

Centrale de Häusling

Province du Tyrol, Autriche

2 groupes ternaires de 170 MW en pompe et 175 MW en turbine

Pompe: Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

J.M. Voith GmbH, Heidenheim, RFA et J.M. Voith AG, St. Pölten, Autriche

Turbine: Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

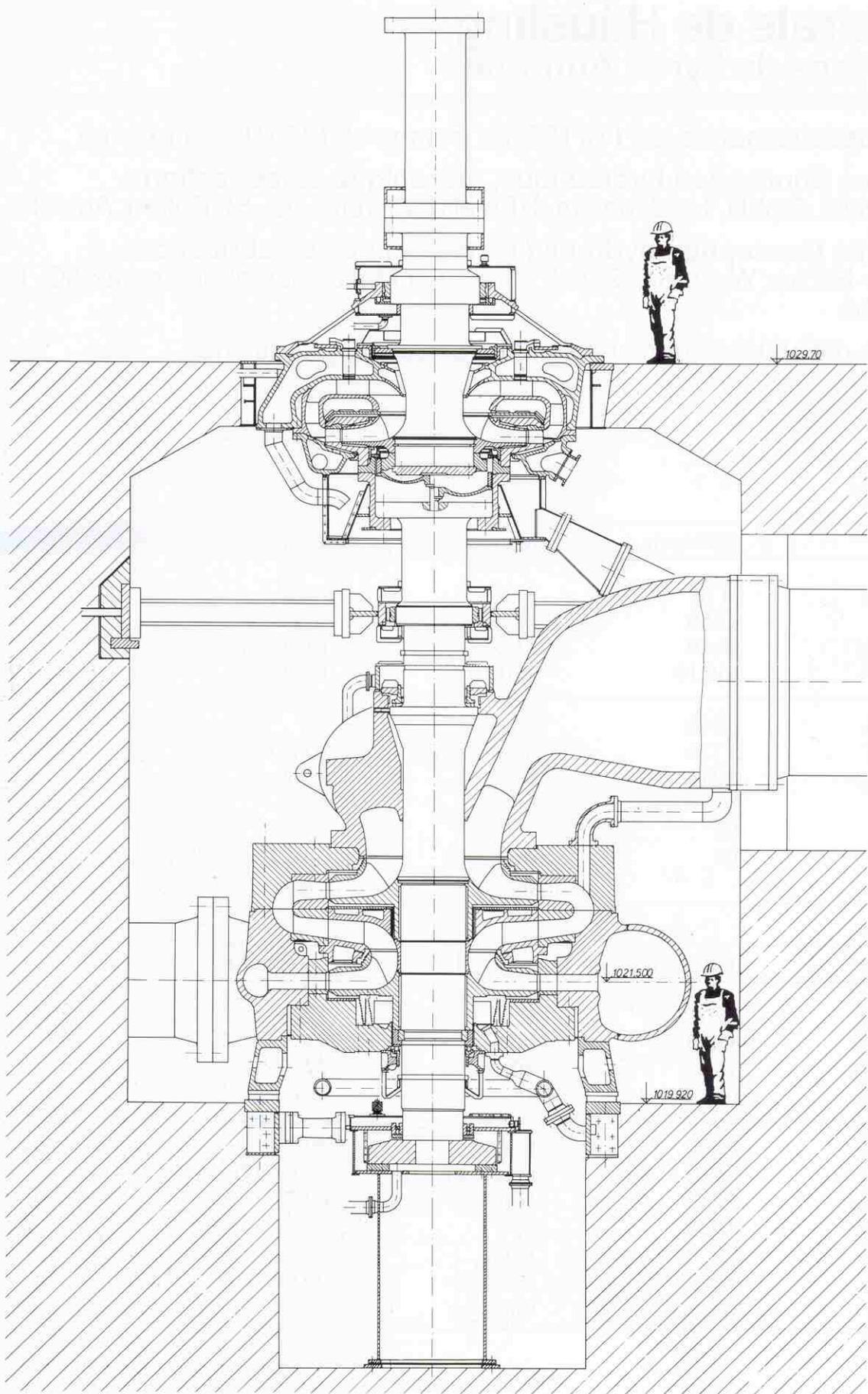
Sulzer-Escher Wyss SA, Zurich, Suisse et Maschinenfabrik Andritz AG, Graz, Autriche

Maître d'œuvre: Tauernkraftwerke AG, Salzburg, Autriche

Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	6178	7117	7495
H (m)	630,0	725,7	764,3
Q (m ³ /s)	26,40	21,57	19,96
P (MW)	166,18	170,16	177,00
D _{1e} (m)	1,748	f (Hz)	50
D _{1i} (m)	2,724	n (t/s; t/min)	10,0; 600
B ₀ (m)	0,219	N _{QE} (-)	0,060
z _r (-)	9	n _q	20
z ₀ (-)	16	v (-)	0,13
z _{avd} (-)	16	σ _{min} (-)	0,19
		σ _{max} (-)	0,42

Caractéristiques

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	5570	6307	7200
H (m)	568,0	643,1	733
Q (m ³ /s)	32,5	30,7	27
P (MW)	166,5	181	181
D _{1e} (m)	1,800	f (Hz)	50
D _{1i} (m)	2,767	n (t/s; t/min)	10,0; 600
D ₀ (m)	3,218	N _{QE} (-)	0,078
B ₀ (m)	0,238	n _q	26
z _r (-)	15	v (-)	0,17
z ₀ (-)	20	σ _{min} (-)	0,109
z _{avd} (-)	10	σ _{max} (-)	0,187



Généralités

La centrale de Häusling fait partie de l'aménagement de Zemm-Ziller, du nom de deux rivières, le Zembach et la Ziller, qui coulent vers le nord pour se jeter dans l'Inn. Le complexe, situé à 40 km à vol d'oiseau au sud-est d'Innsbruck, est composé de 4 centrales d'une puissance totale de 961 MW.

La centrale de pompage-turbinage de Häusling est reliée à l'amont au lac artificiel de Zillergründl situé à 1850 m d'altitude et d'une capacité de $86 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et à l'aval au lac artificiel de Stillupp d'un volume de $6,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à 1120 m d'altitude.

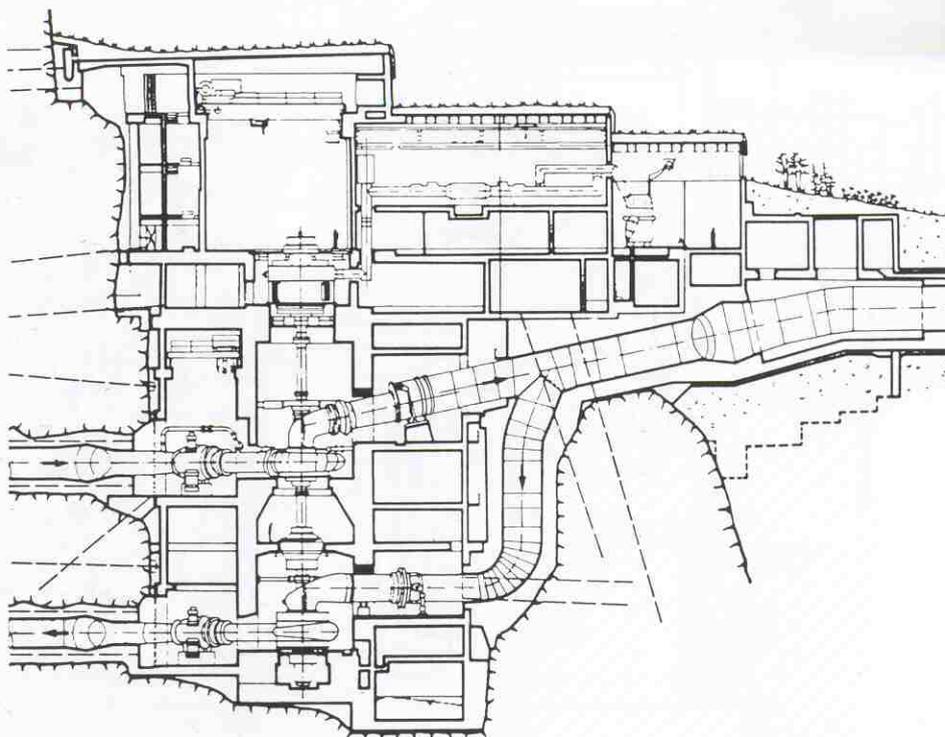
Le barrage de Zillergründl est un barrage-voûte à double courbure en béton. Sa hauteur est de 186 m pour une longueur au couronnement de 506 m.

Le lac est relié à la centrale par une galerie de 7643 m de longueur et de 4,2 m de diamètre suivie d'une cheminée d'équilibre et d'une conduite forcée de 3,65 m de diamètre. La centrale est à ciel ouvert, au bord de la Ziller (fig. 1). Les 2 groupes sont installés dans un puits cylindrique de 33 m de diamètre et de 40 m de profondeur. Les machines sont reliées au lac aval par une galerie de 7523 m de longueur et 4,55 m de diamètre, munie d'une chambre d'équilibre.

Le choix de groupes ternaires est basé sur une recherche d'optimisation très élaborée qui a mené aux conclusions suivantes:

- impossibilité d'installer des turbines Pelton en raison de la très longue galerie aval;
- chute trop élevée (à l'époque 1970-1978) pour installer des pompes-turbines à 2 étages réglables;
- réglage de puissance impossible avec des pompes-turbines multiétages.

1. Coupe de la centrale. On remarque la pompe à la partie inférieure, puis le convertisseur de couple, la turbine et le moteur-alternateur (document Tauernkraftwerke).



En outre, il a été décidé de ne pas bétonner les groupes afin d'avoir la possibilité ultérieure de réajuster leur alignement, problème particulièrement délicat avec des arbres de 40 m de longueur.

La pompe est à 2 étages avec l'aspiration située à la partie supérieure.

L'aspirateur est coudé à 90°, traversé par l'arbre. Le tracé hydraulique de cette pièce est particulièrement difficile (fig. 2 et 3). En effet, la répartition de la vitesse méridienne doit être constante à l'entrée de la roue du premier étage pour obtenir à la fois un bon rendement et des bonnes caractéristiques en cavitation.

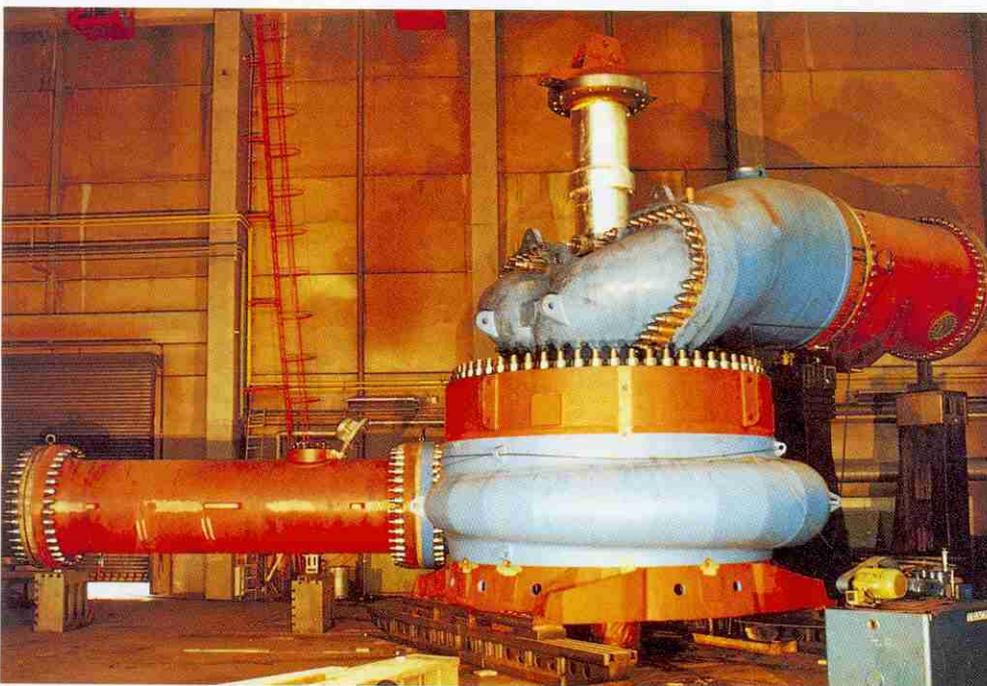
Le tracé hydraulique de la roue du 1^{er} étage est un compromis pour concilier à la fois un bon comportement en cavitation et un bon rendement alors que pour la roue du 2^e étage, l'accent est mis principalement sur le rendement.

Le diffuseur-redresseur du 1^{er} étage doit assurer la transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression et une bonne répartition de vitesse à l'entrée de la 2^e roue. Le diffuseur-redresseur du 2^e étage joue le même rôle pour l'entrée de la bêche.

Des essais comparatifs ont été exécutés dans le laboratoire Aströ à Graz avec un modèle de pompe Voith d'un diamètre $D_{1j} = 0,452$ m et un modèle Sulzer-Escher Wyss d'un diamètre $D_{1j} = 0,472$ m. La chute d'essai était comprise entre 32 et 50 m pour les 2 machines.

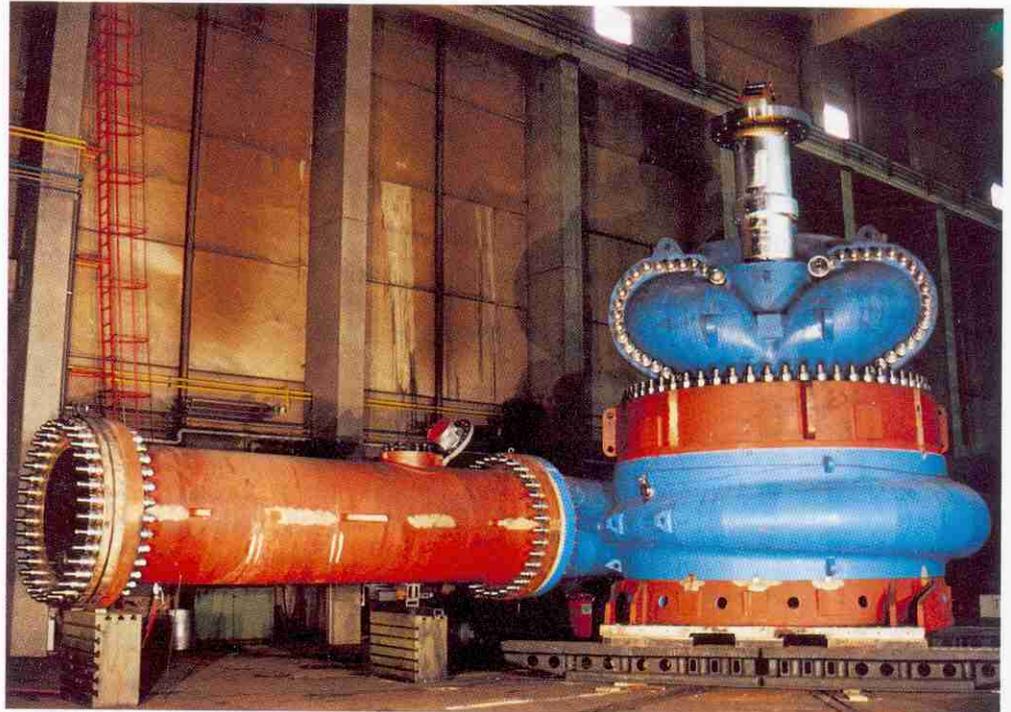
L'essai prototype effectué par la méthode thermodynamique a montré un rendement supérieur de 1% à la valeur prévue.

Conception hydraulique de la pompe



2. Vue de la pompe complètement préassemblée en ateliers (photo Voith).

3. Vue de la pompe pré-assemblée en ateliers. On distingue la forme très élaborée du coude d'aspiration avec arbre traversant (photo Voith).



Conception mécanique de la pompe

Le coude d'aspiration est en acier coulé GS 20 Mn Mo Ni 55. Il est en 2 parties boulonnées (fig. 2 et 3) afin de permettre son montage après celui de l'arbre. Les roues (fig. 4) ainsi que les diffuseurs des 2 étages sont en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4.

Les fonds inférieur et supérieur ainsi que l'anneau d'entretoises de la bache sont également en acier coulé GS 20 Mn Mo Ni 55. Les viroles de la bache sont soudées sur l'anneau d'entretoises. La masse totale de la bache et de l'anneau d'entretoises est de 102 t.

La roue, d'une masse de 9 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4.

Un soin tout particulier a été apporté aux anneaux des labyrinthes. Les anneaux mobiles sont en acier inoxydable alors que les anneaux fixes sont en bronze aluminium-nickel Cu Al 10 Ni. Le diamètre des labyrinthes a été fixé de manière à obtenir une poussée axiale relativement faible, toujours dirigée vers le bas.

Le jeu aux labyrinthes peut être mesuré facilement, lorsque la pompe est vide, grâce à des trous percés dans le couvercle.

L'arbre est en acier forgé 24 Cr Mo 5; sa masse est de 36 t pour une longueur de 8470 mm.

Le démarrage de la pompe s'effectue grâce à un convertisseur de couple. Lorsque la vitesse synchrone est atteinte, l'arbre de la pompe est rendu solidaire de l'arbre du moteur alternatif par un accouplement à denture. Le temps total de démarrage de la pompe est de 60 s.

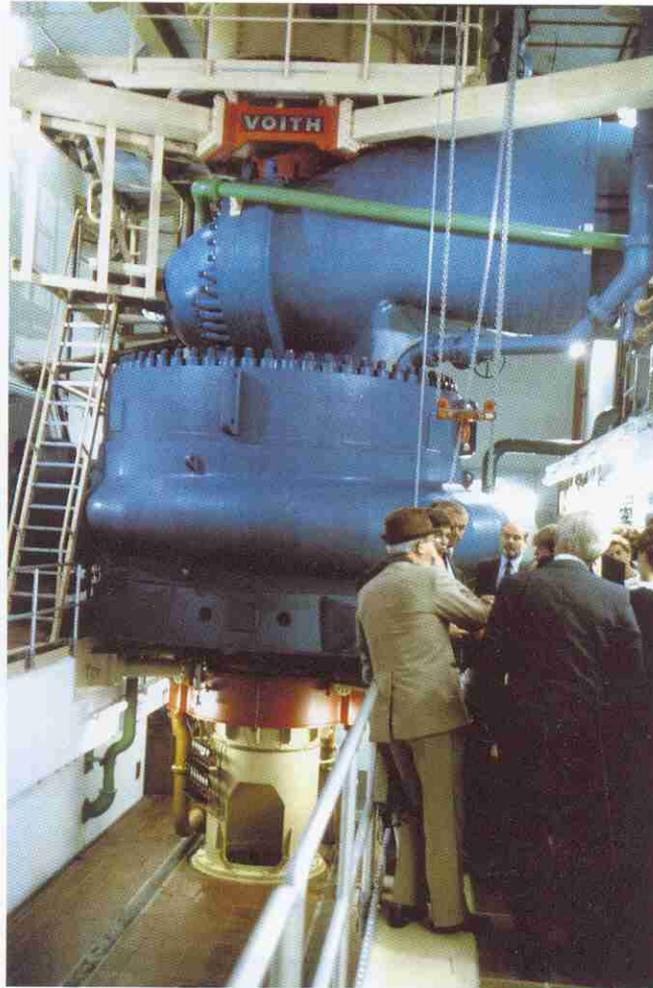


4. Roue de la pompe en cours d'usinage. Diamètre 7,724 m, masse 9 t (photo Voith).



5. Arbre de la pompe avec les 2 roues. Longueur 8,470 m, masse 36 t (photo Voith).

6. Pompe complètement montée dans la centrale (photo Voith).



Conception hydraulique de la turbine

Les principes de base qui ont conditionné le dimensionnement hydraulique de la machine sont les suivants:

- adopter la vitesse spécifique la plus élevée possible, compte tenu de l'implantation de la machine, pour augmenter le rendement tout en diminuant les dimensions;
- éviter complètement l'apparition de cavitation pour tout le domaine de fonctionnement, étant donné la chute extrême de la machine;
- permettre un fonctionnement stable en régime permanent et un comportement acceptable dans les régimes transitoires caractérisés par de très grandes variations de niveau dans les chambres d'équilibre amont et aval.

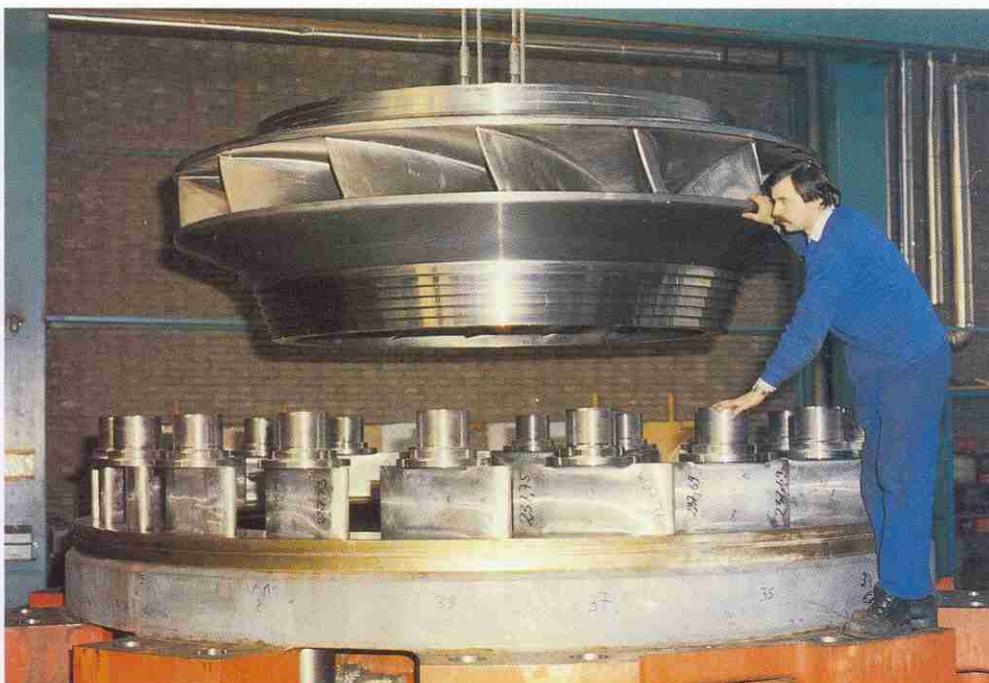
La bêche spirale est composée de 18 viroles; elle a un diamètre d'entrée de 1,800 m et des dimensions hors tout de 8 m x 7 m (fig. 7).

Le profil méridien du canal de l'avant-distributeur est fortement convergent. Les avant-directrices ont un profil avec un squelette courbe.

