



## QUELQUES EXEMPLES DE DÉGRADATION DES BÉTONS PAR CAVITATION DANS DES OUVRAGES HYDROÉLECTRIQUES

Communication  
présentée au Comité technique  
de la Société Hydrotechnique de France  
le 17 novembre 1967

PAR J. DESTENAY \* ET J. BERNARD \*\*

A la demande de la Société Hydrotechnique de France — Section « Machines » — le Service de la Production Hydraulique d'Electricité de France a effectué, en 1965, une enquête sur les dégradations provoquées par la cavitation dans les ouvrages de génie civil soumis à l'action de l'eau.

De l'observation des formes constructives et des conditions d'écoulement correspondant aux divers cas recensés, il semble possible de tirer les quelques enseignements suivants :

- les dégradations sont relativement peu nombreuses;
- les érosions sont habituellement faibles et celles de quelque importance ont été observées, le plus souvent, après des durées de fonctionnement très supérieures à celles de l'exploitation normale;
- les cas rencontrés semblent pouvoir entrer, schématiquement, dans deux catégories d'écoulement :
  - a) écoulement de vitesse modérée (10-20 m/s) à forte turbulence;
  - b) écoulement de vitesse élevée (au-delà de 30 m/s) à faible turbulence.

Les résultats de l'enquête seront donc exposés,

dans le présent rapport, suivant les quatre paragraphes ci-après :

- I. — Nombre (et proportion) d'ouvrages ayant subi des dommages par fait de cavitation;
- II. — Données concernant les durées de fonctionnement des principaux ouvrages détériorés;
- III. — Exemples de dégradations pour des ouvrages où la vitesse moyenne d'écoulement est modérée (catégorie *a*);
- IV. — Exemples de dégradations pour des ouvrages où la vitesse moyenne d'écoulement est élevée (catégorie *b*).

---

### Nombre d'ouvrages ayant subi des dommages

---

Le Service de la Production Hydraulique exploitait, en 1965, environ 400 aménagements hydroélectriques appartenant, soit à l'Electricité de France, soit à la Compagnie Nationale du Rhône.

Il s'agit d'aménagements spécifiquement industriels, donc conçus et traités comme tels. En conséquence, dans la grande majorité des cas, les ouvrages ont été étudiés pour éviter, autant que possible, les dégradations, en particulier celles dues à la cavitation et, le plus souvent, le but a été parfaitement atteint.

Le nombre de cas intéressant le présent rapport s'en trouve considérablement réduit et encore pour

\* Ingénieur-Conseil auprès d'E.D.F.

\*\* Ingénieur au Service de la Production Hydraulique d'E.D.F.

les ouvrages où le projeteur a été contraint d'accepter le risque de cavitation, il s'est, bien entendu, efforcé de le minimiser. De ce fait, certaines dégradations sont souvent assez faibles ou d'origine douteuse et il n'est pas possible de les repertorier avec suffisamment de certitude dans ce rapport. Enfin, les nécessités de l'exploitation n'ont pas toujours permis de procéder à toutes les investigations nécessaires.

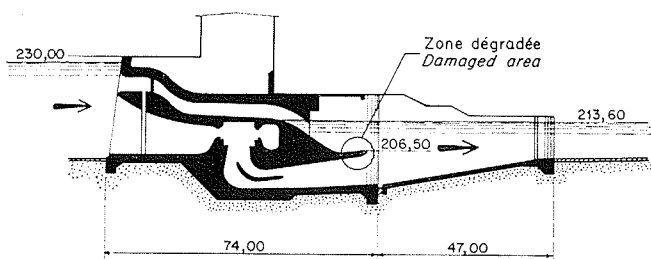
Dans ces conditions, on n'a observé que quelques cas, *une vingtaine au total*, inattendus ou correspondant à des fonctionnements exceptionnellement prolongés.

Une population aussi restreinte et aussi spéciale ne permet pas d'accorder aux tableaux que nous présentons — pour faciliter l'exposé — une quelconque valeur statistique. D'ailleurs, la présente enquête avait bien été prévue pour corroborer, par des exemples industriels, des résultats d'ordre plus ou moins théorique et pour fournir des exemples « grandeur nature » complétant ceux obtenus, en laboratoire, par des séries d'essais systématiques.

A titre indicatif, nous donnons ci-dessous la répartition des cas de dégradations, par cavitation, dans les divers types d'ouvrages.

TYPE D'OUVRAGE	NOMBRE DE CAS OBSERVÉS
Evacuateur de surface.....	1
Evacuateur de demi-fond.....	1
Vidange de fond.....	2
Déchargeur (dispositif de dissipation d'énergie). . . . .	6
Aspirateur de turbine.....	3
Zone aval rainure de vanne.....	4
Ouvrages divers. . . . .	4
<i>Total. . . . .</i>	<b>21</b>

Il peut sembler intéressant de rapprocher, de certains de ces chiffres, le nombre d'ouvrages, de même type, en service à l'époque de l'enquête. Il convient cependant d'être très prudent dans toute tentative d'analyse, car il n'existe pas deux ouvrages absolument identiques (forme, nature des ma-



1/ Ottmarsheim : ensemble du déchargeur.  
Ottmarsheim : general arrangement of relief works.

tériaux, fini de surface, etc.) ayant fonctionné exactement dans les mêmes conditions ou ayant eu des durées de service comparables pour des régimes d'écoulement voisins.

TYPE D'OUVRAGE	NOMBRE DE TYPE D'OUVRAGES COMPARABLE EN SERVICE EN 1965	NOMBRE DE CAS D'ÉROSION PAR CAVITATION OBSERVÉS EN 1965
<i>Evacuateur de surface :</i>		
Type « saut de ski »....	18	—
En galerie souterraine...	13	2
<i>Déchargeur :</i>		
Basse chute (10 à 25 m).	10	5
Chute moyenne (25 m à 70 m). . . . .	3	1

On voit donc que, pour les ouvrages en service en 1965 et avec les durées de fonctionnement atteintes à cette époque, les cas de dégradation par cavitation restent relativement rares sauf, peut-être, pour les déchargeurs (50 % environ).

**Données concernant les durées de fonctionnement**

Certaines des dégradations observées se sont produites sur *des ouvrages ayant eu des durées de fonctionnement exceptionnelles* au moment de leur mise en service. C'est le cas, notamment, de quelques déchargeurs et de la vidange de fond n° 1 de Serre-Ponçon.

On peut citer, par exemple, les fonctionnements suivants :

- à *Fessenheim*, pour permettre le fonctionnement des usines amont et à la navigation d'emprunter le canal pendant le montage des groupes à l'usine, il est passé, entre septembre 1956 et l'été 1957, 8 milliards de mètres cubes d'eau par chacun des deux pertuis du déchargeur. L'énergie dissipée pendant cette période correspond à 600 GWh environ;
- à *Saint-Estève-Janson*, au cours de l'été 1963, le volume d'eau évacué par le déchargeur pendant l'achèvement du montage des groupes a été d'un milliard de mètres cubes;
- à *Serre-Ponçon*, la vidange de fond n° 1 a évacué, entre novembre 1959 et juillet 1960, 1,56 milliard de mètres cubes sous des charges variant entre 60 et 100 m.

Par contre, pour d'autres ouvrages, on a constaté des dégradations *pour des durées de fonctionnement beaucoup plus réduites*.

Par exemple, sur le déchargeur de Châteauneuf-du-Rhône, les premières constatations d'érosions sur les redans des chambres de dissipation d'énergie remontent à une époque où les ouvrages avaient fonctionné 20 h en déchargeur et 250 h pour les

vidanges de l'écluse (l'aqueduc de vidange de l'écluse débouche à l'amont de la chambre de dissipation d'énergie).

