

Centrale de Jebba

Etat de Kwara, Nigeria

6 turbines hélices de 96 MW

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

Conception mécanique et fabrication: Sulzer-Escher Wyss GmbH, Ravensburg, RFA

Maître d'œuvre: National Electric Power Authority, Lagos, Nigeria

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	242,2	271,2	287,3
H (m)	24,70	27,65	29,30
Q (m ³ /s)	368,5	376,5	380,0
P (MW)	84,60	96,35	102,70
D _e (m)	7,100	f (Hz)	50
D _i (m)	3,124	n (t/s; t/min)	1,56; 93,75
D _o (m)	8,485	N _{QE} (-)	0,45
B _o (m)	2,840	n _q	151
Z _r (-)	5	v (-)	0,96
Z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,551
Z _{avd} (-)	16	σ _{max} (-)	0,654

Caractéristiques

La centrale se trouve sur le Niger, près de Jebba, à 380 km au nord de Lagos. Le barrage est une digue en terre d'une longueur de 670 m, qui avec 4 barrages auxiliaires, crée un réservoir de 300 km² s'étendant sur une longueur de 100 km. L'évacuateur de crues-vidange de fond comprend 6 passes munies de vannes secteur de 12 m de largeur et 9,5 m de hauteur. Chaque passe est équipée, en plus, d'une vanne wagon à l'amont et de batardeaux à l'aval pour permettre l'entretien des vannes secteur. Le débit maximal est de 13 600 m³/s.

Généralités

L'aménagement comprend également une écluse de 12,2 m de largeur et 200 m de longueur. La différence de niveau, très importante pour une seule écluse, est de 30 m.

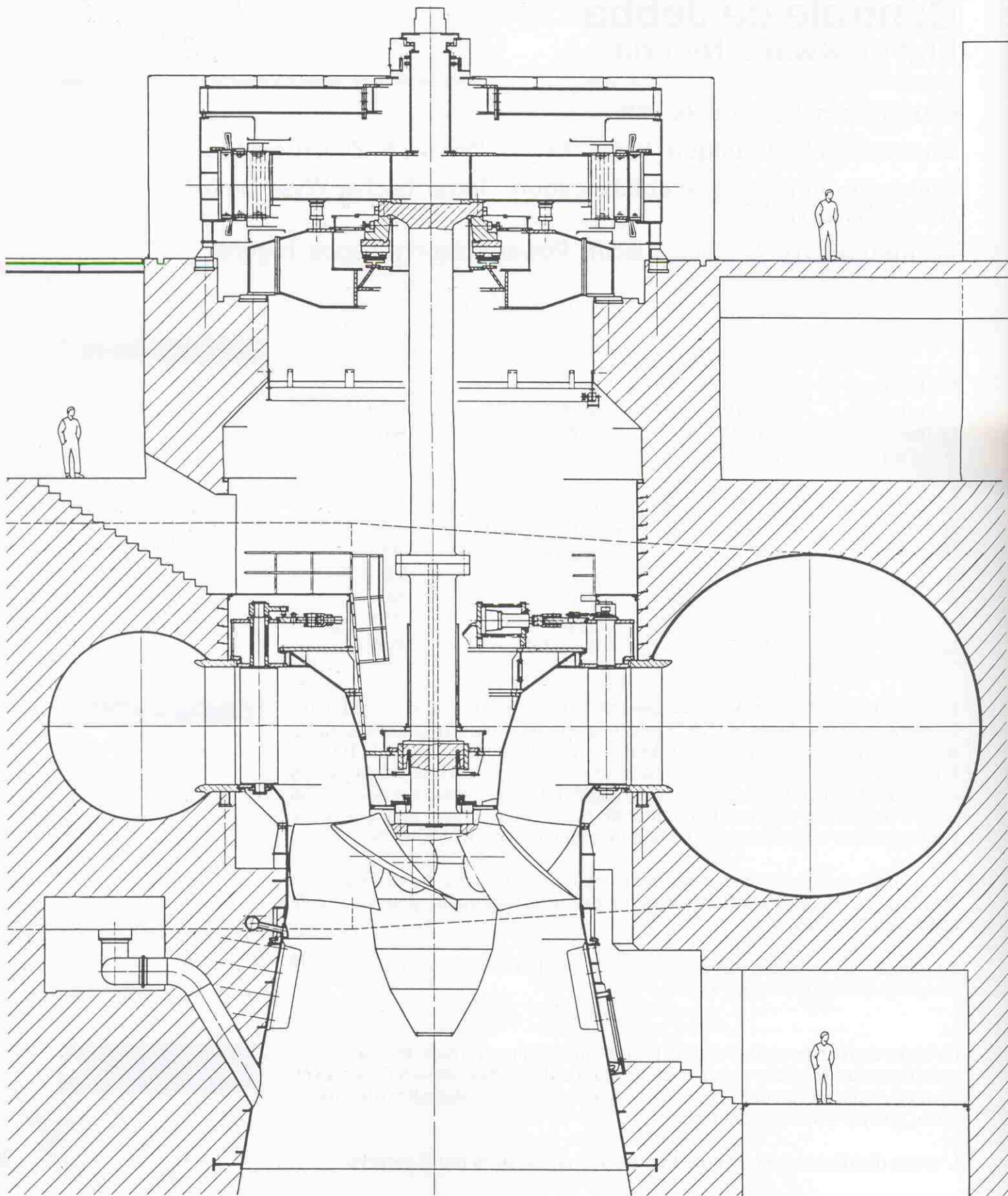
Le premier groupe a été mis en service à la fin de 1983 et les 6 unités ont été réceptionnées en décembre 1984.

