

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	84 (1958)
<b>Heft:</b>	3
<b>Artikel:</b>	Contribution à l'étude du phénomène d'érosion par frottement dans le domaine des turbines hydrauliques
<b>Autor:</b>	Bovet, Th.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-63478">https://doi.org/10.5169/seals-63478</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)  
de la Section genevoise de la S.I.A.  
de l'Association des anciens élèves de l'E.P.U.L. (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole  
polytechnique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève

Vice-président: † G. Epitaux, arch. à Lausanne

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.

Genève: Cl. Grosgrain, arch.; E. Martin, arch.

Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.

Valais: G. de Kalbermann, ing.; D. Burgener, arch.

Vaud: A. Gardel, ing.; A. Chevalley, ing.; E. d'Okolski, arch.;

Ch. Thévenaz, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: A. Stucky, ing.

Membres: M. Bridel; R. Neeser, ing.; P. Waltenspuhl, arch.

Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

## RÉDACTION

D. Bonnard, ing.

Rédaction et Edition de la S. A. du « Bulletin technique »

Tirés à part, renseignements

Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse Fr. 26.—	Etranger. . Fr. 30.—
----------------	-----------------	----------------------

Sociétaires . . . . .	» 22.—	» . . . » 27.—
-----------------------	--------	----------------

Prix du numéro . . . . .	» 1.60
--------------------------	--------

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande », N° II. 57 75, Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page. . . . .	Fr. 275.—
-------------------	-----------

1/2 » . . . . .	» 140.—
-----------------	---------

1/4 » . . . . .	» 70.—
-----------------	--------

1/8 » . . . . .	» 35.—
-----------------	--------

Adresse: Annonces Suisses S. A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Contribution à l'étude du phénomène d'érosion par frottement dans le domaine des turbines hydrauliques, par Th. Bovet, ing. E.P.F., professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

## L'ACTUALITÉ AÉRONAUTIQUE

NÉCROLOGIE : Fritz Hübner, ingénieur

Les Congrès — Documentation générale — Documentation du bâtiment — Service de placement

## CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE D'ÉROSION PAR FROTTEMENT DANS LE DOMAINE DES TURBINES HYDRAULIQUES<sup>1</sup>

par TH. BOVET, ing. E.P.F., professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

### I. Introduction

L'érosion est la dégradation d'une surface en contact avec un fluide en mouvement. Elle peut être provoquée par le fluide lui-même ou par les corps étrangers qu'il contient en suspension.

S'il s'agit d'un liquide qui ne transporte pas de particules solides, la destruction de la matière peut provenir, soit d'un martelage de la surface par des particules liquides (phénomène qu'on désigne en allemand par le terme de « Tropfenschlag »), soit d'une onde de pression due à la condensation brusque de bulles de vapeur engendrées par cavitation.

Supposons que les phénomènes précédents soient absents mais qu'en revanche le liquide contienne des particules solides. L'attaque de la matière est alors due

<sup>1</sup> Conférence tenue à la 235<sup>e</sup> journée de discussion de l'Association suisse pour l'essai des matériaux (A.S.E.M.) du 6 septembre 1957.

au frottement des particules qui viennent s'appliquer contre sa surface.

Nous pouvons donc distinguer trois sortes d'érosions : par martelage, par cavitation et enfin par frottement. L'exposé qui suit n'est consacré qu'à la dernière et, puisqu'il s'agit de turbines hydrauliques, nous nous voyons donc dans le cas où l'eau utilisée contient du sable et du gravier, corps que l'on rencontre en quantités et dimensions plus ou moins grandes dans la plupart des eaux à turbiner.

En effet, un cours d'eau, avant d'être capté et conduit aux turbines d'une installation, débute presque toujours par un écoulement de caractère torrentiel. Ses eaux érodent elles-mêmes son lit et ses berges, tout en entraînant d'autres particules solides provenant aussi d'une érosion due à des phénomènes naturels tels que le vent, la pluie, la décomposition chimique des roches,

les mouvements des glaciers, agents qui tous contribuent à modifier petit à petit le relief de la planète.

Si l'eau ne séjourne que très peu de temps dans un bassin d'accumulation ou si, dans le cas d'une simple dérivation, le canal d'aménée est trop court pour permettre une décantation complète des particules de sable en suspension dans l'eau, ces dernières sont entraînées au travers des conduites jusqu'aux turbines et accomplissent leur œuvre destructive aux endroits des machines qui sont les plus exposés.

Bien entendu, plus la quantité de particules solides par unité de débit sera élevée, plus l'usure par érosion sera accentuée. C'est donc une lapalissade que de dire qu'on devrait toujours chercher à décanter l'eau, dans la mesure du possible, avant de l'utiliser dans des machines hydrauliques. Toutefois la question du dessablage de l'eau doit être examinée aussi sous son aspect économique, mais c'est un sujet que nous ne pourrons aborder dans cet exposé.

## II. Le mécanisme du phénomène d'usure

Est-il possible de prévoir d'une manière quantitative quelle sera la dégradation d'une surface en contact avec un liquide en mouvement contenant des particules solides ? Pour répondre à cette question, il convient d'étudier quelque peu en détail le mécanisme du phénomène d'usure.

A cet effet, considérons une particule solide de volume  $V$  et de masse spécifique  $\rho_s$  dans un liquide de masse spécifique  $\rho_l$  en mouvement plan horizontal matérialisé par ses lignes de courant, en particulier par celle passant par le grain solide au point considéré.

Une masse en mouvement, abandonnée à elle-même décrira une trajectoire rectiligne dans un écoulement à vitesse constante, à moins qu'elle ne subisse un ou des efforts qui la fassent dévier. Dans notre cas, la particule sera déviée d'une trajectoire rectiligne par le liquide qui exerce sur elle des forces de pression et de frottement. C'est alors que la trajectoire de la particule s'incurvera comme le montre la figure 1.

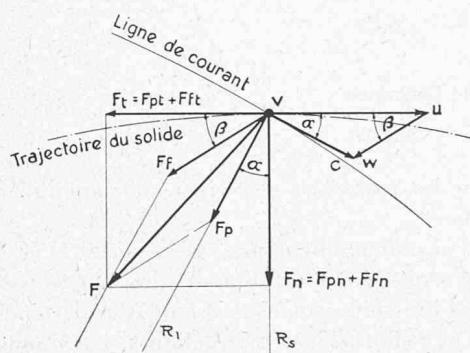


Fig. 1. — Efforts exercés par un liquide en mouvement sur une particule solide qu'il entraîne.

La force de pression exercée par le liquide sur le solide (dans la direction normale à la ligne de courbure  $1/R_l$  au point considéré et provenant de la variation de pression au sein du liquide de vitesse  $C$ ), se calcule par la relation

$$F_p = V \cdot \rho_l \cdot \frac{C^2}{R_l} \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Ici, la variation de pression dans le sens de l'écoulement est supposée nulle, ce qui exclut, dans cette direction, toute variation de vitesse et toute perte de charge.

La force de frottement exercée par le liquide sur le solide dépend de la vitesse relative  $\vec{W}$ , c'est-à-dire de la différence vectorielle entre la vitesse  $\vec{C}$  du liquide et  $\vec{U}$  du solide. L'orientation de cette force est donnée par le vecteur  $\vec{W}$  et, en première approximation, son module peut s'exprimer par

$$F_f = k' \cdot W^2 \quad (2)$$

où  $k'$  est un facteur dépendant essentiellement de la forme du grain de sable et de sa rugosité.

Si l'on examine la figure 1, on voit que les valeurs des composantes de ces deux forces, en direction normale à la trajectoire du solide, s'expriment par les relations

$$F_{pn} = V \cdot \rho_l \cdot \frac{C^2}{R_l} \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$F_{fn} = k' \cdot W^2 \cdot \sin \beta \quad (4)$$

et que leur somme représente la force résultante  $F_n$  exercée par le liquide sur la particule solide en direction normale à la trajectoire de cette dernière, force qui tend donc à l'écartier d'une trajectoire rectiligne. Il vient :

$$F_n = V \cdot \rho_s \cdot \frac{U^2}{R_s} = V \cdot \rho_l \cdot \frac{C^2}{R_l} \cdot \cos \alpha + k' \cdot W^2 \cdot \sin \beta. \quad (5)$$

En exprimant la vitesse  $W$  et l'angle  $\beta$  au moyen des vitesses  $C$  et  $U$ , et en désignant par  $\alpha$  l'angle formé par les deux dernières, on trouve, pour le rapport des courbures  $1/R_s$  de la trajectoire de la particule solide et  $1/R_l$  de la ligne de courant, l'expression

$$\begin{aligned} \frac{1/R_s}{1/R_l} &= \frac{R_l}{R_s} = \frac{\rho_l}{\rho_s} \left( \frac{C}{U} \right)^2 \cos \alpha + \\ &+ \frac{k' \cdot C \cdot R_l \cdot \sin \alpha}{V \cdot \rho_s \cdot U} \sqrt{1 + \left( \frac{C}{U} \right)^2 - 2 \left( \frac{C}{U} \right) \cos \alpha}. \end{aligned} \quad (6)$$

Dans un écoulement à potentiel des vitesses, on aurait

$$C \cdot R_l = k'' = \text{constante} \quad (7)$$

d'où, en réunissant les deux facteurs constants en posant  $k' \cdot k'' = k$ , l'expression qu'il convient d'analyser :

$$\begin{aligned} \frac{1/R_s}{1/R_l} &= \frac{R_l}{R_s} = \frac{\rho_l}{\rho_s} \left( \frac{C}{U} \right)^2 \cos \alpha + \\ &+ \frac{k \cdot \sin \alpha}{V \cdot \rho_s \cdot U} \sqrt{1 + \left( \frac{C}{U} \right)^2 - 2 \left( \frac{C}{U} \right) \cos \alpha}. \end{aligned} \quad (8)$$

De cette dernière relation, on tire de toute évidence les conclusions suivantes :

L'écart entre la courbure  $1/R_s$  de la trajectoire de la particule solide et celle  $1/R_l$  des lignes de courant du liquide sera d'autant plus marqué ( $R_l/R_s$  d'autant plus petit)

- que la masse  $V \cdot \rho_s$  de la particule et sa vitesse  $U$  seront plus grandes,
- que le rapport de la masse spécifique  $\rho_s$  de la particule à la masse spécifique  $\rho_l$  du liquide sera plus grand,
- que le rapport de la vitesse  $U$  de la particule à la vitesse  $C$  du liquide sera plus élevé,
- que la rugosité de la surface de la particule sera faible.

