Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 94 (1968)

Heft: 20: Symposium de l'Association internationale de recherches hydrauliques (AIRH) Lausanne, 8-11 octobre 1968

Artikel: Pompes d'accumulation et eaux glaciaires

Autor: Bezinge, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69662

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: 02.07.2025

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

POMPES D'ACCUMULATION ET EAUX GLACIAIRES

par A. BEZINGE, chef d'exploitation à Grande-Dixence et F. SCHAFER

I. Préambule

De par la configuration de ses ouvrages d'adduction, Grande-Dixence a équipé quatre usines de pompage comportant en tout 15 pompes de sept types différents. Les usines de Z'mutt et de Stafel sont situées dans la vallée de Zermatt ; celles d'Arolla et de Ferpècle dans le val d'Hérens.

Le débit nominal pompé par l'ensemble de ces usines atteint 49 m^3/s en totalité, ce qui représente un volume annuel de $270 \cdot 10^6$ m^3 résultant de la fonte de différents glaciers en conditions météorologiques normales. Ce volume tient compte des $50 \cdot 10^6$ m^3 pompés par l'usine de Ferpècle qui fonctionne en série avec celle d'Arolla, cette dernière refoulant ces eaux dans le collecteur. Ce volume total d'eau pompée nécessite une fourniture annuelle d'énergie de 280 GWh environ, essentiellement d'été.

Le choix de la puissance et du nombre des groupes a été fixé par le calcul optimum des installations, en tenant compte des différents débits captés. Les bassins de compensation ont des volumes utiles qui s'échelonnent de 3000 à 800 000 m^3.

Les heures annuelles moyennes de pompage pour un été normal sont évaluées comme suit :

Z'mutt :	Pompes	nos 1 et 2	2000 h par pompe
	Pompes	nos 3 et 4	1200 h par pompe
	Pompe-turbine	no 5	2000 h et plus
Stafel :	Pompes	nos 1, 2 et 3	1500 h par pompe
Ferpècle :	Pompes	nos 1, 2 et 3	1500 h par pompe
Arolla :	Pompes	nos 1A, 2 et 3	1700 h par pompe
	Pompe	no 1B	800 h

Le bilan des pertes d'énergie dans les stations de pompage de Grande-Dixence, à débit et puissance nominaux, s'établit comme suit, pour des installations neuves :

a)	Pertes électriques sur les lignes 130 kV et sur les transformateurs abaisseurs de tension	2 % env.
b)	Pertes électriques dans les moteurs . . .	2 % env.
c)	Pertes dans les pompes par transformation de l'énergie mécanique en énergie de pression	10-14 % env.
d)	Pertes de charge dans les ouvrages d'amenée et de refoulement	3 % env.
	Pertes totales . . .	17-21 % env.

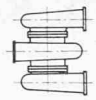
Usine	Débits m^3/s	Hauteur mano en CE	Vitesse spécif. n_s	Vitesse t/mn	Puissance pompe MW	Puissance moteur MVA	Tension moteur kV	Vol. pompé annuel mio m^3	Energie annuelle mio kWh	Disposition		Remarque
Z'mutt	2×5,5	470	145	1500	2×28	2×32	10	70	110		2 flux 2 ét.	pompage
Z'mutt	2×3,2 (P)	365	128	1500	2×13 (P)	2×18,9	10	30	36		2 flux 2 ét.	pompage et turbinage
Z'mutt	2×3,9 (T)	460		1500	2×17	2×18,9	10					
Z'mutt	1×2,3 (P)	130 (P)	220	1495	3	3 (MW)	10				1 flux 1 ét.	pompage et turbinage
Z'mutt	1×2,1 (T)	135 (T)		1505	2,1	3 (MW)	10					
Stafel	3×3,3	212	125	1500	3×7,7	3×9,5	5	50	36		2 flux 1 ét.	pompage
Ferpècle	3×2,8	213	164	1500	3×6,7	3×7,1	5	50	36		1 flux 1 ét.	pompage
Arolla	2×2,1	308	170	1500	2×7,2	1×17,3	7	68	71		1 flux 2 ét.	pompage
Arolla	2×4,2	308	170	1500	2×14,4	2×17,3	7				2 flux 2 ét.	pompage

Fig. 1. — Caractéristiques principales des usines de pompage de Grande-Dixence

Les pertes *a*), *b*) et *d*) sont des données inhérentes aux installations.

En revanche, les pertes *c*) sont très sensibles au degré d'usure des pompes et peuvent s'élever jusqu'à 20-22 % en fin de saison de pompage, comme on l'a observé à Z'mutt.

Ces pertes prépondérantes sont analysées dans la présente étude, ainsi que les moyens de les diminuer. Un gain de 1 % sur le rendement moyen annuel représente une épargne annuelle de 2,8 GWh.

Comme nous allons le voir, un gain notable est possible en diminuant l'usure des pompes par :

— l'amélioration des décantations ;

— l'utilisation de nouveaux matériaux ainsi que la recherche de nouvelles formes pour certaines pièces de pompes, qui doit permettre d'en faciliter l'entretien.

II. Rendement des pompes et effets des usures

Lors des études et des essais sur pompes modèles, les rendements maxima des machines réelles étaient prévus pour la zone des hauteurs manométriques moyennes. En réalité, nous avons mesuré des courbes de rendement dont le maximum s'établissait plus proche de la zone des hauteurs manométriques élevées, soit pour des débits faibles. Ce phénomène peut être imputé à une exécution légèrement trop grande des pompes ou encore que la hauteur manométrique admise lors du projet et la réalité ne sont pas tout à fait identiques (divergence entre pertes de charge admises et réelles des conduites).

Le bilan des pertes d'énergie d'une pompe s'établit comme suit, d'après Stepanoff :

a)	Pertes par chocs et décollements à l'entrée de la roue et du diffuseur	1 % env.
b)	Pertes par frottements et par divergence de l'écoulement dans la roue et dans le diffuseur	4 % env.
c)	Pertes par fuites à travers les labyrinthes	2,5 % env.
d)	Pertes par frottements dues à la rotation de la roue et des labyrinthes dans l'eau	2 % env.
e)	Pertes mécaniques dans les paliers et les pompes de lubrification	1 % env.
	Pertes totales . . .	10,5 % env.

d'où un rendement de 89,5 % environ.

Le pompage d'eaux chargées de limons et de sables fins engendre des usures par érosion sur les roues, les labyrinthes et les diffuseurs. Les phénomènes d'érosion sont connus sous deux aspects : par chocs et par frottements, d'où apparition de surfaces ondulées et grossières (selon la théorie d'Ackeret). (Fig. 2.)