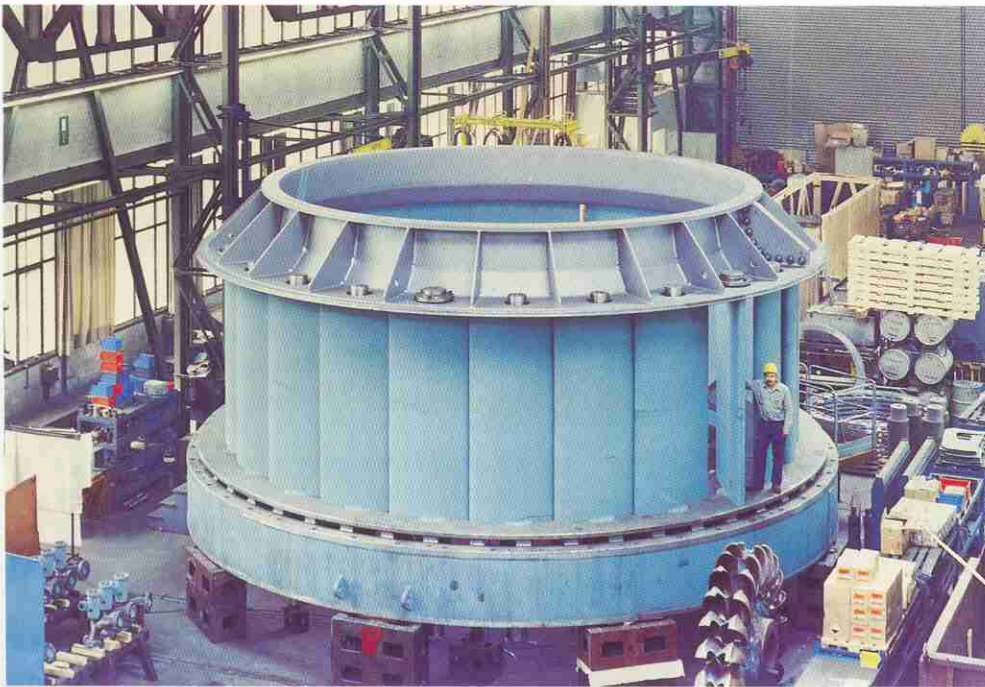
La bêche est du type spirale complète alors que pour une turbine de cette vitesse spécifique fonctionnant sous une chute maximale de 30 m environ, on prévoit en général une bêche semi-spirale en béton. La bêche a un diamètre d'entrée de 10 m; elle est divisée en 22 pièces.

Conception hydraulique

L'avant-distributeur est du type Piguet avec des aubes à profil incurvé.

