hydrauliques. Le décret du 31 Janvier 1980 traite du délai de mise en place des plans d'alerte.

Le plan d'alerte est imposé pour les barrages de plus de 20m de haut et d'une capacité de retenue de plus de 15.10^6 de m³.

Ce plan est en particulier destiné à renseigner les autorités civiles sur les caractéristiques de la submersion à redouter et à permettre à l'exploitant de donner l'alerte à ces autorités dans un certain nombre de cas précis.

On a vu en IX que dans la zone atteinte en moins d'un quart d'heure la population est directement alertée par des signaux sonores en même temps que les autorités.

.../...

Au-delà de cette zone la décision d'alerter la population, la charge de cette alerte et les modalités de protection et d'évaluation sont du ressort des autorités civiles.

Chaque plan d'alerte est dressé par le ou les préfets des départements menacés avec le concours de l'exploitant du service de contrôle, et de la Protection Civile. Le chapitre précédent a donné un certain nombre de détails sur les principaux éléments techniques.

Le plan comporte 3 dossiers :

Dossier A : - Alerte aux autorités et aux populations de la zone de sécurité immédiate.

1/ Enumération des cas d'alerte :

1er cas : Préoccupations sérieuses :

- anomalies dans le réseau d'auscultation s'interprétant comme un risque à venir ;
- annonce d'une crue exceptionnelle dépassant les possibilités de l'ouvrage ;

2ème cas : Danger imminent ;

3ème cas : Rupture partielle ou totale ;

2/ Désignation de la personne physique expressement chargée de donner l'alerte et de son suppléant ;

3/ Indication de l'autorité ou des autorités à prévenir suivant les cas d'alerte.

Dans les cas n° 2 et 3 l'alerte est donnée immédiatement à la population située dans la zone de quart d'heure.

Dossier B : - Dispositifs Techniques de Détection et de Surveillance du barrage

1/ Description du local de surveillance, des dispositifs d'éclairage du barrage et de leur alimentation électrique ;

2/ Description du régime de surveillance

- en période normale,
- en période de vigilance renforcée à savoir :

- a) durant la mise en service ;
- b) en cas de crue dangereuse pour la sécurité de l'ouvrage ;
- c) dans les cas d'insécurité prévus par les textes sur l'organisation de la défense ;
- d) en cas de constatation de faits anormaux susceptibles de compromettre la tenue de l'ouvrage.

.../...

3/ Description des moyens de transmission entre le local de surveillance et la personne physique chargée de donner l'alerte :

- en exploitation normale ;
- en période de vigilance renforcée.

4/ Les manoeuvres éventuelles à effectuer sur l'ouvrage décrites dans les consignes d'application et à mettre en oeuvre en cas de préoccupations sérieuses.

5/ Les caractéristiques de l'onde de submersion. Les résultats de l'étude apparaissant dans des tableaux et sur des cartes au 1/25.000 où sont portées les limites des zones submergées.

Cette étude est soumise au CTPB qui donne son avis aux Ministres concernés.

Dossier C : - moyens de transmission de l'alerte

ils comprennent :

1/ Les moyens de transmission de l'alerte aux autorités : une liaison spéciale et des liaisons de secours.

2/ Les moyens de transmission de l'alerte aux populations dans la zone du quart d'heure :

- le point de commande
- le système de télécommande des sirènes
- les postes sirènes.

XI - PEUX-T-ON FAIRE MIEUX ENCORE POUR LA SECURITE ?

1. Des objets soumis à des dangers aléatoires qu'il faut analyser comme tels.

Les barrages sont des oeuvres humaines. Chacun d'entre eux est un objet unique strictement adapté à son environnement. Dans leur conception, leur construction, leur exploitation ils sont soumis à des aléas qui résultent soit d'erreurs humaines ou de manque d'information, soit de phénomènes extérieurs, soit de défaillances structurelles ou d'équipements.

Il est évident pour les spécialistes que ces ouvrages ne sont pas éternels : ils ont une durée de vie limitée. Toutefois contrairement à d'autres objets technologiques cette durée n'est jamais précisée de façon claire (tout au moins au niveau de la structure).

