

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 21

Artikel: Sur l'usure des turbines hydrauliques par érosion et corrosion : rapport présenté à Paris au Congrès 1932 de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique
Autor: Dutoit, Marc / Monnier, Maurice
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059343>

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: 17.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des
Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXIII. Jahrgang

N^o 21

Mittwoch, 12. Oktober 1932

Sur l'usure des turbines hydrauliques par érosion et corrosion.

Rapport présenté à Paris au Congrès 1932 de
l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique,

par M. Marc Dutoit,
Ingénieur, Chef d'exploitation des «Usines électriques d'Olten-Aarburg» S. A., Olten,
et M. Maurice Monnier,
Ingénieur de la S. A. Motor-Columbus, Baden.

620.19:621.24

Le problème de l'usure des turbines par érosion et corrosion joue un rôle prépondérant dans l'économie des centrales hydro-électriques. L'article ci-dessous donne un aperçu de l'état actuel de ce problème. Les auteurs traitent successivement de l'usure mécanique due aux impuretés de l'eau, de l'usure chimique produite par des agents corrodants dissous dans l'eau et de la cavitation, en appuyant particulièrement sur le mécanisme des destructions entraînées par celle-ci. Des illustrations tirées de la pratique complètent cet exposé.

Die Frage der Abnutzung von Wasserturbinen durch die Erosions- und Korrosionserscheinungen spielt eine hervorragende Rolle in der Wirtschaftlichkeit der hydraulischen Kraftwerke. Im folgenden wird nun ein Ueberblick über den gegenwärtigen Stand dieser Frage gegeben. Es werden nacheinander die durch die Verunreinigungen des Wassers verursachte mechanische Abnutzung, die von im Wasser gelösten angreifenden Stoffen herrührende chemische Korrosion und die Kavitation behandelt, wobei auf den Vorgang der Kavitation näher eingegangen wird. Aus der Praxis stammende Illustrationen ergänzen diesen Bericht.

Introduction.

Le problème de l'usure des turbines hydrauliques a pris, à notre époque de rationalisation, une valeur prépondérante; il est en effet logique, vu les grandes dimensions des turbines modernes, de chercher à réduire au minimum les frais de remplacement ou de réparation de pièces coûteuses et la fréquence des arrêts nécessaires à ces opérations, étant donné le manque à gagner souvent considérable qui en résulte. Il y a lieu de remarquer que pour les exploitations d'outre-mer équipées par des maisons européennes, cette question d'usure est particulièrement à l'ordre du jour, car les délais de livraison des pièces qui ne figurent pas toujours au stock de réserve prolongent de manière appréciable le temps d'arrêt du groupe avarié. A l'usure sont en outre imputables des pertes de rendement souvent sensibles qui pèsent sur l'exploitation, voire même des ruptures de pièces plus ou moins importantes, ruptures dont les conséquences peuvent être graves.

Nous examinerons séparément dans ce rapport les différentes causes de l'usure des turbines hydrauliques, ainsi que les moyens qui permettent soit d'y parer, soit de les éliminer. Nous nous proposons, pour plus de commodité, de grouper ces causes d'usure en trois paragraphes:

1° L'usure mécanique, due aux impuretés contenues dans l'eau, au sable tout d'abord, dont l'action

érosive se fait surtout sentir dans les turbines pour moyennes et hautes chutes du type Francis et du type Pelton, et ensuite aux bois flottants qui viennent se coincer entre l'extrémité des aubes motrices des turbines à roue sans couronne extérieure et le cuvelage dans lequel tourne ladite roue.

2° L'usure chimique qui s'observe dans toutes les turbines actionnées par des eaux contenant en solution des produits corrodants, des acides par exemple. Les détériorations de ce genre sont rares en raison des conditions très particulières dans lesquelles doivent travailler les turbines qui en subissent les effets.

3° L'usure due au phénomène de cavitation. Si le mécanisme de cette usure d'un genre particulier n'est pas encore bien connu, l'expérience montre cependant que la cavitation se produit surtout dans les turbines sous les roues desquelles règne un vide élevé; dans les turbines pour basses chutes à grand nombre de tours spécifique par exemple. Beaucoup d'importantes installations modernes étant équipées de turbines de ce type, il nous a paru opportun de réserver dans notre rapport la plus grande place au paragraphe consacré à cette sorte d'usure, ainsi qu'aux illustrations et aux exemples qu'elle comporte.

Usure mécanique.

Alluvions dures (sables et graviers). Les eaux provenant de cours d'eau de montagne provoquent

presque toujours une usure dans les turbines pour moyennes et hautes chutes du type Francis et du type Pelton; les graviers et les sables qu'elles charrient viennent frapper, à des vitesses souvent considérables, les pièces de la turbine qu'elles alimentent et y exercent un limage continu qui détériore les pièces soumises à cette action et en rend indispensable, au bout d'un temps plus ou moins long, le remplacement ou la réparation. Les quantités d'alluvions transportées par ces eaux varient dans de larges proportions, suivant que les mesures sont faites en période d'étiage ou en période de crue.

La teneur moyenne en alluvions des cours d'eau de montagne en Suisse est estimée à environ 3 à 4 cm³ par litre en été, mais des volumes de 20 cm³ par litre et plus ont été mesurés dans ces mêmes cours d'eau après les pluies.

Si l'on considère qu'avec une teneur en alluvions de 4 cm³ par litre et un débit de 5 m³/s, le dépôt par 24 heures s'élèverait à

$$\frac{4 \cdot 5 \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot 24}{10^6} = 1728 \text{ m}^3$$

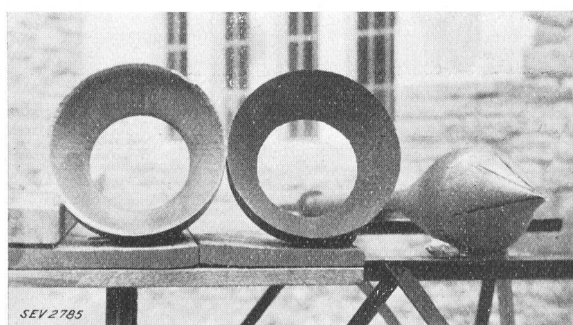


Fig. 1.

Tuyères et pointeau usés par le sable.

Turbine Pelton: $H = 260$ m; $P_e = 7360$ kW; $n = 300$ t/m.

ce qui, pour donner une image concrète, représente la contenance de 259 wagons de 10 tonnes, on pourra se faire une idée de la masse de matériaux solides, très durs pour la plupart, passant dans ces conditions, au cours d'un été, à travers les turbines d'une usine moyenne qui ne dispose pas de bassin d'accumulation de grande importance ou du dispositif de protection dont nous parlons plus loin. Les aubes de turbines Pelton ou Francis, les tuyères, les pointeaux ou les aubes directrices, ne résistent pas longtemps à l'incessant décapage auquel les soumet ce bombardement. Les quelques photographies (fig. 1, 2, 3) donnent une idée de l'effet d'érosion dû aux alluvions sur les pièces de turbines.