Les directrices ont un profil symétrique avec une épaisseur relative au pas de 0,202 (fig. 8).



7. Bâche spirale et avant-distributeur en cours de montage en centrale (photo Andritz).



8. Prémontage de la roue dans le distributeur en ateliers (photo Andritz).

9. Roue prototype ($D_{1i} = 2,767$ m) et roue modèle ($D_{1i} = 0,472$ m) (photo Sulzer-Escher Wyss).



Le distributeur a une tendance à l'ouverture pour des angles compris entre 0 et $12,5^\circ$ et une tendance à la fermeture pour des ouvertures supérieures.

Des essais comparatifs entre un modèle Voith et un modèle Sulzer-Escher Wyss ont été exécutés dans le laboratoire Aströ à Graz.

Les modèles avaient un diamètre d'entrée $D_{1i} = 0,456$ m pour le modèle Voith et $0,472$ m pour le modèle Sulzer-Escher Wyss. La chute d'essai était comprise entre 65 et 75 m pour les 2 modèles (fig. 9).

Les essais comparatifs ont permis d'établir la colline de rendement et les caractéristiques en cavitation.

Sulzer-Escher Wyss a fait ensuite exécuter des essais très complets comprenant:

- les caractéristiques hydrauliques en dehors du régime normal de fonctionnement;
- les caractéristiques en cavitation;
- les fluctuations de pression;
- la mesure du couple sur les directrices, synchronisées et désynchronisées;
- la mesure des contraintes dans les avant-directrices;
- la détermination des poussées axiales et radiales.

Les essais sur le prototype, exécutés par la méthode thermodynamique, ont confirmé les résultats d'essai du modèle avec un effet d'échelle égal à la moyenne arithmétique des valeurs données par les formules de Hutton et d'Ackeret.

La conception mécanique est guidée par le souci d'éviter:

- des concentrations locales de contraintes dépassant de 65% la limite élastique;
- des déformations plastiques dans toutes les parties de la machine et dans toutes les conditions de fonctionnement, y compris les essais de pression de la bête spirale.

La bête spirale comprend 18 viroles soudées et traitées thermiquement sur le site.

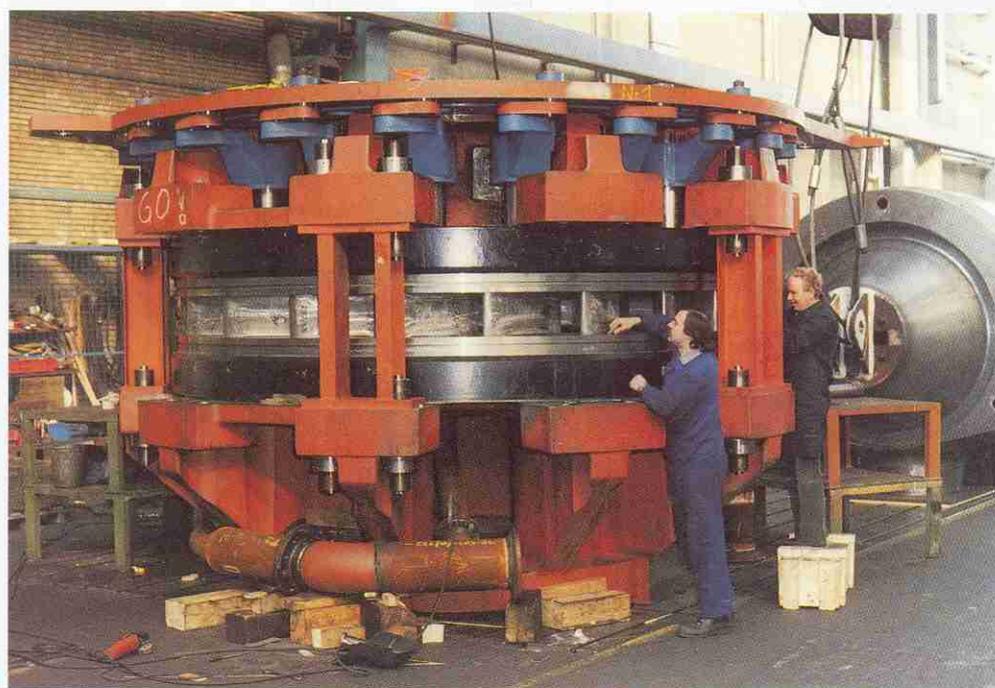
L'avant-distributeur, d'une masse de 60 t, est coulé d'une pièce en acier GS 21 Mn Ni Mo 6.

L'épaisseur des flasques est de 350 mm.

Les aubes directrices sont matricées en acier inoxydable X5 Cr Ni 13.4; elles ont une masse de 340 kg.

Les 2 paliers sont autolubrifiés. Le cercle du distributeur est actionné par 2 servomoteurs. Des douilles de rupture assurent la protection des aubes directrices.

Conception mécanique



10. Prémontage des fonds inférieur et supérieur et du distributeur en ateliers (photo Andritz).

11. Machine complètement montée en centrale. On distingue le coude du diffuseur et l'arbre (photo Andritz).



La roue est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4. Les labyrinthes tournants font partie de la roue. Les anneaux des labyrinthes fixes sont rapportés.

Les fonds supérieur et inférieur sont coulés d'une pièce en acier GS 52 K. Le fond supérieur comprend la première partie du cône du diffuseur, qui est protégée par une douille en acier inoxydable. La masse totale des 2 fonds est de 72 t (fig. 10).

L'arbre de turbine, d'un diamètre de 850 mm et d'une masse de 45 t, est en acier forgé CK 35 V (fig. 11).

Le diffuseur est également fabriqué en acier coulé GS 45.3, il comprend le support du palier supérieur de la turbine.

- Brochures éditées par Tauernkraftwerke AG.
- M. Kolarik. Die Voith Maschinen im Kraftwerk Häusling. Vertrauen in die Kraft des Wassers, 40 Jahre Tauernkraftwerke AG. Verlag A.F. Kosta, Wien-Berlin, 1987.
- H. Grein, W. Mayr, E. Bernhard. Layout and design of the Häusling Francis turbines operating under world record head. Comptes-rendus du 14^e Symposium AIRH, section Machines et cavitation, Trondheim, 1988.
- E. Bernhard. Die Turbinen des Kraftwerkes Häusling. Vertrauen in die Kraft des Wassers, 40 Jahre Tauernkraftwerke AG. Verlag A.F. Kosta Wien-Berlin, 1987.
- O. Hasler. Kraftwerksgruppe Zemm Ziller - Revision von Hochdruckturbinen. Vertrauen in die Kraft des Wassers, 40 Jahre Tauernkraftwerke AG. Verlag A.F. Kosta, Wien-Berlin, 1987.
- E. Pilz. Turbinen und Pumpen - Modellversuche. Vertrauen in die Kraft des Wassers, 40 Jahre Tauernkraftwerke AG. Verlag A.F. Kosta, Wien-Berlin, 1987.
- P. Doerfler, R. Bloch, W. Mayr, O. Haler. Vibration tests on a high-head Francis turbine: Field test results from Häusling. Comptes-rendus du 14^e Symposium AIRH, section Machines et cavitation, Trondheim, 1988.
- S. Guindehi-El, H. Keck. Flow Analysis in the spiral casing and stay ring of a high head Francis turbine, a 3-D FE solution in comparison with experiments. Comptes-rendus du 11^e Symposium AIRH, section Machines et cavitation, Amsterdam, 1982.

Bibliographie

Centrale du Truel

Département de l'Aveyron, France

1 pompe-turbine de 33 MW en pompe et 36 MW en turbine

Conception mécanique, hydraulique et fabrication:

Neypic, Grenoble, France

Maître d'œuvre: Electricité de France, Région d'équipement Alpes-Marseille, Marseille, France

Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	4266	4315	4363
H (m)	435,0	440,0	444,9
Q (m ³ /s)	6,90	6,77	6,63
P (MW)	33,42	33,21	32,92

N _{QE} (-)	0,061	σ_{\min} (-)	0,15
n _q	20	σ_{\max} (-)	0,158
v (-)	0,13		

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	3976	4207	4302
H (m)	405,4	429,0	438,6
Q (m ³ /s)	9,70	10,08	10,20
P (MW)	33,06	36,44	37,74

N _{QE} (-)	0,076		
n _q	25		
v (-)	0,16		

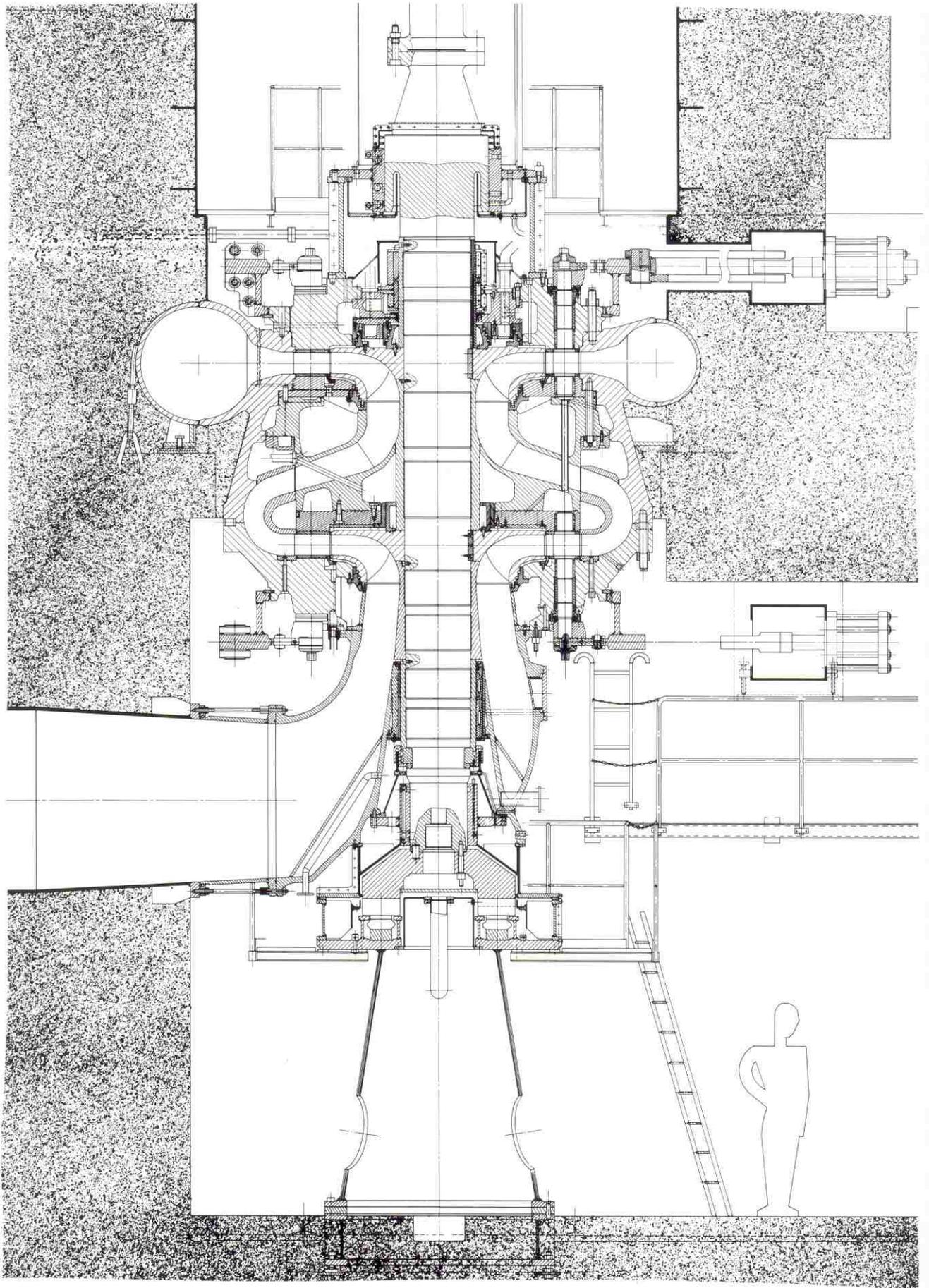
D _{Ie} (m)	1,117	f (Hz)	50
D _{Ii} (m)	1,675	n (t/s; t/min)	12,50; 750
D _O (m)	1,995	z _r (-)	8
B _O (m)	0,174	z _O (-)	24
		z _{avd} (-)	24

Caractéristiques

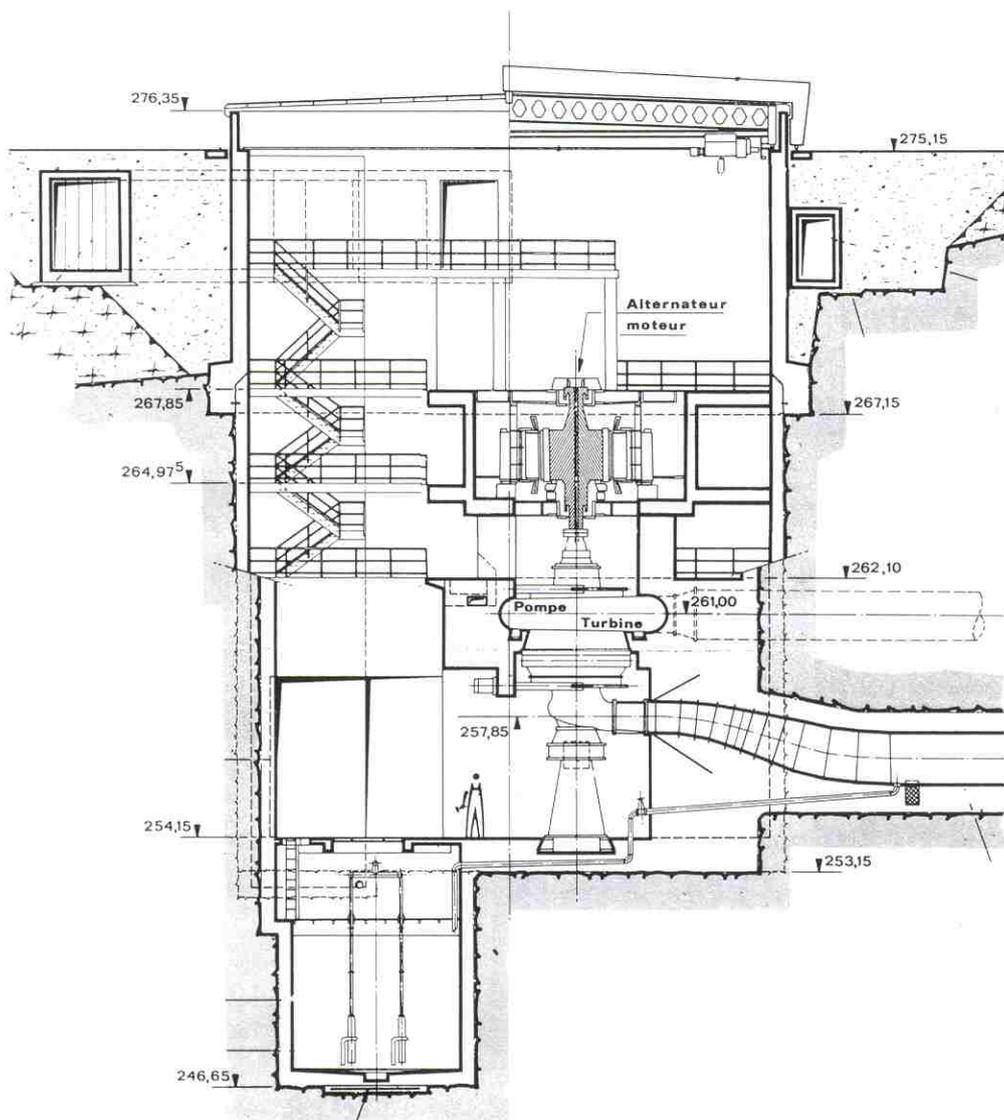
La centrale de pompage-turbinage du Truel fait partie de l'aménagement Pouget-Truel.

Généralités

La centrale du Pouget sur le Tarn comprend 3 groupes Pelton à 2 jets dont les caractéristiques unitaires sont H = 444 m, Q = 11 m³/s, P = 42,5 MW. Une turbine Francis de 257 MW sous une chute de 444 m a été installée par la suite.



1. Coupe de la centrale en puits d'un diamètre de 15,5 m et d'une profondeur de 21 m (document EDF).



Un groupe pompe-turbine complémentaire à caractère expérimental a été ajouté à l'aménagement. Ce groupe est raccordé à la conduite forcée initiale alimentant les 3 groupes Pelton (diamètre 2,7 à 2,5 m) par l'intermédiaire d'une petite conduite de 1,3 m de diamètre.

À l'aval, le groupe est relié à la retenue du Truel par une conduite d'un diamètre de 1,5 m et d'une longueur de 92 m.

La pompe-turbine est installée dans un puits de 15,5 m de diamètre et 21 m de profondeur (fig. 1).

La centrale du Truel, contiguë à celle du Pouget, est équipée de 2 turbines Kaplan d'une puissance unitaire de 13 MW environ fonctionnant sous une chute brute de 19,1 m.

Les centrales du Pouget et du Truel présentent la particularité unique au monde de contenir dans un même bâtiment tous les types modernes de turbomachines hydrauliques, Pelton, Francis, Kaplan et pompe-turbine.

Le groupe réversible du Truel a été mis en service en 1983.

Conception hydraulique

La pompe-turbine du Truel a la caractéristique d'être la première machine réversible à 2 étages réglables en service. Par rapport à une pompe-turbine classique non réglable, les avantages sont les suivants:

- la machine a une bonne souplesse d'utilisation en turbine grâce au réglage possible de la puissance;
- il est possible de surouvrir le distributeur; la machine fournit ainsi en turbine une puissance égale à celle d'une pompe-turbine monoétage (15% de puissance supplémentaire); l'équilibre entre la puissance en pompe et la puissance en turbine est ainsi meilleur;
- le démarrage en turbine est analogue à celui des pompes-turbines monoétage réglables;
- il est possible de régler la position des directrices en fonctionnement pompe et d'améliorer ainsi le rendement pour les installations à grandes variations de chute;
- le démarrage en pompe s'effectue à distributeur fermé, ce qui diminue considérablement la puissance au démarrage qui n'est alors plus que le 15% de la puissance maximale tandis qu'elle est de 65 à 70% pour les machines à distributeur fixe.

La bêche spirale est à double courbure. Les avant-directrices sont relativement longues et de hauteur fortement variable.

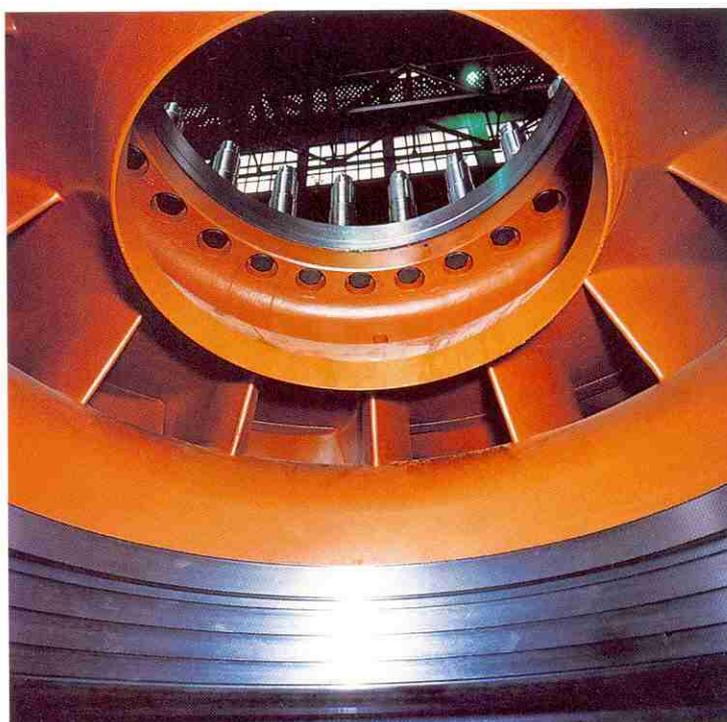
Le profil hydraulique de la roue est fortement influencé par la présence de l'arbre dont le diamètre représente près de 50% du diamètre d'entrée des roues.

Les ailettes du canal de retour, au nombre de 12 (fig. 2), ont un profil hydraulique diagonal pour ménager suffisamment d'espace entre les 2 roues.

Le diffuseur, traversé par l'arbre (fig. 3) a un rapport profondeur/diamètre de roue de 2,51.

Un très grand nombre d'essais et de mesures ont été exécutés, sur modèle et sur prototype, parmi lesquels on peut relever des mesures de pression en de nombreux endroits de la machine, des mesures de poussées radiale et axiale et des mesures de couple sur l'arbre. Les essais ont été effectués pour tous les domaines de fonctionnement et dans les 4 quadrants.

Les figures 4 et 5 donnent les résultats des mesures de rendement comparées du modèle et du prototype, en pompe et en turbine.

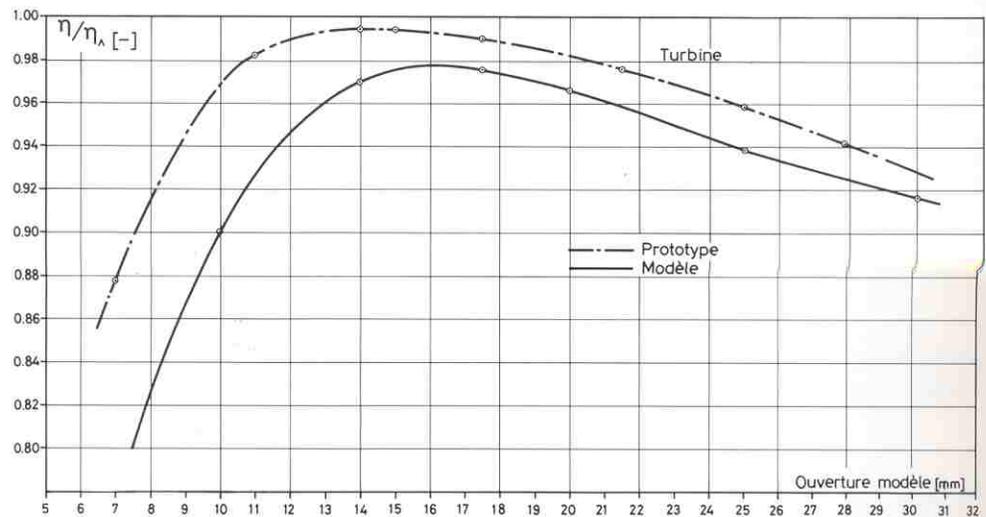


2. Extrémité amont des canaux redresseurs entre le 1^{er} et le 2^e étage (la pièce est retournée par rapport à sa position réelle dans la machine) (photo Neyrpic).