Un écart croissant entre la courbure de la trajectoire de la particule et celle des lignes de courant du liquide qu'elle traverse successivement se traduit par une augmentation de l'angle  $\alpha$ .

Supposons maintenant que le réseau des lignes de courant du liquide soit déterminé par un écoulement le long d'une paroi incurvée et qu'en particulier la ligne de courant limite du liquide en contact avec la paroi se confonde avec la coupe horizontale de cette paroi. Nous retrouvons alors, au point d'intersection de la trajectoire de la particule solide avec la paroi, l'angle  $\alpha$  qui sera déterminant pour le calcul du choc (supposé non élastique) de la particule sur cette surface (voir fig. 2). En effet, l'énergie théorique de choc de la particule sur la paroi est

$$E_{ch} = V \cdot \frac{\rho_s}{2} \cdot (U \cdot \sin \alpha)^2 \quad (9)$$

alors que l'énergie cinétique restante le long de la paroi vaut encore

$$E_c = V \cdot \frac{\rho_s}{2} \cdot (U \cdot \cos \alpha)^2. \quad (10)$$

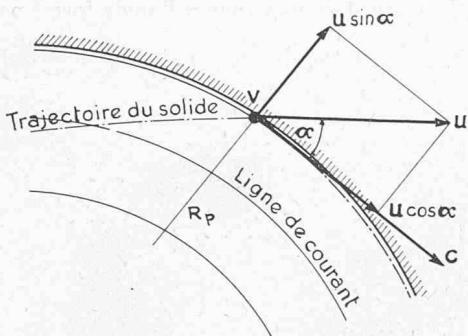


Fig. 2. — Comportement d'une particule solide entraînée par un liquide en mouvement le long d'une paroi incurvée et à proximité de celle-ci.

Si l'angle  $\alpha$  est de  $90^\circ$ , toute l'énergie cinétique de la particule est anéantie par le choc, ce qui se traduit par une désagrégation de la matière constitutive de cet obstacle.

Pour les angles  $\alpha$  plus petits, l'expérience montre que le choc est atténué dans une proportion plus forte que l'équation (9) ne le laisse supposer.

L'énergie de destruction par chocs de la partie de la paroi exposée à ceux-ci ne peut donc se déterminer valablement d'après l'équation (9) qu'en admettant une percussion aussi directe que possible, autrement dit pour un angle  $\alpha$  voisin de  $90^\circ$ .

La particule se déplaçant contre la paroi de courbure  $1/R_p$  aurait une vitesse initiale qui diminuerait progressivement par l'effet du frottement si le liquide ne

la ranimait pas continuellement, si bien que sa vitesse se maintiendrait en moyenne à une valeur que l'on peut supposer, pour simplifier, sensiblement égale à  $C$ , soit à celle du liquide.

Ainsi, la puissance de frottement  $P_f$  pourrait se calculer de la façon suivante :

$$P_f = \mu \cdot V \cdot \frac{(\rho_s - \rho_l)}{R_p} \cdot C^3 \quad (11)$$

où  $\mu$  est le coefficient de frottement entre la particule et la paroi.

Cette équation montre de toute évidence que la puissance destructive par frottement sera d'autant plus grande

- que la différence des masses spécifiques de la particule  $\rho_s$  et du liquide  $\rho_l$  sera plus grande,
- que le volume  $V$  et la vitesse  $C$  de la particule, ainsi que le coefficient de frottement  $\mu$  seront plus grands,
- que le rayon de courbure  $R_p$  de la paroi sera plus petit.

La dégradation de la paroi par frottement des particules solides contre celle-ci se distingue donc nettement de celle par martelage. Les surfaces soumises au frottement conservent leur aspect plus ou moins lisse mais s'ondulent par rabotage. Attendu que l'ondulation est d'autant plus marquée que la courbure de la surface est plus accentuée, il est facile de concevoir que les creux de l'ondulation vont toujours plus s'approfondir, tandis que sur les crêtes, les particules solides n'auront aucune prise.

### III. La détérioration des éléments essentiels des principaux types de turbines hydrauliques

Nous allons maintenant passer à quelques cas concrets d'érosion par frottement sur des éléments de turbines hydrauliques et verrons ensuite dans quelle mesure on peut y remédier d'une manière qui soit à la fois efficace et économique.

#### 1. La turbine Pelton

La turbine Pelton est celle qui est appelée à équiper les plus hautes chutes. La figure 3 montre la coupe transversale d'une des deux turbines fournies par les Ateliers des Charmilles S. A. pour l'installation chilienne de Los Molles. Chacune de ces machines absorbe un débit de  $0,96 \text{ m}^3/\text{s}$  sous une chute nette de  $1125 \text{ m}$  et développe une puissance de  $12\,650 \text{ ch}$  à  $1000 \text{ t/min}$ . Les premiers éléments exposés à l'usure sont ceux de l'injecteur, notamment l'anneau d'embouchure (15) et le pointeau (5) qui servent à la formation d'un jet à la sortie de l'injecteur, jet dont la vitesse, un peu en aval de la tuyère, est proche de la valeur théorique  $\sqrt{2gH}$ . Le pointeau sert aussi à régler le débit de la turbine par simple déplacement axial.

Une représentation du pointeau et de l'embouchure est donnée par la figure 4, dans laquelle on a indiqué les lignes de courant de l'eau dans un plan passant par l'axe de l'embouchure et la trajectoire d'un grain de sable pour deux positions du pointeau, l'une correspondant à  $2/3$ , l'autre à une ouverture réduite à  $1/8$  de l'ouverture totale.

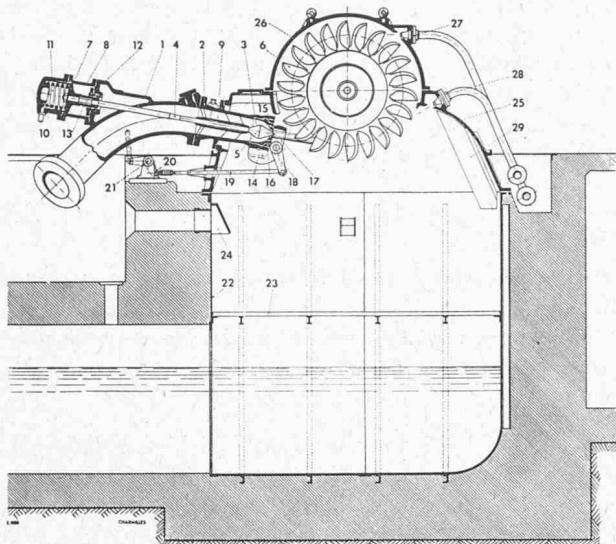


Fig. 3. — Coupe transversale de la turbine Pelton de Los Molles.

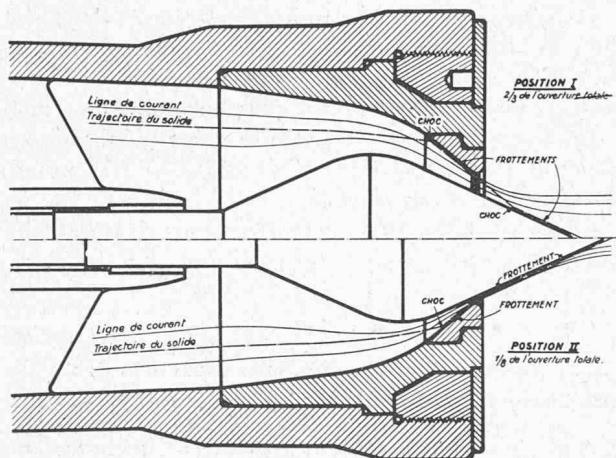
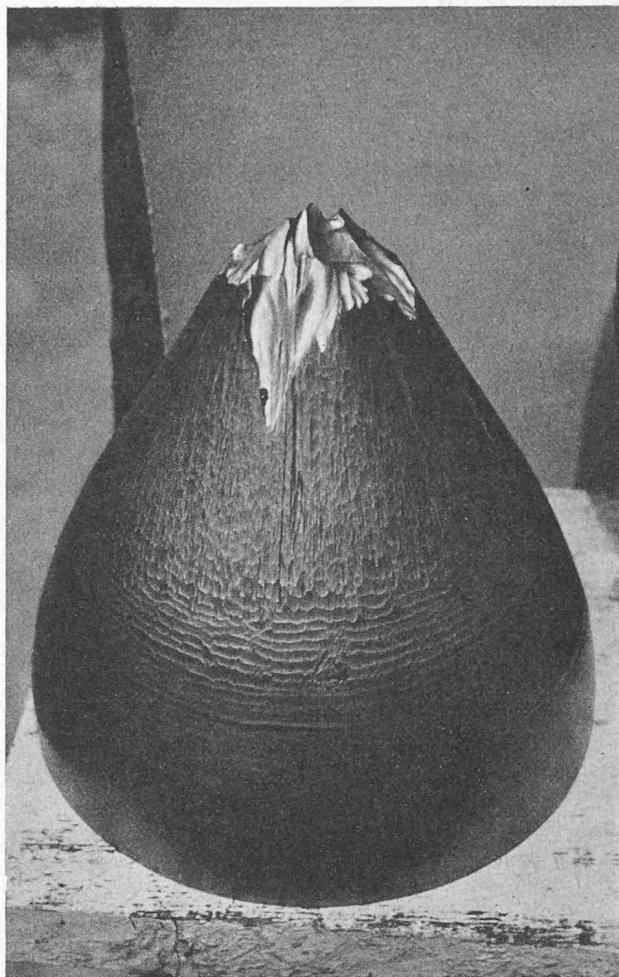


Fig. 4. — Coupe de l'injecteur de la turbine Pelton de Los Molles avec pointeau à deux positions.