Il est donc indispensable d'épurer ces eaux chargées avant de les employer à l'alimentation des turbines. Cette épuration se fait d'elle-même dans les installations pourvues d'un bassin d'accumulation très important; l'amorce d'un chenal taillé dans le fond du bassin et aboutissant au pied du

barrage devant une vanne permet de faire écouler dans un canal ad hoc les alluvions qui se déposent.

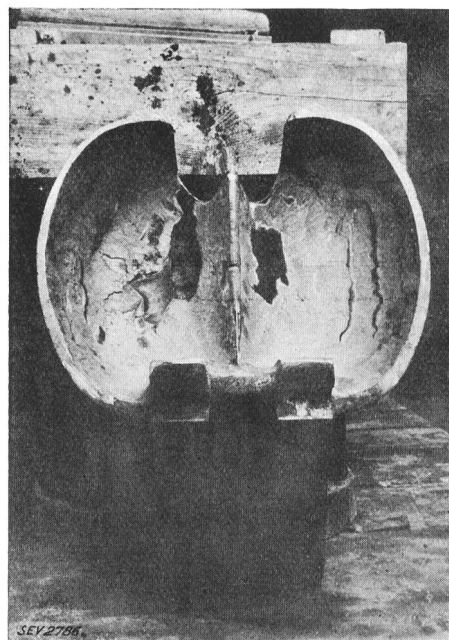


Fig. 2.

Aube rechargée par le procédé Schoop, après trois semaines de service.

Turbine Pelton: $H = 260$ m; $P_e = 7360$ kW; $n = 300$ t/m.

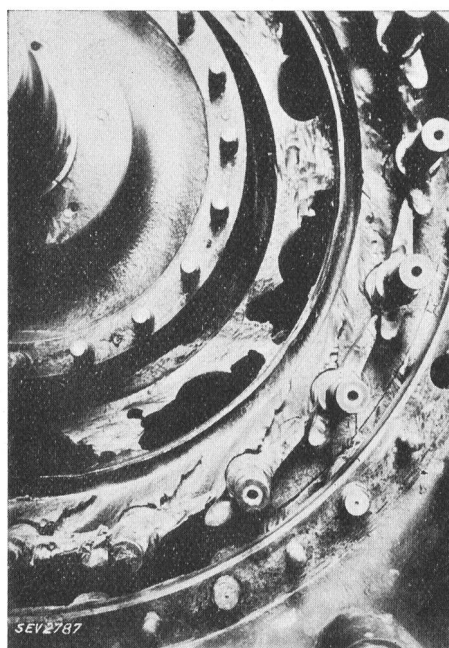


Fig. 3.

Turbine Francis: $H = 80$ m; $P_e = 2945$ kW; $n = 300$ t/m usée par le sable après trois ans de service; teneur moyenne de l'eau en alluvions 1,5 g/l.

Il y a lieu, par contre, de prévoir dans les installations qui sont alimentées par un cours d'eau sans retenue appréciable, un dispositif dont la capa-

a Coupe longitudinale. *b* Coupe transversale (coupe B-B).

à ceux que nous avons décrits, mais simplifié et disposé à l'entrée des chambres des turbines; un dispositif de purge continue permettra d'expédier directement dans le tuyau d'aspiration les alluvions ainsi récoltées; vu le grand débit à disposition, la quantité d'eau nécessaire au fonctionnement de la purge du dessableur pourra être considérée comme tout à fait négligeable²⁾.

Les pièces de turbines détériorées par l'érosion due aux sables ou graviers peuvent être réparées par la soudure autogène ou électrique, s'il s'agit de pièces de bronze ou d'acier; le choix judicieux des électrodes (acier au nickel) permet même de rapporter sur les surfaces détériorées un métal notablement plus dur que celui qui constitue la pièce abîmée; la surface ainsi réparée et convenablement meulée opposera, au cours d'une nouvelle période d'exploitation, une plus grande résistance aux érosions. On sait que la soudure ne tient pas sur les pièces en fonte de fer; les réparations peuvent, dans ce cas, être faites au moyen de projection d'un métal protecteur (procédé de métallisation Schoop). Ce genre de réparation ne peut être considéré que comme un pis aller, les surfaces ainsi rechargées s'usant à nouveau très vite; nous remarquons en passant que l'aube Pelton de la fig. 2 en est un exemple.

Corps flottants. Les turbines à grands débits et à basses chutes du type Kaplan ou hélice, avec roues sans couronne extérieure, sont quelquefois sujettes à une usure d'un genre particulier et due non plus aux alluvions minérales, mais aux corps flottants,

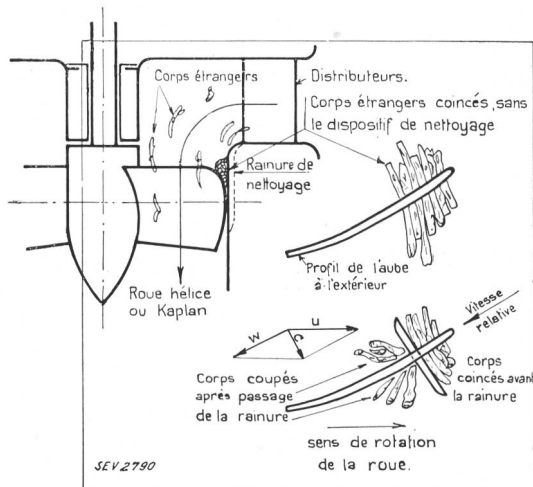


Fig. 6.
Schema du dispositif.

aux bois de toutes espèces en particulier, transportés par les cours d'eau. Ces bois flottants viennent se coincer, en raison de la forme des aubes, entre la roue et le cuvelage dans lequel elle tourne. Le jeu de la roue dans ce cuvelage étant souvent très faible (3 à 4 mm pour les roues modernes de 5 m de diamètre et plus), il est facile de se rendre

²⁾ L'usure des turbines hydrauliques, par H. Dufour, ingénieur, Bulletin technique de la Suisse romande 1922, No. 2 et 3.