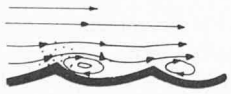


Fig. 2. — Formation de surface ondulée par érosion de sable (selon Ackeret).

Le professeur Th. Bovet, dans une étude sur l'érosion, donne une formule de la puissance d'érosion des grains en mouvement sur une surface incurvée.

$$Pf = \mu \cdot V \cdot \frac{(\rho_s - \rho_l)}{Rp} \cdot C^3$$

où μ est le coefficient de frottement entre la particule et la paroi.

La vitesse de l'eau chargée intervient au cube dans le travail d'usure.

De plus, la forme des grains en suspension ainsi que leur composition minéralogique influencent l'intensité de l'usure. De ce fait, nous avons pu constater que les usures dans les diffuseurs sont moindres que dans les roues et labyrinthes. (Fig. 3.)

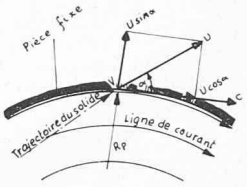


Fig. 3. — Comportement d'une particule solide entraînée par un liquide en mouvement le long d'une paroi incurvée et à proximité de celle-ci (selon Th. Bovet).

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

U = Vitesse d'une particule solide

C = Vitesse de l'eau

Cette équation montre que la puissance destructive par frottement sera d'autant plus grande :

— que la différence des masses spécifiques de la particule et du liquide sera plus grande ;

— que le volume V et la vitesse C de la particule ainsi que le coefficient de frottement μ seront plus grands. Dans les pompes installées à Grande-Dixence, C peut atteindre 50-55 m/s ;

— que le rayon de courbure Rp de la paroi sera plus petit.

Comme nous l'avons vu plus haut, les usures des pièces de la pompe ont une incidence sur toutes les pertes, sauf sur les pertes mécaniques.

Les effets de l'usure sont tels que :

a) les arêtes d'entrée des roues et du diffuseur se détériorent et il s'ensuit non seulement des pertes par chocs mais aussi, consécutivement, l'apparition du phénomène de cavitation, dont l'effet destructeur doit être évité à tout prix, car il agit encore beaucoup plus rapidement que l'érosion proprement dite ;

b) la rugosité des surfaces des aubes augmente et crée des pertes de charge supplémentaires et des turbulences parasites ;

c) les jeux radiaux des labyrinthes s'agrandissent et augmentent les circulations d'eau en circuit fermé ainsi que les pertes par frottement du disque.

De plus, cette circulation interne diminue d'autant le débit pompé et fausse même l'écoulement à l'aspiration de la roue tout en accélérant la dégradation des arêtes d'entrées.

A titre d'exemple, la maison Escher Wyss a calculé pour les pompes de Ferpècle la variation des pertes de rendement en fonction de l'augmentation du jeu radial des labyrinthes. On trouve notamment :

— pour un jeu radial de 0,5 mm, une perte de 2 % ;

— pour un jeu radial de 3 mm, une perte de 12 %, et cela sans tenir compte de la rugosité amplifiée à l'extrême. (Fig. 4.)

A titre de comparaison, nous avons pu mesurer le débit et la puissance des pompes suivantes, après le campagne d'exploitation de l'été 1967 :

Stafel Pompe 3

Roue neuve	0 h.	η = 89,5 %	Q = 3,3	m³/s
Roue usagée après	1996 h.	η = 86,5 %	Q = 3,25	m³/s

Z'mutt Pompe 2

Roues révisées	0 h.	η = 90 %	Q = 5,4	m³/s
Roues usagées après	1350 h.	η = 78 %	Q = 4,9	m³/s

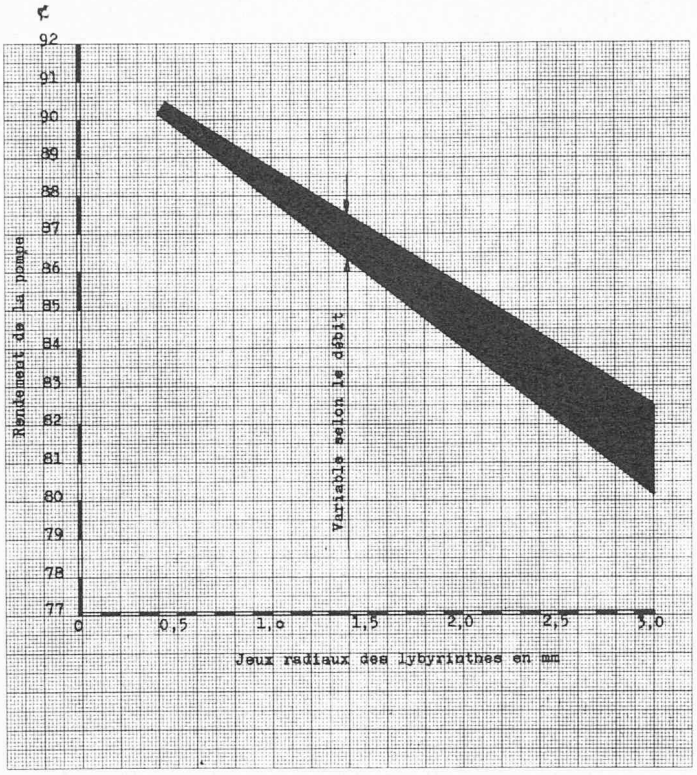


Fig. 4. — Usine de Ferpècle. Influences des usures des labyrinthes par perte volumétrique et par frottement (selon Escher Wyss).

La dureté des matériaux utilisés est le seul critère actuellement valable pour définir la résistance à l'érosion. Ceci est démontré par de multiples essais en laboratoire et sur les machines en exploitation. (Fig. 5.)

Les premières roues livrées ont été fabriquées avec de l'acier 13/1 (13 % de chrome et 1 % de nickel), d'une dureté Brinell de 180-200. Actuellement, au vu des résultats obtenus à Ferpècle et à Stafel, nous le remplaçons par de l'acier 13/4 (13 % de chrome et 4 % de nickel), d'une dureté Brinell de 280-300. Cet acier est le plus dur que les fonderies puissent actuellement fournir dans les limites d'un usinage normal encore possible.

Les labyrinthes ont été exécutés à l'origine avec de l'acier forgé 13/1 d'une dureté Brinell de 250.