A la plus grande de ces ouvertures de l'injecteur, le grain de sable, après avoir subi une déviation vers le centre, provoquée par le cône de l'embouchure, vient frapper l'extrémité aval du pointeau et frotte le long de celle-ci, d'où dégradation de sa surface par choc et frottement. L'usure est particulièrement forte à cause de la grande vitesse d'écoulement en cet endroit, laquelle intervient à la deuxième puissance dans le calcul du choc et à la troisième puissance dans le calcul du frottement.

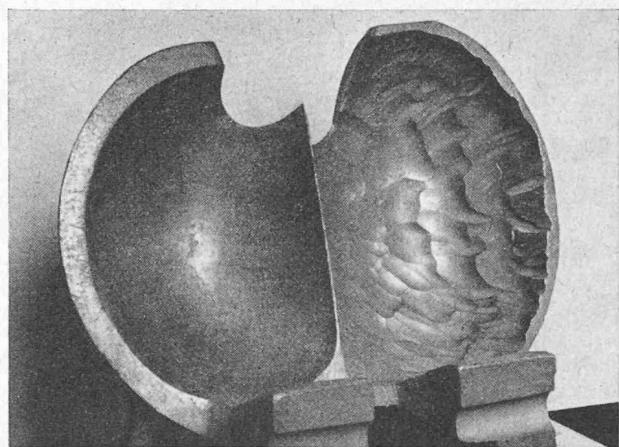
A la plus petite ouverture du pointeau, les chocs sur son extrémité aval n'interviennent plus. Il ne reste que l'effet du frottement.

La photographie reproduite à la figure 5, mise aimablement à notre disposition par la S. A. pour l'Industrie de l'Aluminium (AIAG), se rapporte à une turbine Pelton fonctionnant sous une chute de 540 m. Elle illustre d'une manière frappante les conclusions qui précèdent, car l'on distingue nettement la partie détériorée par frottement de celle détruite par choc vers la pointe du cône. Dans ce cas particulier, la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 100 m/s.



(Photo AIAG)

Fig. 5. — Pointeau de turbine Pelton, érodé par le sable.



(Photo AIAG)

Fig. 6. — Aube d'une roue Pelton : la poche de droite usée par le sable, la poche de gauche rechargée par soudure.

Après avoir quitté l'injecteur, le jet vient frapper l'aubage de la roue motrice, constitué par un certain nombre d'augets, chacun étant formé de deux poches séparées par une arête médiane (repère 6 de la fig. 3).

L'arête médiane de l'aube fractionne le jet en deux nappes égales qui sont déviées dans les poches de façon à transformer l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique. La déviation des particules d'eau est voi-

sine de 180° et par conséquent la présence de grains de sable conduit fatallement à une usure superficielle des poches qui, lisses à l'état de neuf, présentent au bout de quelque temps une surface ondulée sous l'effet du rabotage dont il a été question plus haut.

La figure 6 est une photographie d'une aube Pelton où la surface de la poche de droite a été laissée telle qu'elle se présentait après une durée de fonctionnement correspondant à moins de deux périodes d'été, époques où l'eau est particulièrement sableuse, alors que la surface de la poche de gauche, qui accusait la même usure, a déjà été rechargée par soudure et meulée ensuite pour lui restituer sa forme et son fini primitifs. On remarque les ondulations superficielles de la surface non réparée.

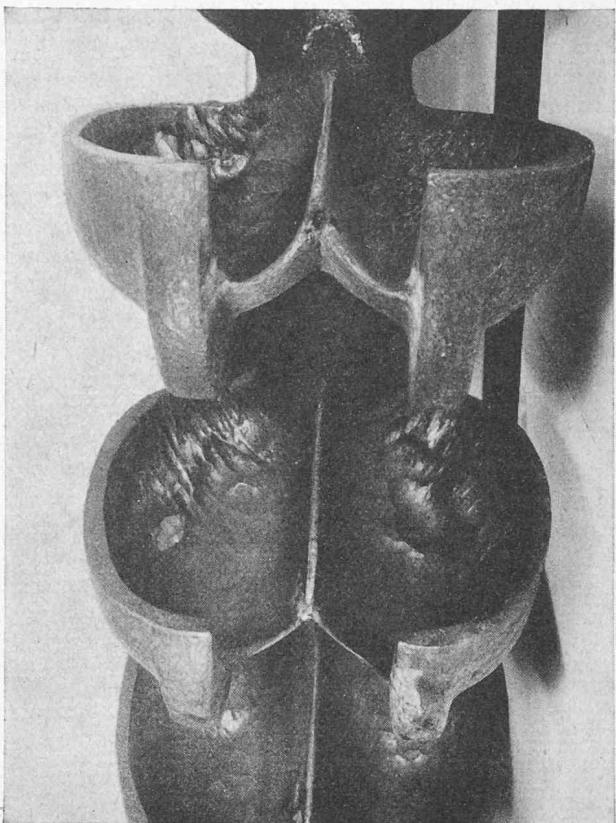
Les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S. A. ont bien voulu nous remettre la photographie de la figure 7, où l'on voit trois aubes d'une roue Pelton attaquées par l'érosion. Une fois de plus on retrouve les ondulations des poches, tandis que l'usure des arêtes d'entrée et médiane a été provoquée par des chocs.

Enfin, les Ateliers des Charmilles S. A. à Genève disposaient d'une collection de photographies montrant l'usure par érosion des surfaces actives des aubages de deux roues Pelton de l'Usine d'Aletsch dans le Haut-Valais. Cette centrale comprend deux groupes à une roue Pelton chacun, une de ces roues étant en acier au Mn, l'autre en acier à 2 % de Ni. La première de ces roues a fonctionné, du 29 janvier 1952 au 22 octobre 1952, durant 6069 heures et a produit une énergie totale de 38 millions de kWh en chiffre rond. Il faut cependant noter que cette roue a été mise tout particulièrement à contribution durant la période d'été, puisque sur environ 4000 heures de cette période on a mesuré une charge moyenne de 7620 kW alors que, le reste du temps, la charge moyenne n'a été que d'à peine 3560 kW. Le fait qu'en période d'été, comme nous l'avons dit plus haut, l'eau est particulièrement sableuse, permet de conclure que l'usure de la roue s'est effectuée presque exclusivement durant la période d'exploitation à forte charge.

La première photographie de cette collection (fig. 8) montre trois aubes de cette roue, sur lesquelles on discerne nettement la nature des usures. La figure 9 est particulièrement parlante, car on y remarque très bien l'usure de l'arête médiane, sur une largeur d'environ 10 mm et celle des deux arêtes d'entrée, sur une largeur d'environ 5 mm.

Quant à l'autre roue motrice, en acier à 2 % de Ni, il sied de relever tout d'abord qu'elle n'a fonctionné que pendant l'été et ceci durant 3921 heures, soit du 11 mai 1952 au 22 octobre 1952. La production totale a cependant atteint 30 millions de kWh en chiffre rond, avec une charge moyenne de 7650 kW. La durée de fonctionnement de cette roue est donc comparable à celle de la roue précédente, en acier au Mn, durant la même période. Ce que nous montre la figure 10 se compare tout à fait aux vues précédentes. D'une roue à l'autre, l'usure n'est guère différente, bien que les qualités d'acier ne soient pas les mêmes.

Enfin, la photographie (fig. 11) d'une surface d'aube de la roue en acier au Ni montre en plus l'effet qui peut résulter d'un défaut de matière mis à jour par l'érosion, défaut qui provoque dans le sens de l'écoulement



(Photo Vevey)

Fig. 7. — Trois aubes d'une roue Pelton érodée par le sable.



(Photo Charmilles)

Fig. 8. — Trois aubes de la roue en acier au manganèse du groupe 1 de l'usine d'Aletsch après 6069 heures de service, la plupart en été.

une ondulation dont le creux est particulièrement profond.

Dans une turbine Pelton, il est évident que la dégradation des surfaces du pointeau, de la tuyère et de l'aubage a pour conséquence une baisse du rendement énergétique et, par conséquent, une baisse de puissance consécutive qui n'est certes pas négligeable. Rappelons à ce sujet l'article de F. Aemmer<sup>1</sup> traitant de l'usure des pointeaux et des tuyères de turbines Pelton et de son influence sur le rendement. L'auteur base son étude sur des essais effectués sur l'une des turbines de 22 000 kW de la Centrale de Handeck de la S. A. des Forces Motrices de l'Oberhasli. Il a constaté une baisse de rendement de 1,5 % à pleine charge et allant jusqu'à 9 % à quart de charge, due à des usures de 0,5 à 1 mm de profondeur sur le pointeau et la tuyère, et consécutives à une durée d'exploitation de 8200 heures environ. Cette baisse de rendement s'explique par la formation défectueuse du jet. En effet, au centre comme à la périphérie de celui-ci, les particules d'eau sont ralenties par un frottement accru, dû à la rugosité des surfaces

<sup>1</sup> « Über den Einfluss der Abnutzung von Nadeln und Düsen auf den Wirkungsgrad von Peltonturbinen ». Bulletin A.S.E. 1943, No 13.



(Photo Charmilles)

Fig. 11. — Défaut sur la surface de l'une des aubes de la roue en acier au Ni.

détériorées, qui provoque une dispersion du jet. Dès lors, il est certain que de nombreuses veines liquides ne travaillent plus convenablement dans l'aubage, d'où l'apparition de nouvelles pertes qu'une turbine neuve n'accuse pas.

La production d'énergie en souffre et elle est particulièrement sensible pour des groupes importants, surtout si l'exploitation dans ces conditions se porte sur les mois d'hiver, soit au moment où il est le plus difficile de répondre à la demande d'énergie. L'étude de M. Aemmer a donc particulièrement souligné l'importance que revêt pour l'exploitant un entretien convenable et suffisamment fréquent des éléments essentiels de ses turbines.

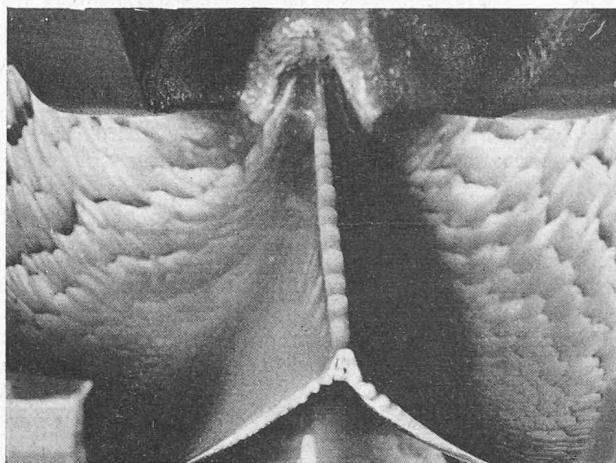
## 2. La turbine Francis

La turbine Pelton dont nous venons de parler est du type à action, sa roue motrice étant mise en rotation par un ou plusieurs jets libres.