Des progrès très importants ont été réalisés, surtout depuis une trentaine d'années, dans tous les domaines concernant ces ouvrages. Il existe néanmoins un parc considérable de barrages anciens qui n'en ont pas bénéficié. Même actuellement, sur beaucoup de barrages récents, pour des raisons évidentes tenant à la législation, l'économie, l'organisation administrative, toutes les techniques disponibles ne sont pas systématiquement mises en oeuvre en vue d'une sécurité maximale.

...|...

Depuis dix à quinze ans, un effort de recherche considérable a été entrepris pour mettre au point et appliquer des méthodes d'analyses probabilistes. Il s'agit de définir les probabilités de ruptures, d'accidents, ou de mauvais fonctionnements. Les résultats de mesures en laboratoire et sur le terrain sont considérés comme des grandeurs aléatoires. Tant au niveau des calculs, qu'à celui de la construction et en cours d'opération, on peut établir des arbres de défaillance à partir d'une analyse cause-conséquences. On peut tirer de ces méthodes une évaluation des coefficients de sécurité (ou des probabilités de rupture) partiels affectés d'intervalles de confiance.

Une application intéressante de cette méthodologie concerne la submersion d'un barrage. Les Fig 4 et 5 montrent un arbre de défaillance simplifié relatif à cet événement et le rôle des erreurs humaines. La Fig 6 montre le diagramme causes - conséquences correspondant - Ces figures sont extraites de la communication "Analytical risk assessment for dams" de GRUETTER et SCHNITZER (Congrès CIGB Rio-de-Janeiro 1982).

Les méthodes de ce type se heurtent à une difficulté importante à savoir l'évaluation des probabilités partielles affectant chacun de ces événements qui est très délicate.

Toutefois, même si ces dernières sont quantifiées de façon excessivement subjective, la méthode présente l'avantage substantiel de conduire le concepteur à analyser en détail les séquences d'événements dangereux et donc à envisager les sauvegardes correspondantes. Malheureusement de telles procédures ne sont pas encore systématiquement appliquées.

2. Une prise de conscience universelle du problème

Dans beaucoup de pays, les pouvoirs publics se sont rendu compte de l'importance du risque et ont mis en place des systèmes réglementaires de contrôle et de surveillance.

Aux Etats Unis, cette prise de conscience s'est vraiment renforcée dans les années 1960. En 1972 la loi intitulée "National Dam Inspection Act" fut votée par le Congrès, elle demandait l'inventaire et l'inspection des barrages ne dépendant pas de l'Etat Fédéral. La catastrophe de TETON accéléra son application. 68.000 barrages furent inventoriés selon les dangers potentiels qu'ils représentaient. De 1977 à 1981 8.800 ouvrages qualifiés à haut potentiel de risque subirent une inspection : 33 % furent considérés comme non sûrs et parmi eux 4 % particulièrement dangereux et nécessitant une action immédiate (abaissement du niveau ou établissement d'une ouverture dans l'ouvrage). Il reste encore beaucoup de barrages à inspecter.

Cette prise de conscience, maintenant largement étendue, correspond à une inquiétude croissante. Il est intéressant de signaler que la loi sur la sécurité des barrages votée en Finlande en 1984 s'applique à tous les ouvrages de plus de 3m de haut.

Le système réglementaire français tel qu'il a été décrit en IX et X s'est révélé être un outil bien adapté et efficace. Il est à l'heure actuelle considéré dans beaucoup de pays comme un modèle. Toutefois il ne peut pas encore couvrir tous les cas à risques.

.../...