Après plusieurs essais plus ou moins fructueux avec des matériaux et des revêtements divers, nous utilisons de plus en plus des aciers spéciaux nouvellement mis au point, d'une dureté Brinell de 500 à 600, d'autant plus nécessaire que, dans le cas des pompes de Z'mutt, les anneaux fixes des labyrinthes s'usent deux ou trois fois plus que les anneaux mobiles. Ces derniers, de par leur rotation, centrifugent les grains contre les anneaux fixes, qui sont soumis à une usure combinée particulière.

III. Décantation des eaux glaciaires

En général tous les dessableurs qui alimentent les installations de pompage GD sont dimensionnés pour obtenir à débit nominal une vitesse moyenne de translation de 20 cm/s, ce qui devrait permettre de décanter tous les grains d'un diamètre supérieur à 0,2 mm. De plus, les bassins de compensation favorisent la décantation des grains les plus fins, puisque en principe les vitesses de circulation sont plus faibles.

En réalité, on constate que :

a) L'eau d'origine glaciaire a une température moyenne de 3 à 4°C, d'où densité maximum et viscosité élevée.

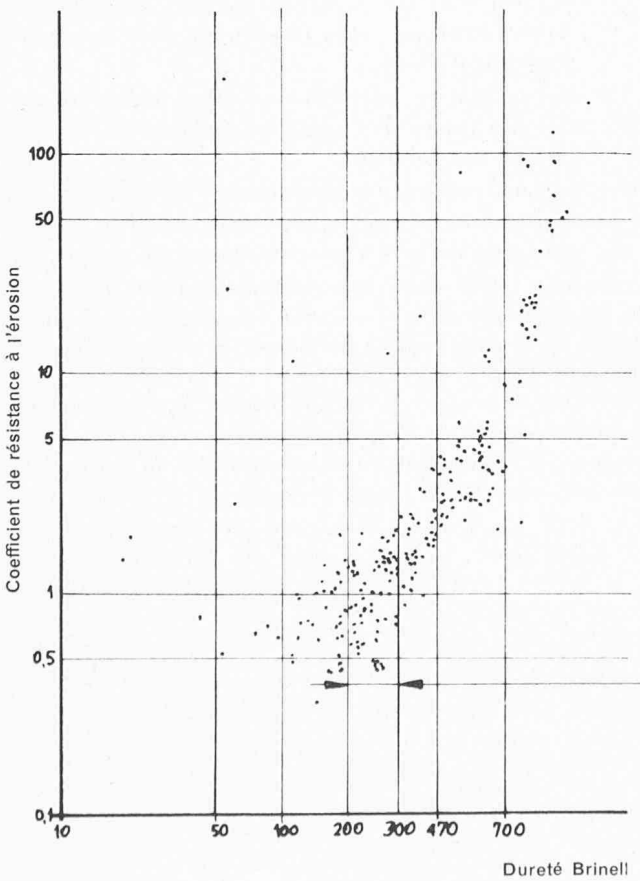
b) La plupart des grains, au lieu d'être pratiquement ronds ou massifs, sont, comme on le voit au microscope, des écailles ou des éclats de roches ayant de grandes surfaces par rapport à leur masse, d'où un grand coefficient de portance et une vitesse de chute très faible dans l'eau à viscosité élevée.

c) Les bassins de compensation sont le lieu de courants internes et de surfaces assez intenses dus à des échanges thermiques, courants de convection ou autres. De plus, des courants de densité peuvent s'établir dans le fond d'une retenue s'il s'agit d'une eau très chargée dont la densité dépasse 1 et si la pente du fond dépasse 1-2 %.

A titre d'exemple, nous citerons des mesures que nous avons effectuées en 1955 sur le lac plein de la Dixence-EOS : 50 millions de m³.

Au lever du soleil, des courants de surface de 40 à 50 cm/s se sont établis. A 40 m de fond, nous avons mesuré, avec un moulinet sensible suspendu à un filin d'acier, des vitesses de 30-40 cm/s.

Quant aux courants de fond, des mesures effectuées



Zone de dureté des matériaux utilisés pour les roues et les diffuseurs à GD

Fig. 5. — Rapport entre le coefficient de résistance et la dureté en Brinell pour différents matériaux métalliques (selon A. Stauffer).

dans des retenues d'Algérie ainsi que l'examen du fond du lac des Dix en 1964 nous en prouvent l'existence.

Il faut noter approximativement que, pour un glacier donné, si le débit est inférieur à la moitié du débit de pointe, le transport des sables est très faible. En revanche, pour un débit supérieur, cet effet augmente très rapidement, selon des mesures relevées en rivières, à la Massa, sur le Rhin, sur l'Aar et sur le Gornerbach. Sur la prise de ce dernier, nous avons observé des usures très grandes sur les revêtements et les grilles, lors de la vidange du lac glaciaire « Gornersee » qui dure trois à quatre jours. Pour 8-10 millions de m³ transités avec des débits élevés, les usures sont semblables à celles créées par les 100-110 millions de m³ captés avec des débits inférieurs. (Fig. 6.)

Les mesures effectuées par Grande-Dixence sur le Gornerbach de juillet à septembre 1961 donnent les résultats approximatifs suivants :

A 7 h. 30

Pour un débit moyen de 10 m³/s, on a mesuré en moyenne 0,3 kg/m³ de sable < 0,5 mm, dont 0,15 kg/m³ de limons inférieurs à 0,18 mm.

A 13 h. 30

Pour un débit moyen de 13 m³/s, on a mesuré en moyenne de 0,5 kg/m³ de sable < 0,5 mm, dont 0,2 kg/m³ de limons inférieurs à 0,18 mm.

A 17 h. 30

Pour un débit moyen de 16 m³/s, on a mesuré en moyenne 0,9 kg/m³ de sable < 0,5 mm et 0,4 kg/m³ de limons inférieurs à 0,18 mm. Cela se traduit journellement par 500-600 tonnes de sable < 0,5 mm, dont 250-300 tonnes de limons inférieurs à 0,18 mm.

Il faut remarquer que de tels limons sont très difficiles à décanter et qu'en 1967 nous avons eu, de juin à septembre, une moyenne de 400 m³/jour de limons déposés dans le bassin de Z'mutt.

Il est donc primordial de dessabler au maximum, afin d'obtenir une eau suffisamment décantée, ne contenant plus que des particules petites et peu nombreuses par unité de volume.

IV. Expériences générales d'exploitation

Nous les donnons dans l'ordre des mises en service.

1. *Usine de Stafel, exploitée dès 1961*

Adductions

- Eaux glaciaires limoneuses en périodes de gros débits.
- Prise d'eau classique à grille verticale : 15 m³/s.
- Dégraveur par chenal de fond d'une efficacité restreinte.
- Deux dessableurs en parallèle et purge par système Dufour à soutirage permanent.
- Bassin de compensation de 90 000 m³.