Passons maintenant à un autre type, savoir la turbine Francis, qui est essentiellement vouée à utiliser les chutes moyennes et les débits moyens. Une telle machine fonctionne suivant un principe tout différent de la turbine Pelton. Elle a une roue motrice entièrement noyée, dans laquelle l'écoulement est à veine forcée, et fonctionne par différence de pression. C'est une turbine à réaction.

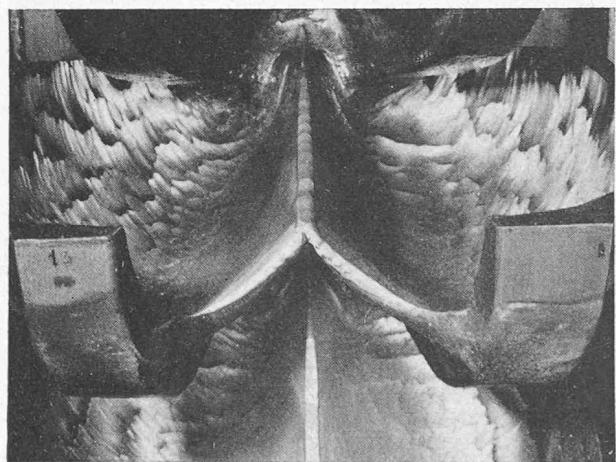
Pour notre propos, nous choisirons l'exemple des trois turbines Francis à roues motrices doubles de l'usine de Martigny-Bourg, centrale construite en 1908 et appartenant à l'important groupe romand de l'Energie Ouest-Suisse (EOS).

Ces trois turbines constituent le nouvel équipement de la centrale, dont la modernisation a été décidée en 1940. Elles ont remplacé dix-sept turbines Pelton de formats et de puissances les plus divers, et dont la plus importante développait péniblement 2500 ch. Chacune de ces trois nouvelles turbines fonctionne sous une chute nette de 177 m, utilise un débit de 4,92 m<sup>3</sup>/s et fournit dans ces conditions une puissance effective de 10 000 ch à l'accouplement à l'alternateur. Le groupe est à axe horizontal et sa vitesse de rotation est de 750 t/min. La figure 12 montre la coupe axiale de l'une de ces turbines construites par les Ateliers des Charmilles S. A. à Genève.



(Photo Charmilles)

Fig. 9. — Arête médiane et arête d'entrée de l'une des trois aubes de la figure 8.



(Photo Charmilles)

Fig. 10. — Arête médiane et arête d'entrée de l'une des trois aubes de la roue en acier à 2 % de nickel du groupe 2 de l'usine d'Aletsch, après 3921 heures de service, la plupart en été.

Elles sont alimentées par les eaux de la Dranse, captées à Sembrancher, eaux dont la teneur en sable peut atteindre des proportions particulièrement élevées, suivant la saison d'une part et les conditions météorologiques qui ont une influence déterminante sur la fonte des glaciers d'autre part. Le sable en question est du type cristallin et, par conséquent, très abrasif.

Il y a longtemps qu'on a fait l'expérience des ravages causés par ce sable dans les turbines hydrauliques de cette centrale. Un premier dessableur Boucher a été transformé en 1923 selon le système Dufour, mais la place laissée disponible par la construction originale pour l'installation du nouveau dessableur ne permet pas d'éliminer les particules solides de granulation inférieure à 0,4 mm.

M. H. Dufour, dans les années de 1924 à 1926, a lui-même effectué des prélèvements d'eau à la sortie des turbines, donc après la mise en service de son dessableur.

Les chiffres suivants donnent les volumes et les poids de sable qui passent en vingt-quatre heures.

Date	Volume (m <sup>3</sup> )	Poids (tonnes)
5 juillet . . . . .	1924	533
22 juillet . . . . .	1924	1328
30 juillet . . . . .	1924	20
7 août . . . . .	1924	382
Un jour en septembre . .	1924	975
Un jour en juin . . . . .	1925	651
Un jour en juillet . . . . .	1925	1149
Un jour en août . . . . .	1925	547
Un jour à fin mai . . . . .	1926	1474
Un jour en juillet . . . . .	1926	1113
		2200
		1680

On relève dans ce tableau :

- a) la variation considérable des quantités d'alluvions charriées par l'eau en des laps de temps très courts ; ainsi, en juillet 1924, huit jours ont suffi pour faire baisser la quantité journalière de sable de 2000 tonnes à 30 tonnes ;
- b) la quantité maximum enregistrée à fin mai 1926, qui est de 2200 tonnes, soit de 92 tonnes par heure ou encore de plus de 25 kg/s, pour un débit de 8 m<sup>3</sup>/s, ce qui fait plus de 3 g de sable par litre d'eau turbiné. Il

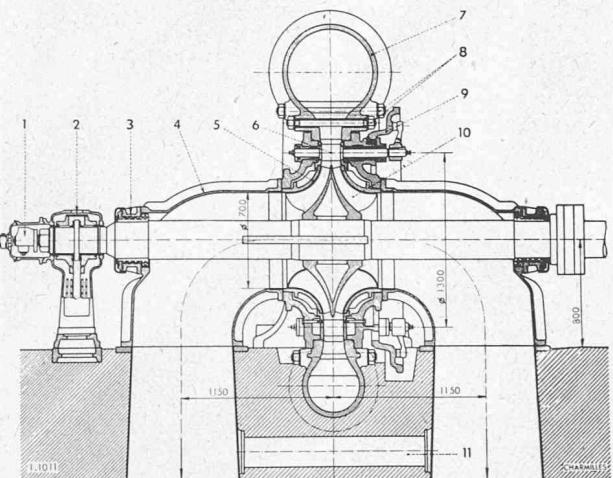
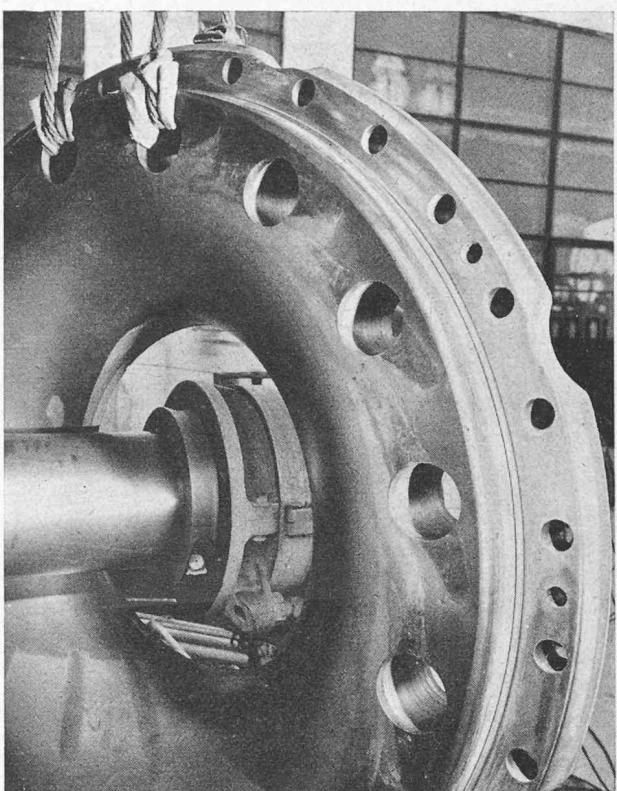


Fig. 12. — Coupe axiale de l'une des trois turbines Francis doubles de la centrale de Martigny-Bourg.

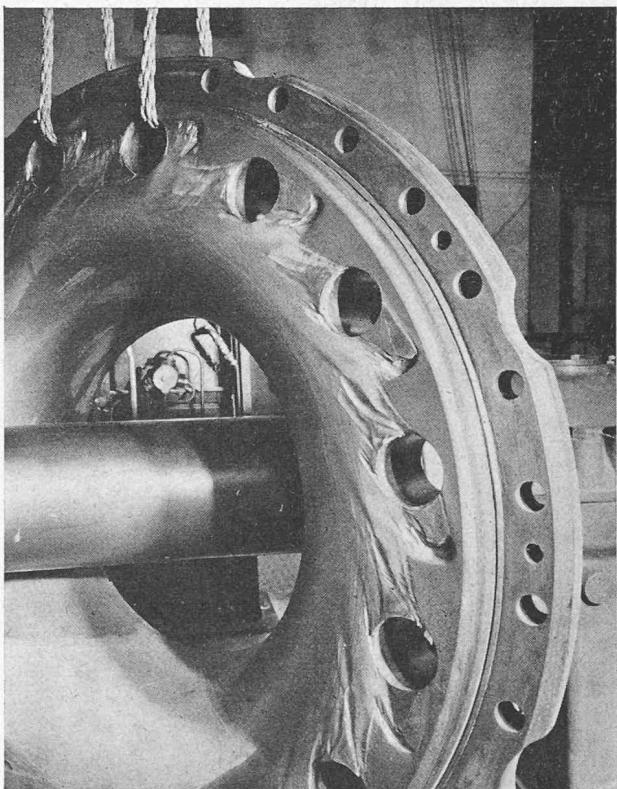
1. Tachymètre de sûreté. — 2. Palier de butée. — 3. Joint hydraulique. — 4. Diffuseur coudé. — 5. Blindage. — 6. Aube directrice. — 7. Bâche spirale. — 8. Tirants d'entretoises. — 9. Cercle de vanne. — 10. Roue motrice. — 11. Tuyau d'équilibrage.

s'agit là, répétons-le, de grains de sable dont les dimensions sont comprises entre 0 et 0,4 mm, à angles vifs et d'origine siliceuse, donc très abrasifs.