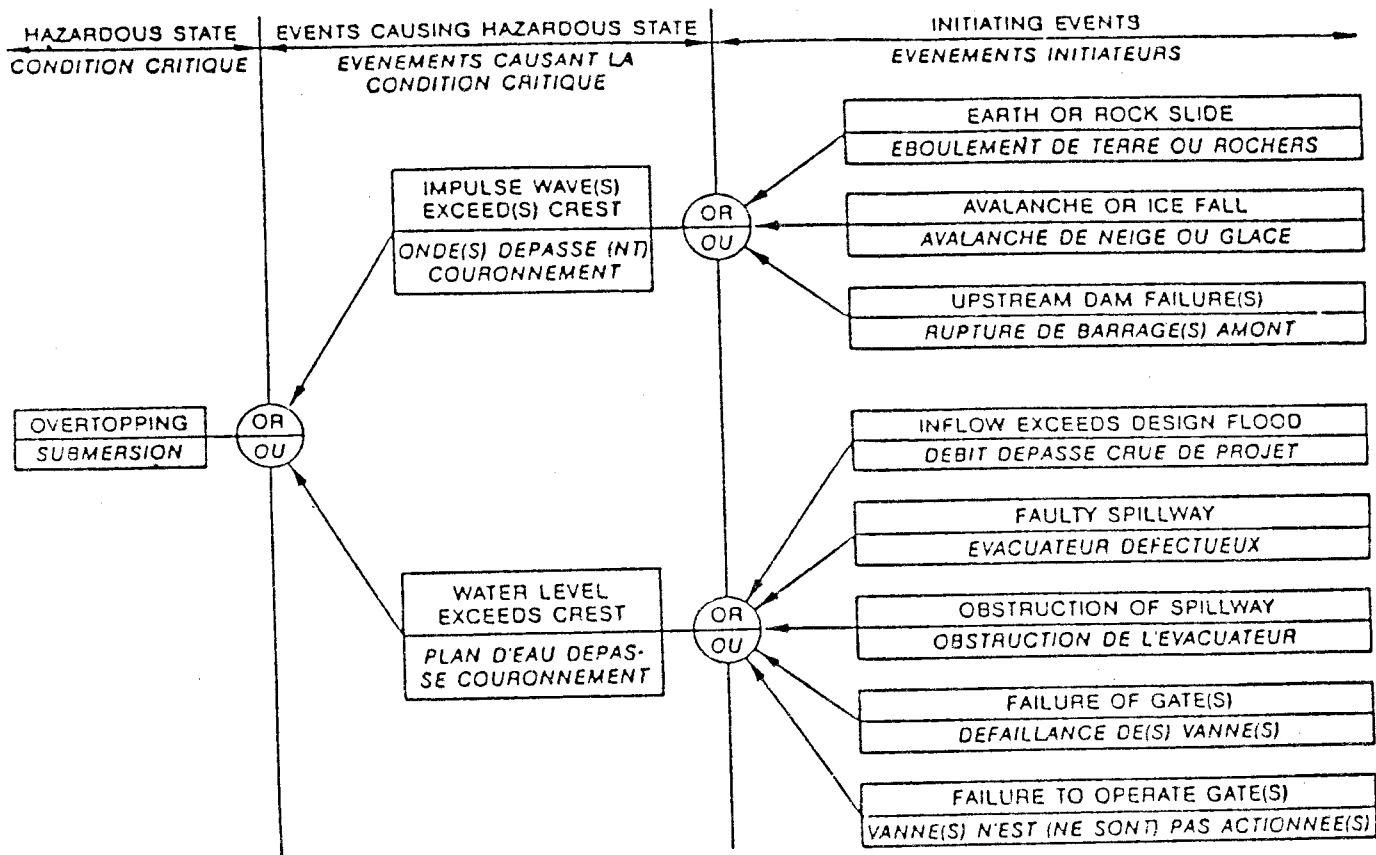


Fig. 4

Arbre de défaillance des causes possibles de la submersion d'un barrage (GRUETTER et SCHNITTER 1982)

Initiating Events	Possible Human Errors
Instability along bank of reservoir leading to earth or rock slide into it.	Insufficient observation and monitoring; misjudgement of situation; failure to lower reservoir water level to safe elevation.
Avalanche or ice fall (into reservoir)	Same as above.
Upstream dam failure(s)	Same as above.
Inflow exceeds design flood.	Underestimation of flood discharge and/or volume.
Faulty spillway.	Error(s) in design and/or construction.
Obstruction of spillway.	Insufficient surveillance; failure to remove obstruction in time.
Failure of gate(s)	Faulty design; insufficient maintenance and checking.
Failure of operate gate(s)	Misjudgement of situation; negligence.