Sur les quatre pertuis du barrage de Rivières, sur le Tarn, équipés de vannes wagons, on a fait les observations suivantes sur les bajoyers des piles, immédiatement en aval des rainures des vannes.

PERTUIS N°	DURÉE CUMULÉE DE FONCTIONNEMENT (h)	EROSIONS OBSERVÉES
1	250	Rive droite : profondeur maximale. . . . 6 cm Rive gauche : profondeur maximale. . . . 10 cm
2	630	Profondeur maximale. 22 cm Arrachement à la crue de 1965 de blindages mis en 1964.
3	990	Rive droite : profondeur maximale. . . . 10 cm Rive gauche : profondeur maximale. . . . 7 cm
4	50	Premières traces de « martèlement ».

Il est possible de penser qu'une certaine « durée d'incubation » est nécessaire avant l'apparition des premières dégradations et qu'elle peut varier, dans d'assez grandes limites, pour des ouvrages de même type.

**Exemples de dégradations par cavitation au sein d'écoulements à vitesse moyenne modérée mais à forte turbulence**

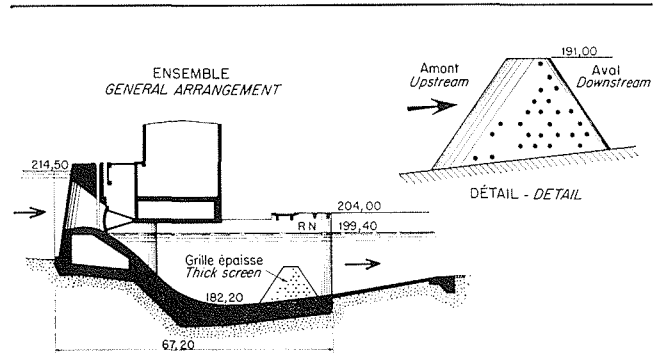
**1. Dégradations observées dans des déchargeurs.**

Ce type d'écoulement se rencontre, en particulier, dans les zones de dissipation d'énergie des déchargeurs. Des dégradations ont été observées sur des déchargeurs de basse chute, notamment à Ottmarsheim (chute brute : 16 m), Fessenheim (15 m), Vogelgrün (12,50 m), Bollène (23 m) et Châteauneuf (18,30 m) et sur un ouvrage de chute moyenne : Saint-Estève-Janson (65 m).

A Ottmarsheim, six pertuis de décharge sont associés à chaque groupe. Ils se terminent par une doucine située au-dessus du débouché des aspirateurs (fig. 1).

A la mise en service, en 1952, après six mois de fonctionnement ininterrompu, les extrémités des doucines des déchargeurs ont dû être rebétonnées, les armatures ayant été mises à nu.

A Fessenheim, au lieu de répartir les déchargeurs sur toute la longueur de l'usine, comme à Ottmarsheim, on a accolé, au centre de l'usine, deux déchargeurs capables chacun de 600 m<sup>3</sup>/s (fig. 2).



2/ Fessenheim : ensemble du déchargeur. Détail de la grille. Fessenheim : general arrangement of relief works. Screen details.

Pour amortir la lâchure d'un débit voisin de 1 200 m<sup>3</sup>/s à une vitesse de 10 à 12 m/s, on a installé, au point bas des passes, une grille épaisse constituée de 26 tubes en acier, de 32 cm de diamètre. Ceux-ci sont remplis de béton pour accroître leur inertie et sont ancrés de 47 cm à leurs extrémités. Le point haut de la grille se trouve à 8 ou 9 m en dessous du niveau moyen du bief aval.

Après le fonctionnement exceptionnel indiqué plus haut, une visite des deux déchargeurs, par les hommes-grenouilles, eut lieu en 1958. Ils constatèrent la disparition du tube le plus proche du radier sur toute la largeur des deux déchargeurs et des dégradations du revêtement des bajoyers des passes et des pilettes intermédiaires qui divisent en trois pertuis l'extrémité aval de chaque déchargeur (photo I).

Après batardage des passes, on s'aperçut que le revêtement d'usure des bajoyers et des pilettes, constitué d'une couche de gunite de 25 mm d'épaisseur, présentait des érosions caractéristiques de cavitation dans le sillage des tubes. Les zones dégradées atteignaient une longueur de 50 cm et une profondeur de 30 à 40 mm. Le revêtement d'usure a été reconstitué avec un mortier de ciment contenant un durcisseur.

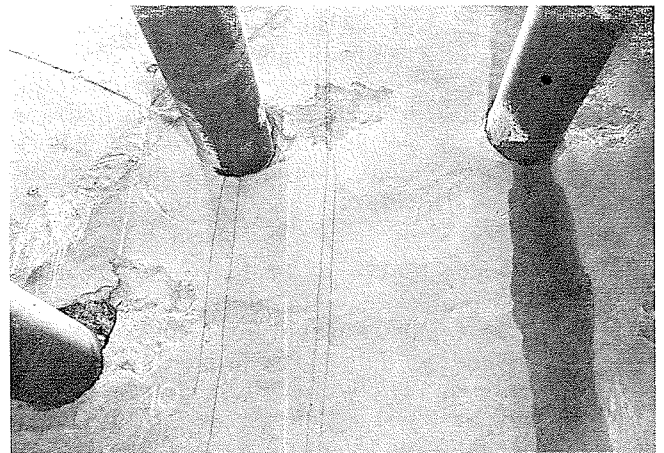


Photo I/ (Photo J.-P. Schwartz, Mulhouse.) Fessenheim : érosions dans le sillage des tubes. Fessenheim : erosion down the tube wakes.

A *Vogelgrün*, le dispositif d'amortissement est identique, dans son principe, à celui de Fessenheim; certaines modifications de détail ont cependant été apportées à la suite de l'expérience de Fessenheim :

- gainage des tubes avec du caoutchouc, sur 10 cm de longueur, au niveau de leurs ancrages, pour éviter la transmission des vibrations au béton;
- longueur d'ancrage portée de 50 à 90 cm;
- remplissage des trois tubes inférieurs par du mortier bitumineux.

Une visite du déchargeur eut lieu à l'automne 1959.

Sur le déchargeur rive droite, après 4 000 h de fonctionnement, on releva des zones d'érosion du béton situées dans le sillage des tubes et d'une profondeur variant entre 2 et 20 cm. Ces zones concernaient principalement les tubes amont.

Chaque pilette était, en outre, fissurée sur ses faces amont et aval.

Sur le déchargeur rive gauche, après 2 300 h de fonctionnement, les zones d'érosion du béton étaient moins nombreuses qu'en rive droite mais de même importance unitaire. Les fissures sur les pillettes étaient également moins longues.

Les dégradations ont été réparées avec un mortier de ciment additionné de 20 % d'oxydociment.

A *Châteauneuf-du-Rhône*, le déchargeur est constitué de deux pertuis semblables, alimentés chacun par une vanne-segment de fond et un clapet de surface. Chaque pertuis est capable d'évacuer 570 m<sup>3</sup>/s, dont 480 m<sup>3</sup>/s par la vanne de fond. La dissipation d'énergie s'effectue dans une chambre de 35 m de longueur et de 8 m de largeur, munie de 6 « dents de fond » dont les formes et les emplacements ont été étudiés sur modèle réduit. Le système de dents évite, en outre, que le déchargeur en fonctionnement ne joue le rôle d'éjecteur pour l'aqueduc de vidange de l'écluse qui débouche à proximité de la vanne de fond (fig. 3).

Les premières constatations de dégradations notables sur les dents de dissipation d'énergie ont été effectuées en décembre 1958, après 270 h de fonctionnement, soit en déchargeur (20 h), soit pour la vidange de l'écluse (250 h).