Pompes

- Roues et labyrinthes fortement usés après une saison, du moins jusqu'en 1964.
- Baisse de rendement de plusieurs pour-cents.
- Révisions annuelles des pompes, de 1961 à 1967.

Améliorations et résultats

- En 1964, des bassins de décantation de 25 000 m² ont été créés, au moyen de digues, entre le glacier et la prise. Dès leur mise en service, les volumes de sables déposés dans le bassin de compensation ont diminué fortement, ainsi que les usures des pompes.
- Révisions annuelles des pompes, mais moins d'usures dès 1964.

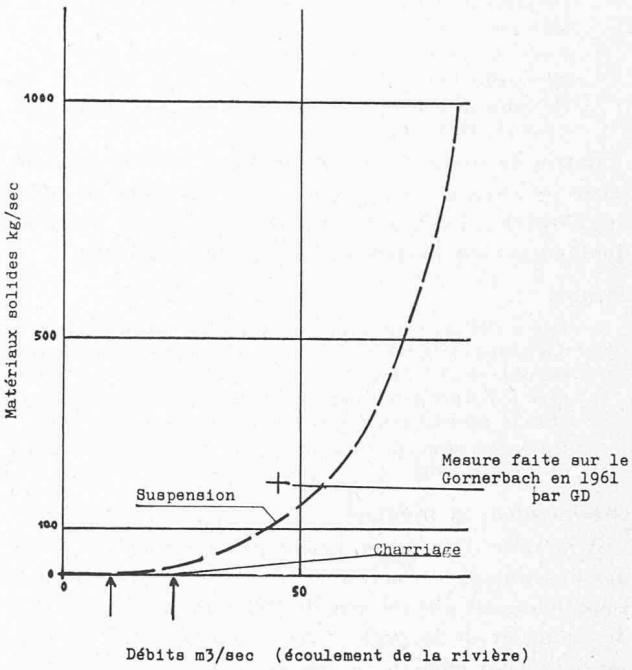


Fig. 6. — Transports de matériaux solides de la Massa à Massaboden, effectué par Electricité de France pour SGI Genève.

- Dès 1967, nous avons transformé le système de soutirage des sables dans les dessableurs ainsi que l'efficacité des bassins de décantation.
- D'autre part, un acier plus dur a été utilisé pour les roues des pompes. Nous espérons, en améliorant quelques détails, porter à deux ans les intervalles de révision des pompes, ceci restant bien entendu lié aux débits et volumes captés.

2. *Usine d'Arolla, exploitée dès 1963*

Adductions

- Prise de Bertol inférieur par « en dessous » (4 m³/s).
- Dégraveur trémie de petit volume : 5 m³.

Année	Matériaux solides déposés ; grains inférieurs à 0,2 mm Volumes estimés	Volumes d'eau transités	Observations
1961	6 000 m³	37 mio m³	sans digues
1962	10 000 m³	43 mio m³	sans digues
1963	6 000 m³	50 mio m³	sans digues
1964	5 000 m³	56 mio m³	avec digues
1965	5 000 m³	40 mio m³	avec digues
1966	3 000 m³	28 mio m³	avec digues Arrêt de pompage du 15.7 au 25.8
1967	5 000 m³	48 mio m³	avec digues

Fig. 7. — Bassin de Stafel. Matériaux solides déposés et volumes d'eau transités.

— Dessableur classique avec soutirage par système automatique Bieri.
— Prise de Tsidjiore-Nouve par « en dessous » (2 m³/s) avec grille fine.
— Dessableur classique avec soutirage des limons par système Bieri.

Bassin de compensation de la Maya (15 000 m³), qui reçoit les eaux de Bertol inférieur et les eaux pompées de Ferpècle. Les eaux captées à Tsidjiore arrivent directement sur l'aspiration des pompes d'Arolla.

Pompes

— Dès le début, nous avons constaté une usure très forte des roues et des labyrinthes, accompagnée d'une baisse sensible du rendement. L'introduction des eaux pompées à Ferpècle n'a pas augmenté les usures dans une grande proportion, malgré le volume prépondérant.
— Révisions annuelles des pompes et des joints de vanne, de 1963 à 1965.

Améliorations et résultats

A la suite d'un engorgement des systèmes de purge des dessableurs, on a complété la prise de Bertol inférieur en créant une retenue de 1000 m³ par surélévation des murs et de la grille. Ceci fonctionne déjà comme un dégraveur efficace, ce qui permet :

— de gagner un volume d'eau appréciable ;
— de soulager le dessableur ;
— d'obtenir de l'eau beaucoup plus propre ;
— de ne réviser les pompes que tous les deux ans, par suite d'usures beaucoup plus faibles.

Au vu des résultats probants obtenus, nous avons complété la prise de Tsidjiore d'une manière analogue, et par suite d'une exploitation avec de nouvelles roues (300 Brinell) la révision des pompes pourra n'avoir lieu que probablement tous les trois ans, intervalle qui restera cependant fonction des débits et volumes d'eau.

3. *Usine de Ferpècle, exploitée dès 1964*

Adductions

— Lac naturel entre glacier et prise, de 300 000 à 400 000 m³, très efficace sous le rapport de la décantation.
— Prise par « en dessous », avec limiteur à 15 m³/s.
— Dégraveur trémie de faible volume.
— Deux dessableurs classiques en parallèle avec soutirage des limons par système Bieri.
— Bassin de compensation de 110 000 m³, avec des dépôts annuels de limons de l'ordre de 2000 à 3000 m³ pour 45-50 millions de m³ transités.

Pompes

— Usures peu marquées sur les roues, surtout celles en acier de qualité supérieure, d'une dureté de 300 Brinell.
— Usures plus prononcées sur les labyrinthes.

Améliorations et résultats

— La décantation est excellente.
— Les matériaux et les formes des labyrinthes ont été modifiés.
— Révisions tous les trois ans, période qui reste fonction des débits et volumes captés.

4. *Usine de Z'mutt, exploitée dès 1965*

Adductions

Eaux du Gornergletscher

— Prise dimensionnée pour 30 m³/s, prise « en dessous ».
— Dégraveur trémie de 600 m³ avec système de détection par radio-isotopes et vanne plane automatique.
— Deux dessableurs classiques en parallèle de 3000 m³, chacun avec système Bieri pour soutirage des limons.
— Galerie d'adduction qui aboutit à l'extrémité amont et au niveau maximum de la retenue de Z'mutt, d'une capacité de 800 000 m³.
— Arrivée des eaux du bassin intermédiaire Stafel-Z'mutt avec un débit maximum de 1 m³/s, plus les eaux de dessablage de Stafel.