(Photo Charmilles)

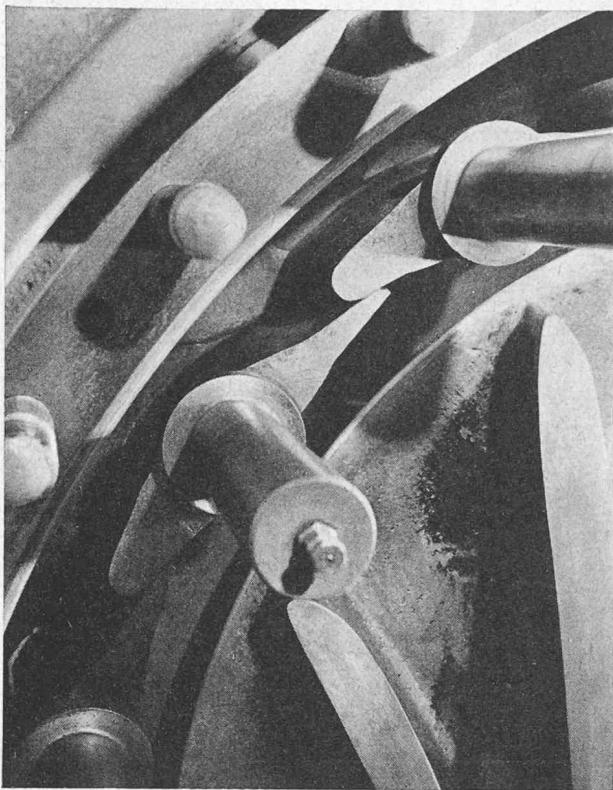
Fig. 13. — Blindage du distributeur et manteau de la roue de la turbine n° 3 de Martigny-Bourg après 4623 heures de service d'hiver.



(Photo Charmilles)

Fig. 14. — Blindage du distributeur et manteau de la roue de la turbine n° 1 de Martigny-Bourg après 3684 heures de service d'été.

Les trois turbines dont il s'agit sont donc à rude épreuve et il est intéressant d'en étudier le comportement. Dans ce but, nous comparons la turbine n° 3, mise en service au début du mois de novembre 1942,



(Photo Charmilles)

Fig. 15. — Aubes directrices de la turbine n° 3 de Martigny-Bourg après 4623 heures de service d'hiver.

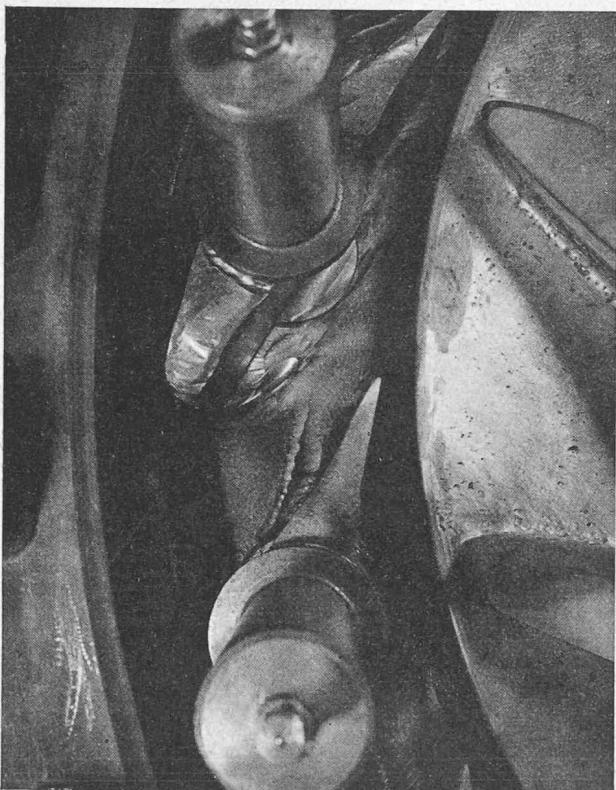


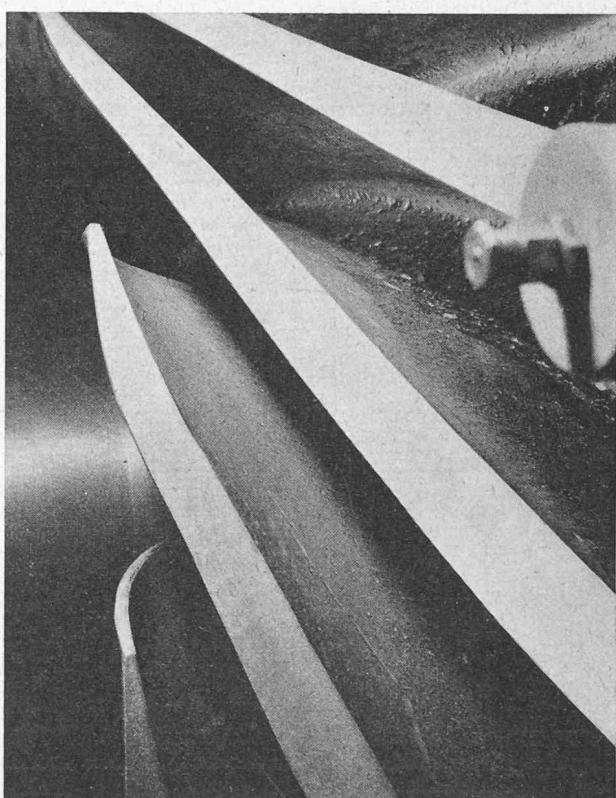
Fig. 16. — Aubes directrices de la turbine n° 1 de Martigny-Bourg après 3684 heures de service d'été.

avec la turbine n° 1 qui fonctionnait déjà depuis le début du mois de juin de la même année. Ces dates nous montrent que la turbine n° 3 commençait par utiliser des eaux claires (période d'hiver) alors que la turbine n° 1 a été alimentée dès le début par des eaux sableuses (période d'été).

Après 4623 heures de fonctionnement d'hiver, la turbine n° 3 a été mise hors service le 11 mai 1954, à fins de contrôle. Un même contrôle avait été effectué sur la turbine n° 1, arrêtée en décembre 1942, après 3684 heures d'exploitation d'été. Bien que la turbine n° 1 n'ait eu à son actif que le 80 % des heures de fonctionnement de la turbine n° 3, l'usure par érosion s'est révélée beaucoup plus prononcée et les images que nous allons commenter l'illustrent d'une manière frappante.

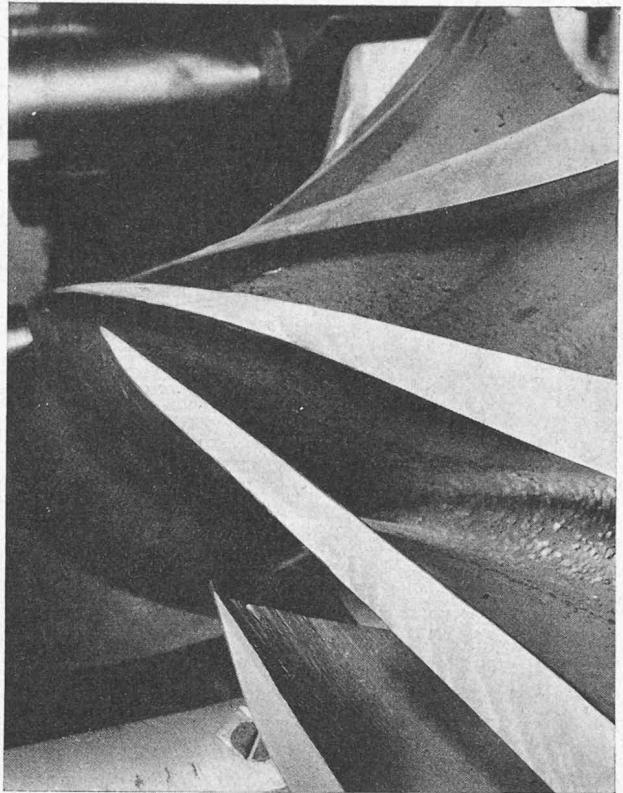
Les éléments les plus exposés à l'usure par érosion sont les blindages des fonds annulaires du distributeur (fig. 12, rep. 5), les aubes directrices (fig. 12, rep. 6) et la roue motrice double (fig. 12, rep. 10). Au sujet de cette roue, relevons qu'elle est du type sans couronnes extérieures, et ceci afin d'éliminer les joints annulaires usuels et de réduire ainsi les surfaces soumises à l'action abrasive du sable. Au surplus, cette construction facilite l'entretien des surfaces actives de la roue ainsi que le remplacement éventuel de ses manteaux.

Examinons successivement, pour chacune des deux turbines, les trois éléments constitutifs dont il s'agit. Les figures 13 et 14 montrent respectivement les blindages en acier coulé au carbone des joues internes des distributeurs des turbines n° 3 et n° 1. Alors que sur le blindage de la première les traces des sillages créés par les aubes directrices ne sont guère perceptibles, sur celui de la dernière le sable a creusé de profonds sillons



(Photo Charmilles)

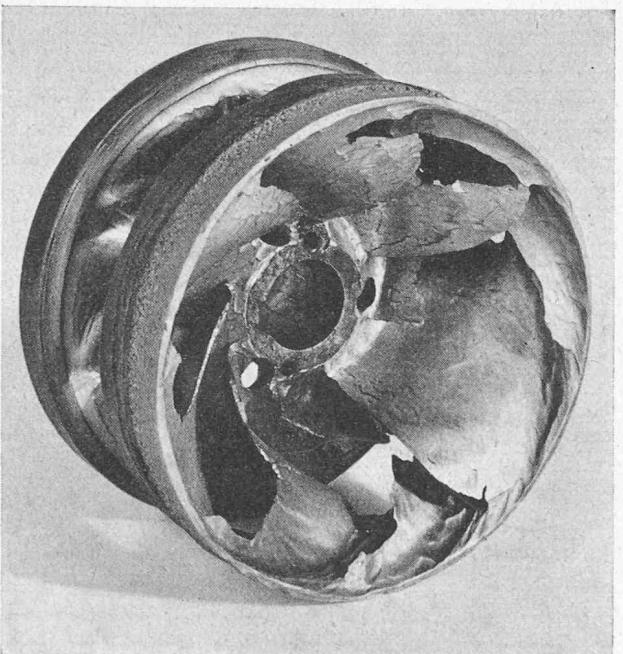
Fig. 17. — Aubage de la roue motrice de la turbine n° 3 de Martigny-Bourg après 4623 heures de service d'été.