Les zones de béton érodées se situaient notamment à l'aval des arêtes ou au niveau de l'enracinement des dents sur le radier (photo II). A l'origine, les dents étaient blindées uniquement sur certaines faces. Quelques tôles de blindage ont été également arrachées.

A *Saint-Estève-Janson*, le déchargeur est constitué par un canal à écoulement libre de 19 m de largeur, disposé parallèlement aux conduites forcées. La dissipation d'une grande partie de l'énergie est obtenue sur le coursier du déchargeur grâce à la présence de 2 000 « dents » de 0,60 × 0,60 m de section et de 5 ou 15 cm de hauteur.

Après un service prolongé à la mise en service de l'usine (1 milliard de mètres cubes sont passés par le déchargeur), on a observé des érosions, localisées le plus souvent dans la partie amont du déchargeur. Les dégradations étaient de faible pro-

fondeur sur les dents et se situaient généralement au niveau de leur enracinement sur le radier où le béton présentait une surface irrégulière et rugueuse et quelques vacuoles.

## 2. Dégradations observées à l'aval de rainures de vannes.

Nous avons déjà cité les érosions observées au barrage de Rivières, sur le Tarn. Cette manifestation de la cavitation se rencontre vraisemblablement lorsque la charge amont est suffisante pour provoquer une résorption brutale des vortex s'échappant des rainures des vannes; l'implosion des bulles d'air s'accompagne alors d'ondes de pression destructrices des bétons.

Il semble que les conditions favorables soient atteintes à partir d'une quinzaine de mètres de charge et sans doute également lorsque la section de la rainure se prête à la formation de tourbillons.

A *Rivières*, la charge est de 17 m d'eau au niveau du seuil des vannes (fig. 4). Les rainures ont 2 m de longueur et 0,90 m de profondeur. Les zones dégradées affectent une forme triangulaire et sont situées immédiatement à l'aval des rainures. Leur hauteur est comprise entre 1 et 1,60 m et leur longueur entre 0,60 et 1 m. Leur profondeur est, en général, comprise entre 6 et 10 cm (photos III et IV).

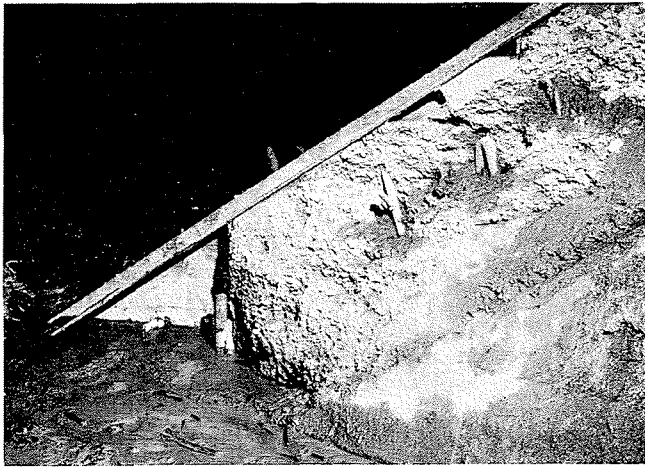
A *Cize-Bolozon*, sur l'Ain, la charge au niveau du seuil des vannes Stoney est très comparable (16,50 m). Les vannes sont à double corps. Il est possible d'évacuer 675 m<sup>3</sup>/s par la partie inférieure. Les rainures de vannes ont 2,23 m de longueur et 1 m de profondeur.

Après un fonctionnement de 400 h environ en « vanne de fond » et pour un débit moyen évacué de 400 m<sup>3</sup>/s, tous les bajoyers des piles présentent une zone érodée de forme triangulaire, accolée aux rainures et ayant les dimensions approximatives suivantes : hauteur : 20 à 30 cm, longueur : 50 cm, profondeur : 10 à 25 cm. Les érosions se sont produites dès la première année d'exploitation et ont fait l'objet de réparations périodiques.

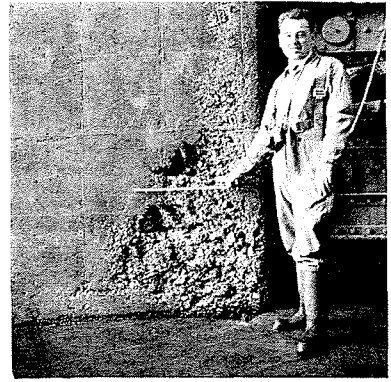
Le même type d'érosion a été observé à *Châteauneuf-du-Rhône*, à l'aval des rainures du batardeau amont du déchargeur (charge : 18 m) et sur l'*adduction directe de la Rhue*, dans la retenue de Bort-les-Orgues. Dans cette adduction, la galerie de 4 m de diamètre est fermée par une vanne à double étanchéité (dimensions : 3 × 4 m). La charge statique maximale sur la face amont de la vanne est de 39 m. La contrepression due à la retenue est de 11 m au maximum. La vanne joue le rôle d'orifice de réglage et son ouverture, variable, est habituellement comprise entre 1 et 3 m. L'adduction directe fonctionne d'une manière intermittente, au cours d'une période de deux mois environ chaque année.

Immédiatement en aval des rainures de la vanne, on a observé une zone cavitée sur chaque piedroit, d'une superficie de 1 m<sup>2</sup> environ. Les érosions les plus importantes atteignaient la dimension du poing.

Un premier blindage de protection a été arraché. Un deuxième blindage, de 12 mm d'épaisseur, a été installé en janvier 1963; il est lié par soudure aux pièces fixes de la vanne.

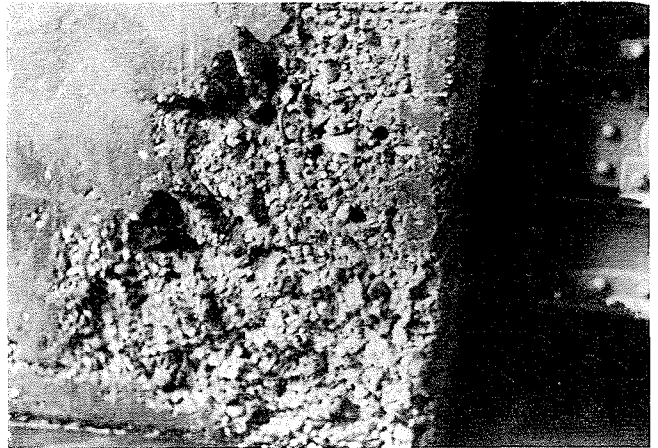
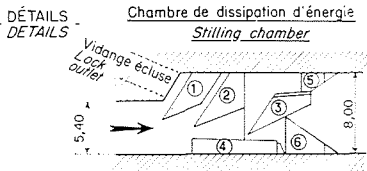
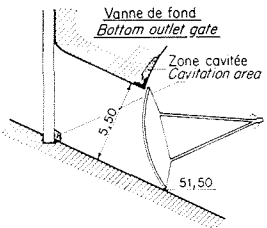
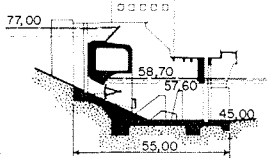


**Photo II/** (Photopresse, Montélimar.)  
Châteauneuf-du-Rhône :  
Erosion de la dent n° 3  
protégée par un blindage  
de 10 mm (janvier 1964).  
Châteauneuf-du-Rhône :  
Erosion on n° 3 tooth,  
in spite of 10 mm  
thick plating protection  
(January 1964).



(Photo E.D.F.) **Photo III/**  
Rivières : Pertuis 3.  
Erosion du bajoyer rive droite.  
Rivières : n° 3 sluiceway  
Right bank side wall erosion.