compte de l'énorme compression à laquelle sont soumis les morceaux de bois, branches de petites dimensions pour la plupart, qui ont réussi à franchir la grille. La fig. 6 qui a été obligeamment mise à notre disposition par les Ateliers des Charmilles, à Genève, montre comment se produit cette compression; sans parler du freinage énergétique ainsi produit et de la perte de puissance qui en résulte, on peut imaginer le frottement intense auquel est soumis le cuvelage. Le bois ainsi coincé contient souvent du sable ou de la terre, quand ce ne sont pas des morceaux de métal, des clous par exemple, s'il s'agit de débris de planches; ces corps durs agissant comme de l'émeri peuvent à la longue affaiblir dangereusement le cuvelage et, dans tous les cas, provoquer entre cette pièce et la roue un jeu suffisant pour occasionner des pertes d'eau et une baisse correspondante du rendement de la turbine. Dans les turbines Kaplan à aubes motrices pivotantes, le cuvelage, qui a une forme sphérique, peut être usé sur une zone plus large, et le mécanisme qui assure la rotation des aubes est soumis à un travail beaucoup plus dur, d'où usure prématurée des surfaces frottantes. Il ne faut pas oublier, enfin, que l'effet de coincement des bois flottants dans les turbines hélice ou Kaplan peut agir de façon très nuisible sur les paliers de guidage et sur l'étanchéité du fond supérieur, par suite des efforts excentriques violents qui s'exercent sur l'arbre dans le cas inévitable où, à un moment donné, une aube seule entraînera du bois comprimé le long du cuvelage, alors que les autres seront par hasard libres.

Il nous a été donné de constater, dans des installations munies pourtant de grilles de dimensions normales, le colmatage complet des roues de turbines par toutes sortes de débris de bois, ce qui montre quelle peut être l'abondance des bois flottants à certaines époques de l'année.

Un dispositif breveté (brevet suisse No. 146 935) au nom de M. Schutz, chef d'usine à Wynau, et des Ateliers des Charmilles, à Genève, permet d'éliminer le bois au fur et à mesure de son coincement; il consiste à prévoir dans le cuvelage, comme l'indique la fig. 6, une ou plusieurs rainures de forme spéciale; ces rainures agissent sur le bois entraîné par les aubes comme une raboteuse, en le déchiquetant avant même qu'il ait été comprimé. Vu les résultats très concluants obtenus avec ce mode de protection, des rainures semblables ont été faites dans le cuvelage de plusieurs turbines déjà installées en Suisse.

Usure chimique.

On sait que l'eau chargée d'éléments ayant une action sur le fer et ses dérivés ne manquera pas de détériorer les pièces de turbine. Les dépressions qui accompagnent toujours le travail de l'eau, soit dans une turbine Francis, soit dans une turbine Pelton, favorisant cette action nocive, cette dernière sera encore considérablement renforcée s'il se produit de la cavitation. Or, lorsqu'on observe une usure chimique dans une turbine donnée, il

est assez difficile de se rendre compte si l'on a à faire à l'usure chimique simple ou si la cavitation ne s'y joint pas, l'aspect caractéristique de surface attaquée par la cavitation se trouvant profondément modifié par les corrosions chimiques.

L'action chimique la plus connue est due à l'eau qui contient en solution du sulfate de calcium (gypse, Ca SO_4).

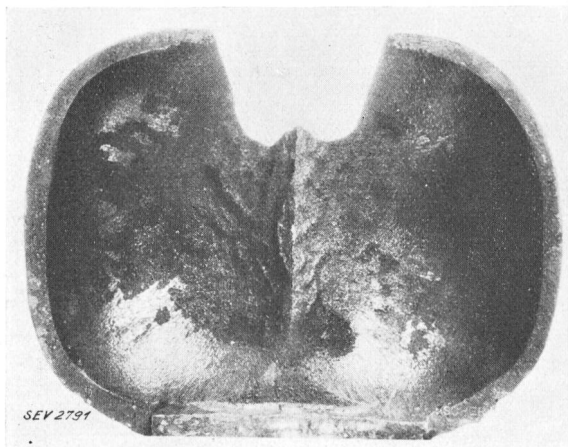


Fig. 7.
Aube Pelton corrodée par de l'eau contenant
du Ca SO_4 .

La maison Escher Wyss, de Zurich, a bien voulu nous communiquer (fig. 7) la photographie d'une aube Pelton détériorée dans ces conditions après environ neuf mois de service, et ajoute qu'il s'agit d'une turbine à nombre de tours spécifique moyen travaillant sous 660 m de chute. L'aube en question, en fonte d'acier de bonne qualité, d'une résistance à la traction de 50 à 60 kg/mm², avait été polie avant la mise en service. Les aubes de la turbine présentèrent, lors de la revision, de fortes corrosions dont la structure rappelait celle du sucre humide. L'eau d'alimentation, qui semblait très pure, fut alors soumise à une analyse qui donna les résultats suivants:

| | |
|----------------------------|--|
| Résidu | 1100 mg/l |
| Dureté du résidu | 11 |
| SO_4 | 750 mg/l |
| Cl | traces |
| CaO | 365 mg/l |
| MgO | 77 mg/l |
| Résistivité de l'eau . . . | 710 $\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}}$ |

La fonte d'acier ordinaire est inutilisable pour la fabrication de pièces appelées à travailler dans ces conditions. Comme on ne peut pas songer à débarrasser l'eau d'alimentation du sulfate de calcium, c'est par l'emploi d'un métal approprié qu'il sera possible de prolonger la durée de turbines soumises aux corrosions de cette origine. Les aubes en acier dit inoxydable (acier au chrome) ont fait preuve de grande résistance dans les conditions de travail dont nous venons de parler.

Corrosion par cavitation.

On appelle cavitation la formation de bulles dans l'eau qui traverse une pompe, une turbine ou une hélice de bateau; ces bulles, de dimensions variables, peuvent passer de la forme sphérique à la forme de fuseau, si elles se produisent dans l'axe de la roue ou de l'hélice. Cette définition a pour but de fixer les idées et semble d'autant moins superflue qu'on entend parfois désigner par cavitation les alvéoles qui se creusent dans les aubes de turbines, dans les pales d'hélice ou même dans les parties voisines de ces pièces lorsque se produit le phénomène que nous allons examiner.

Tous ceux qui ont eu affaire à des turbines, des pompes ou des hélices de bateaux connaissent cette détérioration si active et si caractéristique de métaux, même très résistants, due à la cavitation, détérioration qu'il est impossible de confondre avec les érosions provoquées par le sable. La cavitation est accompagnée, dans les installations de turbines par exemple, de vibrations dont l'intensité peut aller jusqu'à nuire à la sécurité de l'exploitation, et d'un bruit semblable à celui que ferait du gravier passant à travers la machine. Les expériences faites dans les stations d'essais décèlent une baisse brusque du rendement dès que se manifeste le phénomène de cavitation.