(Photo Charmilles)

Fig. 18. — Aubage de la roue motrice de la turbine n° 1 de Martigny-Bourg après 3684 heures de service d'été.

qui atteignent, en certains endroits, des profondeurs de 10 à 12 mm. Ces endroits sont précisément ceux où la déviation de la veine liquide parvenant à l'aube directrice est la plus marquée. Sur la partie incurvée des blindages, qui forme les manteaux périphériques de la roue motrice, l'usure est moins marquée et de 2 mm en moyenne.



(Photo Vevey)

Fig. 19. — Roue motrice en bronze de la turbine Francis de Bourg-Saint-Pierre.

Les aubes directrices, également en acier coulé au carbone, sont visibles sur la figure 15 (turbine n° 3) et 16 (turbine n° 1). Ici, la conclusion est la même que pour les blindages, l'usure étant à peine perceptible sur les aubes directrices de la turbine n° 3 alors que celles de la turbine n° 1 sont marquées de profonds sillons, notamment au droit des surfaces frontales des aubes où se produisent des courants secondaires causés par la différence des pressions existant entre les deux côtés de l'aube. En revanche, les faces latérales des aubes directrices, pour l'une ou l'autre turbine ne présentent pas des degrés d'usure très différents.

Passant aux roues motrices de ces deux machines, celle de la turbine n° 3 se voit sur la figure 17, tandis que celle de la turbine n° 1 est représentée par la figure 18. Ces roues sont en acier inoxydable avec 13 % de Cr environ et 0,5 à 1 % de Ni.

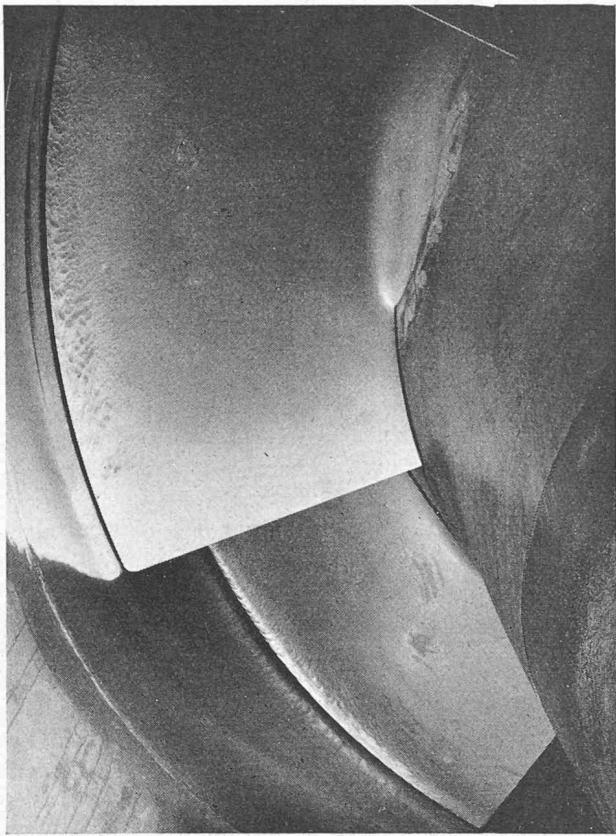
Les aubes de la roue de la turbine n° 3 sont pratiquement intactes, alors que celles de la turbine n° 1 présentent des surfaces régulièrement polies par le sable mais d'usure notable, comme on le voit par la comparaison de l'épaisseur des arêtes de sortie de cette roue avec celle d'une roue à l'état de neuf, pour laquelle l'épaisseur en question est de 6 mm sur toute la longueur. A cette usure s'en ajoute encore une autre, sous forme de stries orientées dans le sens de l'écoulement et dont la profondeur atteint 2 à 3 mm à l'endroit le plus touché, soit à la sortie de l'aubage, sur le côté pression. Il est intéressant de noter que les extrados de toutes les aubes sont exempts d'usure. La tranche des aubes, face au manteau correspondant, est polie et, en cet endroit, l'usure s'est limitée à environ 0,3 mm alors que celle du manteau était de 2 mm environ pour la turbine n° 1, comme nous l'avons déjà relevé plus haut.

Enfin, la photographie (fig. 19) de la roue motrice en bronze de la turbine Francis de 40 ch de Bourg-Saint-Pierre, document mis à notre disposition par les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S. A., montrent d'une manière saisissante le degré de destruction que peuvent présenter les éléments essentiels d'une turbine abandonnée à l'attaque d'un sable particulièrement dur.

Point n'est besoin d'ajouter que quand les machines sont arrivées à un état pareil de dégradation, la déperdition d'énergie qui en résulte se traduit par des pertes considérables pour l'exploitation, dont la rentabilité est de plus en plus compromise. Pour des installations qui se trouvent dans de telles conditions, quant à la quantité et la rugosité des corps étrangers charriés par l'eau, on ne devrait reculer devant aucune mesure qui puisse améliorer, fût-ce tant soit peu, cet état de choses.

### 3. La turbine Kaplan

Le troisième type de machine que nous allons examiner est la turbine Kaplan, qui a également, comme la turbine Francis, une roue fonctionnant suivant le principe de la réaction. Elle se distingue essentiellement de la turbine Francis par la forme axiale de cette roue, sa grande capacité d'absorption et son coefficient de vitesse périphérique élevé, qualités qui la destinent à l'exploitation de faibles chutes mais de forts débits. Au surplus, il s'agit d'une turbine dont l'aubage moteur est orientable en fonction du degré d'ouverture des aubes du distributeur.



(Photo Vevey)

Fig. 20. — Vue prise par-dessous, de deux pales de la roue motrice de la turbine Kaplan du groupe 2 de l'usine de Lavey.

A cause de son grand coefficient de vitesse relative, les plus fortes usures par frottement se situent à la périphérie de la roue motrice et surtout sur le dos des aubes.

Nous allons examiner la turbine Kaplan du groupe 2 de l'Usine de Lavey, propriété des Services industriels de la ville de Lausanne, qui utilise les eaux du Rhône à proximité des fortifications de Saint-Maurice, autrement dit avant qu'elles ne soient allées se décanter dans le Léman. Dans cette installation, la vitesse de l'eau relative à l'aubage de la roue motrice, à sa périphérie et sur le côté des pales en dépression, dépasse largement les 40 m/s.

A l'effet de cette grande vitesse, se superpose celui d'une teneur importante de l'eau en sable fin, ce qui explique les dégâts constatés. La figure 20 est la reproduction d'une photographie faite par les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S. A. On y voit deux aubes de la roue motrice, côté extra-dos, après 18 700 heures de service, ce qui correspond à une production d'énergie de plus de 338 millions de kWh.

Vers l'intérieur, autrement dit du côté du moyeu, on n'aperçoit pratiquement aucune trace d'usure, alors qu'à l'extérieur, dans le voisinage du manteau entourant la roue, apparaissent les traces caractéristiques que laisse le frottement par des particules de sable.

Au bord de l'aube, les dégâts sont encore accentués par la présence de courants secondaires marginaux, courants qui tendent à équilibrer les pressions entre la face et le dos de l'aube.

#### IV. Mesures préventives

Les exemples cités au chapitre précédent ne laissent plus aucun doute quant à l'ampleur des destructions que peuvent subir des turbines hydrauliques alimentées par de l'eau charriant des alluvions. Ces dégâts, nous le rappelons, se traduisent par des pertes d'énergie importantes, surtout si l'on néglige de réviser fréquemment les éléments les plus exposés des turbines.

Sous le rapport des deux mesures préventives plus ou moins efficaces auxquelles on peut recourir, la première vise, si l'on peut dire, à attaquer le mal à sa racine, et ceci dans la mesure du possible. C'est ce qui a été tenté, voilà plus de quarante-cinq ans, en essayant déjà à la prise d'eau, voire dans le canal ou la galerie d'aménée, d'éliminer, du moins en partie, les particules en suspension que contient l'eau à turbiner. A cet égard, l'ingénieur H. Dufour a fait œuvre de pionnier, en imaginant un ouvrage de décantation appelé dessableur, de conception bien supérieure aux systèmes assez primitifs qui avaient été construits jusqu'alors. Il sied de relever les grands mérites qui lui reviennent et de reconnaître l'efficacité de sa méthode. Nous ne voulons cependant pas nous y attarder ici, pour ne pas sortir du cadre imparié à cet exposé, et c'est pourquoi nous nous bornons simplement à relever la contribution importante et fondamentale de M. Dufour à la solution d'un problème qui reste cependant épiqueux. Remarquons en effet que l'élimination des alluvions des cours d'eau exploités, au moyen de dessableurs, ne saurait être complète, le degré de décantation dépendant, dans de larges mesures, de l'importance du dessableur ou du bassin de décantation. En définitive, il faudra se résoudre à admettre qu'une quantité plus ou moins grande d'alluvions subsistera dans les eaux ayant traversé un dessableur, en sorte qu'aussi bien pour le constructeur que pour l'exploitant, le problème de l'érosion restera toujours posé, preuve en soit la présente étude.

La seconde mesure préventive, généralement conjuguée avec la première, consiste ainsi à admettre que le mal ne saurait être complètement tué à la racine et qu'il convient donc de lui résister encore en utilisant pour la fabrication des éléments de machines exposés à l'érosion, des métaux ou alliages constitutifs particulièrement appropriés. Toutefois, à cet égard, il faut se garder de conclure trop à la légère et surtout faut-il faire appel aux confirmations expérimentales, obtenues soit en laboratoires, soit au stade de l'exploitation industrielle. Seules de telles expériences peuvent nous permettre de formuler des conclusions valables sur le comportement de tel ou tel matériel soumis à l'usure par érosion.

En ce qui concerne les essais sur modèles, un exposé de W. Stauffer<sup>1</sup>, ingénieur en chef chez Escher Wyss S. A., à Zurich, vous en donne un aperçu très détaillé et c'est pourquoi il est inutile de reprendre ici cette question.