Fig. 5

Erreurs humaines à l'origine des défaillances (GRUETTER et SCHNITTER 1982)

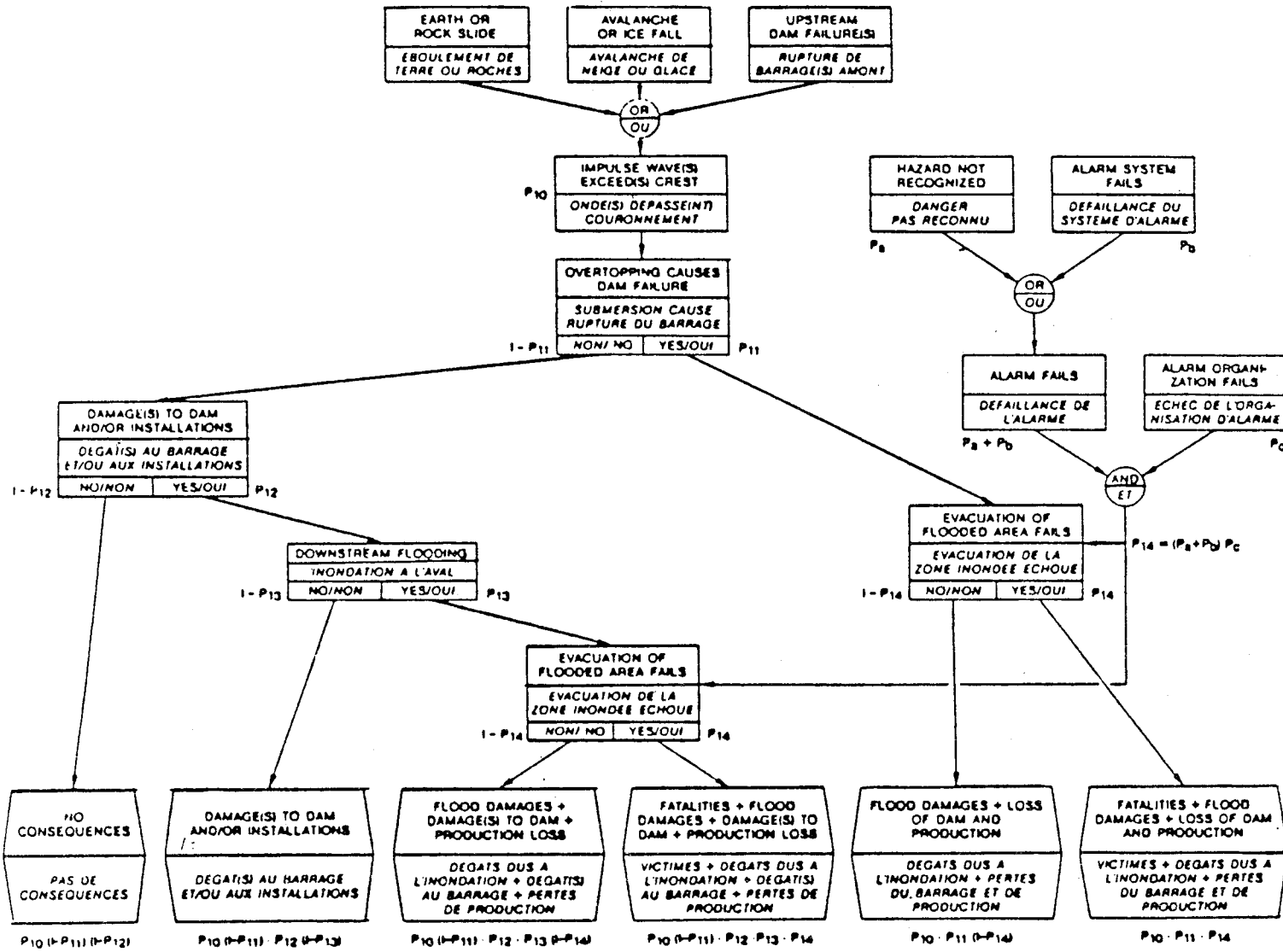


Fig. 6

Diagramme des causes et conséquences de la submersion continue d'un barrage (GRUETTER et SCHNITTER 1982)

3. Adapter encore mieux la réglementation à la réalité et veiller à son application.

Il est clair que notre réglementation, en limitant aux hauteurs supérieures à 20 m le contrôle et les études de plan d'alerte, risque de laisser échapper un certain nombre de cas potentiellement dangereux.

Il est également évident que les instructions de la circulaire 7015 du 14 Août 1970 sur l'inspection et la surveillance ne sont appliquées ni avec la même rigueur ni avec la même puissance d'analyse sur tous les ouvrages "intéressant la sécurité publique" ; une définition plus complète de ces ouvrages est sans doute nécessaire. Un décret d'application de la loi de 1987 sur les risques majeurs est en cours de préparation. Il reprendra ces éléments sur une base juridique plus large.