D'après une intéressante publication de M. Elov Englesson³⁾, ce furent les constructeurs d'hélices de bateaux qui, les premiers, cherchèrent à donner une explication des effets de la cavitation et, partant, les moyens d'y parer. M. Englesson cite, à ce propos, que les pales des quatre hélices du paquebot *Mauretania* présentèrent chacune, au bout de trois mois de service, de fortes érosions atteignant jusqu'à 300 dm² de surface avec une profondeur de 60 mm. Etant donné l'importance des frais de remplacement de ces hélices pesant chacune 20 tonnes, aucun effort ne fut négligé pour essayer de déterminer la cause du dégât et pour tâcher d'en annuler les effets. Le Dr. Silberrad, chargé d'étudier la question, arriva à la conclusion (en 1908) que la cause de la détérioration constatée était avant tout d'ordre mécanique et que l'action, d'ailleurs indéniable, de l'oxygène dégagé ne jouait qu'un rôle de second plan. Nous allons voir que les conclusions auxquelles on arrive aujourd'hui après les constatations faites sur les aubes de turbines à grandes vitesses spécifiques confirment le jugement du Dr. Silberrad.

Pour éviter de nous étendre inutilement, nous bornerons l'étude de la cavitation aux turbines hydrauliques, et plus spécialement aux turbines à réaction des types Francis, hélice et Kaplan, dont sont équipées beaucoup d'installations récentes.

La cavitation ou formation de bulles est due à la propriété bien connue que possède l'eau de passer à l'état de vapeur, même à des températures

³⁾ Wasserkraftjahrbuch 1928/1929. Ueber Anfressungen bei Wasserturbinen und Erprobungen von gegen Anfressungen besonders widerstandsfähigen Baustoffen, par M. Elov Englesson, chef-constructeur aux Ateliers de Kristinehamn (Suède).

relativement basses, si la pression s'abaisse suffisamment. La formation des bulles de la cavitation n'est donc pas autre chose qu'une ébullition. L'expérience montre, en effet, que dans un vase clos l'ébullition de l'eau commence à 30° C, si la pression s'abaisse jusqu'à 0,43 atmosphère et à 10° C déjà si la pression n'est plus que de 0,12 atmosphère. Dans les turbines à réaction, qu'il s'agisse de Francis pour hautes chutes ou d'hélices ou Kaplan pour basses chutes, il est un endroit où nous rencontrons, sinon le vide complet, du moins des dépressions suffisantes pour, dans certains cas, provoquer la cavitation; c'est l'entrée du tuyau d'aspiration. C'est en effet presque toujours la face inférieure des aubes ou le cuvelage du tuyau d'aspiration qui sont atteints par les corrosions de la cavitation.

Il nous a paru utile, pour l'étude des facteurs dont dépend la cavitation, de rappeler ici la théorie du tuyau d'aspiration⁴⁾.

Il est possible, comme on le sait, par l'emploi du tuyau d'aspiration dans les turbines à réaction de placer la roue au-dessus du niveau de l'eau dans le bief aval, sans devoir renoncer pour cela à utiliser la partie de la chute comprise entre ce niveau inférieur et l'arête de sortie de la roue. Cette partie de la chute est la hauteur statique d'aspiration; on l'appellera H_s .

La dépression, mesurée en mètres d'eau, qui existe sous la roue lorsque la turbine est arrêtée, peut s'exprimer par

$$B - H_s$$

où B représente, en mètres d'eau, la valeur équivalente à la pression barométrique au lieu d'installation de la turbine. La valeur de H_s doit toujours être, cela va sans dire, inférieure à celle de B . Mais il faut compter avec un vide beaucoup plus prononcé quand la turbine est en service, car le tuyau d'aspiration est un diffuseur caractérisé par le fait que la surface des sections perpendiculaires à son axe augmente sans cesse et régulièrement, à mesure qu'on se rapproche de la sortie. L'eau, animée d'une vitesse assez considérable à la sortie de la roue, n'a plus, en raison de la forme conique du tuyau d'aspiration, qu'une vitesse très réduite à la sortie de ce dernier, et c'est précisément cette diminution de vitesse qui permet la récupération. L'énergie cinétique encore contenue dans l'eau à sa sortie de la roue est presque entièrement employée à renforcer, sous cette dernière, la dépression $B - H_s$ déjà existante. Seule une petite fraction de cette énergie reste sous forme de vitesse dans l'eau pour en assurer l'évacuation à la sortie du tuyau d'aspiration.

Soit une turbine schématiquement représentée par la fig. 8:

On sait que d'après le principe de la conservation de l'énergie, «la somme des énergies poten-

tielle et cinétique en la section F_1 est égale à la somme des énergies potentielle et cinétique en la section F_2 ».

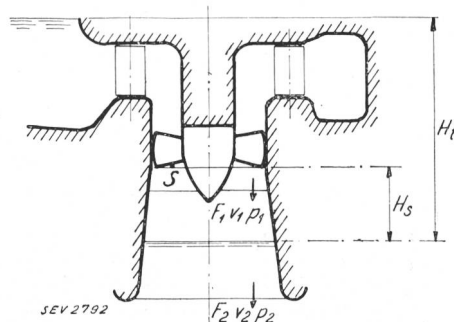


Fig. 8.

On a, en exprimant ces différentes énergies par des hauteurs d'eau,

$$\text{Energie cinétique en la section } F_1: \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\text{Energie cinétique en la section } F_2: \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\text{Energie potentielle en la section } F_1: \frac{p_1}{\gamma}$$

$$\text{Energie potentielle en la section } F_2: \frac{p_2}{\gamma}$$

où g = valeur de l'accélération terrestre,

γ = poids spécifique de l'eau,

p_1 = valeur de la pression en la section F_1 ,

p_2 = valeur de la pression en la section F_2 ,

v_1 = vitesse de l'eau en la section F_1 ,

v_2 = vitesse de l'eau en la section F_2 .

Donc:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Or, toute l'eau qui passe à travers la section F_1 passe également à travers la section F_2 , ce qu'on peut exprimer par l'équation:

$$v_1 F_1 = v_2 F_2$$

Si F_2 pouvait prendre une valeur assez grande pour que $v_2 = 0$, nous aurions la récupération totale (pertes dues aux frottements mises à part), ce qui peut s'écrire:

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g}$$

Le terme $\frac{v_1^2}{2g}$ exprime la hauteur d'aspiration dynamique (H_{dyn}) maximum qui, ajoutée à la hauteur statique fixée d'autre part, permet de déterminer la valeur du vide existant sous la roue.

$$H_{\text{dyn}} = \left[\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} \right] = \frac{v_1^2}{2g}$$

⁴⁾ Nous nous servons de la notation employée par M. Ackereit, ingénieur, dans son article: Ueber Hohlraum-bildung (Kavitation) in Wasserturbinen, Escher-Wyss-Mitteilungen, mars 1928, avril et juin 1930.