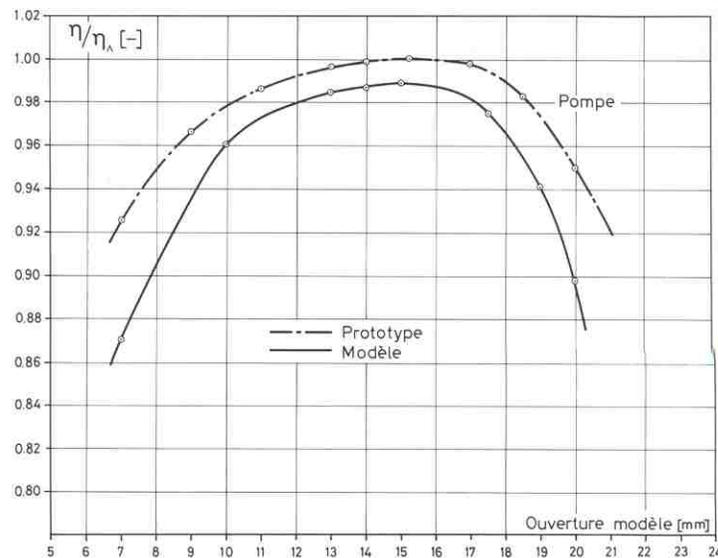


3. Machine en position retournée complètement préassemblée en ateliers. On distingue la commande du distributeur aval (photo Neyrpic).

4. Comparaison des rendements mesurés sur le modèle et sur le prototype pour le fonctionnement en turbine (d'après un document Neyrpic).



5. Comparaison des rendements mesurés sur le modèle et sur le prototype pour le fonctionnement en pompe (d'après un document Neyrpic).



Conception mécanique

La bête spirale est en construction mécano-soudée. Les viroles sont soudées sur l'avant-distributeur en acier coulé ASTM A 643 grade A. La masse totale de l'ensemble bête - avant-distributeur est de 53 t.

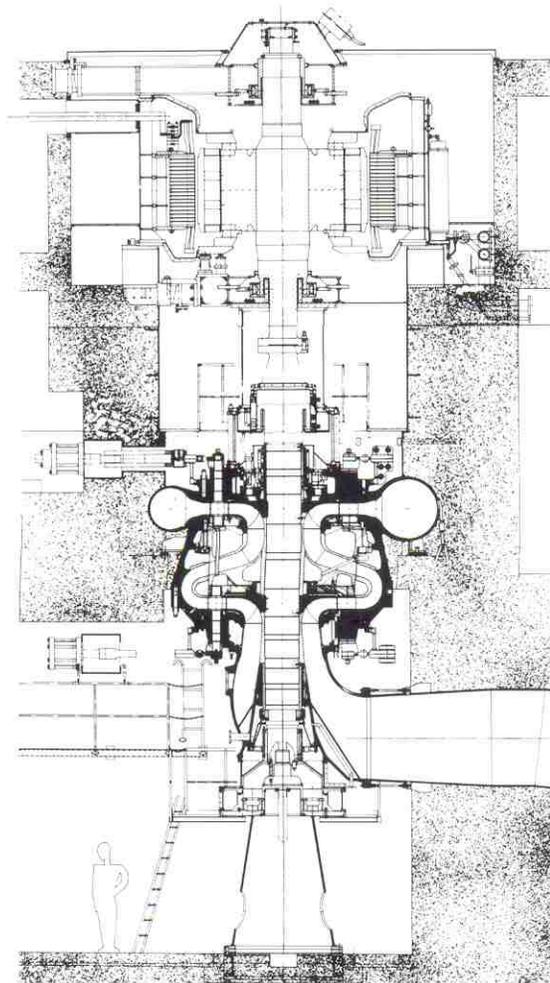
Les aubes directrices sont en acier coulé inoxydable Z 06 CN 12 M. La masse d'une aube est de 58 kg (fig. 6).

La commande du distributeur est classique avec levier, bielle et cercle de vannage. Le dispositif de sécurité est composé d'une tige de rupture en traction et d'un système à friction. Les 2 distributeurs sont synchronisés par voie électrique. Les aubes ont 3 paliers avec des douilles en bronze graissées.

Les roues, d'une masse de 2230 kg, sont en acier inoxydable Z 05 CN 16 04 M, coulées dans un moule de précision en céramique. Elles sont clavetées sur l'arbre, d'une longueur de 6,450 m et d'une masse de 11,4 t, exécuté en acier forgé ASTM A 668 72 grade E.



6. Distributeur aval (2^e étage en turbine) la pièce est retournée par rapport à sa position réelle (photo Neyrpic).



7. Coupe du groupe complet avec la machine électrique (photo Neyrpic).

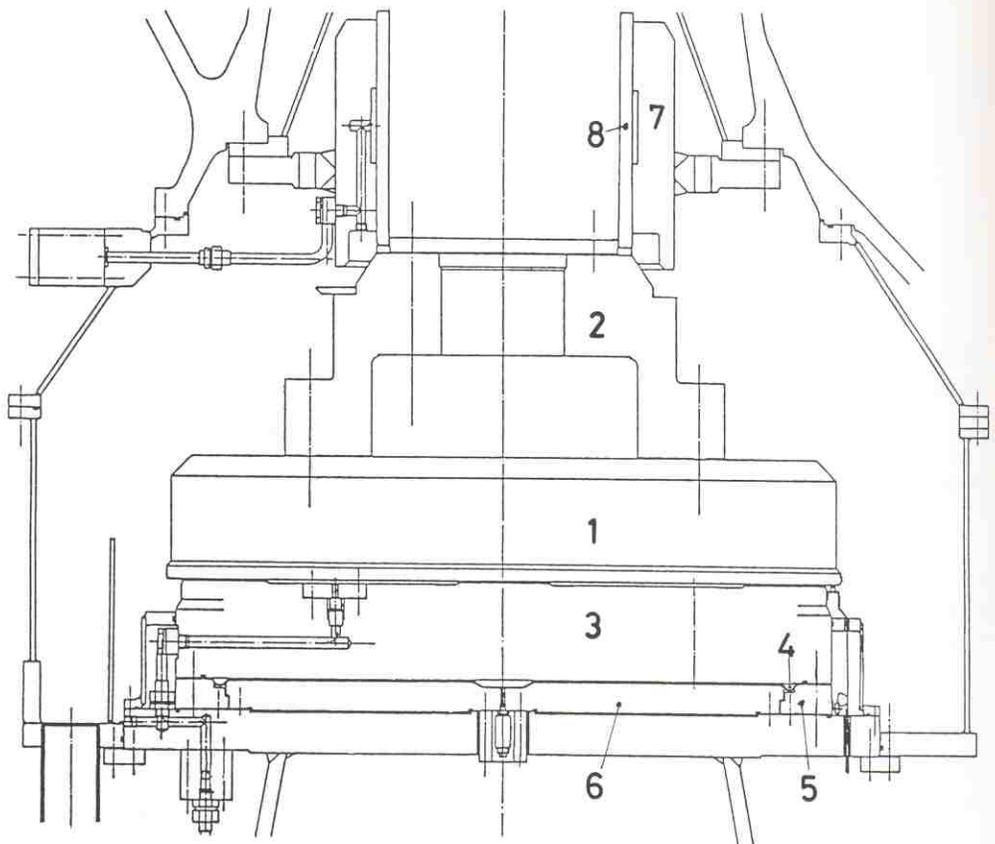
Le groupe complet comprend au total 4 paliers (fig. 7): 1 palier inférieur dans le coude du diffuseur, 1 palier sur le fond supérieur de la machine et 2 paliers de part et d'autre du rotor de la machine électrique. La butée axiale est située à l'extrémité inférieure de l'arbre.

Un programme expérimental a été entrepris en 1987 après la mise en service des machines en vue de la réalisation de machines de 300 MW sous 1000 m de chute. Pour ce type de machine, il est apparu qu'une diminution de la longueur entre les paliers était indispensable pour limiter les déformations de l'arbre et par là les jeux aux labyrinthes, donc les pertes volumiques. La solution retenue consiste à remplacer le palier inférieur à huile par un palier hydrostatique à eau. En outre, il est apparu opportun de combiner le palier avec un pivot hydrostatique également lubrifié à l'eau. On obtient ainsi les avantages suivants:

- l'entraxe des paliers est notablement réduit;
- les pertes par frottement des paliers sont fortement diminuées; pour une machine de $P = 300$ MW, $H = 1000$ m et $n = 600$ t/min, les pertes d'un pivot classique à huile sont estimées à 1100 kW alors que les pertes du pivot à eau sont de 130 kW;
- le joint à fuite de l'arbre peut être supprimé car il est remplacé par le palier.

Le pivot (fig. 8) est composé d'un grain mobile circulaire lié à l'extrémité de l'arbre par un manchon et d'un grain fixe également circulaire muni de 4 poches

8. Coupe du palier et du pivot hydrostatique à eau
- 1 grain mobile
 - 2 manchons d'appuis
 - 3 grain fixe
 - 4 membrane remplie d'huile pour la transmission de la force axiale
 - 5 anneau de fixation de la membrane
 - 6 disque support
 - 7 palier monobloc
 - 8 douille mobile



en forme de secteur. Ces poches sont alimentées par de l'eau filtrée (40 μm) provenant de la conduite forcée (54 bar).

Le grain fixe est supporté par l'intermédiaire d'un matelas d'huile contenu dans une enceinte circulaire en acier inoxydable très souple. Ce système autorise des déplacements du grain fixe qui peut suivre ainsi les mouvements du grain mobile et garder une épaisseur du film d'eau pratiquement constante.

Le palier monobloc, cylindrique, est muni de 6 poches pour l'injection de l'eau. Il est également alimenté par l'eau de la conduite, filtrée.

Le revêtement des surfaces actives du pivot et du palier a fait l'objet de recherches poussées. Le choix s'est porté finalement sur des céramiques oxyde de chrome projetées au plasma. La résistance à l'usure est excellente et l'absence de lubrification n'entraîne aucun grippage. En service depuis 1987, le pivot-palier hydrostatique donne entière satisfaction. Les différentes mesures effectuées au cours d'essais en fonctionnement confirment de façon précise les résultats des études de conception.

- H. Amblard. Turbines-pompes de haute chute. Revue Technique Neyrpic N° 1, 1982.
- P. Jarriand, B. Lourdeaux, D. Lefevre, J. Rondot, N. Roche, P. Robert. Le Truel, essais. Revue Technique Neyrpic N° 4, 1985, N° 5, 1986.
- N. Roche, P. Huvet, P. Jarriand, J. Rondot. Le Truel - Palier et pivot hydrostatiques. Revue Technique Neyrpic N° 7, 1988.

Bibliographie

Centrale de Bajina Basta

Républiques de Serbie et Bosnie Herzégovine, Yougoslavie

2 pompes-turbines de 281 MW en pompe et 294 MW en turbine

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Toshiba Corp., Tokyo, Japon

Maître d'œuvre: Hidroelektrane Bajina Basta, Perucac, Yougoslavie

Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	5214	5904	6093
H (m)	531,7	602	621,3
Q (m ³ /s)	50,8	41,8	36,7
P (MW)		281,0	310,0
N_{QE} (-)	0,069	σ_{min} (-)	0,104
n_q	23	σ_{max} (-)	0,159
v (-)	0,14		

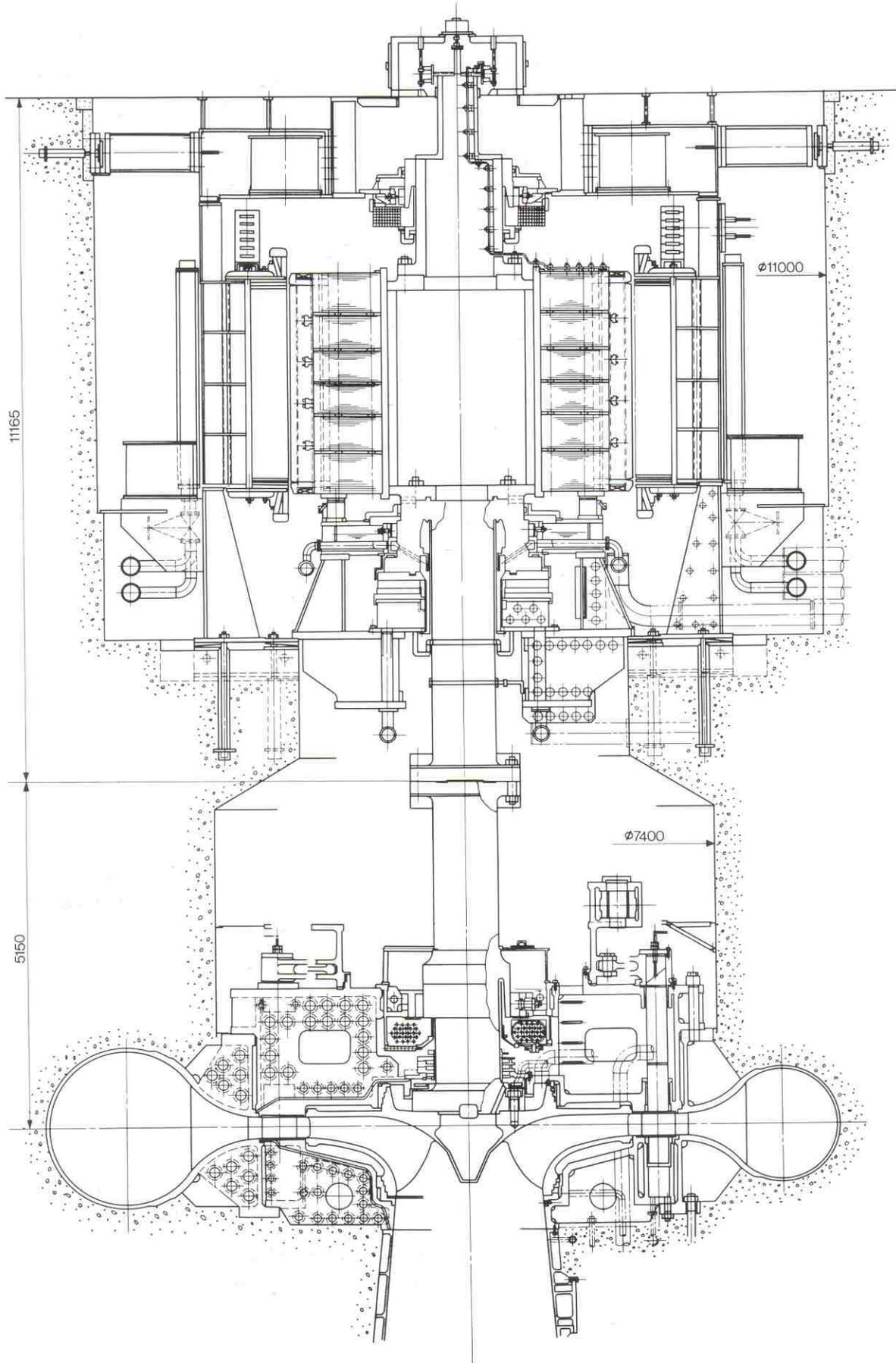
Caractéristiques

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	4874	5434	5885
H (m)	497,0	554,1	600,1
Q (m ³ /s)	57,0	61,8	60,5
P (MW)	243,0	294,0	315,0
N_{QE} (-)	0,089	σ_{min} (-)	0,108
n_q	30	σ_{max} (-)	0,171
v (-)	0,19		
D_{1e} (m)	2,180	f (Hz)	50
D_{1i} (m)	4,728	n (t/s; t/min)	7,14; 428,6
D_o (m)	5,605	Z_r (-)	6
B_o (m)	0,312	Z_o (-)	20
		Z_{avd} (-)	10

La nouvelle centrale de pompage-turbinage de Bajina Basta est située sur la rivière Drina à environ 150 km au sud-ouest de Belgrade. Le réservoir inférieur est un ancien lac artificiel datant de 1966 (fig. 1). Un lac supérieur a été créé par la construction de 2 digues en terre.

La centrale, partiellement souterraine, est reliée au bassin supérieur par une conduite forcée de 4,8 à 4,2 m de diamètre et 760 m de longueur et une galerie de 6,3 m de diamètre et 8 km de longueur. Une chambre d'équilibre et des vannes de garde sont placées en tête de la conduite.

Généralités





1. Ancienne centrale (1966) de Bajina Basta. Le lac est utilisé comme bassin inférieur pour la centrale de pompage-turbinage (photo Toshiba).

Les machines sont munies de vannes sphériques d'un diamètre de 2200 mm. La conduite aval a 300 m de longueur et ne comporte pas de chambre d'équilibre.

La première machine a été mise en service en juin 1980.

La bêche spirale est à double courbure. Les aubes - redresseur pompe, avant-directrices turbine - ont donc des hauteurs très variables.

La roue a été conçue pour obtenir de bons rendements dans tout le domaine de fonctionnement aussi bien en turbine qu'en pompe. La figure 2 montre les caractéristiques en pompe et en turbine dans tout le domaine de fonctionnement.

De nombreuses mesures ont été effectuées sur modèle réduit pour optimiser le tracé hydraulique et pour déterminer les efforts dans les divers composants de la machine. Le couple sur les directrices a été mesuré dans les 4 quadrants.

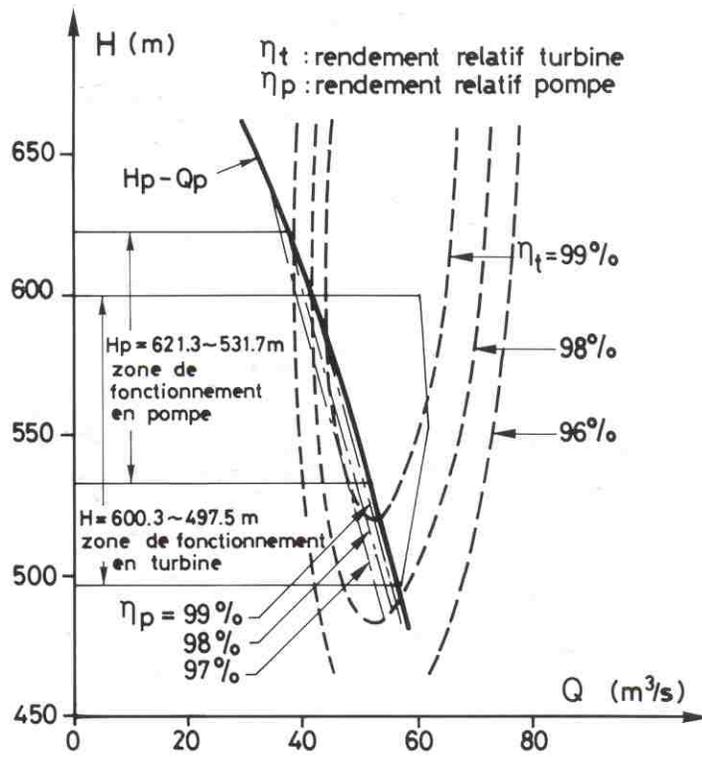
La bêche spirale est en tôle d'acier à haute résistance (600 N/mm^2), en plusieurs sections soudées en centrale (fig. 3).

Les aubes directrices sont en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni coulées d'une pièce. La commande du distributeur est classique par levier, biellettes et cercle de vannage (fig. 4).

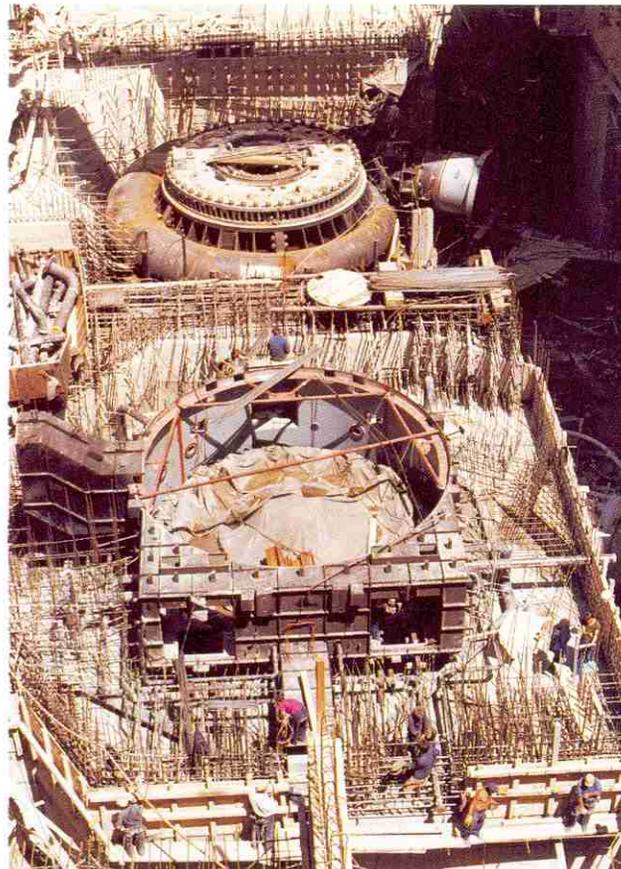
**Conception
hydraulique**

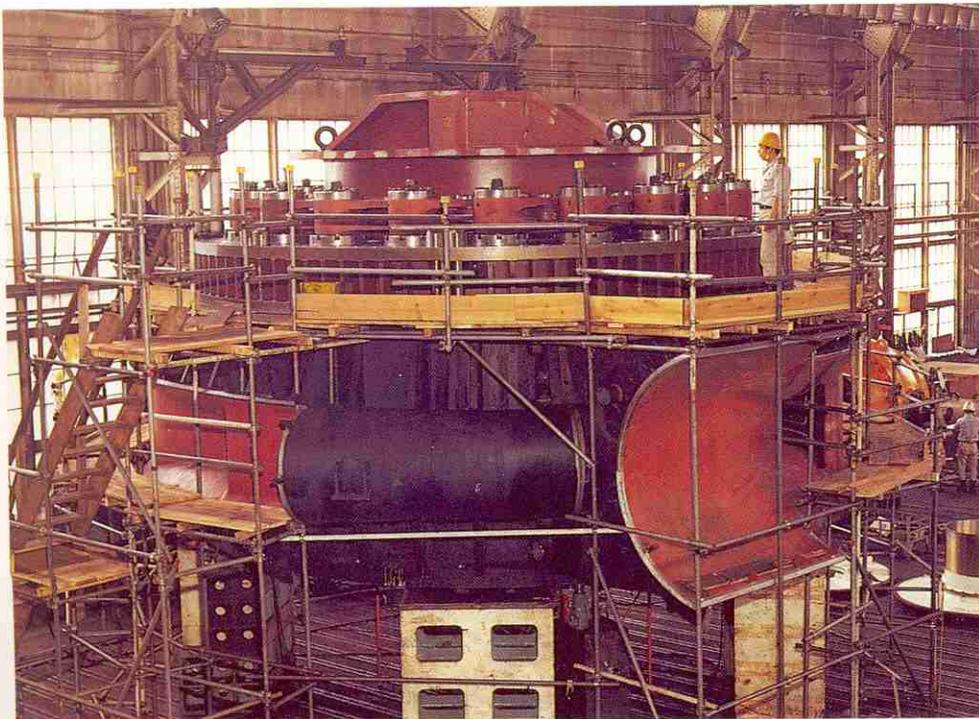
**Conception
mécanique**

2. Caractéristiques et domaines de fonctionnement en pompe et en turbine (d'après un document Toshiba).



3. Bâche spirale et fond supérieur en cours de montage en centrale. Au premier plan on remarque le puits de turbine avec la galerie d'accès et les emplacements des 2 servomoteurs de commande du distributeur (photo Toshiba).