Centrale de Jebba, Nigéria





1. Distributeur en position renversée lors du montage en ateliers (photo Sulzer-Escher Wyss).

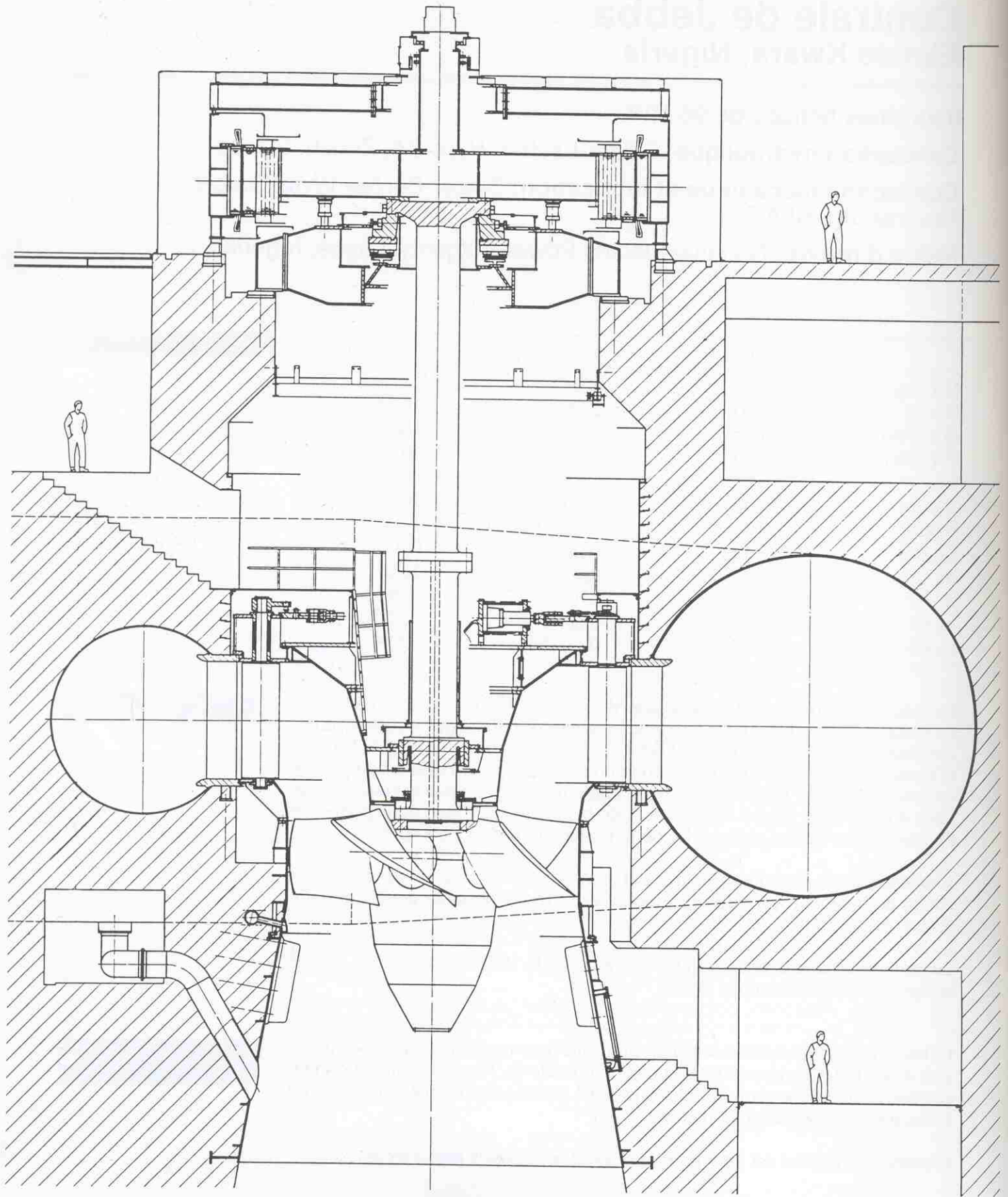


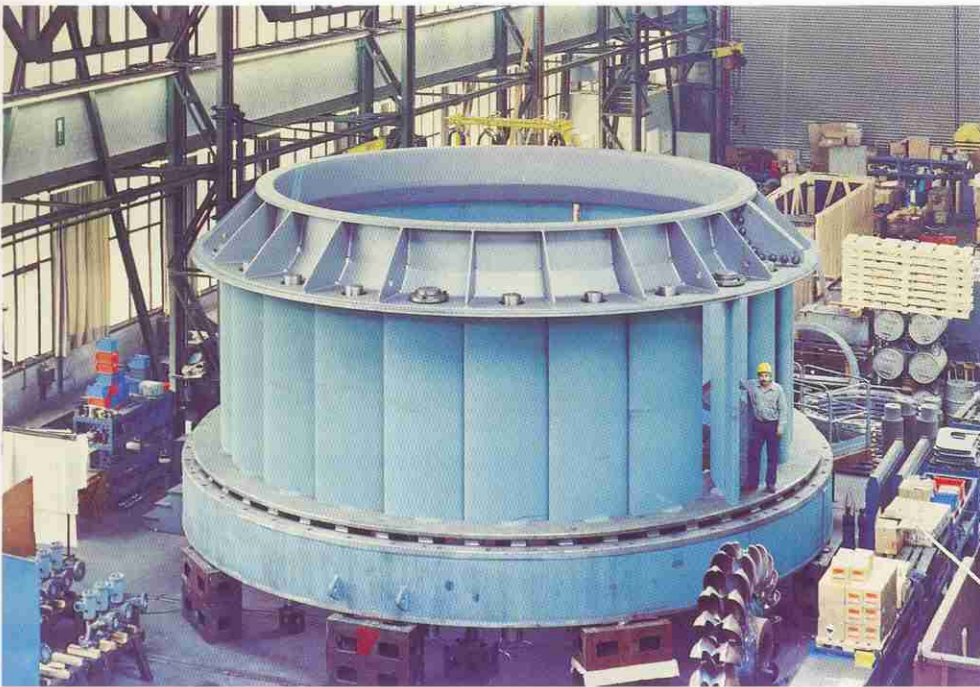
2. Roue à aubes fixes, avant soudure des lèvres anticavitation (photo Sulzer-Escher Wyss).

Les 24 aubes directrices (fig. 1) ont une épaisseur de 192 mm; l'intrados est plan. Le couple hydraulique exerce une tendance à la fermeture sur 70% de la plage de fonctionnement. L'ouverture maximale correspond à un angle de 39° et une ouverture de 636 mm. La durée de la fermeture est de 8 s pour passer de 100% à 40% d'ouverture et de 12 s pour terminer la manœuvre. Le temps d'ouverture est de 10 s.

La roue (fig. 2), du type hélice, a 5 aubes équipées de lèvres anticavitation.

Centrale de Jebba, Nigéria





1. Distributeur en position renversée lors du montage en ateliers (photo Sulzer-Escher Wyss).



2. Roue à aubes fixes, avant soudure des lèvres anticavitation (photo Sulzer-Escher Wyss).