Dépôt annuel de sables et limons dans la retenue de Z'mutt avec volumes d'eau transités :

	Sables et limons	*Volume transité*
1965	20 000 m³	90 millions m³
1966	25 000 m³	120 millions m³
1967	50 000 m³	80 millions m³

Ceci démontre l'influence des débits sur les transports solides.

En effet, 1965 et 1966 ont été des années à débits réguliers, tandis qu'en 1967 les débits ont été faibles en juin et septembre et notablement au-dessus de la moyenne multiannuelle en juillet et août.

Pompes 1, 2 et 5

— Dès le début, roues et labyrinthes très fortement usés, avec un maximum de dégâts en 1967.
— Révisions annuelles pour chacune des pompes. Malgré la qualité des roues et le soin apporté à leur réparation, les usures sont telles qu'à fin 1967, les roues doubles sont irréparables, après 5800 h. d'exploitation.
— Toutes les petites vannes et commandes à eau sont usées ou obstruées par des limons.

Améliorations et résultats

— Exécution des labyrinthes avec des matériaux plus durs et recherches de formes améliorées.
— Nouvelles roues, en acier à haute dureté, montées en hiver 1967/68 en vue de la campagne d'été 1968.

Eaux de Schali-Bis

Adductions

— Prises sous-glaciaires de Bis, avec dégraveur-dessableur automatique, débit maximum 4 m³/s. Seules deux prises captent des eaux sableuses.
— Prises avec barrage en rivière sur le Schalibach pour un débit maximum de 5 m³/s : eaux propres.
— Bassin de Bodmen de 3000 m³.
— Alimentation complémentaire avec les eaux du bassin de Z'mutt, au moyen du groupe pompe-turbine n° 5.

Pompes 3 et 4

— Le démontage de la pompe 3 a eu lieu en automne 1967, après deux ans d'exploitation.
Les usures sont peu prononcées et l'on prévoit qu'avec des roues et labyrinthes en matériaux plus durs, les révisions pourront s'effectuer tous les trois ans.

V. Matériaux utilisés pour l'exécution des pompes et expériences faites

Une comparaison des comportements respectifs des pièces soumises à l'usure, sur les quinze pompes, n'est possible qu'en considérant :

— la durée annuelle de fonctionnement ;
— l'élévation manométrique par étage ;
— la qualité des eaux refoulées.

1. *Matériaux utilisés*

Les caractéristiques des matériaux utilisés et de ceux qui peuvent être envisagés ressortent de la figure 8.

En général les fondeurs de roues déconseillent l'utilisation de l'acier inoxydable 17/4, qui est cher et dont

Spécification	181 V Sulzer	185 V Sulzer	Cor 13 GF	Cor 13 extra GF	Cor 21 GF	N 4 L 55 GF
Résistance à la traction en kp/mm²	70 - 75 *	90 - 100 *	65 - 75 *	104 *	100 - 110 **	55 *
Limite d'élasticité en kp/mm²	50 - 55	70 - 80	45 - 50	97	75 - 80	35
Allongement en %	20 - 25	16 - 20	15 - 20	17	10 - 13	18
Résilience en kpm/cm²	10 - 15	11 - 16	4 - 6	9 - 10	3 - 5	6
Dureté en HB	200 - 220	280 - 300	220 - 230	300 - 310	350 - 360	150 - 160
* Caractéristiques réelles obtenues sur pièces utilisées ** Caractéristiques théoriques de labor.						
Teneur en carbone %	0,05 - 0,07	0,04 - 0,07	0,08 - 0,12	0,05 - 0,07	0,05 - 0,07	0,27
Teneur en chrome %	12 - 13	12 - 13	12 - 13	12 - 13	16 - 17	—
Teneur en nickel %	1,3 - 1,5	3,7 - 4,3	0,8 - 1,0	3,8 - 4,2	3,8 - 4,2	2
Teneur en molybdène %	0,3 - 0,4	0,3 - 0,4		0,4 - 0,6	0,8 - 1,2	—
Utilisé à : * dès 1968	Z'mutt Stafel Arolla	Z'mutt * Stafel Arolla *	Ferpècle	Ferpècle		
Comparaison de prix	100 %	116 %	100 %	115 - 120 %	120 - 125 %	75 %

Fig. 8. — Tableau comparatif des principaux matériaux utilisés et possibles pour roues et diffuseurs

les caractéristiques de résistance obtenues en laboratoire ne dépassent pas celles du 13/4.

De plus, on constate souvent que les caractéristiques effectives obtenues sur des éléments réels de formes compliquées sont toujours inférieures à celles obtenues sur éprouvettes, en laboratoire.

a) *Roues de pompes*
Aciers semi-inoxydables : Sulzer 181 V - 185 V ;
GF Cor 13 - Cor 13 extra.

b) *Appareils directeurs ou diffuseurs*
Matériaux semblables à ceux des roues.

c) *Labyrinthes mobiles et fixes des roues*
1. Acier coulé à 13 % Cr.
2. Acier laminé à 13 % Cr.
3. Acier normal recouvert de nickel chimiquement déposé, procédé Kanigen, dureté : 600-700 Brinell.
4. Acier forgé à 13 % Cr rechargé par projection d'acier à 13 % Cr ; grains dureté : 600 Brinell.
5. Acier normal recouvert par du chromage dur : 650-700 Brinell.
6. Bronze 14.
7. Bronze 14, rechargé par projection d'acier à 13 % Cr.

d) *Anneaux d'étanchéité de la ligne d'arbre*

a) *Parties mobiles :*
1. Acier coulé à 13 % Cr.
2. Bronze 14.
3. Acier coulé à 13 % Cr, puis rechargé par projection.
4. Bronze 14 rechargé par projection d'acier.

b) *Parties fixes :*
1. Alliage bronze-aluminium Inoxyda.
2. Métal blanc déposé sur douille en bronze.
3. Fonte 2 % Ni.
4. Acier normal recouvert par du nickel (Kanigen).