4. Machine en prémontage en atelier. La commande du distributeur est entièrement montée avec les leviers, les biellettes et le cercle de vannage au sommet (photo Toshiba).

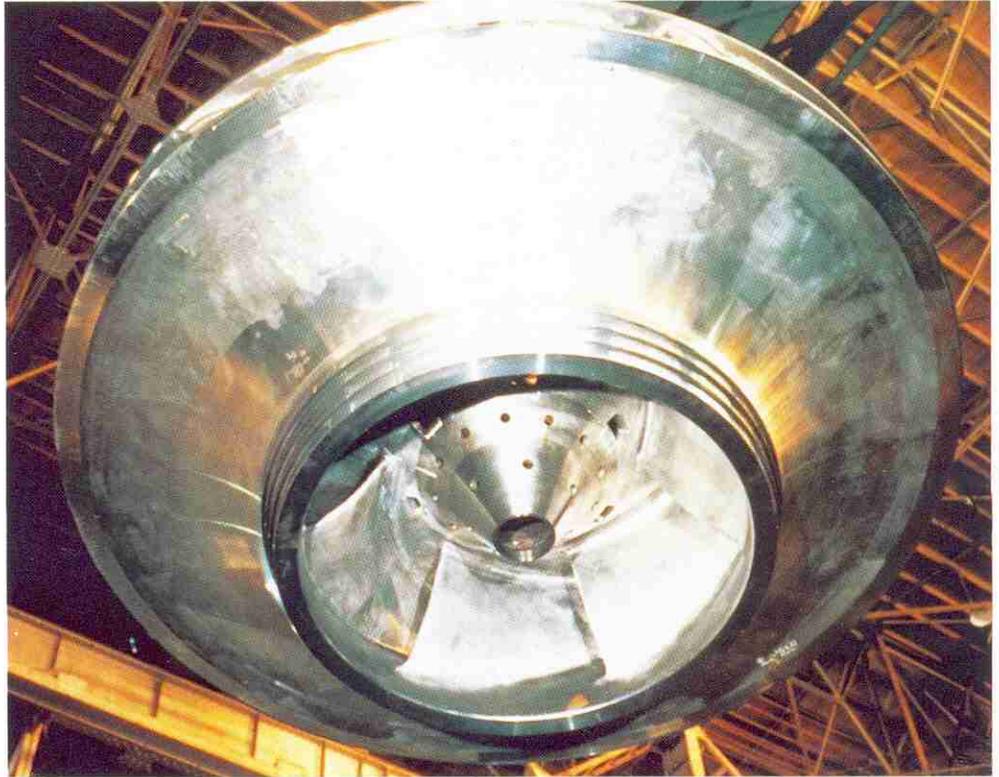


5. Roue coulée d'une pièce en acier inoxydable 13 Cr - 3,5 Ni, vue de la sortie en pompe (photo Toshiba).

La roue, d'un diamètre extérieur maximal de 4,800 m est en acier inoxydable 13 Cr - 3,5 Ni, coulée d'une pièce (fig. 5).

Le couvercle de turbine est en construction soudée, conçu pour supporter 20 000 t. Il est divisé en 4 sections boulonnées qui sont démontables dans le

6. Roue d'un diamètre de 4,8 m, vue de l'entrée en pompe (photo Toshiba).



puits de la machine pour permettre le démontage de la roue par le puits. Le fond inférieur est également fabriqué en tôle soudée. Il est divisé en 2 parties boulonnées.

Le couvercle et le fond inférieur sont munis de joints sur les flasques du distributeur pour diminuer les fuites en position fermée.

L'arbre a une longueur totale de 16,315 m. Il est guidé par 3 paliers: 1 palier turbine sur le fond supérieur, 1 palier combiné avec la butée axiale situé sous le moteur-alternateur, 1 palier au sommet de l'alternateur.

L'aspirateur est entièrement noyé dans le béton.

Le démarrage en pompe se fait en mode synchrone en utilisant deux des groupes de 100 MW de l'ancienne centrale.

Bibliographie

- H. Iijima, T. Tkanashi, S. Tsunoda, K. Harada, M. Fujisaki, T. Ogita. Bajina Basta Pumped Storage Power Station-World's Highest Head, Highspeed and Large Capacity. Toshiba Review No 100, nov.-déc. 1975.
- Bajina Basta converts to pumped-storage. Water Power and Dam Construction, nov. 1977.

Centrale de Chaira

Bulgarie

4 pompes-turbines de 186 MW en pompe et 216 MW en turbine

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Toshiba Corp., Tokyo, Japon

Maître d'œuvre: TA Techno-Import-Export, Sofia, Bulgarie

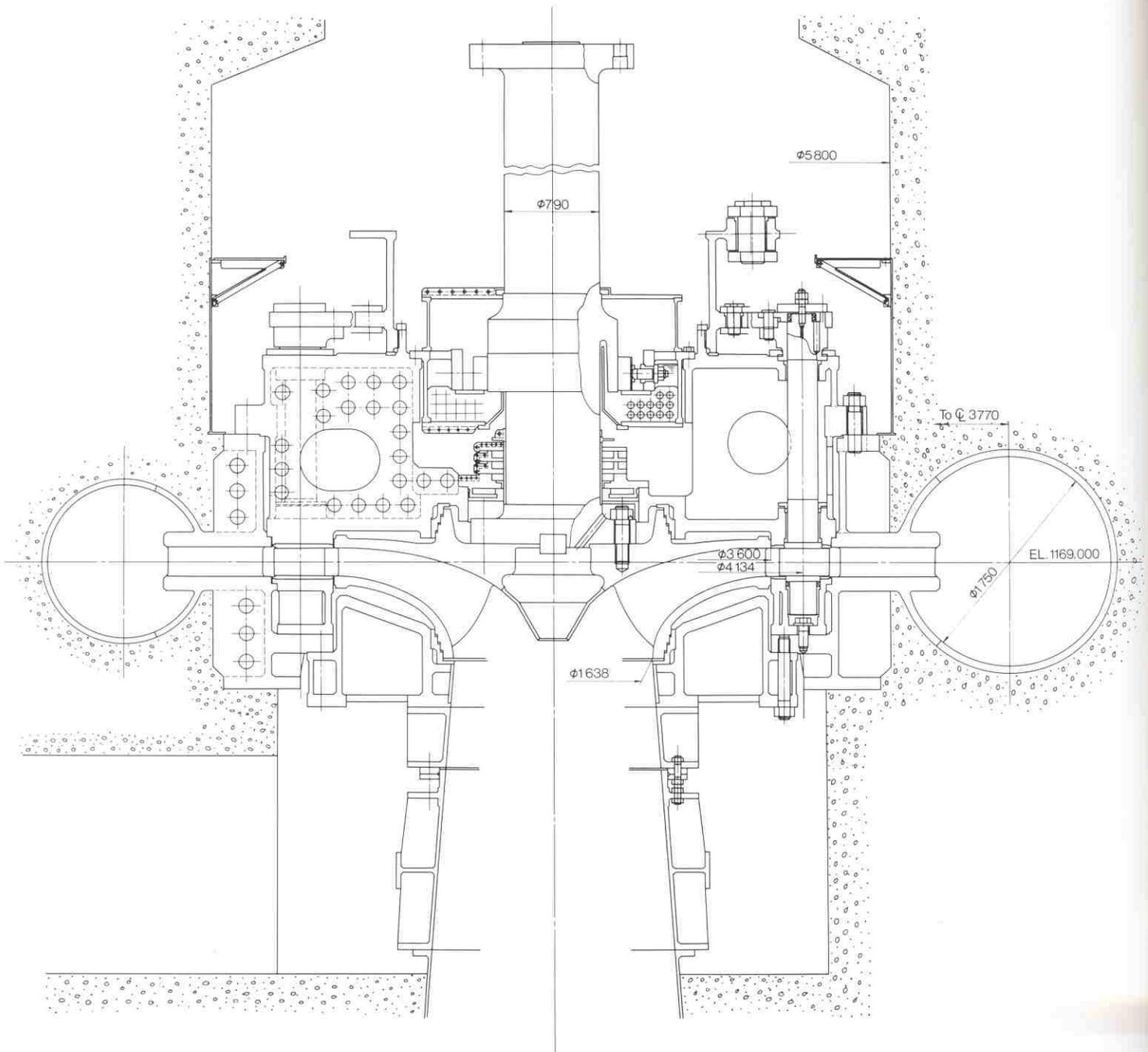
Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	6015	6472	6874
H (m)	613,4	660,0	701,0
Q (m ³ /s)	29,5	25,7	21,3
P (MW)	169,4	186,2	196,9
N _{QE} (-)	0,070	σ_{\min} (-)	0,102
n_q	23	σ_{\max} (-)	0,159
v (-)	0,15		

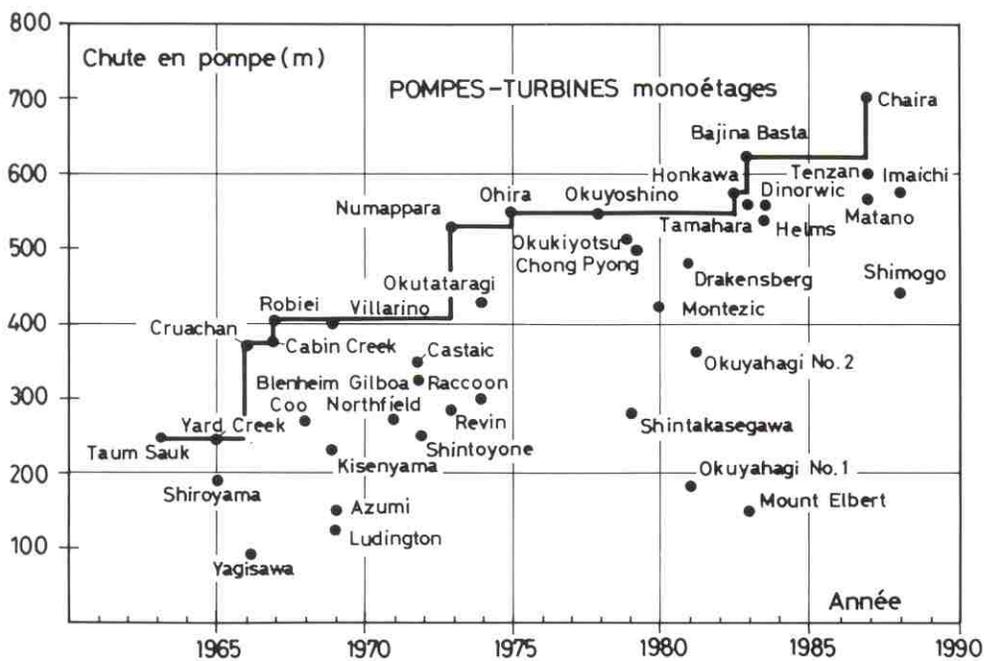
Caractéristiques

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	5668	6408	6637
H (m)	578,0	653,4	676,8
Q (m ³ /s)	34,3	36,0	36,1
P (MW)	171,0	216,0	216,0
N _{QE} (-)	0,085	σ_{\min} (-)	0,106
n_q	28	σ_{\max} (-)	0,169
v (-)	0,18		
D _{1e} (m)	3,517	f (Hz)	50
D _{1i} (m)	1,638	n (t/s; t/min)	10; 600
D ₀ (m)	4,134	Z _r (-)	6
B ₀ (m)	0,234	Z ₀ (-)	20
		Z _{avd} (-)	10

La centrale de Chaira fait partie du complexe hydroélectrique de Sestrimo situé à 100 km au sud-ouest de Sofia. Le bassin supérieur est le lac artificiel existant de Belmeken. La centrale souterraine est reliée à ce bassin par 2 conduites forcées et 2 tunnels d'un diamètre moyen de 4,2 m et une longueur de 4,27 km, avec une chambre d'équilibre située à 1,7 km de la centrale. Le bassin aval se trouve à 1,1 km de la centrale à laquelle il est relié par 2 galeries de 4,5 m de diamètre comprenant chacune une chambre d'équilibre.

Généralités





1. Diagramme montrant l'évolution de la hauteur de refoulement des pompes-turbines (d'après un document Toshiba).

Le premier groupe sera mis en service à la fin de 1991. A cette époque, les pompes-turbines de Chaira exploiteront la plus haute chute du monde pour ce type de machines (fig. 1).

L'avant-distributeur diffuseur est du type Piguet avec des longues aubes et des flasques parallèles.

Conception hydraulique

La roue a été développée à l'aide d'un programme de calcul CAO de manière à obtenir les performances garanties avec des aubes aussi courtes que possible pour limiter les pertes par frottement. La cavitation a également été étudiée très soigneusement pour éviter des dégâts en fonctionnement pompe. L'intensité de l'érosion par cavitation est, en effet, proportionnelle à une puissance comprise entre 4 et 7 de la vitesse d'écoulement, celle-ci étant très élevée pour une machine à aussi haute chute.

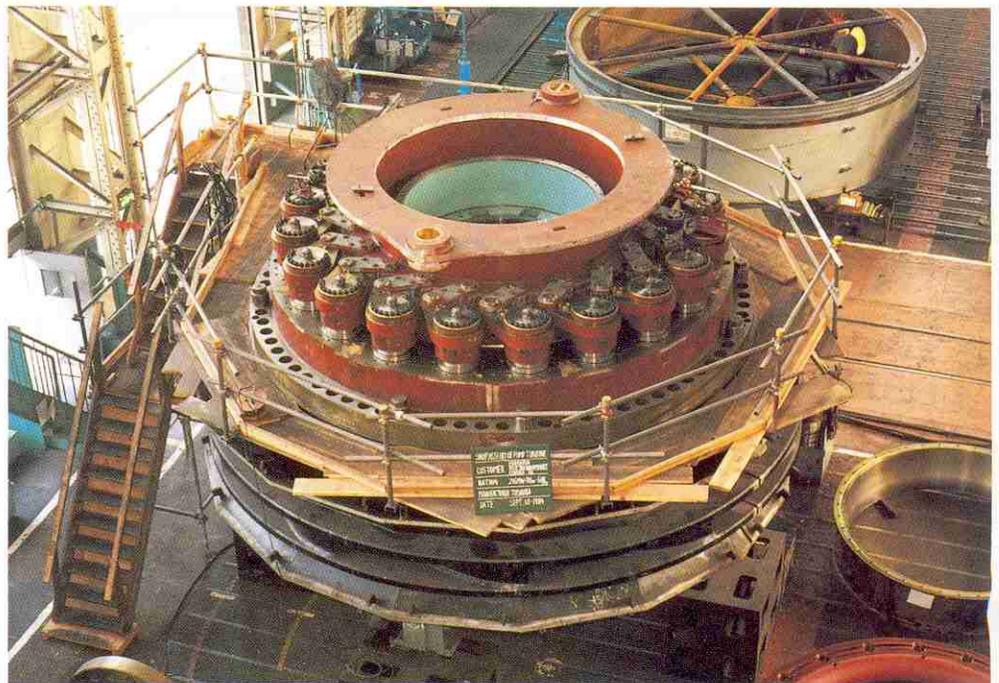
Des essais sur modèle réduit ($D_{1i} = 451$ mm) très détaillés ont été exécutés sous une chute de 80 m pour optimiser le profil hydraulique. En plus, des essais sur modèle, sous la chute prototype (fig. 2), ont permis de vérifier les caractéristiques mécaniques de la machine, plus spécialement les contraintes statiques et dynamiques ainsi que les fluctuations de pression à divers endroits de la machine et spécialement à la sortie de la roue en pompe.

Le problème fondamental dans les machines à très haute chute est de garantir une haute rigidité tout en conservant un bon accès à l'intérieur de la machine (de dimensions relativement petites) pour la fabrication et l'entretien.

Conception mécanique

La bêche spirale et l'anneau d'entretoises sont en construction soudée. La pression de calcul est de 107 bar.

2. Prémontage en ateliers du fond supérieur et du distributeur complet (photo Toshiba).



3. Roue de la pompe-turbine d'un diamètre de 3,6 m (photo Toshiba).



Le fond supérieur est également fabriqué en construction mécano-soudée. Il est divisé en 4 parties qui sont boulonnées sur le chantier. L'épaisseur du fond supérieur est très importante pour assurer une rigidité suffisante sans utiliser des tôles très épaisses.

Le fond inférieur, également très épais, est fabriqué d'une pièce.

Les aubes directrices sont coulées en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Elles sont à 3 paliers avec une commande classique par cercle de vannage (fig. 2).

La roue est également coulée d'une pièce en acier inoxydable. La fabrication, spécialement le meulage, est très difficile dans une telle roue où la hauteur du canal à la sortie pompe n'est que de 234 mm (fig. 3).

La roue est démontable par le bas après démontage d'une section de l'aspirateur et du fond inférieur.

L'arbre, d'un diamètre de 790 mm, est guidé par 3 paliers: 1 palier turbine, 1 palier inférieur alternateur et 1 palier combiné avec la butée situé au sommet de l'alternateur.

La machine est, en outre, conçue pour fonctionner durant de très longues périodes en compensateur synchrone. Les fuites provenant du distributeur forment un anneau liquide qui finit par entrer en contact avec la roue. La vitesse périphérique très élevée, 113 m/s, induit des pertes importantes qui provoquent une forte élévation de la température de l'eau. Un système spécial d'orifice et de tuyau de drainage est prévu pour éviter ces problèmes.

- S. Tsunoda, K. Havada, A. Yamakami. The world's highest head pump turbines. Water Power and Dam Construction, avril 1983.

Bibliographie

Centrale de Palmiet

Province du Cap, Afrique du Sud

2 pompes-turbines de 198 MW en pompe et 203 MW en turbine

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: J.M. Voith GmbH, Heidenheim, RFA

Maître d'œuvre: Compagnie Nationale d'Electricité (ESKOM), Johannesburg, Afrique du Sud

Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	2538	2717	2994
H (m)	258,8	277,1	305,3
Q (m ³ /s)	74,57	68,35	57,12
P (MW)	203,30	198,11	182,13
N _{QE} (-)	0,11	σ_{\min} (-)	0,16
η_q	37	σ_{\max} (-)	0,24
v (-)	0,23		