Les 24 aubes directrices (fig. 1) ont une épaisseur de 192 mm; l'intrados est plan. Le couple hydraulique exerce une tendance à la fermeture sur 70% de la plage de fonctionnement. L'ouverture maximale correspond à un angle de 39° et une ouverture de 636 mm. La durée de la fermeture est de 8 s pour passer de 100% à 40% d'ouverture et de 12 s pour terminer la manœuvre. Le temps d'ouverture est de 10 s.

La roue (fig. 2), du type hélice, a 5 aubes équipées de lèvres anticavitation.

Conception mécanique

Le cône du diffuseur est muni de 8 ailettes radiales (fins) qui ont pour but de diminuer les fluctuations de pression. La trompette a un seul pilier central et des rainures de batardeau. La profondeur relative $\frac{\Delta Z_d}{D_e}$ est de 2,8.

La bête spirale, dont les dimensions hors tout sont 26,630 m par 22,330 m a une masse de 200 t. Assemblée et soudée sur le site, les cordons de soudure sont traités thermiquement.

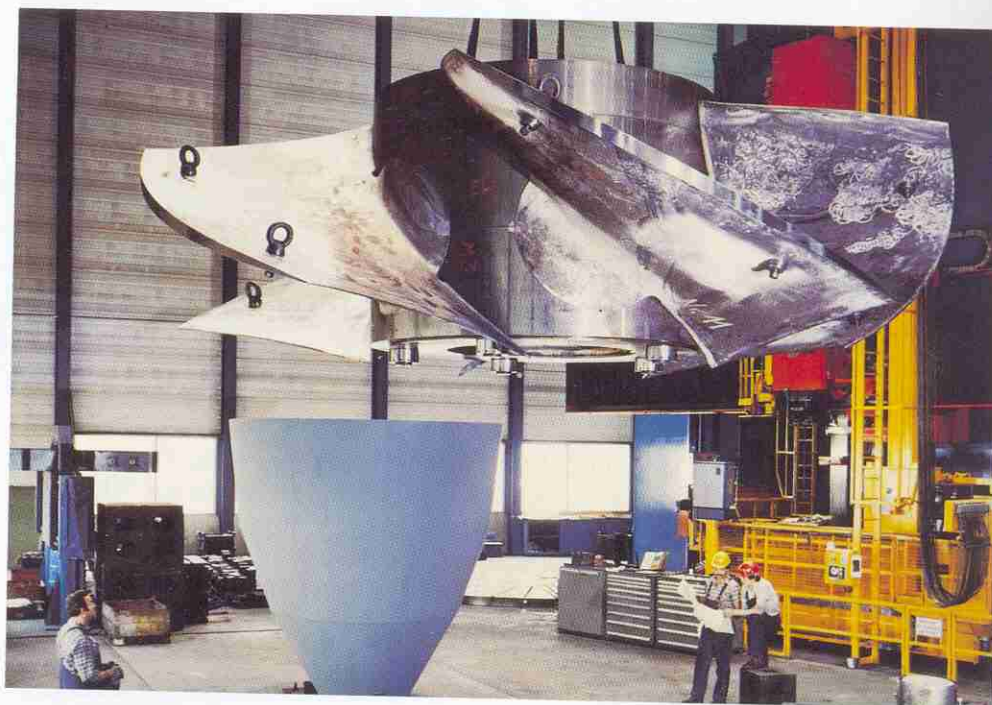
L'avant-distributeur est constitué de deux anneaux en tôle de 200 mm d'épaisseur en acier Ac 37, et de 16 entretoises. Sa masse est de 150 t. Il est divisé en 4 parties assemblées, par boulonnage et soudure, sur le chantier.