Classification : 1 très peu d'usure 2 peu d'usure 3 usure moyenne 4 forte usure 5 très forte usure

Usines	Pièces d'usure	181 V acier coulé	185 V acier coulé	13.65 acier coulé	13 ext acier coulé	Cor 13 acier coulé	Cor 13 forgé laminé	Cor 13 acier coulé	Bz 14 coulé	Métal blanc	Nickel chimi.	Métal à froid	Fonte nickel	Bz-Al coulé	
Z'Mutt	Roues motrices	5													
Stafel		3 4	2												
Ferpècle				2	1										
Arolla		3 4													
Z'Mutt	Pièces de renvoi	4													
Stafel															
Ferpècle															
Arolla		2													
Z'Mutt	Diffuseurs	4													
Stafel		3													
Ferpècle				2	1 2										
Arolla		3													
Z'Mutt	Labyrinthes mobiles roues					4					5	5			
Stafel						3									
Ferpècle								1							
Arolla						3	2								
Z'Mutt	Labyrinthes fixes roues					5									
Stafel						3									
Ferpècle									3 4			2			
Arolla						3					1				
Z'Mutt	Etanchéités mobiles d'arbres					2			4						
Stafel						2			3			2			
Ferpècle															
Arolla						2						2			
Z'Mutt	Etanchéités fixes d'arbres									2	5		2	2	
Stafel															
Ferpècle									2						
Arolla													2	2	

Fig. 9. — Usines de pompage de Grande-Dixence. Tableau comparatif des usures observées sur les différentes pièces et matériaux.
Base : 2000 heures.

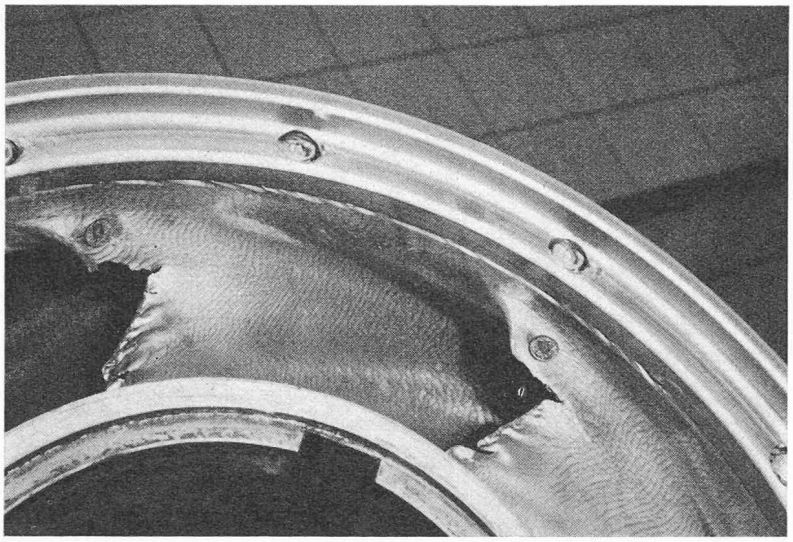


Fig. 10. — Usine de Z'mutt. Pompe n° 1. Automne 1967.
Roue motrice ; 2e étage.
Matériau : acier coulé 13 % Cr ; 1 % Ni.
Etat après 1619 heures de service depuis la dernière révision.
Heures de service cumulées : 5828.
Réparation très difficile : aubes minces.

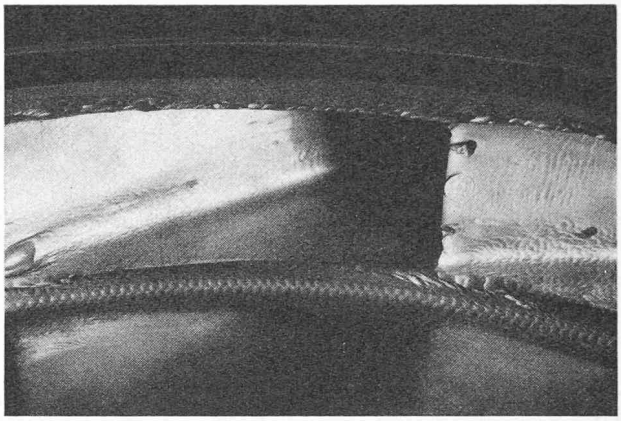


Fig. 11. — Usine de Z'mutt. Pompe n° 1. Automne 1967.
Aubage directeur 1er étage : détail.
Matériau : acier coulé 13 % Cr ; 1 % Ni.
Heures depuis révision : 1619.
Heures cumulées : 5828.
Réparation possible.

2. *Usures constatées*

La figure 9 indique les degrés d'usure observés avec les différents matériaux sur les diverses pièces des pompes. Ces données sont comparées avec un temps d'exploitation de 2000 heures.

Roues

Elles révèlent :

— en général, des usures prononcées des arêtes d'entrée, avec « effet de pile de pont » sur l'attache des aubes ainsi que certaines fissures sur d'anciennes recharges par soudure ;
— des érosions localisées à l'entrée de l'intrados de l'aube ;
— des surfaces intérieures fortement érodées avec ondulations, selon la théorie d'Ackeret ;
— des arêtes de sortie érodées et amincies ;
— des disques des roues érodés selon une forme particulière. (Fig. 10.)

Diffuseurs

On constate :

— des usures semblables à celles des roues, mais moins prononcées ;
— des usures sur l'appui des diffuseurs dues à des écoulements interstitiels. (Fig. 11.)

Labyrinthes

On constate :

— des jeux radiaux qui, de 0,4 mm à l'état de neuf, atteignent 3 à 4 mm après 2000 heures de service, du moins à Arolla et Z'mutt.

Pour un même matériel, l'usure se répartit comme suit :

0,5-1 mm sur l'anneau mobile en rotation ;
2 -3 mm sur l'anneau fixe soumis aux impacts des particules. (Fig. 12 et 13.)

Avec l'augmentation des jeux radiaux, le débit de fuite augmente. Ce dernier peut atteindre 10 % du débit pompé et vient fausser l'écoulement à l'aspiration de la roue, d'où aggravation des dégâts aux arêtes d'entrée.

Les surfaces, qui étaient lisses en début de pompage, sont très rugueuses après 2000 heures de service. La rugosité entre creux et bosses atteint plusieurs millimètres.

Selon des expériences réalisées sur les turbines à vapeur, certains labyrinthes ont été exécutés avec des rainures de freinage. Ce système, efficace à l'état de neuf, a été abandonné car, après usure, cela engendre des destructions localisées sur la contre-pièce et les réparations deviennent difficiles. Les nouvelles formes des labyrinthes deviennent simples, lisses, avec des chambres de destruction d'énergie et les jeux radiaux sont diminués.

Anneaux d'étanchéité sur la ligne d'arbre

En général, on y relève peu d'usures, surtout si l'on utilise des aciers normaux à 13 % Cr.