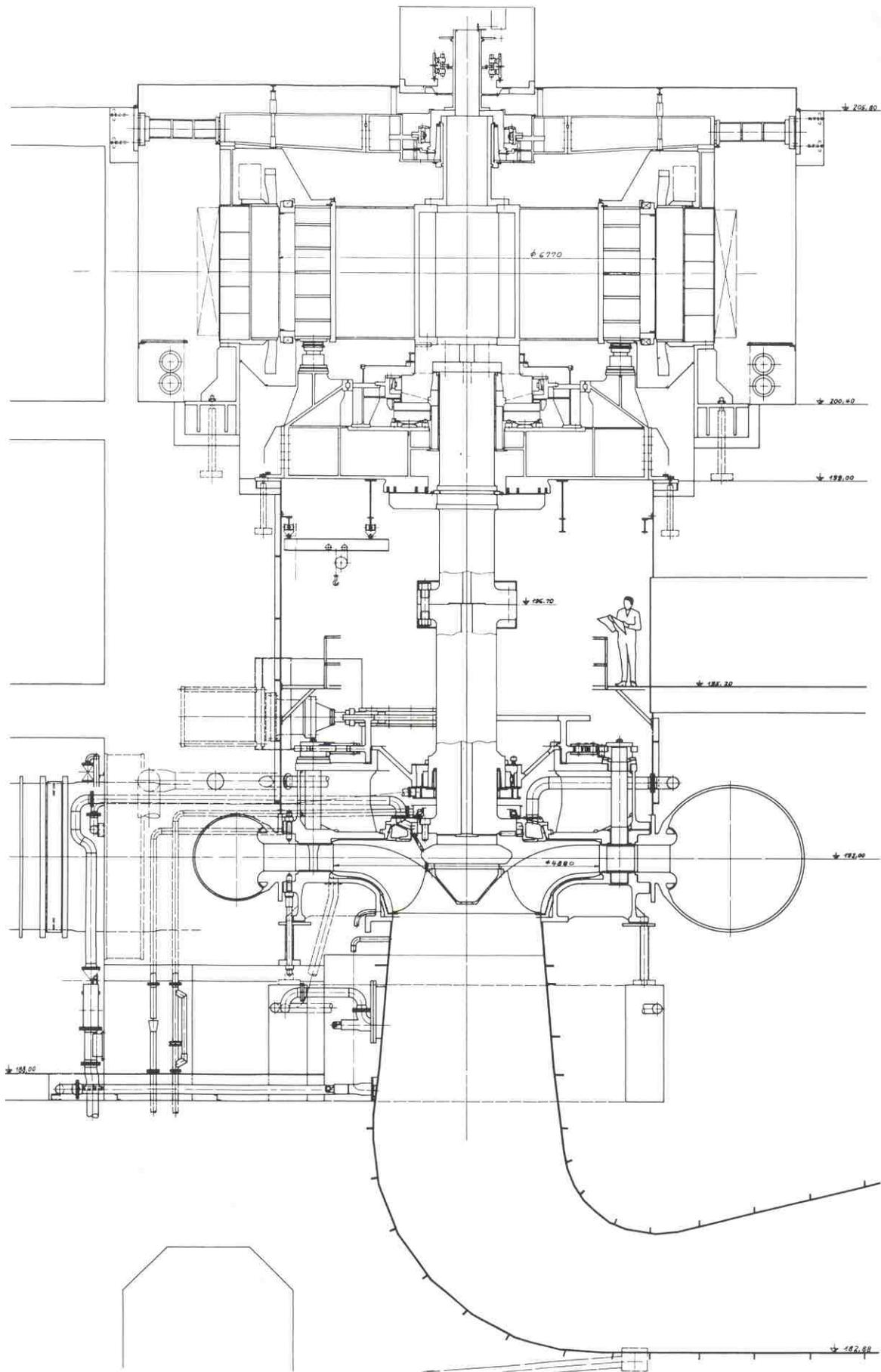
Caractéristiques

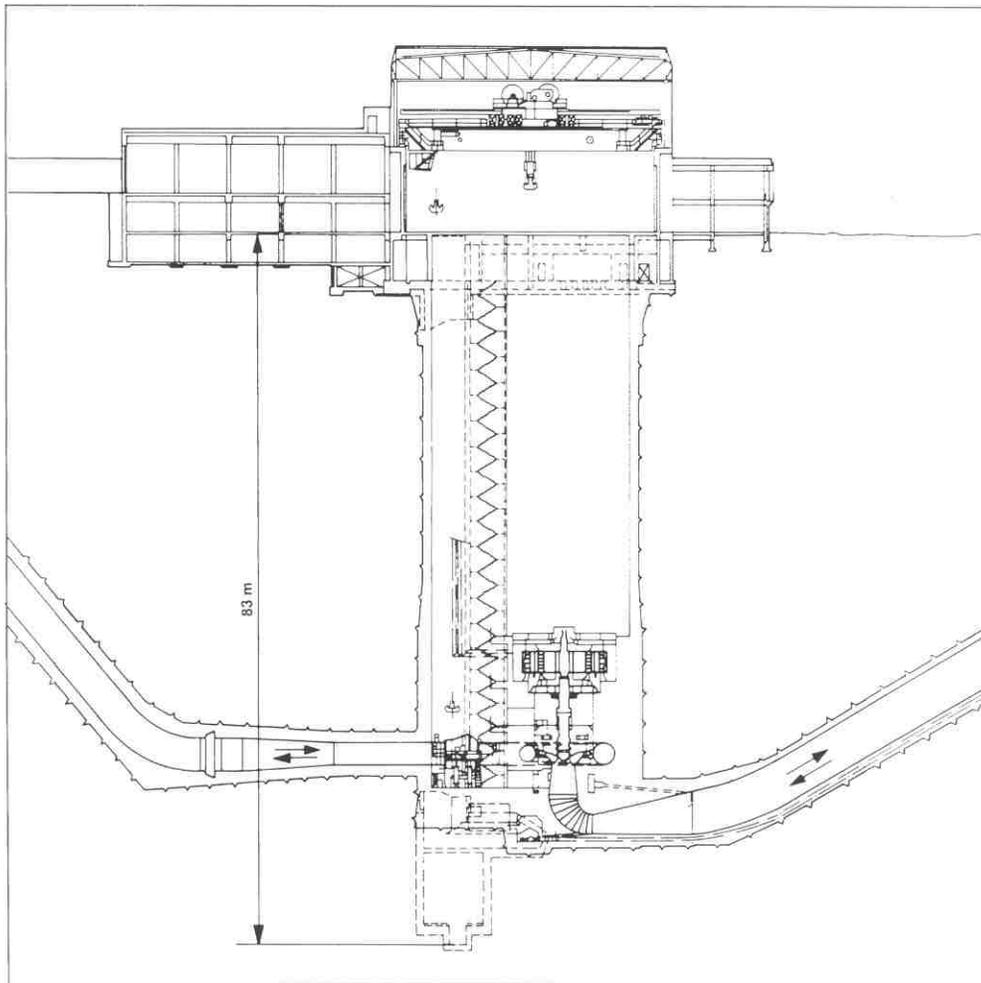
Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	2416	2550	2956
H (m)	246,4	260,0	301,4
Q (m ³ /s)	85,86	88,47	94,40
P (MW)	186,1	203,5	253,0
N _{QE} (-)	0,13	σ_{\min} (-)	0,16
η_q	44	σ_{\max} (-)	0,24
v (-)	0,28		
D _{ie} (m)	2,702	f (Hz)	50
D _{li} (m)	4,880	n (t/s; t/min)	5,0; 300
D _o (m)	5,573	z _r (-)	7
B _o (m)	0,490	z _o (-)	20
		z _{avd} (-)	20

La centrale de pompage-turbinage de Palmiet est située à 40 km de la ville du Cap.

Généralités

Les principales centrales d'Afrique du Sud étant à une distance de 1400 km, la centrale de Palmiet joue un rôle décisif dans la stabilité du réseau de la zone du Cap. Pour remplir cette fonction, les machines ont été prévues pour assurer de manière sûre 15 démarrages par jour en pompe ou en turbine.





1. Coupe de la centrale à travers un des deux puits des machines (document Voith).

En outre, le barrage du type digue en terre assure un approvisionnement sûr en eau de la ville du Cap et de ses environs.

La centrale (fig. 1) est constituée de 2 puits disposés côte à côte et contenant chacun une machine. La mise en service des machines a eu lieu en 1988.

L'aspirateur diffuseur a une section de sortie circulaire et ne comporte pas de pilier central. Sa profondeur $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 1,88$.

La roue (fig. 2) a 7 aubes à épaisseur constante, profilées à l'entrée et à la sortie.

Les aubes directrices (fig. 3) ont une épaisseur relative au pas de 0,156. En mode pompe, l'ouverture du distributeur est ajustée en fonction de la chute.

Le distributeur a une tendance à fermer dans tout le domaine de fonctionnement à l'exception de la région à puissance maximale en turbine.

**Conception
hydraulique**

2. Roue de la pompe-turbine (7 aubes, masse 48 t, diamètre 4,880 m) (photo Voith).



3. Aubes directrices à 3 paliers en acier inoxydable (masse 1500 kg) (photo Voith).





4. Modèle de la pompe-turbine installé sur une plate-forme d'essai Voith à Heidenheim (photo Voith).

Le diffuseur/avant-distributeur, du type Piguet, a des flasques parallèles. Les aubes sont incurvées et profilées à l'entrée et à la sortie.

La bêche spirale a un diamètre d'entrée de 2,600 m; elle est divisée en 20 sections.

Les essais de réception sur modèle réduit ont été exécutés dans le laboratoire de Voith à Heidenheim (fig. 4).

Le modèle avait un diamètre $D_{1e} = 273$ mm. Il a été essayé à vitesse constante, $n = 1500$ t/min, aussi bien en pompe qu'en turbine. La chute en turbine était d'environ $H = 70$ m.

L'aspirateur/diffuseur est entièrement blindé en tôle d'acier R St 37 - 2.

La roue, d'une masse de 48 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4. Les labyrinthes tournants de la ceinture sont usinés avec la roue tandis que ceux du moyeu sont rapportés.

Le fond supérieur (fig. 5) est en partie venu de fonderie et en partie mécanosoudé en aciers GS 20 Mn et StE 355. Sa masse totale est de 89 t pour un diamètre de 6,680 m et une épaisseur totale de 1,760 m. Il est exécuté en une seule pièce en ateliers.

Le fond inférieur est réalisé d'une pièce en acier coulé GS 20 Mn 5. Son diamètre est de 6,680 m, sa hauteur 0,930 m et sa masse 64,5 t.

**Conception
mécanique**

5. Fond supérieur en cours d'usinage (diamètre 6,680 m, masse 89 t) (photo Voith).



6. Anneau d'entretoises en cours de soudure en atelier. On remarque la forte épaisseur (150 mm) des 2 flasques (photo Voith).





7. Bâche spirale en cours d'assemblage avec l'anneau d'entretoises (photo Voith).



8. Descente de la bâche spirale dans le puits. On remarque en bas, le fond inférieur de la machine déjà en place (photo Voith).

Les directrices sont guidées par 3 paliers lubrifiés à la graisse. Les aubes directrices sont coulées en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4, leur masse est de 1500 kg. Le système de sécurité est composé d'une tige de rupture, d'un système à friction et d'une butée sur le levier.

L'anneau d'entretoises, d'une masse de 87,5 t (fig. 6), est réalisé en 2 moitiés assemblées par boulonnage et soudure sur le chantier. Les anneaux inférieurs et supérieurs ont une épaisseur de 200 mm, les aubes de 150 mm. Le tout est réalisé en acier 20 Mn Mo Ni 55 et la masse totale est de 87,5 t.

La bêche spirale (fig. 7 et 8), d'une masse de 59,2 t, est en construction mécano-soudée en atelier. Elle est divisée en 2 parties soudées sur le chantier. L'épaisseur maximale de la tôle d'acier E StE 420 est de 50 mm.

L'arbre, d'une longueur de 4,250 m et d'une masse de 38,5 t, est en acier forgé CK 35 V. Il est guidé par 3 paliers à patins. Le palier turbine est situé dans le couvercle de la turbine; la butée axiale combinée avec un palier est supportée par un croisillon sous l'alternateur. Le 3^e palier se trouve au-dessus de l'alternateur.

Le démarrage du groupe en pompe est réalisé par un convertisseur statique de fréquence.

Bibliographie

- Pump-Turbines for Palmiet Pumped-storage Plant. Publication Voith No t 2686 e, 1988.

Centrale de Pan Jia Kou

République populaire de Chine

3 pompes-turbines de 86 MW en pompe et 90 MW en turbine

Conception hydraulique: Sulzer-Escher Wyss SA, Zurich, Suisse

Conception mécanique et fabrication: De Pretto-Escher Wyss S.p.A., Schio, Italie

Maître d'œuvre: National Technical Import Company, Beijing, République populaire de Chine

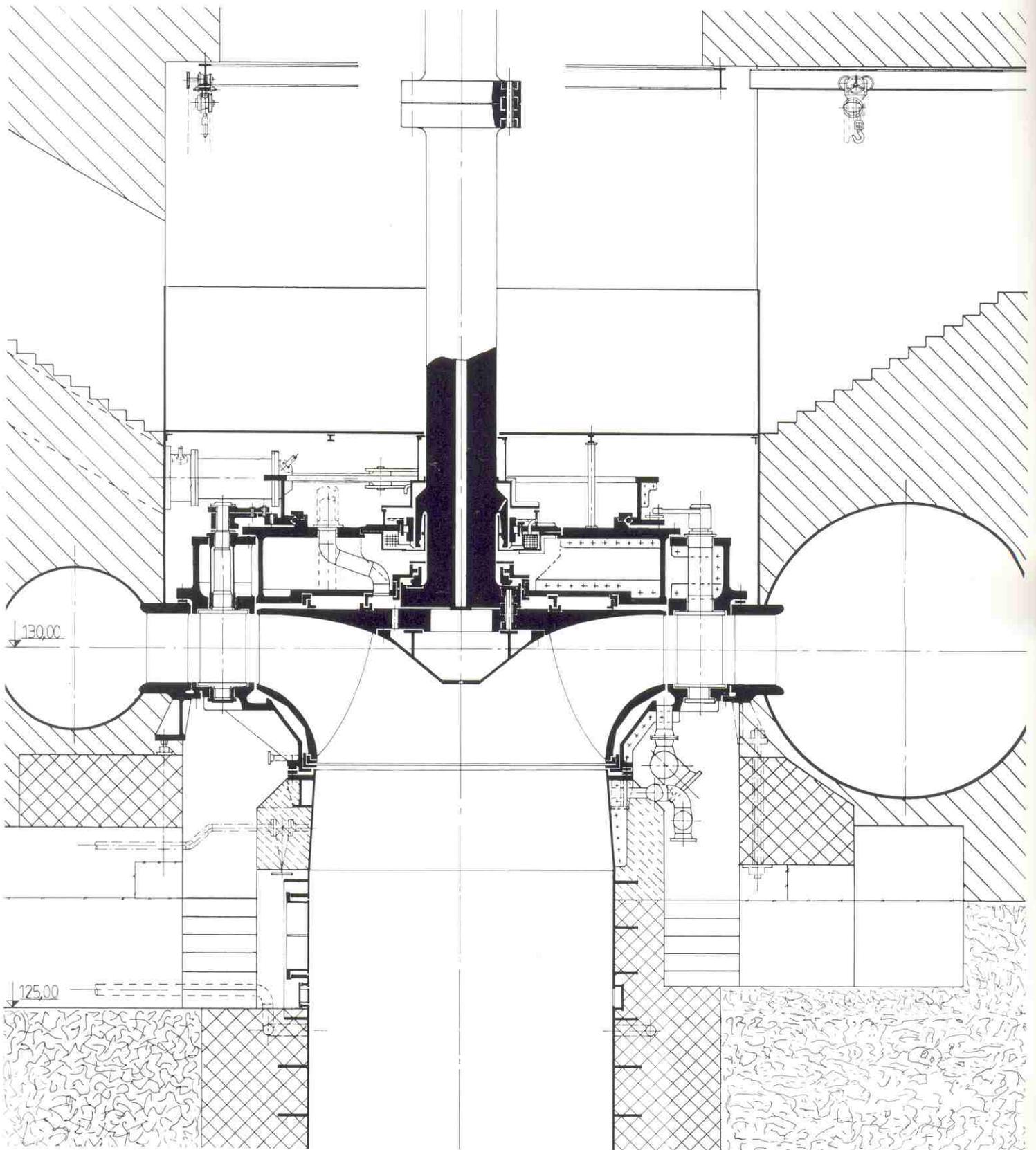
Pompe à 2 vitesses (n = 2,38 t/s)

Caractéristiques

	minimum	maximum	
E (J/kg)	601	845	
H (m)	61,3	86,2	
Q (m ³ /s)	131,8	82,8	
P (MW)	86,4	76,9	
f (Hz)	50	n (t/s; t/min)	2,38; 142,86
N _{QE} (-)	0,14	σ _{min} (-)	0,235
n _q	46	σ _{max} (-)	0,412
v (-)	0,29		

Pompe à 2 vitesses (n = 2,08 t/s)

	minimum	maximum	
E (J/kg)	364	641	
H (m)	37,1	65,4	
Q (m ³ /s)	120,0	73,8	
P (MW)	58,1	51,9	
f (Hz)	50	n (t/s; t/min)	2,08; 125,00
N _{QE} (-)	0,14	σ _{min} (-)	0,310
n _q	47	σ _{max} (-)	0,681
v (-)	0,30		



Pompe à vitesse variable

	minimum	moyen	maximum
E (J/kg)	355 - 365	429	720
H (m)	36,2 - 37,2	43,7	73,4
Q (m ³ /s)	53,2 - 123,0	126,5	75,8
P (MW)	21 - 50	60	60
n (t/s; t/min)	1,54 - 2,00; 92,3 - 120,0	2,12; 127,0	2,19; 131,4
		σ_{\min} (-)	0,276
		σ_{\max} (-)	0,700

Turbine à vitesse fixe

	minimum	maximum	
E (J/kg)	347	834	
H (m)	35,4	85,0	
Q (m ³ /s)	105,8	115,7	
P (MW)	31,3	90,0	
f (Hz)	50	n (t/s; t/min)	2,08; 125,00
N _{QE} (-)	0,14	σ_{\min} (-)	0,239
n _q	48	σ_{\max} (-)	0,714
v (-)	0,30		

Turbine à vitesse variable

	minimum	moyen	maximum
E (J/kg)	348 - 353	523	837
H (m)	35,5 - 36,0	53,3	85,4
Q (m ³ /s)	104,4 - 20,0	128,3	81,0
P (MW)	32,5 - 5,0	60,0	60,0
n (t/s; t/min)	1,72; 103,0 - 1,27; 76,3	2,10; 126,0	2,04; 122,2
		σ_{\min} (-)	0,239
		σ_{\max} (-)	0,714
D _{ie} (m)	3,905	z _r (-)	7
D _{li} (m)	5,530	z _o (-)	24
D _o (m)	6,432	z _{avd} (-)	24
B _o (m)	0,908		

Généralités

L'aménagement de Pan Jia Kou est situé sur la rivière Luanhe, à environ 200 km au nord-est de Beijing. La centrale existante se trouve au pied d'un barrage en béton. Une turbine Francis est en fonctionnement depuis quelques années et des emplacements pour 3 pompes-turbines avaient été prévus lors de la construction. La mise en service de la première pompe-turbine a eu lieu en 1991.

Conception hydraulique

La très importante variation de chute, 36 à 86 m, aurait imposé une roue à pales orientables du type Dériaz. Toutefois, l'implantation des machines, imposée par le génie civil existant, est beaucoup trop haute pour une pompe-turbine Dériaz. Dans ces conditions, la seule solution est une pompe-turbine Francis avec 2 vitesses de rotation.

La solution retenue finalement consiste en 3 groupes à 2 vitesses (125,00 et 142,86 t/min).

Un convertisseur de fréquence est prévu pour le démarrage des pompes. Il a été décidé de l'utiliser, à titre expérimental, pour le fonctionnement d'un groupe en turbine et en pompe avec vitesse variable jusqu'à la puissance maximale de 60 MW du convertisseur.

La pompe à 2 vitesses doit fonctionner avec une ouverture variable du distributeur pour obtenir un bon rendement sur toute la gamme de chutes. Toutefois, l'ouverture maximale du distributeur doit être limitée (pour les hauteurs de refoulement inférieures à 44,3 m) pour éviter des problèmes de cavitation. Cette limitation provoque cependant une baisse sensible du rendement (environ 17%). Ces pertes produisent une augmentation du niveau de vibration et de bruit.

L'avantage des 2 vitesses se fait sentir principalement en mode turbine. La vitesse la plus basse (125 t/min) permet d'obtenir une plage de fonctionnement bien centrée sur le sommet de la colline.

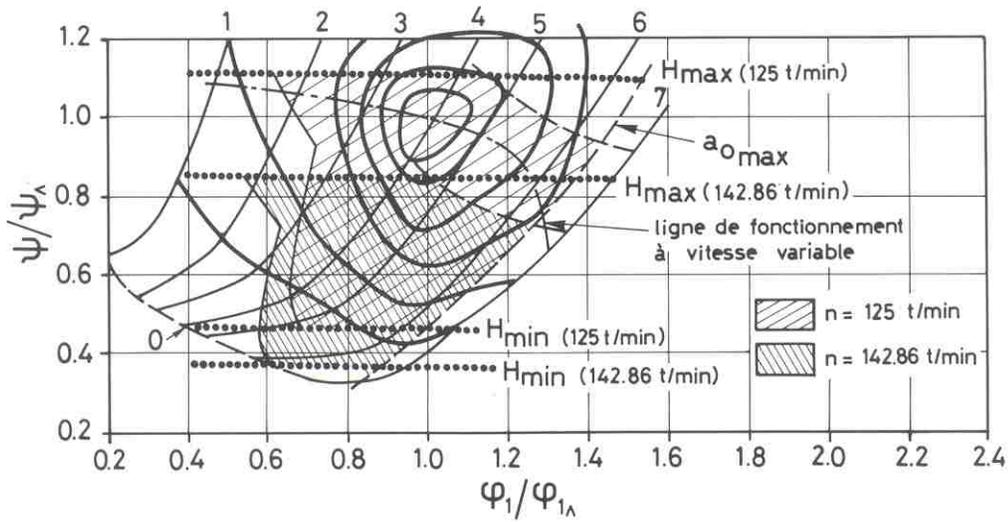
La figure 1 montre les domaines de fonctionnement obtenus, en turbine, avec les vitesses 142,86 et 125 t/min. Les rendements obtenus avec la vitesse la plus basse sont à l'évidence bien meilleurs.

La figure 2 montre le domaine de fonctionnement en pompe à vitesse variable. On voit que le rendement est excellent dans tout le domaine de fonctionnement même avec une puissance limitée à 60 MW.

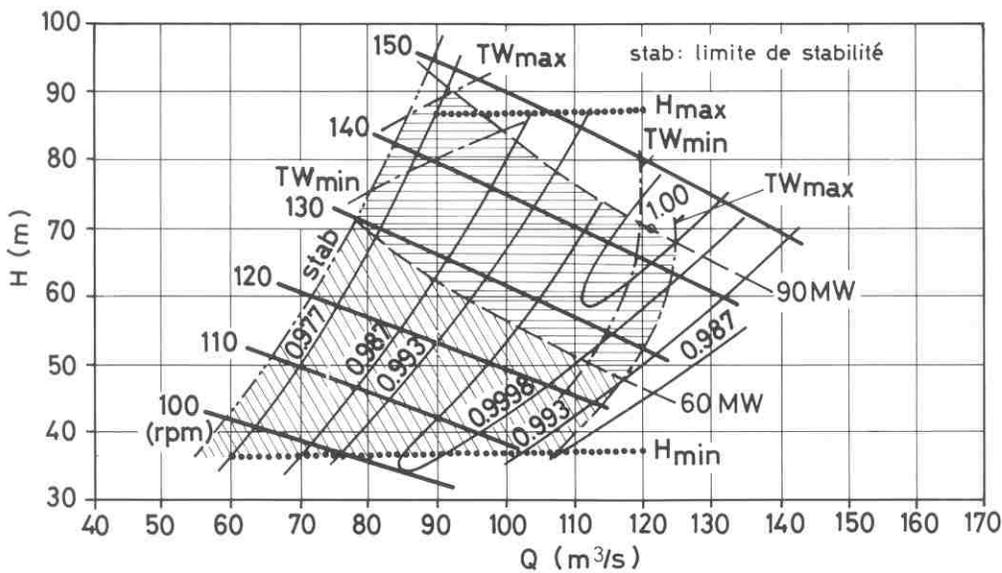
En turbine, il est possible de faire varier la vitesse de rotation pour maintenir le rendement à son maximum à chaque ouverture de distributeur. Cette ligne du sommet apparaît sur la caractéristique de la figure 1.

La figure 3, qui représente le domaine de fonctionnement de la turbine à vitesse variable, montre bien que le rendement est excellent à tous les régimes.

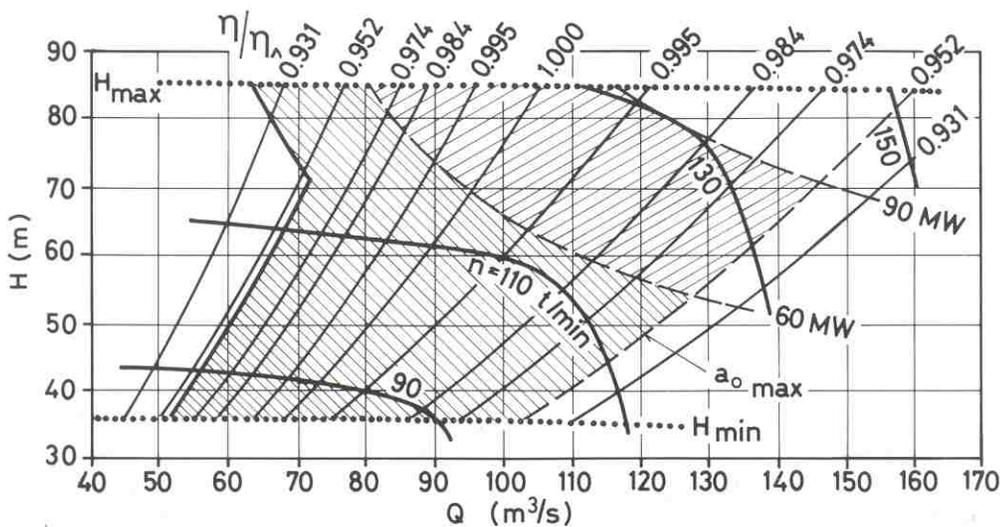
Cette optimisation n'est possible qu'avec des essais très soignés sur modèle réduit. Ceux-ci ont été exécutés dans les laboratoires de Sulzer-Escher Wyss à Zurich. Le diamètre D_{1e} de la roue était de 348,4 mm et la chute d'essai 60 m en turbine. En pompe, la vitesse de rotation était de 1900 t/min.