Les aubes directrices sont en acier coulé; elles ont une masse de 4760 kg. Les tourillons ont des douilles en acier inoxydable, alors que les paliers sont en téflon. Le cercle de vannage, actionné par 4 servomoteurs, commande les aubes par un système de leviers et de biellettes de rupture.

La roue a une masse totale de 89 t. Les aubes, munies de tourillons, ont une masse de 9,7 t. Elles sont en acier coulé au chrome-nickel, alors que le moyeu, également coulé, est en acier au chrome-manganèse. Le moyeu est coupé en 2 parties au droit de l'axe des tourillons des aubes et assemblé par 5 boulons axiaux M 160 précontraints (fig. 3). Le cône, d'une masse de 7 t, est en acier soudé.

Le diffuseur est blindé sur une hauteur de 5,800 m.

3. Aubes et moyeu de la roue. On remarquera le moyeu en 2 parties et les 5 boulons d'assemblage M 160 (photo Sulzer-Escher Wyss).



Le couvercle de la turbine, d'une masse totale de 72 t, est en construction mécano-soudée. Il a un diamètre de 9,900 m et une hauteur de 1,190 m. Il est divisé en 2 parties assemblées sur le site avec des boulons précontraints.

Le fond inférieur, d'un diamètre extérieur de 9,580 m et d'une hauteur de 1,025 m, également en construction mécano-soudée, a une masse de 30 t. Il est divisé en 2 parties pour le transport et assemblé sur le chantier par des boulons précontraints (voir fig. 1).

L'arbre complet, en acier forgé CK 35 N, est constitué de deux parties: l'une, côté roue, de 6,441 m de longueur et de 1,100 m de diamètre et l'autre, côté générateur de 8,700 m de longueur. Elles sont assemblées par boulons précontraints. La masse de l'arbre-turbine est de 58 t.

Le palier inférieur est situé à l'intérieur du couvercle de la turbine. D'une hauteur de 625 mm, il a un diamètre de 1500 mm et un jeu compris entre 0,6 et 0,8 mm. La lubrification se fait à travers 24 trous percés dans la cloche de l'arbre, en utilisant la force centrifuge.

Le joint d'arbre est constitué d'un anneau téflon divisé en 4 parties et pressé par des ressorts contre un anneau en acier inoxydable en 2 pièces. Le joint est arrosé en permanence par un débit d'eau filtré.

- G.C. Mac Tavish et W.G. Matthews. The Jebba hydroelectric development. Water Power and Dam Construction, september 1985.

Bibliographie

Centrale de Machicura

VII Région del Maule, Chili

2 turbines Kaplan de 48 MW

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

Maître d'œuvre: Empresa Electrica Colbun Machicura S.A., Santiago du Chili, Chili

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	333,5	360,0	369,7
H (m)	34,0	36,7	37,7
Q (m ³ /s)	150	144,2	142,0
P (MW)	46,55	48,40	49,00
D _e (m)	4,200	f (Hz)	50
D _i (m)	1,932	n (t/s; t/min)	3,13; 187,5
D _o (m)	7,200	N _{QE} (-)	0,45
B _o (m)	1,323	n _q	151
z _r (-)	5	v (-)	0,96
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,44
z _{avd} (-)	23	σ _{max} (-)	0,49