Si on introduit le rendement η du tuyau d'aspiration, il vient:

$$H_{\text{dyn}} = \eta \left[\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} \right] = \frac{\eta v_1^2}{2g}$$

La pression $\frac{p}{\gamma}$, mesurée en mètre d'eau qui règne au point S de la fig. 8 est égale à la pression barométrique B du lieu où est installée la turbine, diminuée de la somme des hauteurs d'aspiration dynamique et statique, ce qui s'écrit:

$$\frac{p}{\gamma} = B - H_s - H_{\text{dyn}} = B - H_s - \frac{\eta v_1^2}{2g}$$

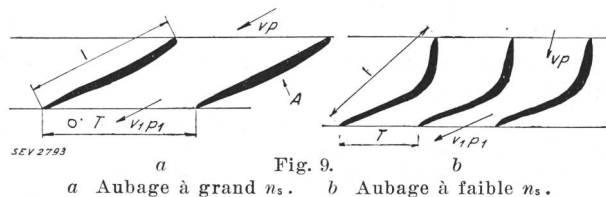
On doit absolument éviter que la valeur de la pression en S n'égale zéro, car la cavitation se produirait inmanquablement.

$$B - H_s - \frac{\eta v_1^2}{2g} = 0$$

est donc un cas limite. Les constructeurs sont souvent amenés à disposer les roues de turbines, dont la hauteur d'aspiration dynamique est considérable, à quelques centimètres seulement du niveau de l'eau dans le bief aval, pour réduire la hauteur d'aspiration statique. Dans le cas de turbines à grande vitesse spécifique, telles que les Kaplan ou hélices, la hauteur d'aspiration statique est même fréquemment négative, c'est-à-dire que la roue doit être placée au-dessous du niveau de l'eau dans le bief aval.

L'expérience a montré que la marge à prendre contre le danger de cavitation, lorsqu'il s'agit de turbines à grande vitesse spécifique n_s , doit être beaucoup plus grande que dans le cas de turbines Francis pour moyennes et hautes chutes. Il ne suffit pas, pour les turbines à grand n_s , de prévoir, selon ce qui précède, des hauteurs d'aspiration statique et dynamique telles que la pression à la sortie de la roue ait une valeur qui paraîtrait raisonnable dans le cas d'une turbine à vitesse spécifique moindre. Pour les turbines à grande vitesse spécifique, il faut tenir compte d'un autre facteur encore. La raison de cette anomalie apparente tient au fait que l'écoulement de l'eau dans les turbines à grande vitesse spécifique, telles que turbines hélices ou turbines Kaplan, est assez différent de celui qu'on observe dans les turbines à faible vitesse spécifique, dont les aubes nombreuses et à grande surface forment une série de canaux dans lesquels la pression de l'eau diminue régulièrement de l'entrée jusqu'à la sortie. Il en est tout autrement dans les turbines hélices et Kaplan, dont les aubes peu nombreuses et à faible surface ne forment plus entre elles les «canaux» réguliers le long desquels il est possible de suivre l'écoulement de l'eau. Cette différence entre les deux sortes d'aubage ressort de la fig. 9 représentant le développement de coupes cylindriques effectuées en un diamètre moyen à travers une roue Francis à petit n_s et à travers une roue hélice à grand n_s .

Les mesures faites au cours d'essais sur la valeur des pressions au recto et au verso d'une aube de la turbine hélice montrent que la pression la plus



faible ne se mesure pas à l'entrée du tuyau d'aspiration, où elle est égale à p_1 ; mais au contraire, en un point A situé sur la face inférieure de l'aube et dont les coordonnées varient suivant la forme de l'aube, sa longueur et le pas de l'aubage; on constate du reste, par des mesures en différents points de la surface inférieure de l'aube, que la pression y est en général plus faible que p_1 , et c'est en effet à la face inférieure des aubes que se manifestent le plus fréquemment les corrosions de la cavitation. Or, on peut exprimer la valeur de la pression en A sous la forme d'une hauteur d'eau qui s'écrit

$H_1 - \lambda \frac{v_1^2}{2g}$; le terme H_1 de cette expression indique, en mètres d'eau, la pression p_1 à l'entrée du tuyau d'aspiration; quant au facteur λ , il représente une valeur proportionnelle à la différence entre la pression p_1 et la pression au point considéré A et rapportée à la vitesse v , v_1 ou u ⁵⁾ (on choisira v_1); λ aura aux différents points de la face inférieure de l'aube des valeurs différentes et atteindra son maximum en A. D'autres valeurs encore devraient être attribuées au facteur λ pour le cas d'un aubage d'un pas différent, d'une augmentation de la longueur de l'aube ou d'une modification de sa forme. Il est possible, d'après ce qui précède, d'indiquer la pression H_{min} qui existe en A par l'expression

$$H_{\text{min}} = H_1 - \frac{\lambda v_1^2}{2g}$$

Or, on a vu que H_1 , qui représente la pression à l'entrée du tuyau d'aspiration, égale $B - H_s - H_{\text{dyn}}$. Donc

$$H_{\text{min}} = B - H_s - H_{\text{dyn}} - \frac{\lambda v_1^2}{2g}$$

Il se produira sûrement de la cavitation en A si la pression y est nulle, donc si

$$B - H_s - H_{\text{dyn}} - \frac{\lambda v_1^2}{2g} = 0$$

En écrivant cette expression quelque peu différemment et en la divisant par H_t ou hauteur de chute totale

$$\frac{B - H_s}{H_t} = \frac{H_{\text{dyn}}}{H_t} + \frac{\lambda v_1^2}{2g H_t} = \sigma$$

⁵⁾ u = vitesse tangentielle de l'eau.

on arrive à la valeur bien connue de σ qui est généralement employée pour désigner le facteur de cavitation.

$$\frac{H_{\text{dyn}}}{H_t} \text{ et } \frac{\lambda v_1^2}{2g}$$

caractérisent un type déterminé de turbine. Il sera toujours possible au constructeur qui aura étudié expérimentalement, à ce point de vue, une certaine roue et son tuyau d'aspiration, de déterminer si, dans des conditions données de chute et de hauteur statique d'aspiration, la dite roue et son tuyau d'aspiration risquent ou non de provoquer la cavitation. De là, l'importance toujours plus grande donnée aujourd'hui aux mesures effectuées sur les turbines d'essai, mesures qui permettent de fixer la valeur admissible de σ pour un type donné de roue.

Plus la vitesse spécifique d'une turbine augmente, plus le σ admissible est grand. Des valeurs beaucoup plus faibles de σ deviennent admissibles dès que les aubes s'allongent et que les «canaux» qu'elles présentent au passage de l'eau sont plus longs. Le fait que les roues à aubes courtes et peu nombreuses sont spécialement sujettes aux effets de la cavitation s'explique d'ailleurs aisément. La face inférieure des roues à réaction subissant une force sous forme d'aspiration, plus la surface des aubes est faible, plus les zones de dépression seront accusées.