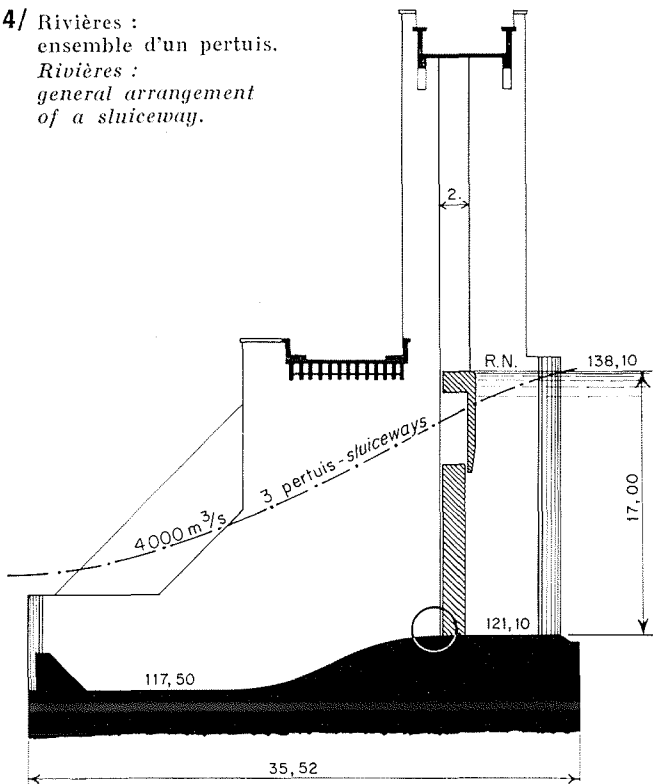
ENSEMBLE - GENERAL ARRANGEMENT



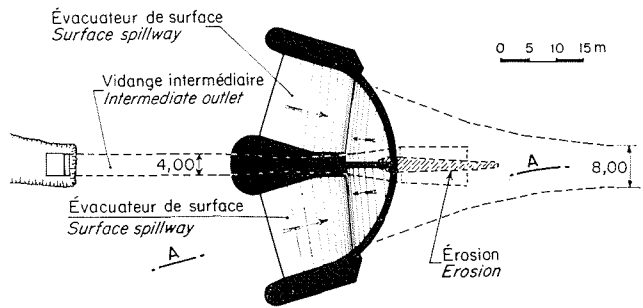
**Photo IV/** (Photo E.D.F.)  
Rivières : pertuis 3. Erosion du bajoyer rive droite. Détails.  
Rivières : n° 3 sluiceway. Right bank side wall erosion.  
Details.

**3/** Châteauneuf-du-Rhône : ensemble du déchargeur. Situation des dents de dissipation d'énergie.  
Châteauneuf-du-Rhône : general arrangement of relief works. Energy dissipation teeth positions.

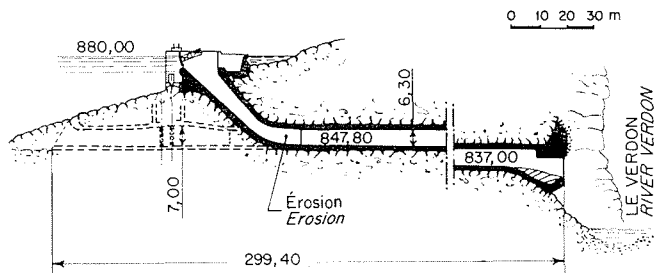
**4/** Rivières : ensemble d'un pertuis.  
Rivières : general arrangement of a sluiceway.



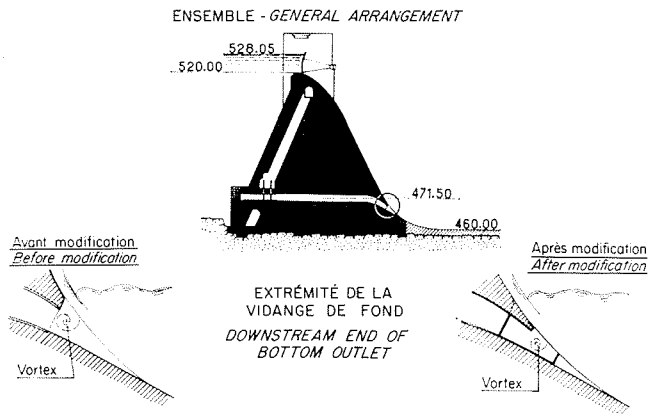
VUE EN PLAN - PLAN VIEW



COUPE - SECTION A-A



**5/** Castillon : ensemble de l'évacuateur de surface et de la vidange intermédiaire.  
Castillon : general arrangement of the surface spillway and intermediate outlet.



6/ Miranda : profil du barrage. Extrémité de la vidange de fond.  
 Miranda : general arrangement of the dam. Bottom outlet details.

3. Dégradations observées dans l'évacuateur de Castillon.

Ces dégradations se situent au niveau du raccordement de la vidange intermédiaire avec le coursier de l'évacuateur de surface (fig. 5). La turbulence de l'écoulement, au droit du débouché de la vidange, est sans doute importante et c'est pourquoi nous avons rangé cet exemple d'érosion parmi les écoulements turbulents à vitesse moyenne modérée.

Le raccordement est situé 30 m au-dessous du niveau de la retenue normale. L'évacuateur de surface peut débiter, au total, 520 m<sup>3</sup>/s dans deux pertuis indépendants qui se raccordent au niveau du débouché de la vidange intermédiaire.

L'extrémité du mur, qui divise en deux pertuis l'évacuateur, partage également le débouché de la vidange en deux orifices. C'est sur la face rive droite de ce mur diviseur, dans la zone de raccordement des deux ouvrages, que l'on observe l'érosion du béton sous la forme de sept sillons.

Ils ont une longueur moyenne de 1 m, une largeur de 20 cm et une profondeur maximale de 10 cm. Ils sont situés exactement dans le prolongement de découpes du coffrage, sensiblement perpendiculaires à l'écoulement, et qui ont laissé subsister des balèbres ou des décrochements de 10 à 25 mm de hauteur, encore apparents au-dessus des érosions (photos V et VI).

Il est peut-être possible de rapprocher cet exemple des érosions observées au Portugal, sur les deux barrages de Bemposta et de Miranda (\*) au débouché des vidanges de fond sur le parement aval de l'ouvrage qui sert de coursier à l'évacuateur de surface (fig. 6). Des essais sur modèle réduit ont montré, qu'avec la vidange fermée, le fonctionnement du déversoir s'accompagnait, au débouché de la vidange, d'un vortex à axe horizontal. On a obtenu, très approximativement, sur le modèle, pour un débouché réalisé avec un mortier à faible teneur en liant, les zones d'érosion du prototype.

(\*) Rapport 1-21 au XI<sup>e</sup> Congrès A.I.R.H. (Leningrad 1955).

Rapport 12, question 33. IX<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages (septembre 1967).

**Exemple de dégradations par cavitation au sein d'écoulements à vitesse moyenne élevée et à faible turbulence**

1. Evacuateurs de crues.

On pouvait penser, *a priori*, que les ouvrages qui sont le siège d'écoulements à vitesse moyenne élevée (évacuateurs en saut de ski, vidanges de fond, etc.) permettraient l'observation d'un certain nombre d'érosions par cavitation. Ce n'est pas le cas, et nous citerons uniquement, dans cette rubrique, les importantes érosions observées dans la vidange de fond n° 1 de Serre-Ponçon. Il faut toutefois noter que la grande majorité des évacuateurs n'a pas connu, jusqu'à présent, une durée de fonctionnement aussi prolongée que la vidange de Serre-Ponçon. Citons quelques chiffres :

- à Chastang, les évacuateurs fonctionnent, en moyenne, chaque année, une vingtaine d'heures;
- à L'Aigle, entre 1955 et 1965, les évacuateurs ont fonctionné, en moyenne, 180 h par an;
- à Bort-les-Orgues, de la mise en service (1951) à 1966, la durée cumulée de fonctionnement a été d'une centaine d'heures et les débits évacués compris entre 60 et 100 m<sup>3</sup>/s.