1. Colline de rendement $\phi - \psi$ en turbine montrant les domaines de fonctionnement à 142,86 et 125 t/min (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).



2. Domaine de fonctionnement de la pompe à vitesse variable (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).



3. Domaine de fonctionnement de la turbine à vitesse variable (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).

Conception mécanique

La bêche spirale, du type Piguet, est composée de 21 viroles soudées sur les flasques en tôle épaisse de l'avant-distributeur (fig. 4).

L'avant-distributeur est assemblé et usiné en 3 parties qui sont boulonnées et soudées sur le chantier.

L'installation ne comportant pas de vanne de turbine, le distributeur doit être très étanche, non seulement durant les périodes d'arrêt de la machine, mais également durant le démarrage de la pompe dans l'air. L'étanchéité est réalisée par des aubes à plateaux en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni, et par des joints en caoutchouc sur les flasques du distributeur (fig. 5).

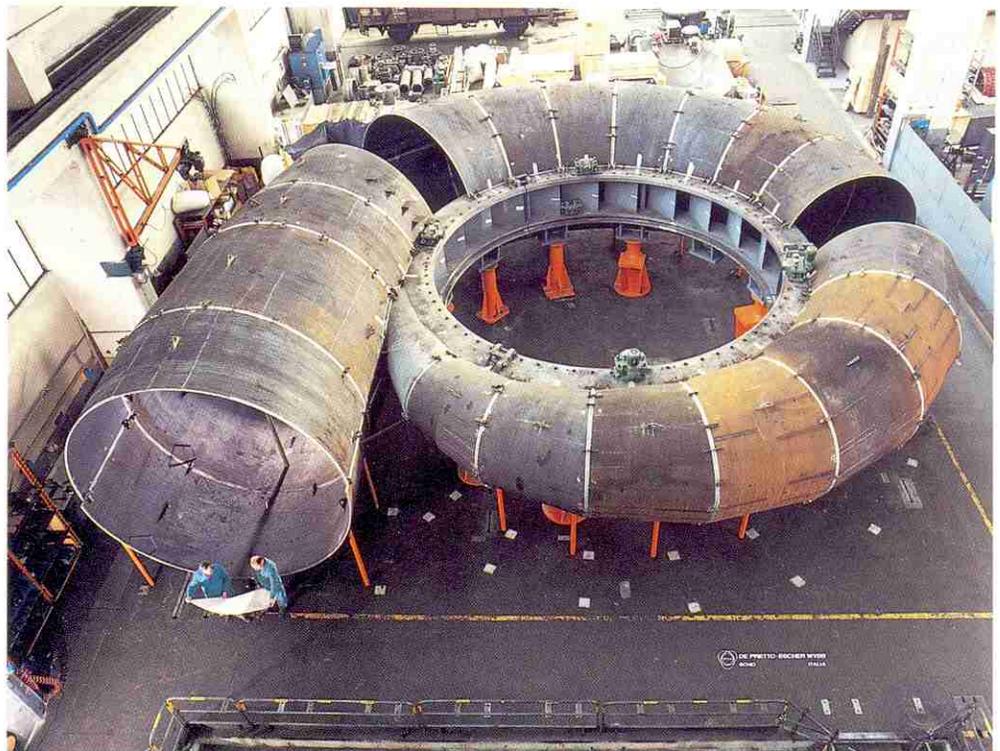
Les aubes, usinées par commande numérique, le moyeu et la ceinture de la roue, en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni, sont assemblés par soudure (fig. 6). La masse totale de la roue est de 70 t. L'usinage des aubes par commande numérique et la soudure de la roue ont été effectués dans l'usine de Zurich.

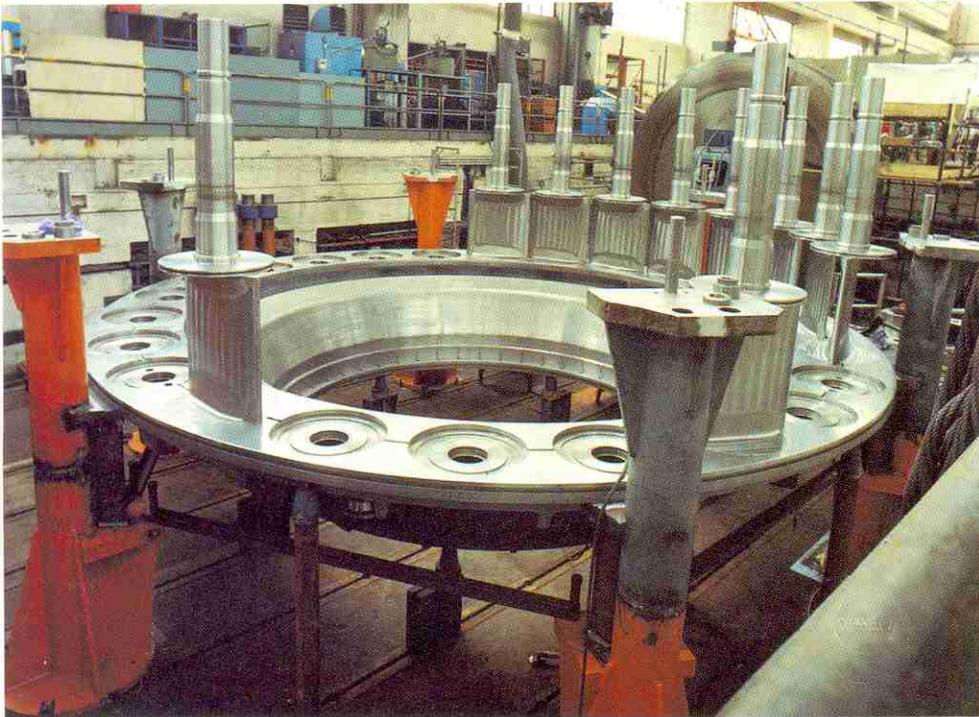
Le couvercle de la machine, en construction soudée, est divisé en 2 parties pour faciliter le démontage de la roue qui se fait par le haut.

Le démarrage a lieu à distributeur fermé avec 3 possibilités:

- démarrage noyé dos à dos en utilisant un groupe voisin;
- démarrage noyé en utilisant le convertisseur de fréquence;
- démarrage à roue dénoyée en utilisant le convertisseur de fréquence et en renoyant la machine.

4. Bêche spirale et avant-distributeur en cours de prémontage en atelier (photo De Pretto-Escher Wyss).





5. Distributeur avec aubes à plateaux en cours de pré-montage (photo Sulzer-Escher Wyss).



6. Roue de la pompe-turbine en cours d'usinage final (photo De Pretto-Escher Wyss).

- M. Jaquet. The Pan Jia Kou pumped storage station (Pump-turbines operated with two speeds or with variable speed). Comptes-rendus du Winter Annual Meeting ASME, Anaheim CA, 1986.

Centrale de Torrão, Province de Porto, Portugal

2 pompes-turbines de 73,3 MW en pompe et 69,9 MW en turbine

Conception hydraulique et mécanique: Neyrpic, Grenoble, France

Fabrication: Sorefame, Amadora, Portugal et Neyrpic, Grenoble

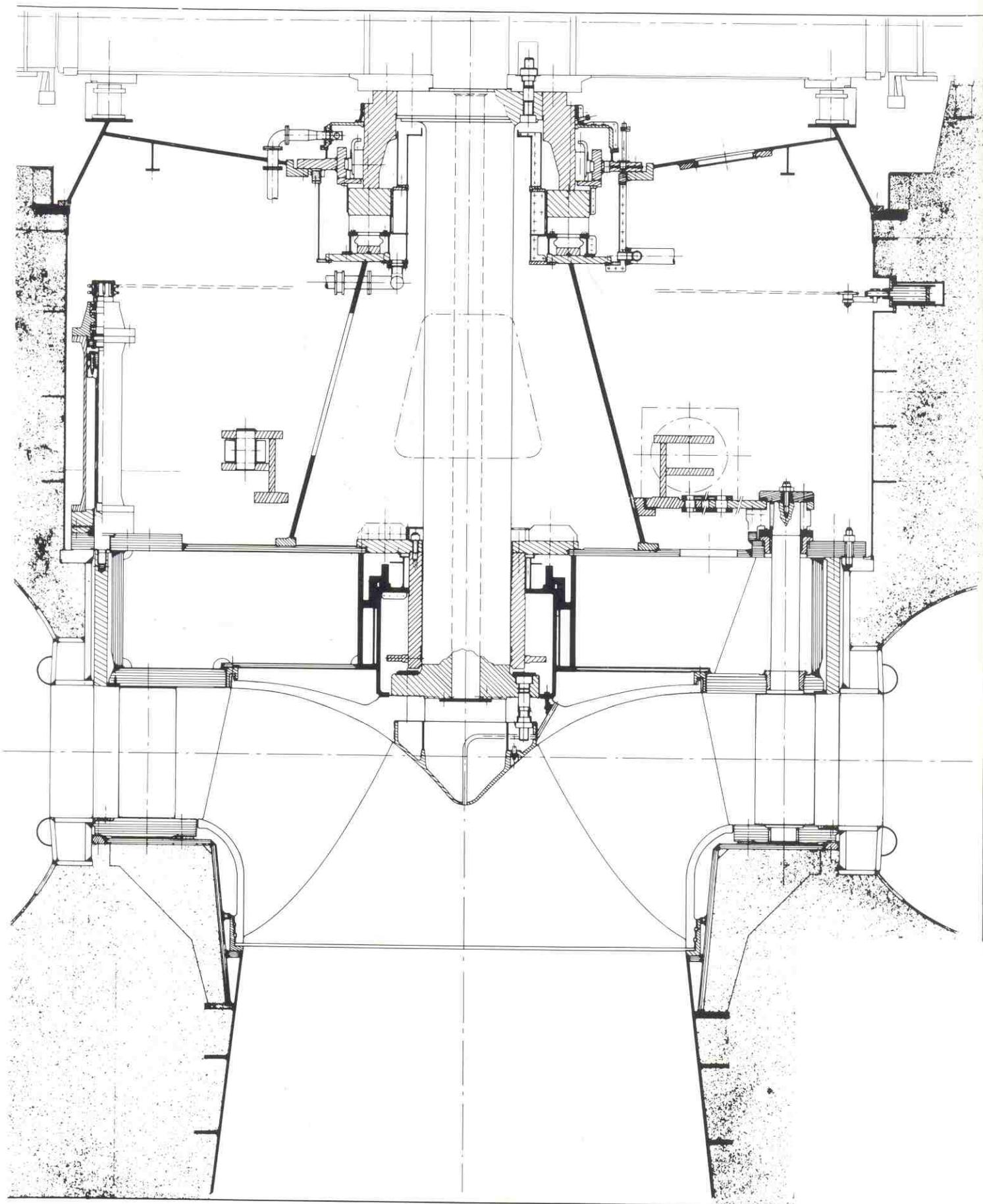
Maître d'œuvre: Electricidade de Portugal (EDP), Porto, Portugal

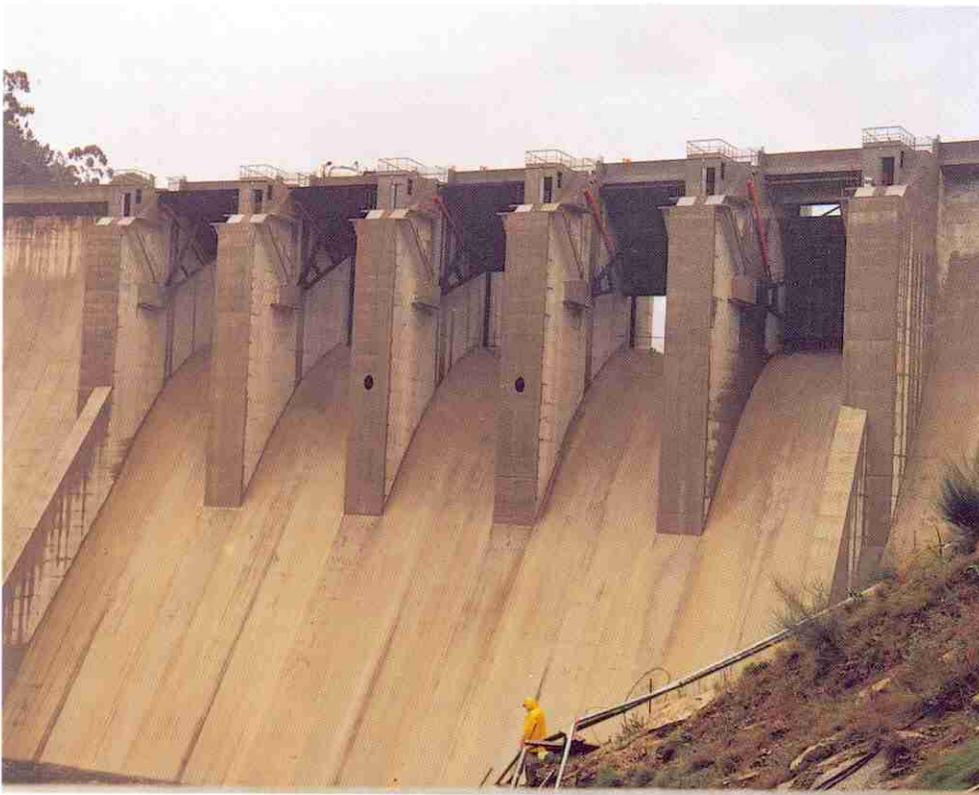
Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	390,3	514,8	527,6
H (m)	39,8	52,5	53,8
Q (m ³ /s)	165,4	131,0	126,9
P (MW)	73,1	73,3	72,9
N_{QE} (-)	0,22	σ_{min} (-)	0,485
n_q	73	σ_{max} (-)	0,694
v (-)	0,47		

Caractéristiques

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	339,3	492,3	510,9
H (m)	34,6	50,2	52,1
Q (m ³ /s)	129,5	157,6	161
P (MW)	35,1	69,9	74,3
N_{QE} (-)	0,25	σ_{min} (-)	0,501
n_q	83	σ_{max} (-)	0,797
v (-)	0,53		
D_{ie} (m)	4,673	f (Hz)	50
D_{li} (m)	5,058	n (t/s; t/min)	2,08; 125,0
D_o (m)	6,860	z_r (-)	7
B_o (m)	1,398	z_o (-)	24
		z_{avd} (-)	24

Centrale de Torrão, Portugal





1. Evacuateur de crues équipé de 5 vannes secteur de 10,7 m de largeur (photo Neyrpic).

La centrale de Torrão est située sur le Tamega, affluent du Douro, à 40 km en amont de Porto. Le barrage en béton a 70 m de hauteur et 218 m de longueur. La partie centrale du barrage comprend l'évacuateur de crues, muni de 5 vannes secteur de 10,7 m de largeur, dimensionnées pour 4150 m³/s (fig. 1).

Les galeries, séparées pour chaque groupe, ont une longueur de 150 et 200 m. Elles sont blindées sur 35 m.

La centrale se présente sous la forme de 2 puits de 17,5 m de diamètre, distants de 30 m.

Les aspirateurs-diffuseurs ont une longueur de 35 m et sont équipés de batardeaux.

Le premier groupe a été mis en service en 1988.

La bêche spirale, du type Piguet, a un diamètre d'entrée de 5,343 m. Sa largeur totale est de 17,400 m.

Les avant-directrices sont à épaisseur constante, légèrement cintrées (fig. 2).

Les directrices ont une forme profilée aux 2 extrémités; leur épaisseur relative est de 0,18.

L'aspirateur-diffuseur a une profondeur $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,12$, il est relativement large et possède un pilier central.

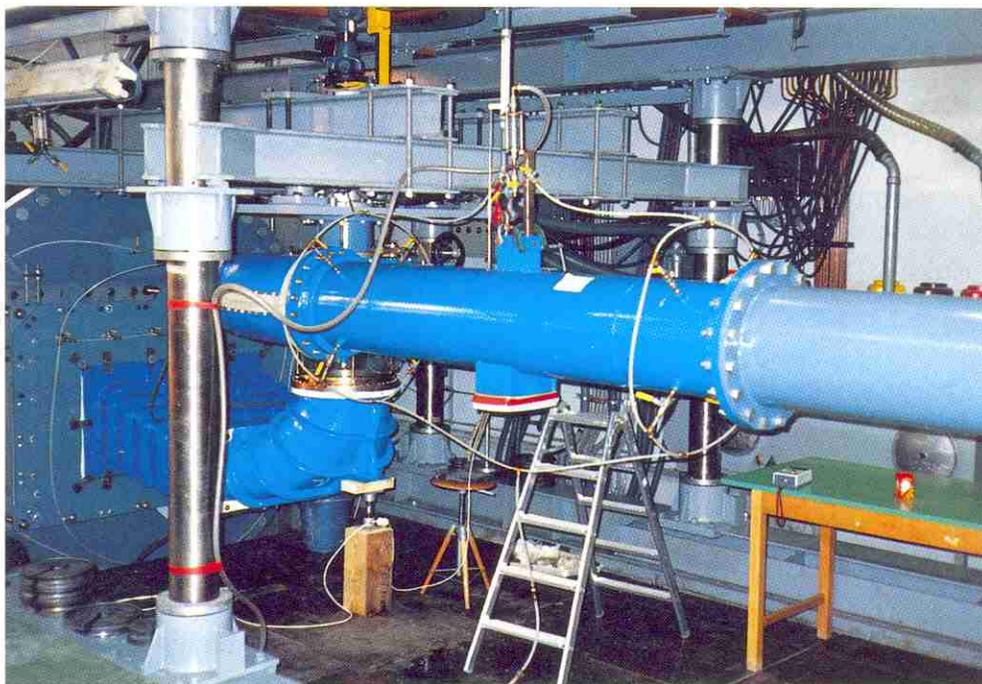
Généralités

Conception hydraulique

2. Avant-distributeur en fabrication. On distingue les 2 pièces qui seront soudées sur le chantier (photo Neyrpic).



3. Modèle durant les essais de réception à l'IMHEF (photo IMHEF).





4. et
5. Modèle de fonderie en bois de la roue en cours de finition (photo Neyrpic).



Les essais de réception officiels en pompe et en turbine ont été effectués dans le laboratoire de l'IMHEF, avec un modèle de diamètre $D_{1c} = 351$ mm.

Les essais de rendement ainsi que les essais de cavitation ont été exécutés en pompe et en turbine sous une chute de 20 m en turbine et environ 15 m en pompe (fig. 3).

Conception mécanique

La conception mécanique de la machine est assez classique. Sa particularité principale est d'être équipée d'une vanne fourreau, ce qui est assez rare pour une pompe-turbine. On obtient ainsi une économie substantielle sur le coût du génie civil; en évitant d'avoir à construire une chambre des vannes, on réduit la largeur de la centrale. On supprime en plus les pertes de charge dues aux vannes.

La vanne fourreau est située entre l'avant-distributeur et le distributeur. Elle est commandée par 6 servomoteurs synchronisés par un système de vis sans fin, écrous réversibles et chaîne de synchronisation très semblable à celui utilisé pour les turbines de LG 4.

Il faut toutefois remarquer que les dimensions de ces vannes sont plus importantes que celles de LG4. Leur diamètre est en effet de 8,030 m, leur hauteur 1500 mm, l'épaisseur de 140 mm et la masse de 40 t.

Les vannes fourreau en 2 parties sont entièrement usinées en atelier et soudées sur le chantier en utilisant une technique spéciale qui évite de reprendre l'usinage après soudure.

La roue, en acier inoxydable 17 Cr - 4 Ni (VIRGO 39), est coulée d'une pièce (fig. 4 et 5). Sa masse est de 72 t.

La ligne d'arbre comprend 3 paliers. Celui de la turbine découle d'une conception originale Neyrpic: l'arbre ne comporte pas de cloche, la cuve du palier étant fixée à la roue, donc tournante. Le joint plan est placé sur la partie supérieure de cette cuve; elle est donc immergée et réfrigérée naturellement. Le joint plan est ainsi très accessible et sa position permet d'abaisser le palier, ce qui diminue le porte-à-faux et augmente la rigidité.

Bibliographie

- A. Sauron. Les grandes installations hydroélectriques récentes au Portugal. Revue technique Neyrpic No 5, 1986.