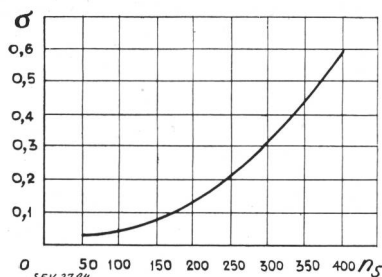


Fig. 10.

Courbe des σ admissibles d'après D. Thoma.

Si l'on porte en ordonnées les valeurs de σ pour différents types de roues caractérisés par leur vitesse spécifique, il est possible de tracer une courbe semblable à celle que nous donnons par la fig. 10 et qui a été établie par le Professeur D. Thoma, de Munich. Une courbe semblable permet, étant donné la hauteur de chute d'une installation et la cote d'implantation de la turbine, de calculer le nombre de tours spécifique maximum admissible pour la dite turbine. Inversement, on pourra fixer, à l'aide de la courbe en question, la hauteur maximum au-dessus du bief aval à laquelle il sera admissible de placer la roue d'une turbine dont la puissance est donnée par le débit, la chute à disposition et le nombre de tours déterminé par les conditions dans lesquelles la turbine est appelée à travailler. Cette courbe ne fournit naturellement que des indications générales; les valeurs qu'elle donne devraient subir des corrections dans certains cas particuliers.

Il arrive souvent que le constructeur, dans le désir d'obtenir le rendement optimum, choisisse

pour sa roue une cote d'implantation qui ne donne pas la marge de sécurité suffisante contre la cavitation. Il suffit alors que la forme de l'aube — sa courbure ne pouvant pas être mathématiquement déterminée — soit quelque peu défavorable, pour que la cavitation fasse son apparition sur une surface plus ou moins grande où la dépression devient trop considérable. Elle peut également apparaître, l'expérience le montre, sur les pièces voisines, sur le revêtement du tuyau d'aspiration, par exemple lorsqu'il présente une malfaçon quelconque, créatrice de forte dépression, voire même sur des roues très prudemment installées, mais dont l'aubage, par suite d'un défaut de construction, favorise en un point donné la formation d'un vide trop poussé.

Les turbines d'essai, dans lesquelles la cavitation peut être provoquée à volonté, sont munies de regards permettant d'observer les surfaces où le phénomène à étudier va prendre naissance. Soumises à la cavitation, les surfaces en question apparaissent couvertes d'un nuage blanchâtre, qui oscille presque toujours à la même place, dont les contours un peu flous varient suivant une légère pulsation et que le courant d'eau semble impuissant à entraîner.

On a vu que la cavitation est une ébullition de l'eau; le nuage en question est effectivement composé d'un amas de bulles remplies de vapeur d'eau. Ces bulles se forment en amont de la surface soumise au vide qui provoque leur naissance, pour disparaître en aval dans la zone où la pression est suffisante pour les écraser. Les mesures faites montrent qu'il se produit à l'endroit précis où disparaissent les bulles, une brusque et forte augmentation de la pression, et ceci sur une distance équivalant à la somme des diamètres de 2 ou 3 bulles. L'étendue de cette région de surpression varie suivant la taille de la turbine, car le diamètre des bulles croît avec les dimensions de cette dernière. Si l'on considère ce qui se passe au moment de l'écrasement d'une bulle dans la zone de surpression, on s'aperçoit que l'eau qui la presse de toutes parts se précipite vers le centre de la dite bulle avec une accélération en rapport avec la valeur de la surpression, valeur que les mesures ont fixée à plusieurs atmosphères. Or, lorsque le diamètre décroît, la surface de la bulle que l'on peut admettre sphérique et qui diminue proportionnellement au carré de cette décroissance, n'oppose plus à l'eau qu'un obstacle qui s'amoindrit avec une rapidité considérable. La vitesse de l'eau étant, d'une part, très grande au moment où la vapeur contenue dans la bulle parvient à s'opposer à une contraction supérieure, et la bulle étant, d'autre part, à ce moment réduite à des dimensions extrêmement faibles, le freinage est si brutal qu'on peut le considérer comme un choc non élastique provoquant, dans un espace très restreint et en un temps très court, des surpressions évaluées à des centaines, voire même à des milliers d'atmosphères⁶⁾. Le métal ne subi-

⁶⁾ Ackeret: Technische Mechanik und Thermodynamik, 1930.

rait-il de la part de celles des bulles qui glissent à sa surface qu'une partie de ces pressions momentanées, il n'en faudrait pas plus pour le désagréger. Lorsqu'après avoir franchi la zone de surpression la bulle qui a été ainsi comprimée et probablement échauffée, pénètre dans une région de pression moindre, la vapeur qui la constitue se condense au moment de l'expansion et la bulle disparaît complètement.

Le Prof. D. Thoma de Munich ⁷⁾ a donné du phénomène de cavitation une théorie expliquant fort bien le mécanisme des corrosions qui transforment la surface des pièces attaquées en une masse dont la structure rappelle celle d'une éponge. On a vu que le phénomène de cavitation est caractérisé par des variations rapides et brusques de la pression au sein de l'eau; il en résulte des ondes fréquentes qui se propagent avec une vitesse voisine de celle du son dans l'eau, puisqu'il s'agit d'une sorte de choc; et ces ondes sont capables de provoquer à leur tour, à la surface du métal, des variations de pression atteignant en valeur absolue quelques atmosphères. Pour peu que le métal présente des anfractuosités, celles-ci ne tarderont pas à s'agrandir. Soit le cas de l'anfruosité 1 de la fig. 11, dont la profondeur est de 10 mm et la section de 1 cm², pour considérer un cas concret, et à l'orifice de laquelle, au cours des variations de pression déjà citées, règne une dépression; l'eau est séparée du fond de

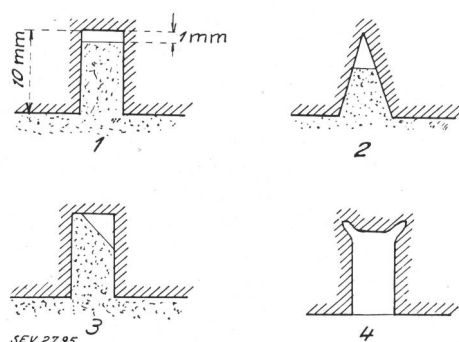


Fig. 11.

l'anfruosité par la petite distance de 1 mm représentée dans le schéma. Il est facile d'imaginer ce qui se passe lorsque l'orifice de l'anfruosité est à nouveau soumis à une pression; celle-ci, on l'a vu, peut survenir brusquement et atteindre quelques atmosphères, ce qui a pour effet de refouler l'eau sur le fond de l'anfruosité où se produit un choc brutal qui ne peut être amorti par le petit volume de vapeur à basse pression représenté par la tranche de 1 mm, la violence du choc est proportionnelle au carré de la vitesse prise par l'eau, et cette vitesse qui se calcule aisément peut être assez grande.