Seul, l'évacuateur rive droite de Génissiat a eu un fonctionnement important, environ 24 100 h, depuis sa mise en service en avril 1948.

Aucun de ces ouvrages n'a présenté, à ce jour, de dégradations importantes et les quelques déficiences des coursiers semblent, le plus souvent, devoir être attribuées à une mauvaise qualité des bétons, au gel ou à l'usure (photo VII).

2. Vidange de fond n° 1 de Serre-Ponçon.

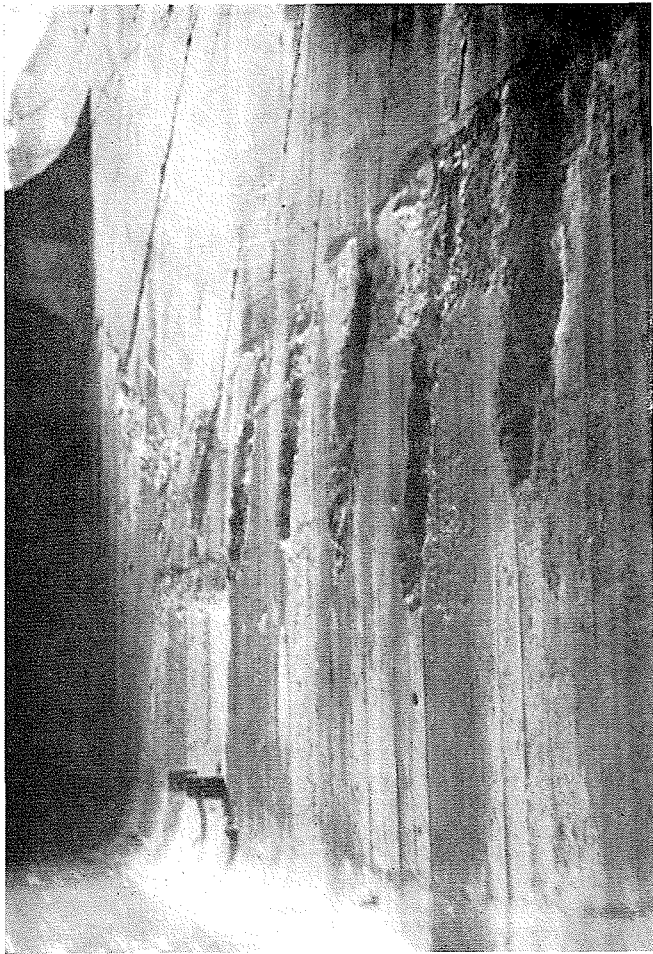
Chacune des deux vidanges de fond de Serre-Ponçon est équipée d'une vanne de garde et d'une vanne de réglage, distantes de 7 m. La section d'écoulement au droit de la vanne de réglage a 5,20 m de hauteur et 2,60 m de largeur.

Le seuil de la vanne est calé à 124 m au-dessous du niveau de la retenue normale et les vitesses peuvent atteindre 45 m/s (fig. 7).

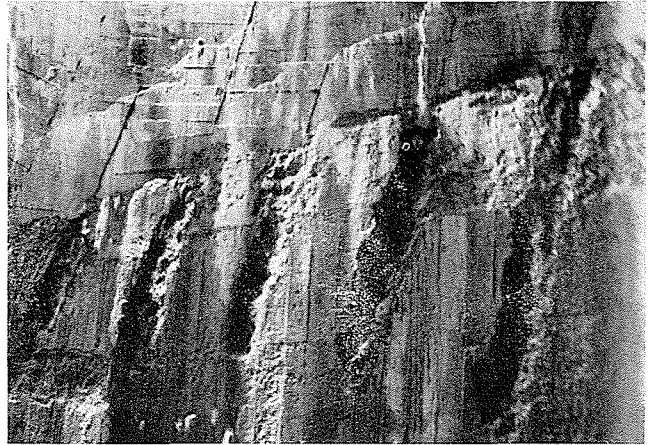
A l'aval de la vanne de réglage, la section rectangulaire est raccordée progressivement, par des formes simples, sur 45 m de longueur à la section circulaire de 9,30 m de diamètre. Le raccordement a été étudié sur modèle réduit. Un blindage en acier mi-dur, de 20 mm d'épaisseur, s'étend depuis 5 m à l'amont de la vanne de garde jusqu'à 15 m à l'aval de la vanne de réglage.

Fonctionnement :

Fin août 1959, la dérivation n° 2 a été fermée et la vidange n° 1 mise en service. Cette dernière a fonctionné pratiquement sans interruption jusqu'au 1<sup>er</sup> décembre 1960, écoulant plusieurs milliards de mètres cubes d'eau. Au cours de cette période deux érosions importantes du radier ont été constatées.



V



VI

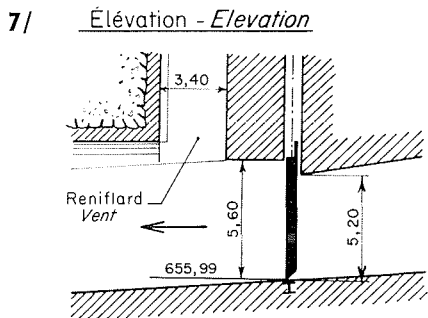
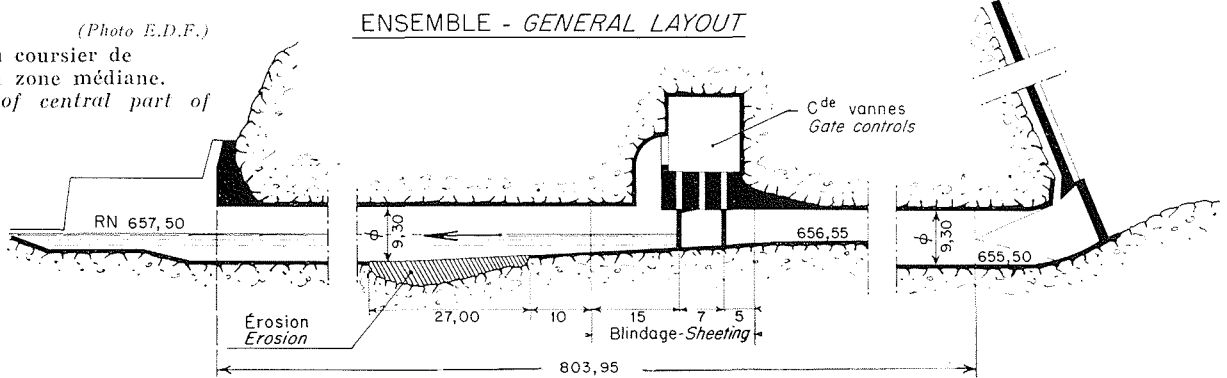


VII

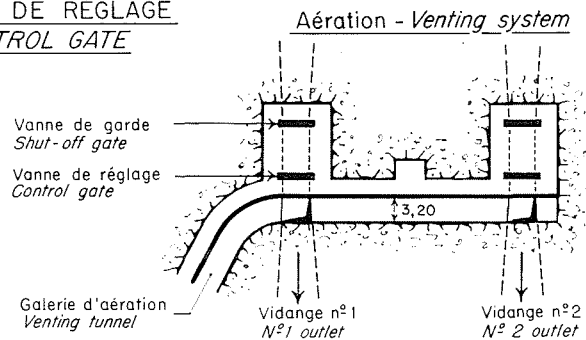
**Photo V/** (Photo E.D.F.)  
Castillon : évacuateur de crues. Erosions au raccordement de la vidange intermédiaire.  
*Castillon : Spillway erosion at the transition to the intermediate outlet.*