Restent les résultats d'exploitation, qui peuvent nous donner très souvent de précieuses indications. Ces résultats ont une valeur tout intrinsèque, puisqu'ils expriment la réalité même et qu'ils découlent de la conception des machines soit, pour mieux dire, de la

<sup>1</sup> « Verschleiss durch Sand », Conférence tenue à la 235<sup>e</sup> journée de discussion de l'A.S.E.M. de 6 septembre 1957.

forme et de la position assignées par le constructeur à l'élément examiné.

L'importance de l'expérimentation à l'échelle industrielle dans ce domaine n'échappe d'ailleurs pas aux exploitants, comme en témoignent tout l'intérêt que nous avons rencontré auprès d'eux ainsi que les documents qu'ils ont eu l'amabilité de mettre à notre disposition.

Commençons par les constatations que nous a communiquées la S. A. pour l'Industrie de l'Aluminium (AIAG), société déjà citée dans cet exposé. Elle exploite en Valais plusieurs centrales hydro-électriques, dont la plupart fonctionnent au fil de l'eau.

Bien qu'elle soit considérablement atténuée par l'installation de dessableurs, la teneur en particules solides des eaux à turbiner est, dans la plupart des cas encore notable. De plus, ces particules sont essentiellement des grains de quartz, donc très abrasives. L'exploitant est ainsi contraint de procéder, sur les turbines exposées à l'érosion, à des revisions périodiques, à raison d'une par année en moyenne. Ceci n'est guère étonnant si l'on note que la teneur en sable peut atteindre 1 à 2 g par litre d'eau, voire même jusqu'à 3 g comme on l'a exceptionnellement mesuré, rappelons-le, à la sortie des turbines de la centrale de Martigny-Bourg.

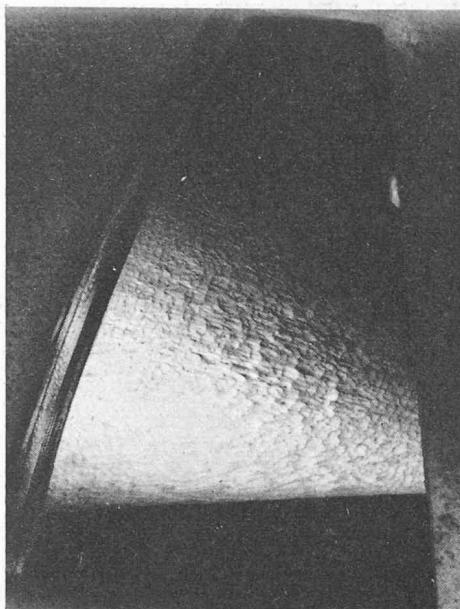
Il est évident que le choix des métaux constitutifs des pièces de turbines exposées à l'érosion est de la plus grande importance. Les expériences faites par cette société sur des roues motrices montrent qu'un acier allié à 1,5 % de Mn et 0,4 % de C donne de bons résultats, de même qu'un acier à 2 % de Ni, 0,7 % de Mn et 0,25 % de C, qui correspond à l'acier coulé + GF + N4L55. Ces deux nuances d'acier présentent une résistance à la traction de 60 kg/mm<sup>2</sup> environ et leur soudabilité est de plus excellente, ce qui est très important pour la facilité d'entretien du matériel.

En revanche, les expériences de l'AIAG au sujet de l'acier inoxydable à environ 13 % de Cr, sur des roues motrices exposées à l'érosion, paraissent plutôt décevantes. Cet acier inoxydable, comparativement à l'une des deux nuances dont nous venons de parler, ne paraît pas pouvoir résister davantage à l'usure, et surtout dans une mesure qui justifie le supplément de prix que demandent les aciéries pour cet alliage, supplément qui excède souvent de 50 %, si ce n'est davantage, le prix d'un acier normal. Bien que la soudure de l'acier inoxydable soit possible, notons qu'il se forme, entre la matière de base et celle d'apport par soudure, une zone d'extrême dureté qui rend au surplus très difficile l'usinage consécutif à la recharge.

Passant aux anneaux d'embouchure et aux pointeaux d'injecteurs de turbines Pelton, éléments dont le bon état est essentiel à une formation homogène et compacte du jet, la S. A. pour l'Industrie de l'Aluminium a fait de bonnes expériences en dotant ces pièces d'une couche superficielle de chrome dur, de 0,2 mm d'épaisseur. Il semble que cette protection est efficace tant que la quantité de sable ne dépasse pas 50 mg par litre d'eau.

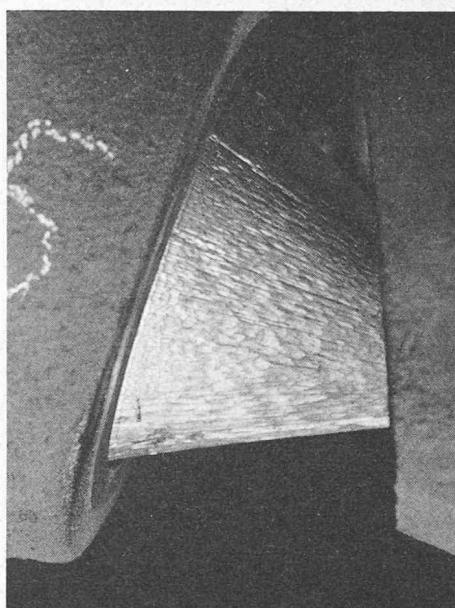
Les essais faits d'autre part par les Forces Motrices Bernoises (BKW) sur les pointeaux des turbines Pelton de la centrale de Kandergrund semblent confirmer ce qui précède.

Les figures 21 et 22 montrent les pointeaux des tur-



(Photo Haller BKW)

Fig. 21  
Pointeau  
en acier  
ordinaire,  
rechargé par  
soudure, de  
la turbine  
n° 4 de la  
centrale de  
Kander-  
grund, après  
20 600 heures  
de service



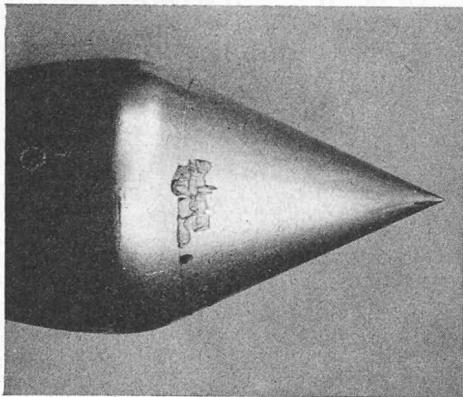
(Photo Haller BKW)

Fig. 22  
Pointeau  
en acier  
ordinaire,  
rechargé par  
soudure, de  
la turbine  
n° 5 de la  
centrale de  
Kander-  
grund, après  
51 340 heures  
de service.

bines 4 et 5 de Kandergrund, le premier après 20 600 heures et le second après 51 340 heures de service. Le degré d'usure de ces deux pointeaux est très marqué, d'où une formation défectueuse des jets correspondants et, par conséquent, une baisse sensible du rendement de ces machines.

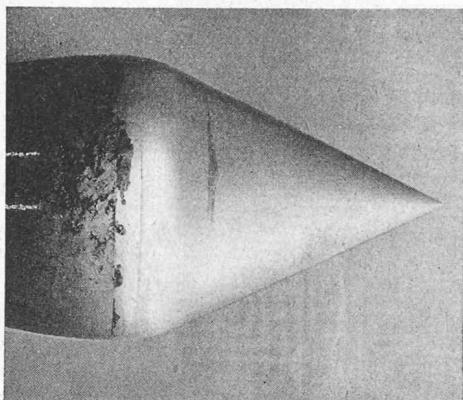
Un premier essai a consisté à recouvrir d'une couche de chrome dur, de 0,15 à 0,20 mm d'épaisseur, la surface préalablement polie d'un pointeau. Cette couche est déposée par électrolyse<sup>1</sup> et son adhérence à la matière de base est excellente. La dureté Rockwell, mesurée en coupe, atteint 70 à 72 kg/mm<sup>2</sup>, ce qui correspond à une dureté Brinell de 1000 kg/mm<sup>2</sup> environ. Le pointeau a été démonté après 26 807 heures de service et on a constaté que sa surface (fig. 23) pouvait être encore considérée comme polie, tandis qu'il présentait une seule empreinte circulaire, due au contact entre le

<sup>1</sup> « Le chromage technique dur », E. Blaser, Lucerne.



(Photo Oertli, BKW)

Fig. 23  
Pointeur  
d'une tur-  
bine de la  
centrale de  
Kander-  
grund, revêtu  
d'une couche  
de chrome  
dur, après  
26 807 heures  
de service.



(Photo Müller, BKW)

Fig. 24  
Pointeur  
d'une tur-  
bine de la  
centrale de  
Kander-  
grund, revêtu  
d'une couche  
de chrome  
dur, après  
51 666 heures  
de service.

pointeur en position fermée et l'anneau d'embouchure. La présence de cette empreinte s'expliquait par le fait que la matière de base était trop tendre eu égard à la pression spécifique de contact. De plus, cette empreinte était plus marquée à certains endroits de la surface du pointeur et offrait ainsi au sable une certaine prise sur la matière d'où destruction locale rapide de la surface. Il a été facile de remédier à cet état de choses en augmentant la surface d'appui sur l'embouchure, autrement dit, à effort d'appui du pointeur égal, en position de fermeture, en réduisant la pression spécifique de contact.

A la suite de cette retouche, un nouvel essai a été tenté et le résultat s'est révélé des plus concluants, comme le montre la figure 24, qui est la photographie du pointeur après 51 666 heures de service. Ajoutons que dans le cas particulier, l'eau utilisée est peu sableuse. On constate tout de même une notable différence entre le comportement d'un acier ordinaire et celui d'un acier protégé par une couche de chrome dur. En revanche, il est évident que dès que la surface est blessée à un endroit, la destruction de la matière réapparaît et suit un processus rapide.

Lorsque la teneur en sable est supérieure à celle que nous avons indiquée plus haut, la S. A. pour l'Industrie de l'Aluminium utilise un acier au Cr-Ni-Mo dont la résistance à la traction est de 150 kg/mm<sup>2</sup>. Lorsqu'il s'agit de gros pointeurs, il est avantageux d'adopter un acier soudable, ce qui facilite la réparation et la rend moins onéreuse que s'il fallait remplacer toute la pièce. Cet avantage tombe dès que le diamètre du pointeur est inférieur à 300 mm.