Centrale de R.B. Russel Dam, Etat de Géorgie, USA

4 pompes-turbines de 96,6 MW en pompe et 77,6 MW en turbine

Conception hydraulique: Hydro Vevey SA, Vevey, Suisse

Conception mécanique et fabrication: GE Canada Ateliers d'Ingénierie Dominion (AID), Lachine, Canada

Maître d'œuvre: Department of Army, Corps of Engineers, Savannah District, USA

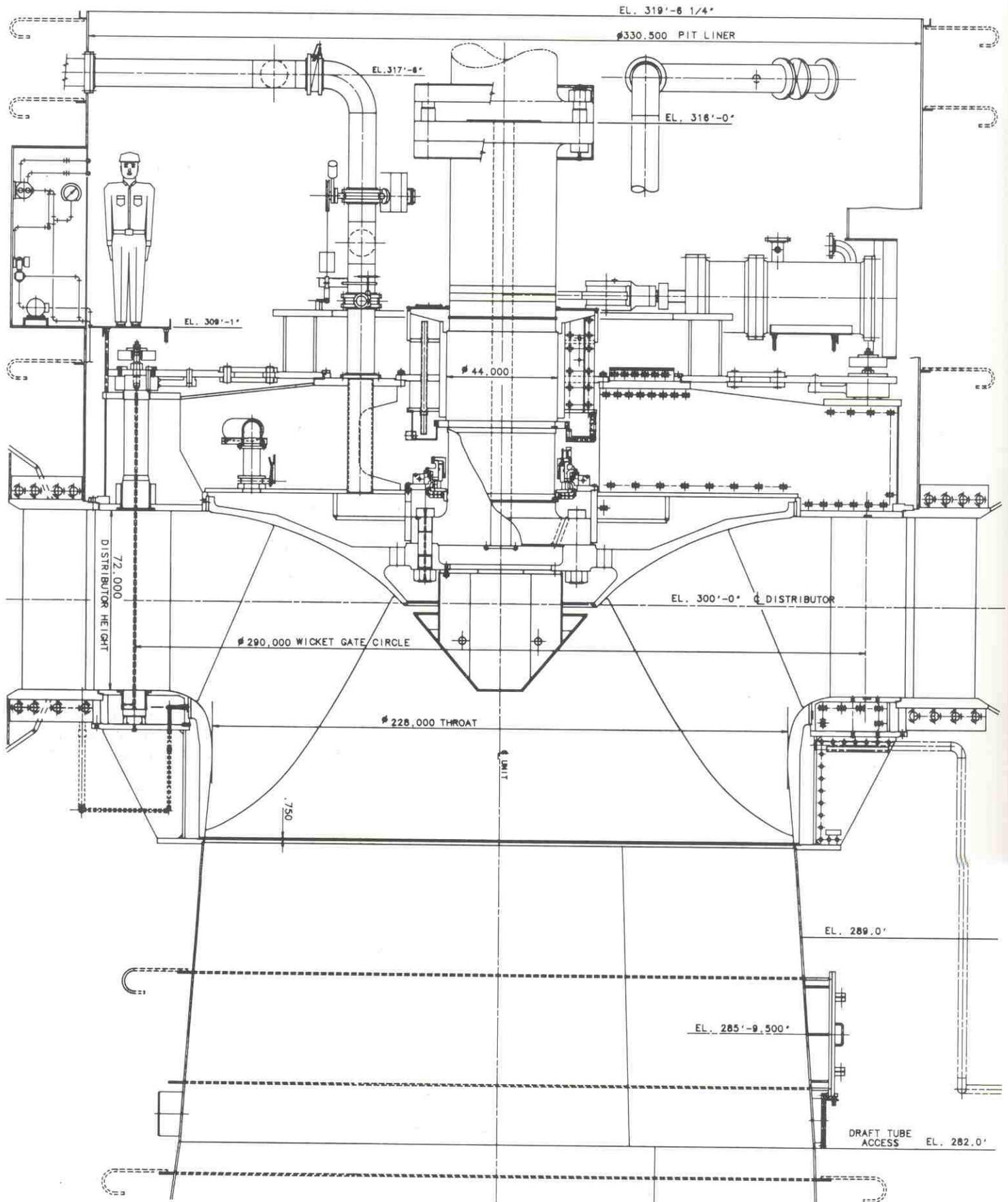
Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	421,5	442,4	481,2
H (m)	42,98	45,11	49,07
Q (m ³ /s)	202,5	195,3	178,5
P (MW)	96,27	96,55	95,41
N_{QE} (-)	0,29	σ_{min} (-)	0,321
n_q	96	σ_{max} (-)	0,550
v (-)	0,61		

Caractéristiques

Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	415,5	430,4	469,2
H (m)	42,37	43,89	47,85
Q (m ³ /s)	211,42	201,40	199,55
P (MW)	77,55	77,55	92,8
N_{QE} (-)	0,30	σ_{min} (-)	0,330
n_q	100	σ_{max} (-)	0,558
v (-)	0,63		
D_{ie} (m)	5,893	f (Hz)	60
D_{li} (m)	4,560	n (t/s; t/min)	2,0; 120
D_o (m)	7,360	Z_r (-)	6
B_o (m)	1,829	Z_o (-)	22
		Z_{avd} (-)	22

La centrale de R.B. Russel Dam est située sur la rivière Savannah, près d'Elberton, à 150 km d'Atlanta, en Géorgie. L'usine et l'évacuateur de crues constituent la partie centrale du barrage qui est prolongé sur les 2 rives par des digues en terre.

Généralités



A l'origine, la centrale était équipée de 4 turbines Francis Voest-Alpine MCE. Il a été décidé d'installer 4 pompes-turbines dans les emplacements prévus pour les 4 derniers groupes. La mise en service de la première machine devrait avoir lieu en 1992.

La bêche spirale, d'un diamètre d'entrée de 8,0 m, est du type Piguet et comprend 22 viroles. La largeur maximale est de 18,7 m.

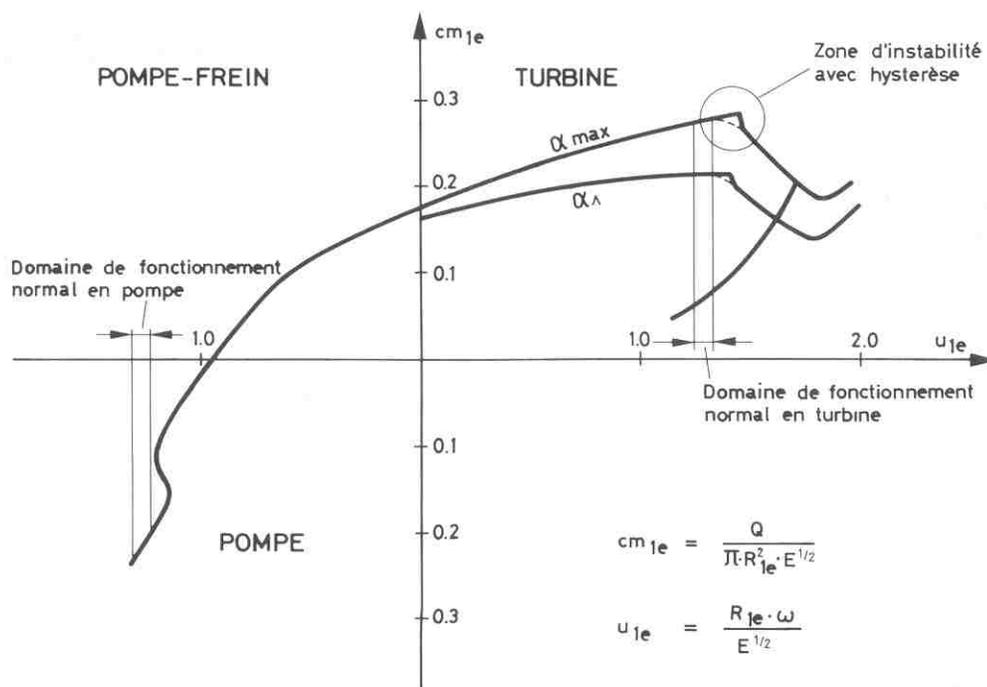
Les avant-directrices ont un profil courbé à épaisseur constante.

Les directrices sont relativement minces (épaisseur maximale 133 mm) pour une pompe-turbine. La hauteur du distributeur est de 1829 mm.

La conception de la roue a présenté de nombreux problèmes. En effet, la vitesse spécifique de la machine est très élevée ($v_{\text{pompe}} = 0,475$, $v_{\text{turbine}} = 0,510$) et la puissance en turbine est très importante.

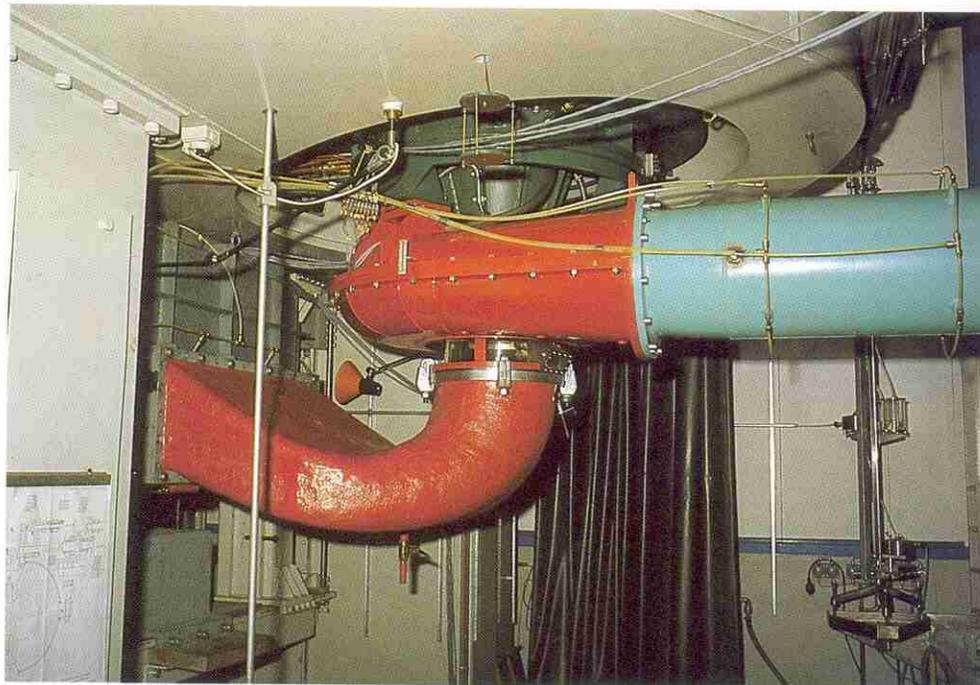
Le problème principal est causé par les zones d'instabilité en pompe et en turbine. La zone d'instabilité en pompe, appelée feston, est une particularité des pompes-turbines. Elle est due à la recirculation à l'entrée de la roue et se situe souvent très près du point de fonctionnement à rendement maximal. L'essai sur modèle réduit revêt donc une grande importance pour situer avec précision la position de cette zone. Dans le cas de Russel Dam, les essais sur modèle ont montré une instabilité en fonctionnement turbine (fig. 1). En cas de déclenchement de la machine en turbine, on observe une baisse brutale du débit pour une vitesse d'environ 20% supérieure à la vitesse nominale. L'influence de la position de l'arête d'entrée turbine, de la géométrie du distributeur, du nombre d'aubes, 5 ou 6, ainsi que l'inclinaison des aubes à l'entrée en turbine a été étudiée en détail.

Conception hydraulique



1. Caractéristiques 4 quadrants montrant les zones d'instabilité en pompe et en turbine (document Hydro Vevey).

2. Modèle d'essai sur la plate-forme de Hydro Vevey (photo Hydro Vevey).



Le développement d'une pompe-turbine est le résultat d'un compromis délicat entre les critères de conception d'une pompe et ceux d'une turbine pour obtenir les caractéristiques désirées dans les deux modes de fonctionnement. Les essais sur modèle ont été exécutés dans le laboratoire de Hydro Vevey, avec un modèle de diamètre $D_{1e} = 301$ mm et sous une chute $H = 20$ m environ (fig. 2).

Conception mécanique

La bache spirale d'une masse de 176 t est entièrement soudée sur le chantier.

L'avant-distributeur, d'une masse totale de 84 t, est divisé en 4 parties boulonnées et soudées sur le site (fig. 3). L'acier utilisé est de l'ASTM A-516 grade 60 d'une épaisseur de 100 mm pour les flasques et 64 mm pour les aubes.

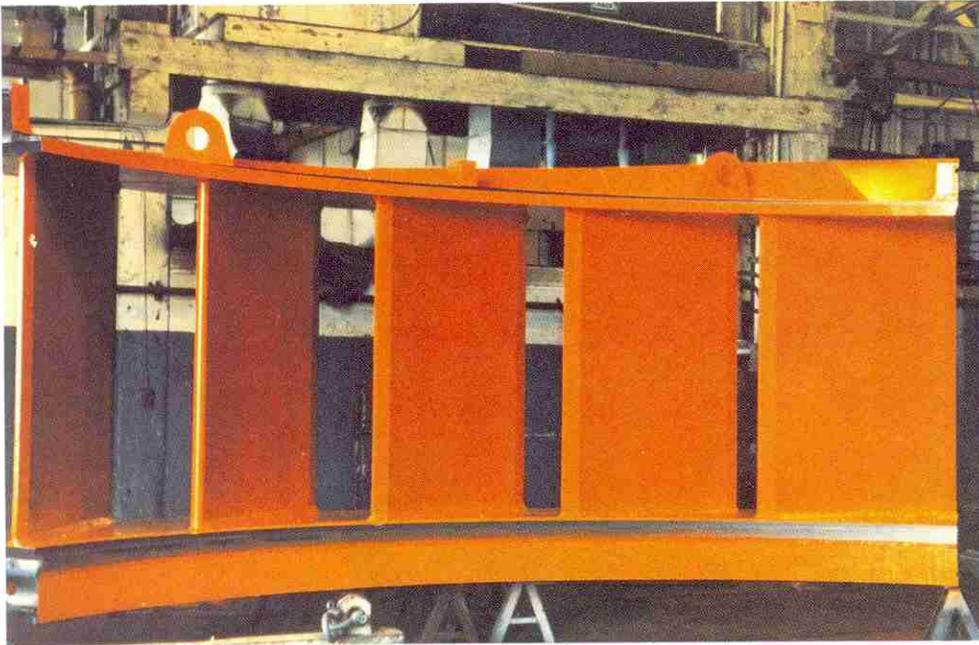
Les aubes directrices, d'une masse de 2300 kg, sont en acier coulé ASTM A-27 grade 70-40 avec une protection inoxydable sur les lignes de contacts ainsi que sur les faces inférieures et supérieures.

Les aubes sont guidées par 3 paliers et sont commandées par le système classique levier - biellettes - cercle de vannage (fig. 4).

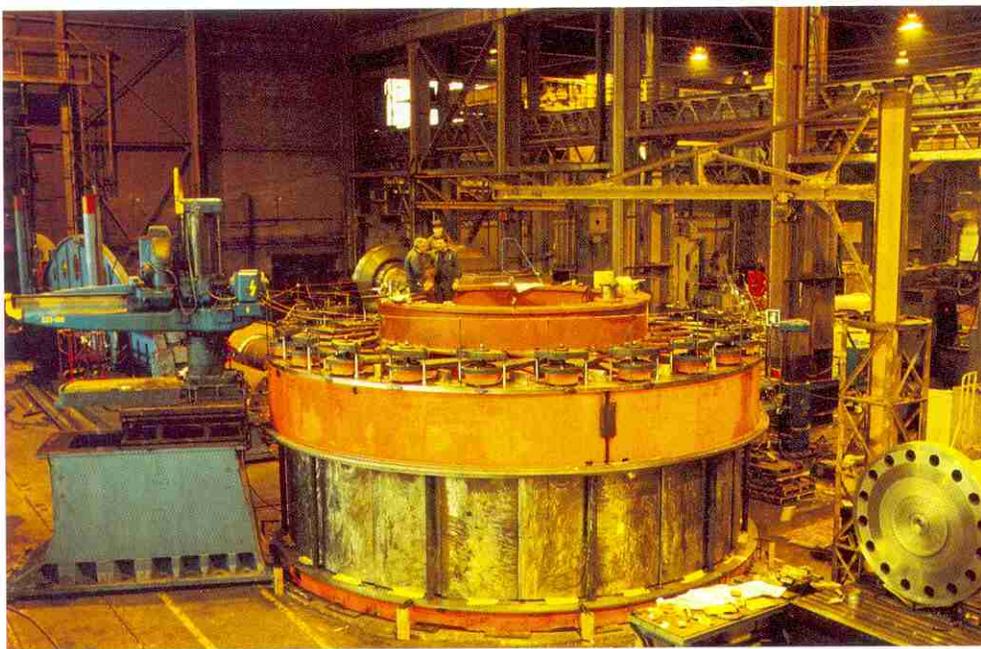
Les roues sont fabriquées à partir d'un moyeu, d'une ceinture et de 6 aubes, le tout en acier inoxydable coulé ASTM A-743 CA - 6 NM (13 Cr - 4 Ni) (fig. 5).

Les aubes ont été usinées par commande numérique avant d'être soudées. Un très grand soin a été apporté au positionnement des aubes (fig. 6). En effet, de très faibles écarts par rapport à la géométrie du modèle réduit peuvent avoir de très grands effets sur les performances hydrauliques, spécialement pour les roues de pompes-turbines.

3. Avant-distributeur divisé en 4 parties (photo GE Canada).



4. Distributeur préassemblé dans les ateliers du constructeur (photo GE Canada).



Le fond supérieur, en acier ASTM A-516 grade 60 est divisé en 2 parties boulonnées sur le site. Sa masse est de 65 t pour un diamètre de 8,320 m.

L'anneau inférieur du distributeur, fabriqué avec le même acier, est divisé en 4 parties également boulonnées sur le chantier. Son diamètre est de 8,110 m et sa masse 26,4 t.

L'arbre, en acier forgé ASTM A - 668 D, a un diamètre de 1,800 m pour une longueur de 4,300 m et une masse de 35 t.

5. Tournage d'une roue en acier inoxydable, d'une masse de 99 t (photo GE Canada).



6. Mise en place des aubes de la roue dans le moyeu et la ceinture, avant soudure (photo GE Canada).



Le palier turbine est du type cylindrique sans réglage, avec lubrification forcée par pompe.

Le blindage de l'aspirateur, en acier ASTM A-36, s'étend sur une hauteur de 5,73 m sous la roue.

- R. Thalmann. Développement des pompes-turbines rapides. Bulletin technique Vevey, 1985.
- R. Thalmann. Développement des pompes-turbines de R.B. Russel Dam. Bulletin technique Vevey, 1987.

Bibliographie

Index

- Alto Lindoso, 69
Atatürk, 87
Bajina Basta, 367
Chaira, 373
Cirata, 129
Colbun, 75
Crestuma, 303
Devil Canyon, 47
El Cajon, 81
Gezhouba, 243
Grand-Maison, 333
Greenup, 317
Greifenstein, 295
Guavio, 21
Guri II, 139
Häusling, 343
Itaipu, 147
Itaparica, 189
Jebba, 197
Jostedal, 11
L'Eau d'Olle, 5
Laufenburg, 275
La Bâtiaz, 29
La Grande 3, 157
La Grande 4, 111
Ligga III, 209
Limestone, 221
Machicura, 203
Manavgat, 215
Murray Lock and Dam, 289
Naterno, 1
Palmiet, 379
Pan Jia Kou, 387
Piedra del Aguila, 165
Pigai Aaos, 35
Porto-Primavera, 259
Racine, 323
Restitución, 53
Revelstoke, 121
Russel Dam, 401
San Agaton, 59
San Carlos, 41
Saucelle-Huebra, 181
Sayano-Shushenskaya, 95
Sellrain-Silz, 17
Shiroro, 135
St-Mary, 311
Svartisen, 65
Sydney A. Murray, 327
Tadami, 267
Taquaruçu, 229
Tarbela, 101
Torrão, 395
Truel, 357
Tucurui, 171
Verbois, 233
Wells Dam, 253
West End Dam, 285

PRESENTATION DES ENTREPRISES

Les entreprises qui se présentent sur les pages suivantes ont participé à la publication de cet ouvrage. Qu'elles en soient ici remerciées.

Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich (Suisse)

Gec Alsthom Neyrpic, Grenoble (France)

J.M. Voith GmbH, Heidenheim (Allemagne)

Hydro Vevey S.A., Vevey (Suisse)

GE Canada, Lachine (Canada)

Riva Hydroart S.p.A., Milan (Italie)

Hitachi Works Ltd, Hitachi-Shi (Japon)

Fuji Electric Co. Ltd, Kawasaki (Japon)

Voest Alpine MCE GmbH, Linz (Autriche)

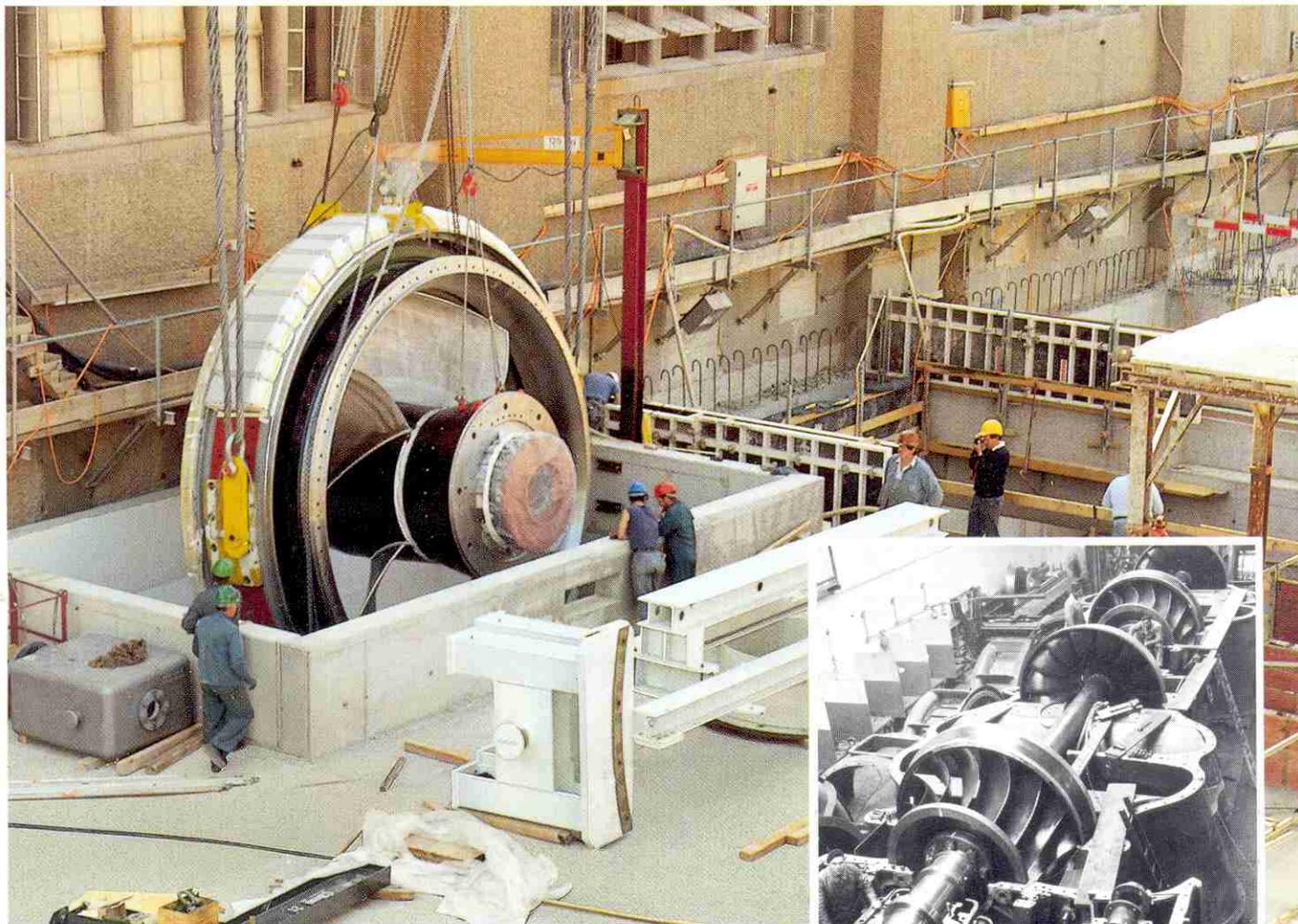
Impsa, Mendoza (Argentine)

Aussi à Laufenburg...