Plaques de protection

Avec des eaux sableuses, on constate des usures prononcées sur la fonte grise d'origine. Les usures sont moindres sur des plaques exécutées en acier 50. Les vibrations créées par les démarrages ont causé quelques ruptures de boulons de fixation.

3. *Résumé*

On constate que les pièces s'usent fortement suivant l'ordre décroissant suivant :

1. Roues et labyrinthes.
2. Diffuseurs.
3. Anneaux d'étanchéité de la ligne d'arbre.
4. Plaques de protection.

Roues

Au vu des résultats obtenus, et compte tenu de leurs prix respectifs, les aciers 185 V Sulzer et Cor 13 extra GF s'avèrent les plus intéressants pour l'exécution des roues de pompes.

Labyrinthes

Les métaux les plus durs, mais encore usinables et peu fragiles, sont ceux qui se comportent le mieux, à condition de réaliser des formes simples. Les recharges, applications, recouvrements ou projections peuvent être utilisés, mais avec circonspection.

Diffuseurs

Les expériences sont semblables à celles faites sur les roues.

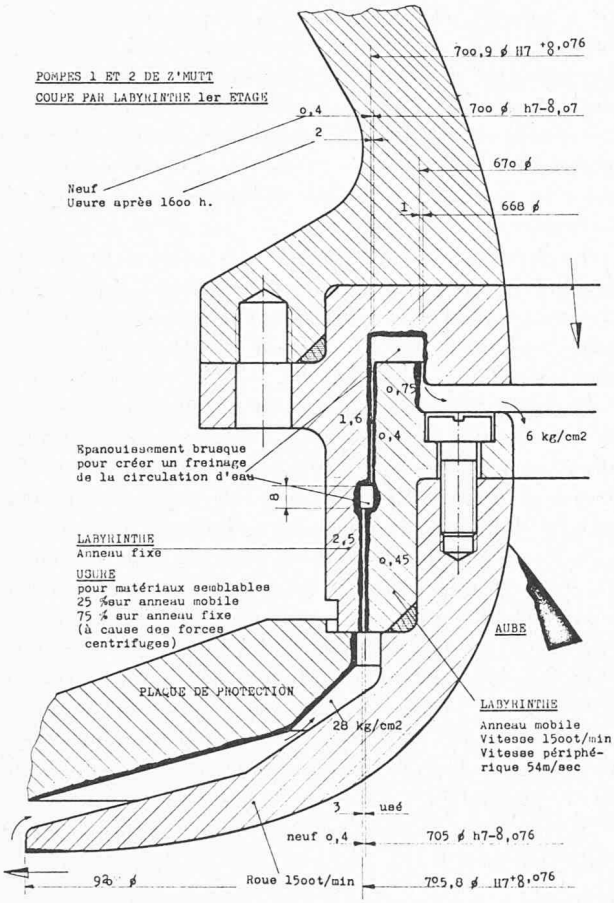


Fig. 12. — Pompes 1 et 2 de Z'mutt. Coupe par labyrinthe, 1er étage.

VI. Réparations de pompes et organisation des réfections

1. *Réparations et fréquences*

Roues

— On recharge par soudure électrique avec des aciers de même composition que le matériau de base. En général, la recharge s'exécute facilement sur les arêtes d'entrée et de sortie et sur les anneaux des disques.

En revanche, il est très difficile de recharger l'intérieur des canaux, à cause de leur exiguïté. Certaines réparations de secours ont été faites par soudure, en recourbant les électrodes, et exécutées à l'aide d'un miroir.

Le meulage grossier, puis le polissage enlèvent les irrégularités et donnent aux surfaces des formes adéquates. L'inconvénient réside dans le fait que des aubes de 8 à 10 mm d'épaisseur ne supportent que trois ou quatre révisions, après lesquelles elles deviennent irréparables. C'est le cas des roues doubles de Z'mutt 1 et 2, dont les arêtes d'entrée sont déchiquetées après 5600 heures d'exploitation et deux révisions seulement.

Il faut compter deux ouvriers durant un mois pour meuler et polir une roue simple.

— On procède à un tournage des disques et anneaux de la roue.

— On réalise un équilibrage dynamique des roues, tel que les balourds ne dépassent pas 10 gr. à 1500 t/mn.

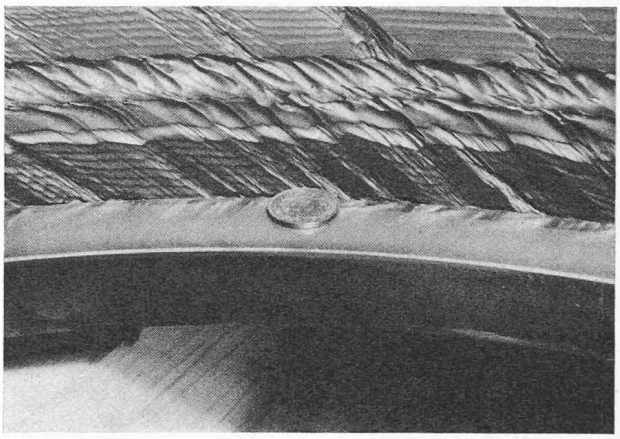


Fig. 13. — Usine de Z'mutt. Pompe nº 2. Automne 1966.
Anneau fixe du labyrinthe : 2e étage.
Matériau : acier au chrome de 13 %.
Heures de service : 2048.
N'est plus réparable.

Diffuseurs

— Ils sont réparés comme les roues, mais avec moins de difficultés.

Labyrinthes

Par reprise au tour des pièces fixes extérieures et en exécutant des pièces mobiles spéciales, on peut réutiliser, durant une saison, des labyrinthes endommagés. Les labyrinthes montés sur les roues sont équilibrés dynamiquement avec ces dernières.

Fréquence des révisions

Elle est fixée par le degré d'usure des roues et des labyrinthes et elle doit coïncider avec la fin d'une période de pompage. La fréquence probable s'établit comme suit, en regard des expériences faites et en ne tenant compte que des usures :

		Actuel	*Futur*
Z'mutt	Pompes 1, 2 et 5	1 × /an	1 × /an
	Pompes 3 et 4	1 × /2 ans	1 × /3 ans
Stafel	Pompes 1, 2 et 3	1 × /an	1 × /2 ans
Ferpècle	Pompes 1, 2 et 3	1 × /3 ans	1 × /3 ans
Arolla	Pompes 1A, 1B, 2 et 3	1 × /2 ans	1 × /3 ans

Actuellement, nous avons 9-10 pompes à réviser annuellement. Plus tard, nous pensons abaisser ce nombre à 7 ou 8 pompes, d'une part en améliorant les matériaux et les moyens de décantation, d'autre part en combinant judicieusement les heures de fonctionnement.