On a affaire, dans le cas considéré, à un volume de 0,9 cm³; en admettant la valeur de la surpression à 1 atmosphère seulement, la force qui sollicite le volume d'eau en question est, par suite de la section, égale à 1 kg.

⁷⁾ Wasserkraft-Jahrbuch, 1924.

Ce volume d'eau de 0,9 cm³ a une masse de 0,0009 kg, où 9,81 représente l'accélération terrestre. Soit «*b*» l'accélération communiquée par la force de 1 kg à la masse considérée, on sait que

Force = masse × accélération
d'où

$$b = \frac{9,81}{0,0009} = 10\,090 \text{ m/s}^2$$

L'eau soumise à cette accélération parcourt une longueur

$$s = 1 \text{ mm}$$

on sait que

$$s = \frac{1}{2} bt^2 \quad (1)$$

où *t* représente le temps,

or

$$\frac{ds}{dt} = v \text{ (vitesse)}$$

il vient en différentiant (1)

$$v = bt \quad (2)$$

$$\text{d'après (1)} \quad t = \sqrt{\frac{2s}{b}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,002}{10\,090}} = 0,000447 \text{ s}$$

$$\text{d'après (2)} \quad v = 0,000447 \cdot 10\,090 = 4,51 \text{ m/s.}$$

La hauteur d'eau *H* correspondant à la pression provoquée par le choc de l'eau au fond de l'anfruosité se détermine par la relation

$$H = \frac{\text{vitesse de l'eau} \times \text{vitesse du son dans l'eau}}{\text{accélération terrestre}}$$

soit dans le cas précité

$$H = \frac{4,51 \cdot 1\,400}{9,81} = 642,6 \text{ m, soit environ 65 atmosphères.}$$

Dans les deux cas 2 ou 3 de la fig. 11, la hauteur *H* est beaucoup plus grande encore par suite de la vitesse plus considérable de l'eau.

Ces violents et innombrables chocs hydrauliques, se répétant sur une surface métallique, à une fréquence élevée, finissent par désagréger le métal. Les observations faites au microscope, de coupes à travers une surface ainsi corrodée, semblent montrer que les parties les moins dures du métal (graphite dans la fonte, par exemple) sont d'abord enlevées. La cavitation continuant son action forme

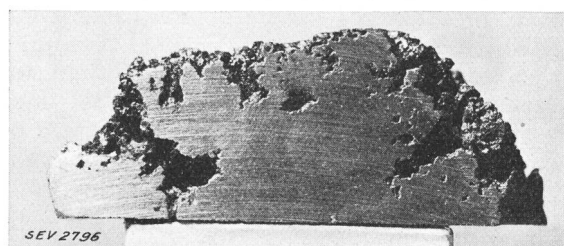


Fig. 12.

Coupe à travers un morceau d'aube corrodée par cavitation (fonte de fer).

sur les surfaces qu'elle touche les corrosions représentées par les fig. 12 et 13 et pousse dans le métal les attaques tentaculaires du schéma 4 de la fig. 11; les coupes (fig. 12 et 13) montrent bien, semble-t-il, comment progresse cette destruction.

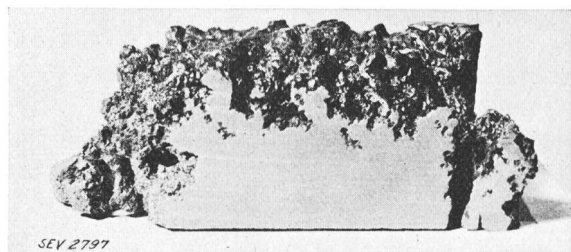


Fig. 13.
Aspect d'une surface corrodée par cavitation et coupe
(fonte de fer).

Certains auteurs⁸⁾ ont donné, et assez récemment, des dégâts causés par la cavitation, une explication d'après laquelle l'action chimique serait l'agent principal; mais comme on a constaté, d'autre part, que des surfaces en verre chimiquement neutre, soumises aux effets de la cavitation, présentent au bout de peu de temps les corrosions caractéristiques de ce genre d'usure, il y a au contraire lieu de croire que c'est bien l'action mécanique qui joue le premier rôle. Il est cependant certain que l'oxygène libéré dans les zones de dépression attaque le métal en atmosphère humide dans des conditions particulièrement favorables et ajoute son action aux coups de bélier de l'eau. Il est très probable aussi que cette action augmente au fur et à mesure des progrès de l'attaque mécanique qui livre à l'oxydation une surface de métal toujours plus grande.

On a vu que les effets désastreux de la cavitation peuvent presque toujours être évités par le choix judicieux de la cote d'implantation des roues, et que le constructeur doit s'efforcer en outre de donner aux aubes la meilleure forme possible, afin qu'il ne se produise ni décollement de la veine liquide, ni troubles (tourbillons) dans l'écoulement des filets liquides. La correction de la forme de l'aubage peut, dans certains cas, supprimer la cavitation et la figure 15 donne un exemple de l'heureux effet d'une correction d'aubage.

Le nombre de tours spécifique de la roue de la fig. 14 est d'environ 456 et le σ résultant des conditions d'aspiration légèrement défavorables, si l'on en juge d'après la courbe du Prof. Thoma (fig. 10). La roue avait subi, au bout d'un an de service, les corrosions que l'on constate. Cette roue fut remplacée par la roue de la fig. 15, munie d'un aubage modifié; ce nouvel aubage, ainsi que le montre la photographie prise après un an de service, ne présente plus de corrosions. Nous ajouterons que les roues du nouveau type en service depuis 1918 n'ont pas encore été remplacées.

⁸⁾ Albion Davis, Report of Hydraulic Power Committee 1924, National Electric Light Association, New York.

Le choix du métal peut également avoir une influence sur la résistance aux corrosions par cavitation. Dans le cas où la cavitation est faible, mais suffisante cependant pour détériorer une roue de fonte, il suffira de prévoir la roue de rechange en

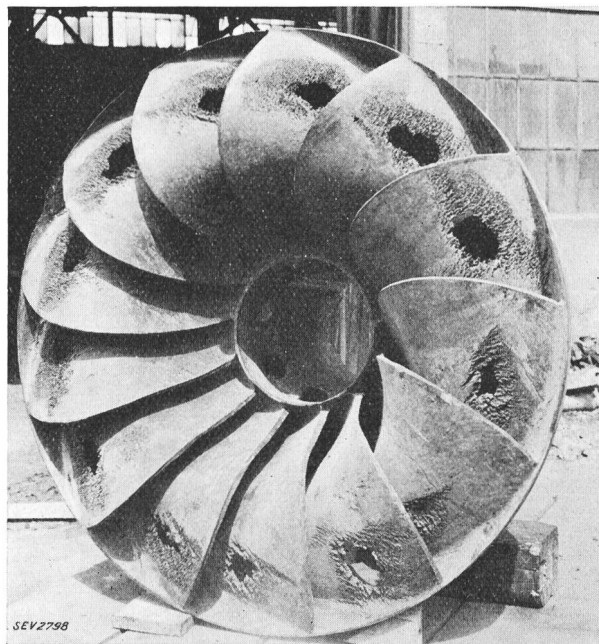


Fig. 14.
Roue corrodée par la cavitation après 1 an de service.
Turbine Francis: $P_e = 1840$ kW; $n = 375$ t/m.
 $H_{\text{moyen}} = 19,5$ m; $n_s = 456$.