Transformation de la centrale de Laufenburg sur le Rhin avec des turbines Straflo®

Construite au début du siècle, la centrale de Laufenburg sur le Rhin est actuellement en cours d'agrandissement. Lors de précédentes modernisations, la puissance avait déjà été augmentée

de 40 à 81 MW. Avec la transformation actuellement en cours et le remplacement des turbines Francis par dix unités STRAFLO®, la puissance totale sera portée à 106 MW.



Montage sur site du premier rotor Straflo d'un poids de 100 t, le 30 août 1989.

Des technologies innovatives ouvrant des voies nouvelles sur le marché mondial de l'hydraulique – depuis 1844

SULZER
ESCHER WYSS
HYDRAULIQUES



Montage en ateliers d'un groupe de turbines Francis pour la centrale de Laufenburg, en 1937 à Zurich.

Sulzer-Escher Wyss SA
Escher Wyss-Platz
CH-8023 Zurich, Suisse
Tél. 01-278 22 11
Fax 01-278 22 61

Bell-Escher Wyss SA
CH-6010 Kriens/Lucerne, Suisse
Tél. 041-49 51 11
Fax 041-45 51 15

Meeting the world's energy challenges



L'énergie des défis


NEYPIC

Where performance counts ... Voith

Voith Tolosa S.A.
P. Larramendi 9
E-Tolosa (Guipuzcoa)
Tel. (43) 67 37 99, 67 40 11
Fax (43) 67 28 48

J.M. Voith GmbH
Postfach 1940
D-7920 Heidenheim
Tel. (0 73 21) 37-0
Fax (0 73 21) 37-70 00

J.M. Voith AG
Postfach 168
A-3100 St. Pölten
Tel. (27 42) 6 95 10-0
Fax (27 42) 6 18 76

Voith Hydro Inc.
P.O. Box 712
York, PA 17405/USA
Tel. (7 17) 7 92-70 00
Fax (7 17) 7 92-72 63

Voith S.A., Maq. e Equip.
Caixa Postal 3916
BR-01060 São Paulo
Tel. (11) 8 41-41 11
Fax (11) 8 41-32 06

Hydro Turbines Shut-off valves Governors and control systems

With manufacturing facilities in ① Germany, ② Austria, ③ Spain, ④ United States and ⑤ Brazil, Voith is the largest and most efficient manufacturer of machines and equipment for the utilization of water power worldwide.

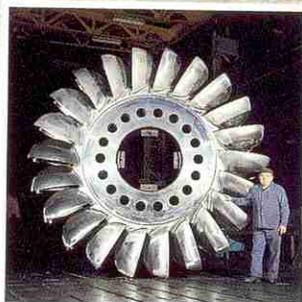
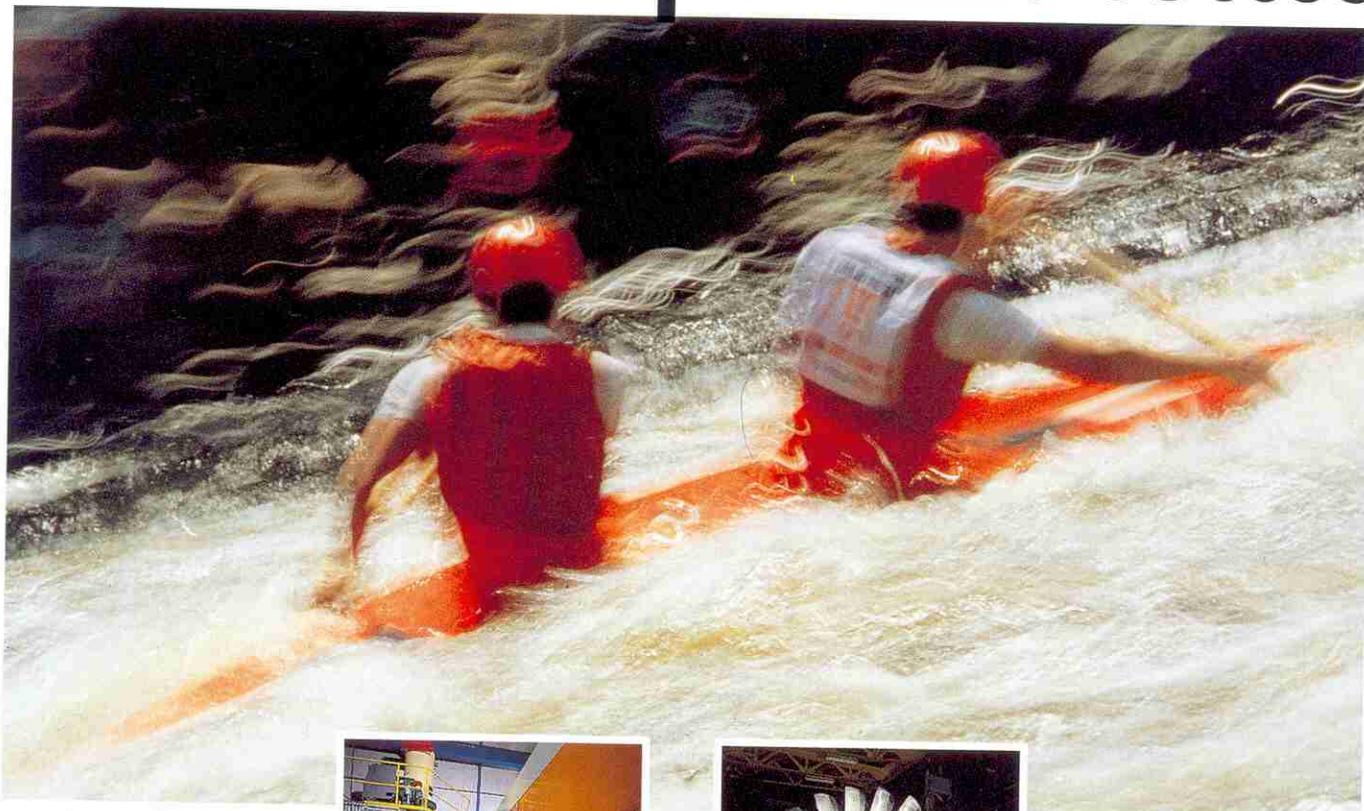
Performance and achievement have been impressing our customers for the past 125 years.

We are proud of being a leader in the field of water-power technology. To date more than 30,000 units for water power installations with a combined output of more than 133,000 MW have been installed throughout the world.

We offer economical solutions for new projects as well as for the modernization of existing hydro plants in Europe and around the world.

VOITH
125 YEARS
SUPERIOR TECHNOLOGY
ESPRIT · EXCELLENCE · EFFIZIENZ

A l'unisson cap vers le succès



Une équipe pour gagner dans les tourbillons de la compétition internationale; la réunion de brillantes réussites dans des domaines complémentaires: HYDRO VEVEY S. A. et VOEST-ALPINE M.C.E.

HYDRO VEVEY S. A., partenaire de VOEST-ALPINE M.C.E. depuis le début de l'année 1991, offre une gamme complète de services et produits dans le secteur des centrales hydro-électriques. Un de nos points forts est la modernisation des centrales.

Nos spécialistes hautement expérimentés vous conseilleront de façon à optimiser vos investissements lors de la modernisation, avec ou sans augmentation des performances, des équipements de votre centrale hydro-électrique.

Une technologie de pointe pour produire mieux et davantage.

Une équipe efficace, à vos côtés,
HYDRO VEVEY S. A. et VOEST-ALPINE M.C.E.

**HYDRO
VEVEY**

Machines et Installations Hydrauliques
HYDRO VEVEY SA

Chef de
file mondial
en matière
de conception,
de fabrication
et d'installation
hydroélectrique
depuis plus d'un siècle,
nous sommes à jamais
au sommet de notre art.



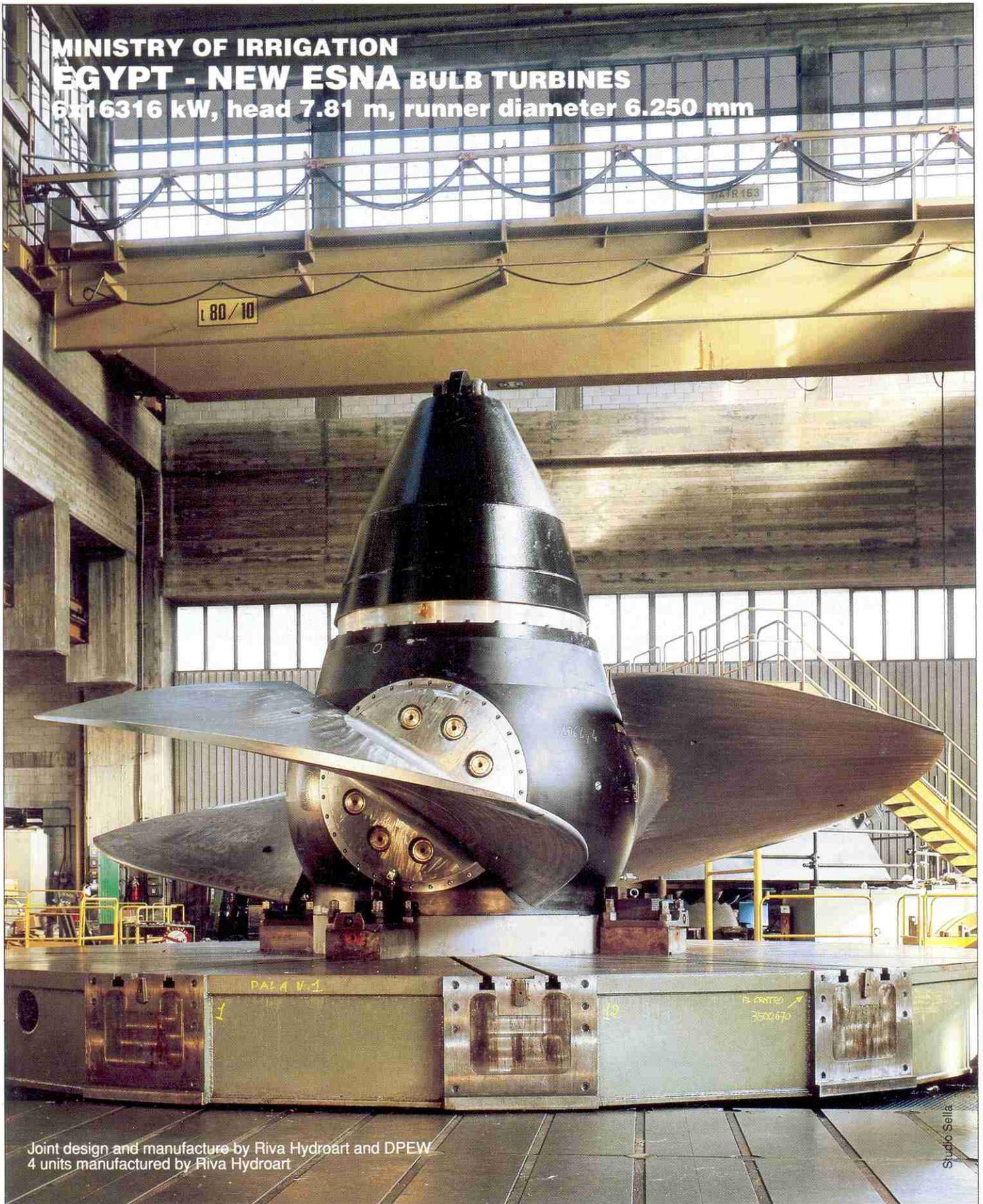
GE Canada

Groupe Matériel hydroélectrique

795, 1^{re} Avenue, Lachine, Québec, H8S 2S8

téléphone (514) 485-4000 télécopie (514) 485-4230

**MINISTRY OF IRRIGATION
EGYPT - NEW ESNA BULB TURBINES**
6x16316 kW, head 7.81 m, runner diameter 6.250 mm

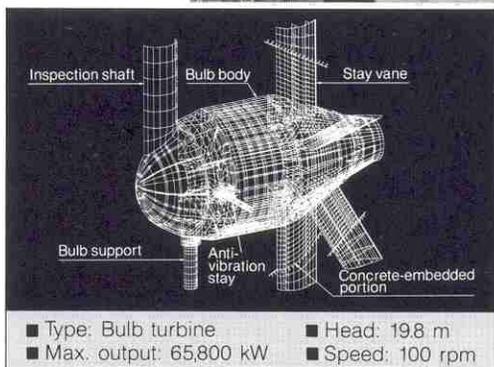
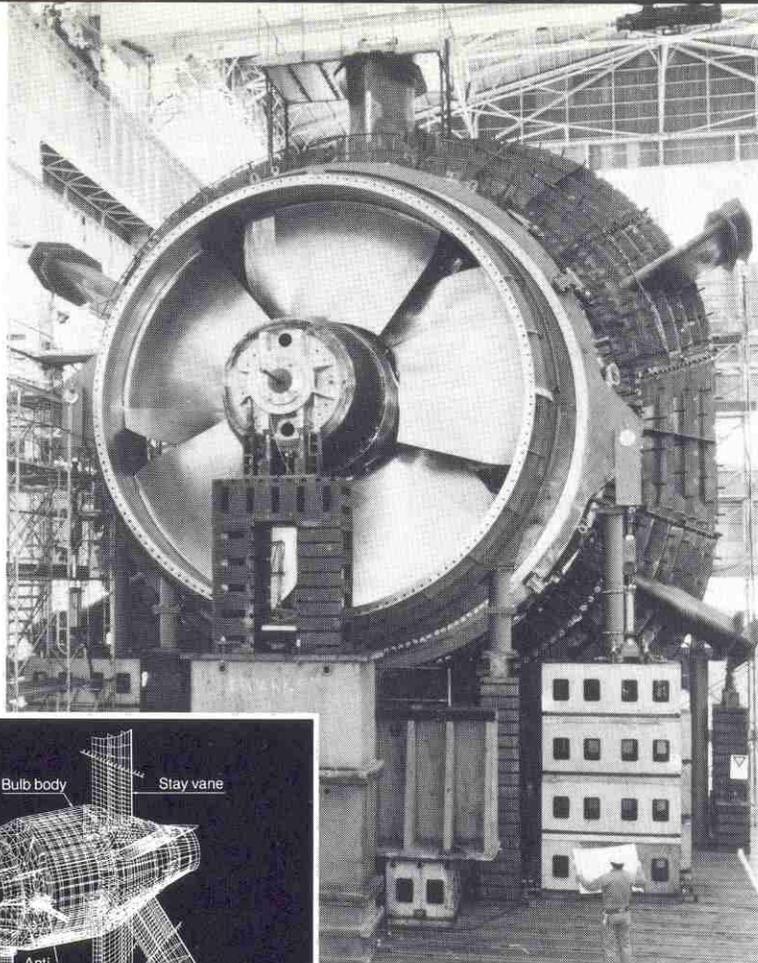


Joint design and manufacture by Riva Hydroart and DPEW
4 units manufactured by Riva Hydroart

Studio Sella

RIVA HYDROART

RIVA HYDROART S.p.A. - Via Stendhal, 34 - 20144 Milano - Tel. 02.4146.1 - Tlx: 353506 RIVAT I - Fax: 02.425749



GET THE POWER.

With the World's Largest Capacity (65,800 kW) Bulb Turbine and Generator. From Hitachi.

Through CAD systems and testing, Hitachi has succeeded in the development of a record-breaking bulb turbine and generator, featuring high performance, along with high efficiency due to less head loss. It's the optimum unit for power generation at low head sites that have a large flow.

For your next hydroelectric power project, get the power, performance, efficiency and cost effectiveness that will ensure success. Contact Hitachi—the fully integrated company with all the R&D, design and manufacturing resources needed to undertake any turbine project, including Kaplan, Francis, Pelton, diagonal flow and reversible types. Anywhere in the world.

HITACHI

For more information, please contact:

Hitachi, Ltd. International Trade Division (XE) 6 Kanda-Surugadai 4-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-10, Japan
Tel: Tokyo (03) 3258-1111 Fax: Tokyo (03) 3258-5211 Telex: J22395, J22432, J24491, J26375 HITACHY

FUJI ELECTRIC

FUJI ELECTRIC COMPANY LTD
12-1 Yurakucho 1-chome, Chiyodaku, Tokyo 100, Japon

Ken-ichi Kusaka - Mgr, Power
Eqpt Dept II, PID Int Group

Tél: 03 211 1343
Tlx: 22331
Fax: 03 211 7988

Categories of products/services available:

Acceleration monitoring equipment; Bearings, thrust; Chart recorders; Circuit breakers, air; Circuits breakers, SF6; Control systems; Convergence meters; Couplings; Data acquisition systems/loggers; Dispatching equipment; Draft tube liners; Exciters, static; Expansion joints; Flow meters; Frequency convertors; Generators, asynchronous; Generators, synchronous, external excitation; Generators, synchronous, self-excitation; Governors, electrical; Governors, electro-hydraulic; Governors, mechanical; Headcovers (turbine); Relays; Spiral casings; Stay rings; Thermometers; Transducers; Transformers, single-phase, oil-cooled; Transformers, single-phase, water-cooled; Transformers, three-phase, oil-cooled; Transformers, three-phase, water-cooled; Turbines, bulb, large; Turbines, bulb, small; Turbines, Francis, large; Turbines, Francis, small; Turbines, Pelton, large; Turbines, Pelton, small; Turbines, reversible; Valves, butterfly; Valves, dispersion (inc hollow jet); Valves, sleeve; Valves, spherical; Voltage regulators.

FORCES UNITED



By means of perfect technique, an experienced crew rides the wave of success internationally, too. Everyone masters his element being always on top also in the singles competition. For joint tasks, they are all in one boat striving for the ultimate goal.

Optimum part results are achieved by well coordinated cooperation and by joining forces they had for success.

With the product lines "turbines", "hydraulic steel structures", "penstocks" and "construction", VA M.C.E. offers a full hydro-power package. Consequently, there is only one partner for the power plant owner or operator. But for individual services, too, the purchaser will benefit from the overall know-how of the company.

In the construction of turbines, hydraulic steel structures and penstocks, these will be optimized, by means of the Finite-Elemente method, CAD/CAM and the most up-to-date design methods, both with regard to manufacture and flow properties. This provides high efficiency for economical and environmentally acceptable energy generation.

VOEST-ALPINE M.C.E.

Custom-made solutions for:
Hydro turbines and plants ●
Hydraulic steel structures ●
Penstocks ●
Service and Maintenance ●



IMPSA

HYDRAULIC ENERGY FOR THE AMERICAS PENSTOCKS, GATES and VALVES

ARGENTINA

Cabra Corral, Río Grande, Alicura, Piedra del Aguila, Arroyito, Agua del Toro, El Tigre, Ullum, Reyunos, Piedras Moras.

UNITED STATES

Truman, Bureau of Reclamation, Kaw Dam, Tunnel 1, City of New York

COLOMBIA

Guavio, Río Grande, Jaguas

ECUADOR

Agoyan

NICARAGUA

Asturias

CHILE

Colbun, Alfalfal

TURBINES AND GENERATORS

ARGENTINA

Yaciretá, Piedra del Aguila, Ullum, Arroyito, Agua del Toro, Piedras Moras, Urugua-I, Casa de Piedra.

COLOMBIA

Jaguas

UNITED STATES

Kaw Dam, Emsworth, Inglis, Spirit Mountain

BRASIL

Miranda

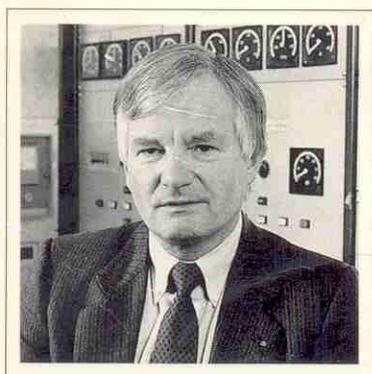
IMPSA / Ceretti 244 / Godoy Cruz, 5501 Mendoza, ARGENTINA

Fax: 005461 350378 - Phone 350600

Turbomachines hydrauliques

Choix illustré de réalisations marquantes

A la fois ouvrage de référence et document de travail, ce livre, sans aucun équivalent sur le marché, présente un vaste choix de réalisations modernes de turbomachines hydrauliques. Il est ainsi un complément aux ouvrages théoriques qui traitent de la mécanique des fluides appliquée aux turbomachines et à ceux qui décrivent les techniques de calculs pour la conception, le dimensionnement et l'utilisation des turbines et des pompes. Les exemples ont été choisis parmi tous les types de turbines: Pelton, Francis, Kaplan, hélices et leurs dérivés tels que turbines bulbes et turbines en S, ainsi que pompes-turbines. Ces exemples sont, de plus, représentatifs des techniques utilisées par tous les grands constructeurs de réputation mondiale. ■ Chaque machine est présentée par un tableau de données numériques exprimant toutes ses caractéristiques principales, ainsi que par une riche illustration. Une coupe détaillée offre notamment au lecteur une image précise des particularités constructives de la machine. Un texte donne en outre un complément d'information sur la conception, la fabrication et les essais de réception. ■ Cet ouvrage original s'adresse donc à un large public. De l'ingénieur concepteur de turbomachines hydrauliques à l'étudiant, en passant par l'ingénieur-conseil et l'utilisateur, chacun y trouvera une image de l'état de l'art dans le domaine.



Originaire de Valeyres-sous-Ursins (Vaud), Pierre Henry est né à Sainte-Croix (Vaud) le 1^{er} février 1940. Après son baccalauréat scientifique, il poursuit ses études à l'Ecole polytechnique universitaire de Lausanne (EPUL) où il devient diplômé ingénieur mécanicien en 1964.

Il commence sa carrière d'ingénieur à l'Institut de machines hydrauliques (IMH) de l'EPUL. En 1966 et 1967, il travaille au Département des turbines de Dominion Engineering Works, à Montréal. Dès 1968, il poursuit son activité à l'EPUL où il s'occupe du montage et de la mise en service du stand d'essai universel de machines hydrauliques. En 1970, il devient ingénieur en chef et dirige l'exécution de nombreux essais de réception pour des sociétés électriques du monde entier.

Dès 1979, il est professeur à l'EPFL où il dirige également l'activité de recherche de l'IMH, qui deviendra l'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides (IMHEF) en 1984.

Ses domaines de recherche sont principalement la cavitation, le comportement instationnaire des installations et des machines, ainsi que le tracé d'aubages et l'évaluation des caractéristiques des machines. A ces travaux s'ajoute une intense activité sous forme de mandats. L'IMHEF a ainsi exécuté les essais de réception de la plupart des grands aménagements hydro-électriques dans le monde, par exemple ceux d'Itaipu (Brésil) et du complexe de la Baie James (Canada).

ISBN 2-88074-209-9



9 782880 742096