Faut-il appliquer à des ouvrages plus petits la réglementation actuelle ? La question mérite d'être étudiée en faisant le bilan des risques encourus vis à vis du coût de l'opération en vue de proposer éventuellement des solutions alternatives.

Faut-il veiller de façon beaucoup plus stricte à l'application de la circulaire 7015 ? Cela représenterait sans aucun doute un progrès important vers plus de sûreté. Les techniques existent mais demanderaient pour être mise en oeuvre un minimum de moyens, et il serait préférable de ne pas trop attendre. Les ruptures de barrages de 20 m et moins peuvent entraîner des accidents très graves aux répercussions extrêmement nocives.

4. Gérer les catastrophes - un problème très difficile

Le risque collectif n'est plus maintenant accepté qu'avec une extrême réticence.

Les effets socio-psychologiques d'accidents de ce type sont considérables. L'impact déstabilisateur sur les structures en cause peut être énorme. L'influence des médias, des groupes de pression amplifie tous ces mouvements de façon démesurée.

Fait plus grave, dans le cas d'une catastrophe de grande ampleur engendrant l'inondation de centaines de km de vallée, ces effets déstabilisateurs rendraient probablement encore plus difficile l'organisation de l'évacuation et des secours. Et qu'en serait-il en cas d'agression terroriste ou de sabotage ?

Le danger est considérable. L'amélioration des techniques et de la réglementation pour indispensables qu'elles soient, ne sont sans doute pas suffisantes pour y répondre.

Une réflexion approfondie sur chacun de ces points paraît indispensable. Saurions nous gérer efficacement le démarrage lent d'un accident de type VAIONT ? Saurions nous, face à une telle menace, envisager l'évacuation d'une grande ville ? Cette question, qui relève de la protection civile interagit évidemment avec la décision d'alerte.

5. Utiliser au mieux nos moyens pour surveiller et contrôler

L'étude des accidents et ruptures réels est un moyen efficace de progrès vers plus de sûreté. La CIGB a édité, dans cet esprit, des répertoires et des publications du plus grand intérêt. Des colloques ont élargi l'information des participants. Nous pensons néanmoins que des synthèses périodiques seraient nécessaires pour mieux éclairer les ingénieurs praticiens. .../...

La diminution du nombre des chantiers et la concurrence internationale croissante font qu'actuellement le nombre des spécialistes, en France en particulier, diminue régulièrement.

Cette évolution est préoccupante car elle signifie qu'en parallèle notre faculté de conception et de contrôle diminue. Dans le même temps nos barrages vieillissent et donc deviennent plus sensibles.

Plutôt que de disperser les équipes, ne vaudrait-il pas mieux utiliser ces compétences à des tâches de surveillance, d'interprétation et de conseil aux administrations ?

Les dépenses d'une telle opération ne représenteraient probablement qu'une faible fraction du coût de la rupture d'un barrage de taille moyenne.

.../...

LA SECURITÉ DES BARRAGES

- Références -

1 - BAUZIL V.

Vulnérabilité des Barrages, dispositions prises pour assurer leur sécurité
TRAVAUX - Paris Juillet-Août 1978

2 - BENOIST G.

Rupture progressive des barrages en terre
Congrès de l'AIRH - Moscou Septembre 1983
Note EDF - D.E.R. 1983

3 - BUDWEG F.

Dam Safety assessment by worldwide cooperation : a challenge to ICOLD
CIGB 13ème Congrès des Grands Barrages
New-Delhi 1979

4 - BURY K.V. and KREUTZER H.

Assessing the failure probability of gravity dams
WATER POWER and DAM CONSTRUCTION
November 1985

5 - CARLIER M.

La réglementation française en matière d'inspection et de surveillance des
barrages.
TRAVAUX - Paris Novembre 1974

6 - CARTER L.J.

Auburn Dam : Earthquake hazards imperil \$ 1 billion project
SCIENCE - August 1977

7 - C I G B

Détérioration de barrages et réservoirs - Recueil et cas d'analyse
CIGB - Paris Décembre 1983

8 - C I G B

Registre mondial des barrages
CIGB - Paris 1984

9 - C I G B

The philosophy for selecting dam design criteria - Internal report
CIGB Comité de la conception et des calculs des barrages
Janvier 1987

.../...