Quant aux anneaux d'embouchure, on ne saurait guère envisager de les réparer. Il faut donc qu'ils soient fabriqués en acier à haute résistance. De tous récents essais ont démontré la très bonne tenue d'un acier traité, à 18 % de Cr, 0,8 % de C et 1,8 % de Mo, qui n'est autre chose qu'un acier inoxydable spécial.

En ce qui concerne les blindages de turbines Francis ainsi que les autres éléments placés entre la bâche spirale et le diffuseur, à l'exception de la roue motrice et des aubes directrices, l'AIAG utilise de l'acier ordinaire. En effet, ces pièces sont difficiles à réparer et, si l'on veut ne pas affecter le rendement de la turbine, il est avantageux de les remplacer régulièrement par de nouvelles pièces. Là encore, la dépense plus élevée que représenterait leur confection en acier inoxydable ne paraît pas rentable.

Abordant la question des réparations des roues Pelton, il faut en considérer de deux sortes. Ce sont tout d'abord celles de peu d'importance, qui peuvent s'effectuer à la rigueur sur place, et qui ne consistent qu'en de petites retouches dans la région de l'échancrure et de l'arête médiane des aubes. Dans des cas de ce genre, la quantité d'apport par soudure est petite et l'on peut se passer d'un traitement thermique ultérieur. Les recharges sont alors simplement meulées et polies, afin de redonner aux aubes leur forme primitive.

La deuxième sorte de réparation consiste à recharger les aubes sur toutes leurs surfaces, afin de leur rendre leur épaisseur d'origine. Il s'agit donc là d'une opération beaucoup plus importante, qui demande le préchauffage des aubes et l'élimination des tensions dues à la soudure, par revenu au four. Notons en passant que le prix d'une réfection de cette envergure est cependant notablement moindre que celui d'une roue neuve, mais que ce genre de réparation ne saurait être indéfiniment renouvelé.

## V. Conclusions

Prévenir vaut mieux que guérir. Les exploitants de centrales hydro-électriques le savent bien, car l'usure par érosion de leurs turbines se traduit pour eux par des dépenses d'entretien supplémentaires et des baisses de production. Ce sont eux qui sont donc directement touchés par cet affligeant phénomène. Et pourtant on voit encore aujourd'hui — notamment dans certains pays où l'on manque encore d'expériences de ce genre — des installations dans lesquelles on a négligé de prévoir un dessableur efficace, où une prise d'eau est mal exécutée sous ce rapport, où l'on a cru faire l'économie d'un ouvrage alors qu'on allait s'exposer à des mécopes autrement coûteux. C'est un aspect de la question que nous avons intentionnellement laissé de côté ici, pour porter notre accent sur les résultats, souvent partiels, qui ont été obtenus par l'utilisation préventive d'aciers alliés de haute qualité. Nous avons voulu ainsi, comme chacun l'aura pressenti, introduire le débat dans un cercle que les métallurgistes viendraient élargir.

Avant de faire appel à leur compétence, disons quelques mots de la position des constructeurs de turbines. Certains pensent que le problème de l'usure par érosion ne les intéresse pas beaucoup puisqu'ils ne peuvent être rendus responsables de la qualité de l'eau

qui alimente leurs turbines. Or rien n'est plus faux et preuve en soient les dépenses considérables qu'ils engagent dans leurs laboratoires de recherches pour améliorer quelque peu des constructions qui pourtant s'approchent déjà de la perfection, et lancer ainsi sur le marché mondial — qui est un vaste terrain de lutte — des machines aux performances hydrauliques et mécaniques toujours plus satisfaisantes. Ils souhaitent, au contraire, que les qualités de leurs machines soient reconnues et, par conséquent, que le résultat de leurs efforts constructifs et de leurs perfectionnements ne soit pas anéanti par une insuffisance de précautions. Si, face au problème de l'usure par le sable, ils ont pu déjà accomplir certains progrès, c'est grâce à la collaboration de quelques producteurs d'énergie hydro-électrique, qui les ont renseignés sur leurs observations et sur certains remèdes qu'ils avaient éprouvés, car nous rappelons que cette question importante se situe essentiellement sur le plan des expériences d'exploitation. C'est donc quand une telle collaboration entre constructeurs et exploitants existe que l'on peut progresser dans l'étude et la recherche des moyens préventifs les plus adéquats.

## L'ACTUALITÉ AÉRONAUTIQUE

### L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE FRANÇAISE

#### Renaissance

Après la deuxième guerre mondiale, l'industrie aéronautique française a connu des temps difficiles, car elle devait, pratiquement, repartir de zéro.

Il s'agissait de réorganiser les usines (dont certaines furent nationalisées, suivant une formule assez souple), coordonner la production et, surtout, mettre au point un programme d'ensemble, tenant compte des possibilités effectives propres et du développement et des tendances de l'industrie aéronautique des autres pays.

Il semble que les vœux des utilisateurs n'aient pas été toujours exprimés avec toute la clarté voulue, car on a pu remarquer facilement que les producteurs français cherchaient effectivement la voie à suivre. Cette recherche, naturellement accompagnée d'hésitations, de tâtonnements et d'arrêts plus ou moins prolongés, a d'abord abouti à l'élosion d'un très grand nombre de prototypes, qui permettent d'ailleurs de caractériser la période s'étendant de 1945 à 1950. Pendant cette période, l'industrie aéronautique française n'a pas échappé à la critique, ni même à certaines attaques et moqueries, ce qui s'explique précisément par le fait que les prototypes de toutes sortes foisonnaient, cependant que, pratiquement, aucune fabrication en série n'était entreprise, exception faite d'une série d'avions « Ouragan » de la maison Dassault.

Dès 1950, toutefois, la voie à suivre s'est fort heureusement précisée. De la masse des prototypes, quelques-uns étaient mis en évidence, qui devaient devenir assez rapidement des réalisations extrêmement sérieuses et prometteuses.

Dans le secteur de l'*aviation civile*, la France mettait l'accent sur l'hélicoptère à turbine à gaz (le « Djinn » de l'ancienne SNCASO), puis sur un avion commercial moyen-courrier à réaction, dont la particularité réside surtout dans la disposition inédite des deux turbo-réacteurs, montés de part et d'autre du fuselage, à l'arrière de ce dernier (la « Caravelle », de l'ancienne SNCASE). On notait également une intéressante tentative de la maison Hurel-Dubois, qui réalisait des avions commerciaux pourvus d'une aile de très grand allongement.

L'intérêt que présentent ces trois réalisations se marque par les nombreuses commandes obtenues par les producteurs (environ 60 exemplaires des « Caravelle », par Air-France,

C'est ici que nous arrivons aux espoirs que nous pouvons nourrir après avoir présenté cet exposé devant des spécialistes de la métallurgie. Nous savons, pour ce qui les concerne, qu'une solution, même partielle, du problème de l'usure par érosion, a des aspects d'ordre technologique et économique et c'est bien plutôt à leurs expériences et à leurs connaissances spéciales qu'exploitants et constructeurs de turbines voudraient avoir recours. En effet, ce sont bien les métallurgistes qui, dans certaines circonstances, peuvent émettre l'avis le plus autorisé.

C'est donc par un échange fréquent de points de vues et d'expériences correctement interprétés qu'on avancera dans l'étude de l'érosion des métaux par le sable, de façon à pouvoir présenter aux producteurs d'énergie hydro-électrique les solutions constructives qui, dans la mesure du possible, leur donneront le plus de satisfaction, surtout si, de leur côté ils veulent bien apporter aussi leur contribution à l'examen de cet important problème. Il est temps de remercier vivement ceux d'entre eux ainsi que les constructeurs qui ont mis à notre disposition des documents d'un très grand intérêt.

la Suède et les Etats-Unis), ainsi que par les essais de divers pays (notamment les Etats-Unis et la Grande Bretagne) de les copier ou de les adapter.

Dans le secteur de l'*aviation militaire*, de la pépinière des prototypes sont sortis notamment :

- de l'ancienne SNCASO :
  - le « Vautour », bombardier léger ;
  - le « Trident », intercepteur.
- de l'ancienne SNCASE :
  - le « Baroudeur », avion tactique léger ;
  - le « Durandal », intercepteur delta.
- des usines Dassault :
  - le « Mystère », chasseur lourd ;
  - le « Supermystère », chasseur lourd ;
  - l'« Etendard », avion tactique léger ;
  - le « Mirage », intercepteur delta.
- des usines SNCAN :
  - le « Gerfaut », intercepteur delta ;
  - le « Griffon », intercepteur delta à propulsion mixte (turbo- et stato-réacteur).
- des usines Breguet :
  - le « Taon », avion tactique léger.

La France s'est également spécialisée dans la production d'avions d'entraînement à réaction, et notamment du Fouga « Magister ». La période ingrate de 1945 à 1950 a permis la mise au point de nombreux procédés de fabrication, ainsi que la réalisation, par exemple, de servo-commandes particulièrement efficaces (système Jacquot-Leduc). Les ateliers Leduc s'occupent de la mise au point de l'avion « Leduc 022 », à stato-réacteur. L'industrie des moteurs, avec les maisons SNECMA, Hispano-Suiza et Turbomeca, mettait ce temps à profit pour réaliser des moteurs extrêmement intéressants.

Pendant cette période, un avion a été particulièrement mis en vedette ; il s'agit de l'*« Espadon »*, de l'ancienne SNCASO, qui a été utilisé pour la mise au point des servo-commandes Jacquot-Leduc et pour la mise au point également des moteurs-fusées devant équiper, par la suite, le « Trident ».

On a pu noter également, avec satisfaction, qu'une heureuse collaboration technique s'était établie entre la France et l'Allemagne, collaboration qui va probablement se poursuivre par l'échange de licences (l'Allemagne s'intéressant, par exemple, au « Trident », et préparant la fabrication sous licence des « Magister » et « Noratlas » — avion cargo de la SNCAN — tandis que la France manifeste le désir de fabriquer sous licence le Dornier DO-27).

Pour ceux qui ont suivi les fameux « salons de l'Aéronautique » de Paris-Le Bourget, la renaissance française,