Il est apparu, en effet, que les démontages et remontages doivent être réduits au minimum car souvent, lors des nouveaux démarrages des pompes, nous éprouvons des difficultés : mauvais alignement d'arbre, vibrations, tensions parasites de fixation des pompes, sans parler des problèmes de joints, de paliers ou d'alésages, etc.

2. *Organisation des travaux de réfection*

Jusqu'en 1966, les travaux de révision et réfection ont été exécutés en grande partie par les différents fournisseurs des pompes.

Cette méthode ne nous a pas donné satisfaction, pour les raisons suivantes :

a) Les délais d'exécution impératifs pour la remise en exploitation des pompes sont difficilement respectés.

b) Le prix de revient de ces réparations est élevé.

Pour les raisons ci-dessus, nous nous sommes équipés pour faire face à tous les problèmes posés par la révision des pompes et nous avons formé notre personnel en conséquence. Ce mode de faire présente les avantages suivants :

a) Utilisation optimale de notre personnel en hiver.
b) Contrôle du délai de réparation.
c) Adaptations immédiates des pièces à l'état des machines.
d) Coordination simplifiée des travaux.
e) Transports et frais réduits.
f) Diminution de l'indisponibilité des machines.
g) Polissage poussé des roues et diffuseurs.
h) Prix de revient intéressant.

VII. Pièces de rechange

Lors de la commande initiale des pompes, il avait été prévu quelques pièces de réserve, à titre de sécurité, puisque l'on ne connaissait pas la fréquence des révisions. Mais au vu des résultats d'exploitation de l'usine de Z'mutt et compte tenu des différents travaux de révision de tous genres qui immobilisent le personnel d'exploitation, il s'avère nécessaire d'avoir un jeu de pièces de rechange pour chaque machine. Les délais de fourniture, pour des pièces de fonderie usinées, dépassent fréquemment 18 mois.

VIII. Remarques et conclusions

Décantation des eaux glaciaires

Il ressort de cette étude que le dessablage doit être poussé au maximum, afin que les effets d'abrasion soient réduits. Dans ce domaine, il semble que l'on doit s'orienter vers des formes nouvelles de dessableurs, en tenant compte des expériences faites dans des branches similaires : épuration des eaux ou traitement des eaux. Le soutirage des sables est résolu actuellement de façon très satisfaisante par différents systèmes, en particulier par le type « Bieri ». Un autre système qui a fait ses preuves est le dessableur cloisonné.

Ce système, installé sur une prise de montage de la Société hydro-électrique de l'Oberhasli, donne satisfaction, par l'élimination des grains supérieurs à 0,1 mm, depuis plusieurs années.

Métallurgie et conception des pompes

La résistance à l'abrasion est basée sur la dureté et sur le genre de cristallisation de métaux utilisés et dont les alliages jouent un rôle important. Mais les techniques et les possibilités d'usinage limitent les duretés.

Pour les roues et distributeurs, la métallurgie actuelle fournit des aciers coulés à 13 % de chrome et 4 % de nickel, dont la dureté Brinell peut atteindre 300-320.

Par la suite, au vu du développement des machines-outils d'usinage par électro-érosion, il sera possible d'utiliser des aciers spéciaux, en particulier des aciers alliés au titane, déjà utilisés pour des hélices marines de bateaux.

Pour les labyrinthes, dont l'usure a une influence prépondérante sur les caractéristiques de la machine, on utilise, de plus en plus, des aciers spéciaux traités, de dureté Brinell 500-550. Dans ce cas, la fragilité de matériel limite son application aux anneaux fixes, qui sont d'ailleurs les plus soumis à l'usure. Il est possible qu'à l'avenir, sur des machines de petites dimensions, on utilise des joints flottants avec injection d'eau propre. De plus, les possibilités d'application de stellitage ou de recharge par plasma doivent être étudiées.

L'étude comparative de résistance à l'érosion de vingt matériaux récents est en cours sur machine spéciale mise au point par la Société Générale pour l'Industrie, à Genève.

La résistance et la longévité des roues peuvent être améliorées par agrandissement des canaux, suppression de quelques aubes et épaississement des aubes restantes, mais seulement après essais sur modèles, afin d'éviter des instabilités d'écoulement.

La vitesse de 1500 t/mn a été un choix heureux, car il en a résulté des machines de dimensions réduites, d'où des pièces relativement petites et en conséquence moins coûteuses. En revanche, cela augmente quelque peu les difficultés de réparations. Pour de futures pompes d'accumulation travaillant avec des eaux glaciaires, il serait avantageux de choisir des pompes à un seul flux, pour autant que le rendement n'en souffre pas trop et que la vitesse spécifique dépendant des caractéristiques imposées permettent une telle construction. Afin de diminuer les vitesses d'écoulement à travers les roues, d'où les usures, la hauteur manométrique par étage devrait être limitée au minimum encore économiquement justifiable.

De plus, les canaux seraient moins exigus, d'où un entretien facilité.

Entretien

L'équipement adéquat des ateliers permet de réaliser des réparations efficaces et économiques. De plus, des appareils de contrôle facilitent grandement les recherches et améliorations possibles.

Au vu des coûts de réparations (essentiellement en main-d'œuvre) et de l'évolution de la métallurgie, il est probable qu'une machine-outil travaillant sur le principe de l'électro-érosion sera rentable dans quelques années, malgré son coût élevé.

Des machines de ce genre sont déjà utilisées pour l'usinage d'aubes de turbines Pelton. Dans le cas des pompes susmentionnées, le problème à résoudre est celui de l'électrode et de sa situation dans l'espace pour usiner correctement les canaux des roues. Cette méthode aura les avantages suivants :

— d'usiner de façon précise et totale les canaux ;
— d'usiner des matériaux durs.
— d'usiner rapidement avec une économie considérable de main-d'œuvre.

La décantation des eaux glaciaires et l'utilisation des matériaux adéquats ont une importance considérable sur les rendements. Les démontages, révisions et remontages des pompes sont à réduire au minimum. Chaque révision est onéreuse. De plus, chaque remise en service apporte des incertitudes quant à la sécurité de fonctionnement de la machine.

Sur la base de la quantité d'énergie annuelle de pompage et de son coût, tout doit être mis en œuvre pour maintenir au maximum les rendements des pompes, ainsi que pour améliorer la sécurité d'exploitation des groupes.