**Photo VI/** (Photo E.D.F.)  
Castillon : évacuateur de crues. Erosions au raccordement de la vidange intermédiaire. Détails. / *Castillon : Spillway erosion at the transition to the intermediate outlet. Details.*

**Photo VII/** (Photo E.D.F.)  
Chastang : détail du coursier de l'évacuateur dans la zone médiane.  
*Chastang : details of central part of spillway channel.*



VANNE DE RÉGLAGE  
CONTROL GATE



Serre-Ponçon : ensemble de la vidange de fond n° 1. Détail de la vanne de réglage.  
*Serre-Ponçon : general arrangement of n° 1 bottom outlet. Control gate details.*

apporte un ensemble d'informations très intéressant et très précis, dont il faut louer les auteurs et plus généralement, les services d'E.D.F. Les observations, bien entendu, ont porté non pas directement sur le phénomène hydraulique de cavitation sur l'ouvrage en service, mais seulement sur les érosions attribuées à la cavitation, et constatées après mise à sec de l'ouvrage. Pour tous les exemples présentés, on se trouve en présence d'écoulements très complexes, dont la simulation sur modèle réduit, qui n'a d'ailleurs pas été tentée, aurait été très délicate. La quasi-totalité des érosions constatées est liée à des perturbations locales : c'est le cas, par exemple, de la galerie de Serre-Ponçon, pour laquelle l'érosion semble liée au ressaut à l'aval de la vanne.

M. DUPORT précise que l'un des buts de l'enquête était d'obtenir des informations sur les détériorations pouvant survenir en l'absence de macroturbulence dans les écoulements uniformes à très grande vitesse; les renseignements recueillis sur les évacuateurs de crue paraissent rassurants, mais ils ne permettent pas de dire si, dans un souci d'économie, il est possible d'augmenter encore les vitesses dans ces ouvrages.

M. CANAVELIS remarque que les détériorations constatées dépendent de la qualité des bétons utilisés. A-t-on, dans ce domaine, des résultats d'essais effectués suivant des méthodes analogues à celles permettant de sélectionner les métaux résistants le mieux à la cavitation dans les turbomachines?

M. DUPORT répond qu'un programme d'étude systématique de tenue des bétons en présence de grandes vitesses d'écoulement avait été élaboré en liaison avec E.D.F.; il avait pour objectif de comparer les différents types de béton et surtout de formuler les tolérances acceptables pour l'irregularité de leur surface, compte tenu des conditions hydrodynamiques. Les installations d'essai sont d'une importance

et d'un prix très supérieurs à leurs homologues utilisés pour les recherches sur la résistance des métaux à la cavitation, car pratiquement, il n'est pas possible de représenter les bétons et même les couches limites des écoulements à grande vitesse autrement qu'à l'échelle 1/1.

Ce programme de recherche a été pour l'instant abandonné; on ne peut que souhaiter qu'il soit repris bientôt.

Dans la littérature technique, on trouve le compte rendu d'essais de cavitation effectués sur des éprouvettes en béton, en particulier, sous l'égide du Bureau of Reclamation (?) des Etats-Unis; malheureusement, ces articles n'apportent que des réponses incomplètes au problème qui nous occupe.

M. LABAYE précise que le programme d'essais, auquel a fait allusion M. DUPORT, avait été mis sur pied pour parfaire les spécifications nécessaires à la réalisation d'un ouvrage en projet dans les Alpes. Cet ouvrage ayant été remplacé par un autre très différent, les essais n'ont pas été commandés.

Il ajoute que de tels essais ont été réalisés non seulement aux U.S.A. mais aussi en U.R.S.S.; il ignore si ces derniers ont donné lieu à publication.

Il demande à M. BERNARD si, dans des cas d'érosions demandant des interventions d'entretien répétées : Cize Bolozon, par exemple, on a essayé des bétons de résine. La Région d'Equipement Alpes-Nord a essayé de tels bétons ou mortiers à l'abrasion sur l'Arveyron de la Mer de Glace, sans que les résultats soient vraiment concluants.

M. BERNARD répond qu'une tentative d'emploi de tels bétons a été réalisée dernièrement à Rivières-sur-Tarn; il est trop tôt pour conclure.

Le Président lève la séance en remerciant M. DESTENAY et M. BERNARD pour leur communication qui a suscité des réactions de nature à encourager la poursuite du travail de la « Section Machines » dans ce domaine difficile.

---

## Abstract

### Examples of cavitation damage to concrete

by J. Destenay \* and J. Bernard \*\*

---

In 1965 the Hydraulic Production Section of Electricité de France carried out a survey of cavitation damage to concrete among operational structures. Twenty cases were observed, resulting in the following findings:-

- 1) Cases of erosion were fairly infrequent;
- 2) Comparatively major damage usually occurred after exceptionally prolonged operation (e.g. after passing part or the whole of the flow diverted through the relief arrangements during staggered starting-up of power sets;
- 3) More severe damage seems liable to occur with the two following types of flow:-
  - a) Moderate mean flow velocities (10—20 m/sec) with considerable turbulence,
  - b) High mean flow velocities (above 30 m/sec) with little turbulence.

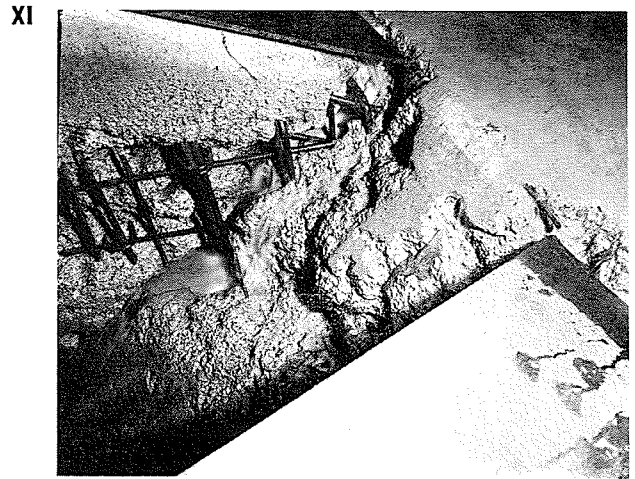
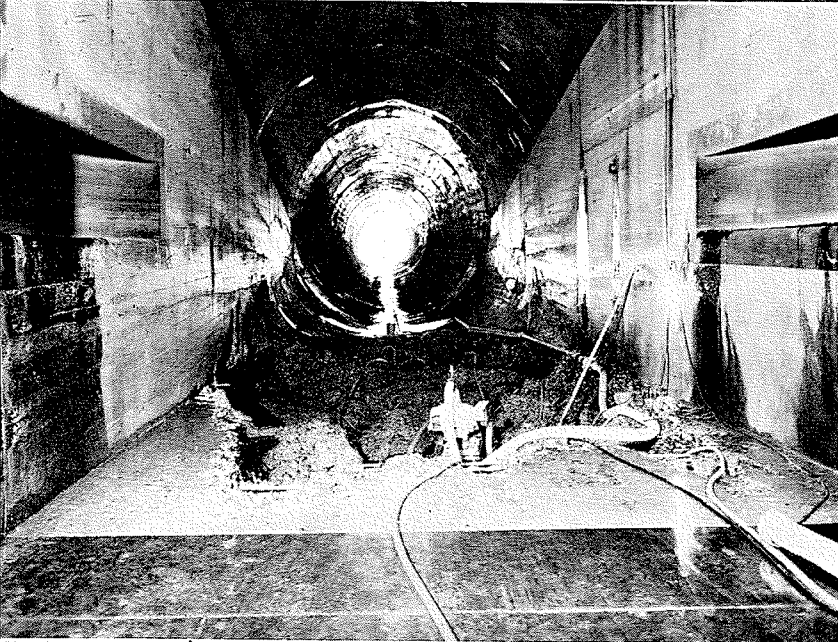
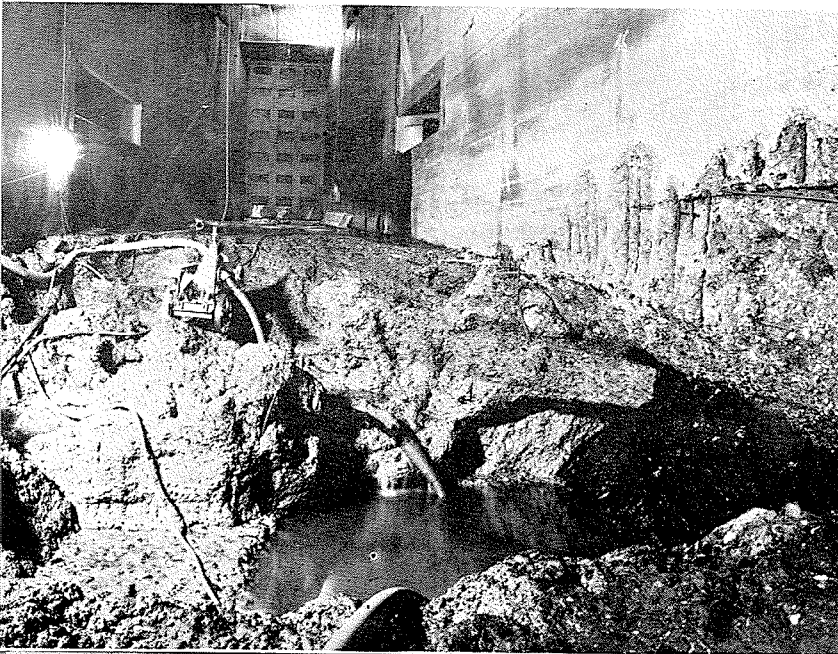
Relief works belong to category (a). Their energy dissipation arrangements frequently seem to require full sheeting protection.