18 - COMITE FRANCAIS DES GRANDS BARRAGES

Développements récents dans les méthodes de détermination de la crue de projet et conception de la sécurité de fonctionnement des ouvrages d'évacuation définitifs des barrages

Colloque Technique
Paris Mars 1986

**19 - COMMITTE ON FAILURE AND ACCIDENTS TO LARGE DAMS
(U.S. Committe on large dams)**

Lessons from dam incidents U.S.A.
A.S.C.E. - New York 1975

20 - DA SILVEIRA A.F.

Statistical analysis of deteriorations and failures of dams
Proceedings of the international conference on safety of dams
Coimbra (Portugal) April 1984

21 - GAUVENET A.

Les risques d'accidents et leurs conséquences
E.D.F. Division Information sur l'Energie H 29
Février 1977

22 - GOUBET A.

Risques associés aux barrages
LA HOUILLE BLANCHE n° 8
Paris 1979

23 - GOUBET A.

Propositions pour une meilleure protection des barrages européens contre les submersions
Proceedings of the international conférence on safety of dams
Coimbra (Portugal) April 1984

24 - GRUETTER F. and SCHNITTER N.J.

Analytical risk assessment for dams
CIGB 14ème Congrès des grands barrages
Rio de Janeiro 1982

25 - IDEL K.H., KNY H.J., RISSLER P.

The influence from external loads and human insufficiency on the safety of an earth dam
Proceedings of the international conference on safety of dams
Coimbra (Portugal) April 1984

26 - INTERNATIONAL WORKSHOP ON DAM FAILURES

(Purdure University Lafayette Indiana USA)

Four major dam failures reexamined

WATER POWER AND DAM CONSTRUCTION November 1985

27 - LE BEL et HAMON - COMITE FRANCAIS DES GRANDS BARRAGES

Incidents survenus au barrage de TARBELA

lors de la mise en eau de la retenue

Colloque Technique décembre 1974

28 - LE BRETON

Les ruptures et accidents graves de barrages de 1964 à 1983

LA HOUILLE BLANCHE 6/7 1985

29 - LE MAY Y, NURY C, DOUILLET G, LEFEVRE

Auscultation des barrages d'Electricité de France

CIGB 15ème Congrès des grands barrages

Lausanne 1985

30 - LOUKOLA, KOUSISTO, REITER

The finnish approach to dam safety

WATER POWER AND DAM CONSTRUCTION November 1985

31 - MARAZIO A. BONALDI P. GIUSEPPETTI G.

The safety of dams : costs and investments

CIGB 15ème Congrès des grands barrages

Lausanne 1985

32 - MARTIN J.

A consulting engineer's view on dam safety

WATER POWER AND DAM CONSTRUCTION November 1985

33 - MINEIRO A.J.C.

Seismic safety criteria

Proceedings of the international conference on safety of dams

Coimbra (Portugal) Avril 1984

34 - POCHAT C., COLIN E..

Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage

Etude n° 25 CTGREF Antony Mars 1978

35 - POCHAT R.

Formation d'un renard et développement d'une onde de submersion lors de la rupture du barrage de TETON

Note interne CEMAGREF Juin 1981

.../...

36 - SALEMBIER M., DUBOIS P., PINATEL R., RICARD C., DOUILLET G.

Adaptation et évolution des dispositifs d'auscultation en cours
d'exploitation des ouvrages. Utilisation d'appareils nouveaux
CIGB 15ème Congrès des grands barrages - Lausanne 1985

37 - VAN MARCKE E.

Risk management to improve safety
Proceedings of the international conference on safety of dams
Coimbra (Portugal) April 1984.

AUTRES DOCUMENTS SUR LA SECURITE DES BARRAGES SIGNALES A
L'ATTENTION DES LECTEURS PAR LE CIEH

Le CIEH attire l'attention des lecteurs de son Bulletin
de Liaison sur deux articles parus dans le n° 1 - 1989
de la Houille Blanche (48 Rue de la Procession, 75724
PARIS CEDEX 15) :

- BENOIST G.

Les études d'onde de submersion des grands barrages
d'EDF (p. 43 à 54).

- CARBALLADA L.

Dam break analysis on a river system.