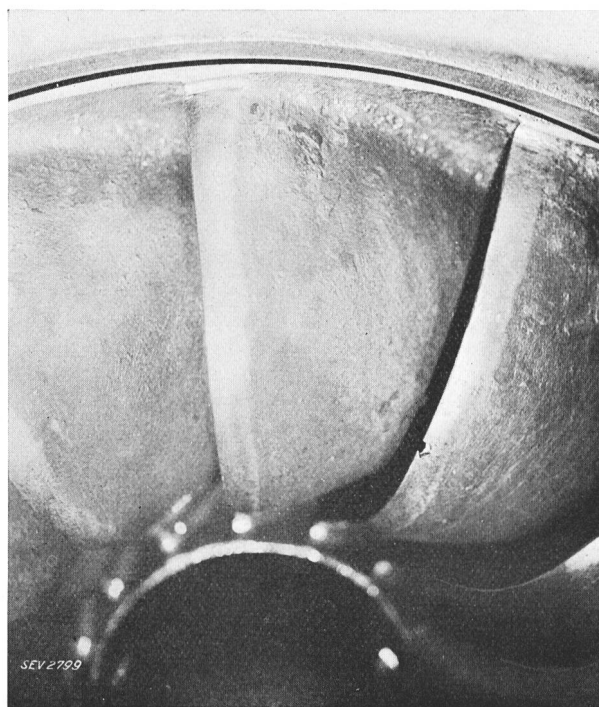


Fig. 15.
Nouvel aubage de la roue (fig. 14) après un an de service.

acier, par exemple, ou même en bronze, pour voir cesser l'usure. Mentionnons à ce propos les expériences de D. J. Mc. Adam⁹⁾ sur la résistance aux corrosions de différents métaux, expériences qui montrent notamment combien cette résistance varie si les épreuves portent sur le métal à l'air libre ou sur le métal plongé dans l'eau et à quel point ce dernier cas est défavorable. Pour illustrer ces différences de résistances, nous pouvons citer le cas d'une grande turbine Kaplan dans laquelle la surface de bouchons en plomb obturant sur le moyeu de la roue les orifices de vis noyées fut fortement corrodée par la cavitation, alors que le métal environnant, de l'acier à 2 pour 100 de nickel, était resté absolument intact.

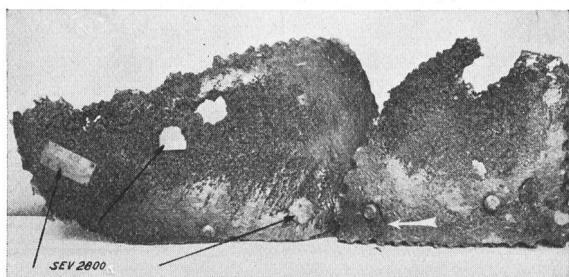


Fig. 16.
Fragment d'aubage en fonte après 103 000 heures
de travail.

La soudure électrique ou autogène, au moyen de laquelle on peut rapporter sur un métal donné un métal plus résistant, permettra de réparer de façon durable, comme cela a été dit pour l'usure mécaniques, des surfaces même touchées par une corrosion assez avancée due à la cavitation. Les réparations sur des pièces de fonte constituent un problème plus épineux. La soudure électrique ou autogène est impossible dans ce cas; d'autre part, comme nous l'avons vu plus haut, le métal rapporté au moyen d'autres procédés (procédé de métallisation Schoop par exemple) n'adhère pas suffisamment.

La fig. 16 montre précisément le résultat de tentatives de réparation effectuées sur une roue de fonte. Par suite de la forme défavorable de l'aubage avec couronne extérieure, l'extrémité des aubes fut assez fortement corrodée. Les surfaces ainsi abîmées furent recouvertes de tôle d'acier ordinaire maintenue en place par des rivets; cette

tôle ne tarda pas à être arrachée par les vibrations. Il faut cependant observer que les fragments de tôle (indiqués par des flèches) provenant du moule et incrustés dans l'aubage lors de la fonte, sont absolument indemnes de corrosions, ce qui montre bien la plus grande résistance de l'acier. L'influence perturbatrice du rivet inférieur sur l'écoulement de l'eau le long de l'aube est également typique.

En résumé, les réparations sur une roue en fonte ne sont guère que provisoires. La meilleure solution consiste en général dans le remplacement des pièces détériorées.

Il va sans dire que ces différentes causes d'usure que nous venons d'examiner séparément coexistent souvent en pratique, auquel cas les pièces qui leur sont soumises subissent une destruction plus rapide encore. Citons par exemple l'usure due au sable dont les effets perturbateurs sur l'écoulement de l'eau dans une turbine peuvent être la cause déterminante de la production de cavitation. De même, l'eau d'alimentation d'une centrale peut non seulement être chimiquement nuisible au matériel qui constitue les turbines, mais encore charrier du sable dur dont l'action sera beaucoup plus violente sur les surfaces affaiblies par l'agent chimique, lequel agira à son tour plus fortement sur le métal décapé par le sable.

Nous terminons ce rapport en remarquant que nous n'avons certainement rien apporté de très neuf dans ces questions d'usure. Spécialement pour ce qui concerne la cavitation, nous nous gardons de vouloir trancher et donner de ce phénomène l'explication définitive, à la recherche de laquelle travaillent encore des constructeurs et des physiciens bien mieux qualifiés que nous. Nous espérons cependant, grâce aux larges emprunts que nous avons faits aux travaux de MM. Thoma, Englesson et Ackeret, avoir expliqué de façon tout au moins plausible le mécanisme des destructions entraînées par la cavitation.

Nous remercions ici les Maisons Ateliers des Charmilles et Escher Wyss pour les photographies qu'elles ont bien voulu nous communiquer et pour les observations intéressantes qu'elles ont mises à notre disposition.

Enfin, si l'un ou l'autre de nos lecteurs a pu trouver une indication ou un conseil utile dans notre modeste contribution aux travaux de ce congrès, nous considérerons que nous aurons atteint le but que nous nous étions proposé en nous efforçant de coordonner quelques exemples tirés de la pratique.

⁹⁾ Schweizerische Technische Zeitschrift, 4. Oktober 1928.