Where high flow velocities are experienced, e.g. in bottom outlets, careful surface outline design and a smooth finish are important factors in preventing rapidly spreading damage.

---

\* Ingénieur-Conseil auprès d'E.D.F.

\*\* Ingénieur au Service de la Production Hydraulique d'E.D.F.



VIII

**Photo VIII/** *(Photo Sciarli, Marseille.)*  
Serre-Ponçon : érosion du radier de la vidange n° 1 (vue d'aval).

*Serre-Ponçon : N° 1 outlet apron erosion seen from downstream.*

**Photo IX/** *(Photo Sciarli, Marseille.)*  
Serre-Ponçon : érosion du radier de la vidange n° 1 (vue d'amont).

*Serre-Ponçon : N° 1 outlet apron erosion seen from upstream.*

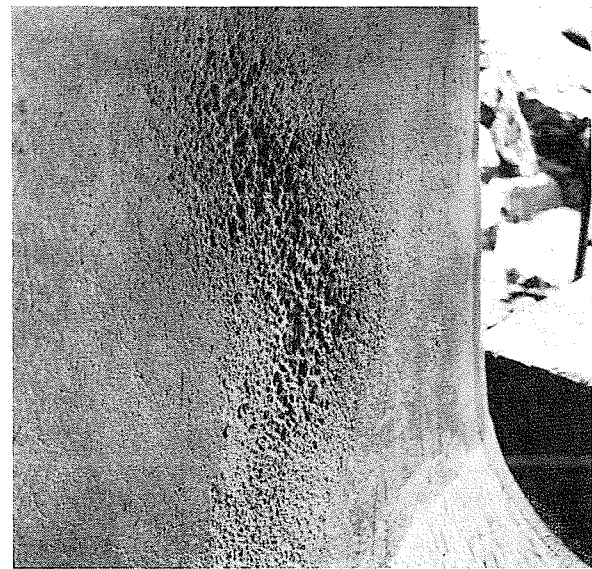
**Photo X/** *(Photo Sciarli, Marseille.)*  
Serre-Ponçon : vidange n° 1. Cavitation du blindage à l'aval de la rainure de la vanne de réglage.  
*Serre-Ponçon : N° 1 outlet. Sheeting cavitation downstream of the control gate groove.*

**Photo XI/** *(Photo Max, Boilène.)*  
Bollène : déchargeur n° 4. Redans n° 3. Erosions sur la doucine et les redans (juin 1953).  
*Bollène : N° 4 relief opening. N° 3 steps. Erosion on the ogee and steps (June 1953).*

**Photo XII/** *(Photo E.D.F.)*  
Eguzon : évacuateur de demi-fond. Bajoyer rive droite de l'entonnement (1967).  
*Eguzon : intermediate outlet. Intake right-bank wall (1967).*

IX

XII



X

*Erosion constatée en juin 1960 :*

Après un fonctionnement avec des débits compris entre 155 et 415 m<sup>3</sup>/s (de la mi-mai à la fin juin) et pour une charge de 85 m environ, des bruits anormaux et violents ont conduit à visiter la galerie.

On a constaté la présence d'une fosse d'érosion qui débutait, à environ 10 m en aval du blindage, avec une profondeur de 40 cm (au droit d'un changement de pente de moins de 1 degré du radier) et s'étendait sur 27 m de longueur. Elle s'approfondissait progressivement pour atteindre une profondeur maximale de 4 m, sensiblement au droit du raccordement avec la section circulaire (en ce point, la pente du radier diminue avec un angle inférieur à 4°). Les surfaces érodées du béton, très irrégulières, avaient un aspect très rugueux, « arraché », caractéristique de la cavitation. Le volume de la fosse était de 360 m<sup>3</sup> environ.

Aucune trace appréciable de cavitation n'était visible sur les blindages sauf à l'aval immédiat de quelques irrégularités provenant de gouttes de mortier qui n'avaient pas été nettoyées.

Les réparations furent effectuées rapidement avec du ciment HRI et la vidange remise en service le 7 juillet 1960.

*Erosion constatée en septembre 1960 :*

La vidange fonctionna, jusqu'en septembre, avec des débits inférieurs à 200 m<sup>3</sup>/s pour une charge d'environ 105 m. Dans la deuxième quinzaine de septembre, il fut nécessaire d'évacuer 300 m<sup>3</sup>/s environ. Le passage de ce débit s'effectua normalement pendant une journée environ, après quoi, des bruits anormaux ayant commencé à se faire entendre et des à-coups ayant été constatés dans le fonctionnement, la vidange fut arrêtée.

Sans vider la galerie, des sondages permirent de constater la présence d'une nouvelle fosse d'érosion, moins importante qu'en juin, et située plus en amont (photos VIII et IX). Le blindage en aval immédiat des rainures de la vanne de réglage était

cavité sur une zone triangulaire de 1 m de haut sur 1 m de longueur environ; il était même percé en rive droite sur 6 dm<sup>2</sup> (photo X). Les impératifs de la météorologie imposèrent une remise en service avec des débits compris entre 100 et 150 m<sup>3</sup>/s. Un mois plus tard, après vidange de la galerie, la fosse d'érosion ne semblait pas avoir évolué de façon notable. Elle s'amorçait à 30 cm en aval du blindage par trois saignées qui s'approfondissaient et se rejoignaient pour former, à 10 m du blindage, un trou occupant toute la largeur de la galerie et atteignant le rocher avec une profondeur maximale d'environ 2 m.

Le volume de la fosse était de 150 m<sup>3</sup>. En de nombreux points, de petites irrégularités de surface de l'ordre de quelques millimètres avaient provoqué des amorces de cavitation en aval immédiat.

La réparation définitive a consisté à réaliser un revêtement en béton d'un état de surface au moins équivalent à celui d'un blindage métallique par réglage soigné et meulage de toute la surface.

Des essais ultérieurs, au débit maximal de 600 m<sup>3</sup>/s, mais de faible durée (5 h 30 mn), n'ont montré aucune érosion appréciable.

\*  
\*\*

Ces exemples montrent quelques manifestations de la cavitation dans les ouvrages hydroélectriques. Celles-ci semblent rares et, le plus souvent, de faible ampleur pour les ouvrages actuellement en service.

Pour les écoulements à vitesse modérée (10 à 20 m/s), mais à forte turbulence, il semble possible de se mettre à l'abri de la plupart des dégradations, grâce à certaines précautions : blindage des zones de dissipation d'énergie dans les déchargeurs et blindage des bajoyers, à partir d'une certaine charge, à l'aval des rainures de vannes ou de batardeaux.

Pour les écoulements à grande vitesse (40 m/s), il semble nécessaire de veiller très soigneusement aux formes et aux états de surface, les dégradations pouvant s'amplifier rapidement.

**Discussion**

Président : P. BERGERON

Avant de donner la parole à M. BERNARD pour l'exposé de la communication ci-dessus, M. le Président présente celle-ci dans les termes suivants :

« Le titre proposé initialement par la « Section Machines » pour ce travail, était :

« Recensement des cas où ont été observées des cavitations sur les ouvrages de génie civil. »

Ce recensement était mené par un groupe dont avait bien voulu se charger M. DESTENAY.

M. BERNARD, à l'instigation de M. DESTENAY, faisait en 1965 une importante enquête sur le sujet.

En principe, ce travail devait être ensuite examiné et discuté par un groupe de la « Section Machines » pour essayer d'en tirer des observations et si possible des conclusions. Malheureusement, cette dernière partie du travail n'a pas encore été faite et c'est pourquoi le rapport qui vous est présenté aujourd'hui porte le titre :

« Quelques exemples de dégradation des bétons par cavitation dans des ouvrages hydroélectriques. »

Je tiens à remercier M. Pousse d'avoir bien voulu accepter que ses services présentent ce rapport sous sa forme actuelle. D'une part, le recensement des résultats constatés apporte des renseignements très précieux et d'autre part, il ne peut que stimuler tous ceux qui s'intéressent à la cavitation et les inciter à se pencher d'une manière plus efficace sur le mécanisme des érosions dans les ouvrages de génie civil (par exemple, en procédant à des essais systématiques en laboratoire afin de les comparer aux observations faites en grandeur nature) ».

Après l'exposé de M. BERNARD, M. le Président remercie ce dernier et ouvre la discussion.

M. CANAVELIS demande si l'on a pu mettre en évidence une relation entre certains risques d'érosion et certaines formes de cavitation au moins dans quelques cas simples et bien définis : cavitation derrière un tube cylindrique, à l'aval d'un redans à talus à 30°, etc.

M. DUPONT confirme que la communication de M. BERNARD

apporte un ensemble d'informations très intéressant et très précis, dont il faut louer les auteurs et plus généralement, les services d'E.D.F. Les observations, bien entendu, ont porté non pas directement sur le phénomène hydraulique de cavitation sur l'ouvrage en service, mais seulement sur les érosions attribuées à la cavitation, et constatées après mise à sec de l'ouvrage. Pour tous les exemples présentés, on se trouve en présence d'écoulements très complexes, dont la simulation sur modèle réduit, qui n'a d'ailleurs pas été tentée, aurait été très délicate. La quasi-totalité des érosions constatées est liée à des perturbations locales : c'est le cas, par exemple, de la galerie de Serre-Ponçon, pour laquelle l'érosion semble liée au ressaut à l'aval de la vanne.

M. DUPORT précise que l'un des buts de l'enquête était d'obtenir des informations sur les détériorations pouvant survenir en l'absence de macroturbulence dans les écoulements uniformes à très grande vitesse; les renseignements recueillis sur les évacuateurs de crue paraissent rassurants, mais ils ne permettent pas de dire si, dans un souci d'économie, il est possible d'augmenter encore les vitesses dans ces ouvrages.

M. CANAVELIS remarque que les détériorations constatées dépendent de la qualité des bétons utilisés. A-t-on, dans ce domaine, des résultats d'essais effectués suivant des méthodes analogues à celles permettant de sélectionner les métaux résistants le mieux à la cavitation dans les turbomachines?

M. DUPORT répond qu'un programme d'étude systématique de tenue des bétons en présence de grandes vitesses d'écoulement avait été élaboré en liaison avec E.D.F.; il avait pour objectif de comparer les différents types de béton et surtout de formuler les tolérances acceptables pour l'irrégularité de leur surface, compte tenu des conditions hydrodynamiques. Les installations d'essai sont d'une importance

et d'un prix très supérieurs à leurs homologues utilisés pour les recherches sur la résistance des métaux à la cavitation, car pratiquement, il n'est pas possible de représenter les bétons et même les couches limites des écoulements à grande vitesse autrement qu'à l'échelle 1/1.

Ce programme de recherche a été pour l'instant abandonné; on ne peut que souhaiter qu'il soit repris bientôt.

Dans la littérature technique, on trouve le compte rendu d'essais de cavitation effectués sur des éprouvettes en béton, en particulier, sous l'égide du Bureau of Reclamation (?) des Etats-Unis; malheureusement, ces articles n'apportent que des réponses incomplètes au problème qui nous occupe.

M. LABAYE précise que le programme d'essais, auquel a fait allusion M. DUPORT, avait été mis sur pied pour parfaire les spécifications nécessaires à la réalisation d'un ouvrage en projet dans les Alpes. Cet ouvrage ayant été remplacé par un autre très différent, les essais n'ont pas été commandés.

Il ajoute que de tels essais ont été réalisés non seulement aux U.S.A. mais aussi en U.R.S.S.; il ignore si ces derniers ont donné lieu à publication.

Il demande à M. BERNARD si, dans des cas d'érosions demandant des interventions d'entretien répétées: Cize Bolozon, par exemple, on a essayé des bétons de résine. La Région d'Équipement Alpes-Nord a essayé de tels bétons ou mortiers à l'abrasion sur l'Arveyron de la Mer de Glace, sans que les résultats soient vraiment concluants.

M. BERNARD répond qu'une tentative d'emploi de tels bétons a été réalisée dernièrement à Rivières-sur-Tarn; il est trop tôt pour conclure.

Le Président lève la séance en remerciant M. DESTENAY et M. BERNARD pour leur communication qui a suscité des réactions de nature à encourager la poursuite du travail de la « Section Machines » dans ce domaine difficile.

---

## Abstract

### Examples of cavitation damage to concrete

by J. Destenay \* and J. Bernard \*\*

---

In 1965 the Hydraulic Production Section of Electricité de France carried out a survey of cavitation damage to concrete among operational structures. Twenty cases were observed, resulting in the following findings:-

- 1) Cases of erosion were fairly infrequent;
- 2) Comparatively major damage usually occurred after exceptionally prolonged operation (e.g. after passing part or the whole of the flow diverted through the relief arrangements during staggered starting-up of power sets);
- 3) More severe damage seems liable to occur with the two following types of flow:-
  - a) Moderate mean flow velocities (10—20 m/sec) with considerable turbulence,
  - b) High mean flow velocities (above 30 m/sec) with little turbulence.

Relief works belong to category (a). Their energy dissipation arrangements frequently seem to require full sheeting protection.

Where high flow velocities are experienced, e.g. in bottom outlets, careful surface outline design and a smooth finish are important factors in preventing rapidly spreading damage.

---

\* Ingénieur-Conseil auprès d'E.D.F.

\*\* Ingénieur au Service de la Production Hydraulique d'E.D.F.