Caractéristiques

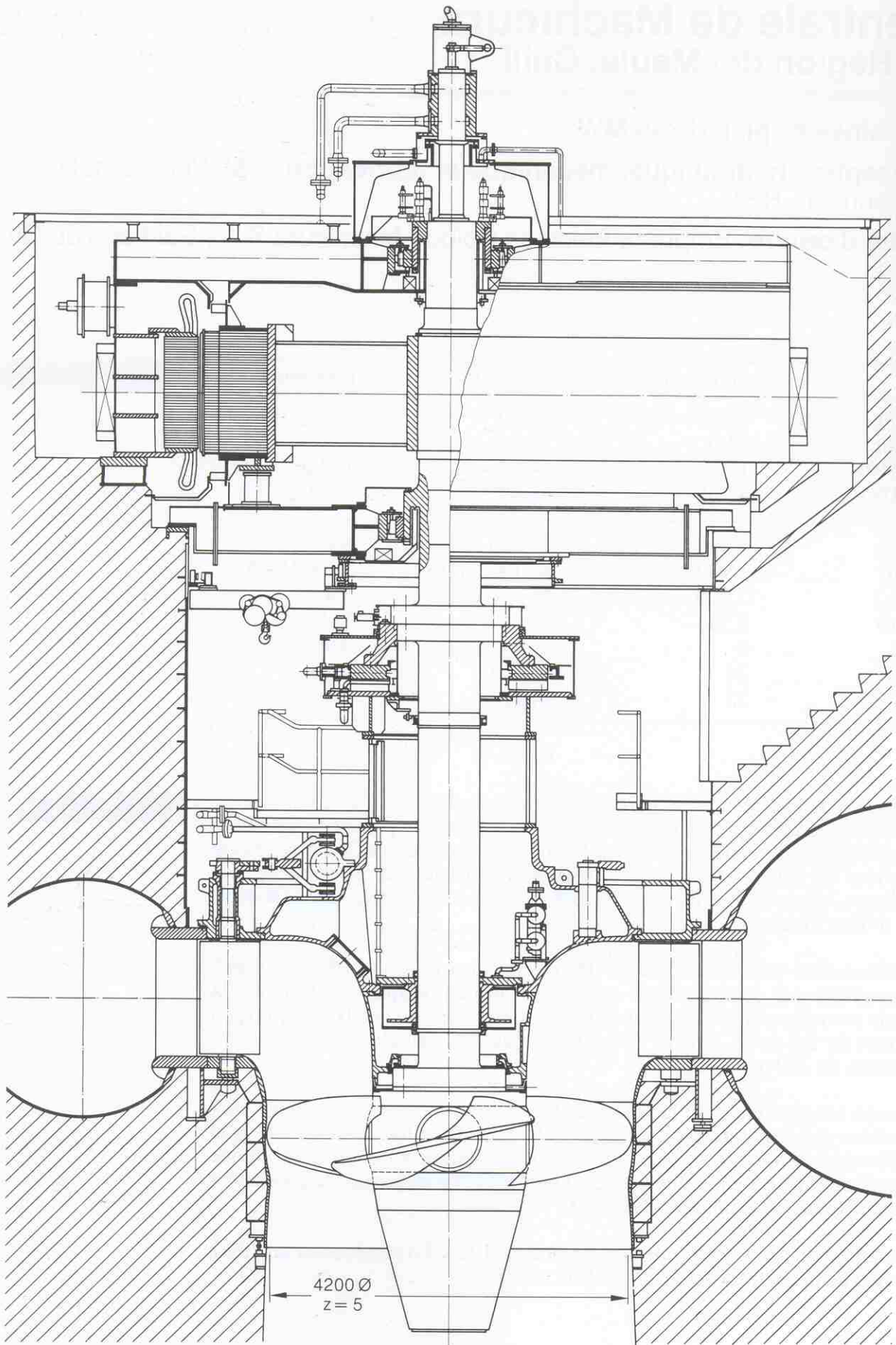
La centrale de Machicura fait partie, avec celle de Colbun, d'un complexe de deux centrales, d'une puissance totale de 490 MW, situé au pied de la cordillère des Andes, à environ 300 km au sud de Santiago. La centrale de Colbun exploite une chute de 170 m, située entre deux lacs artificiels, alors que celle de Machicura, située à l'aval du second lac, a pour fonction de régulariser le débit de la rivière Maule.

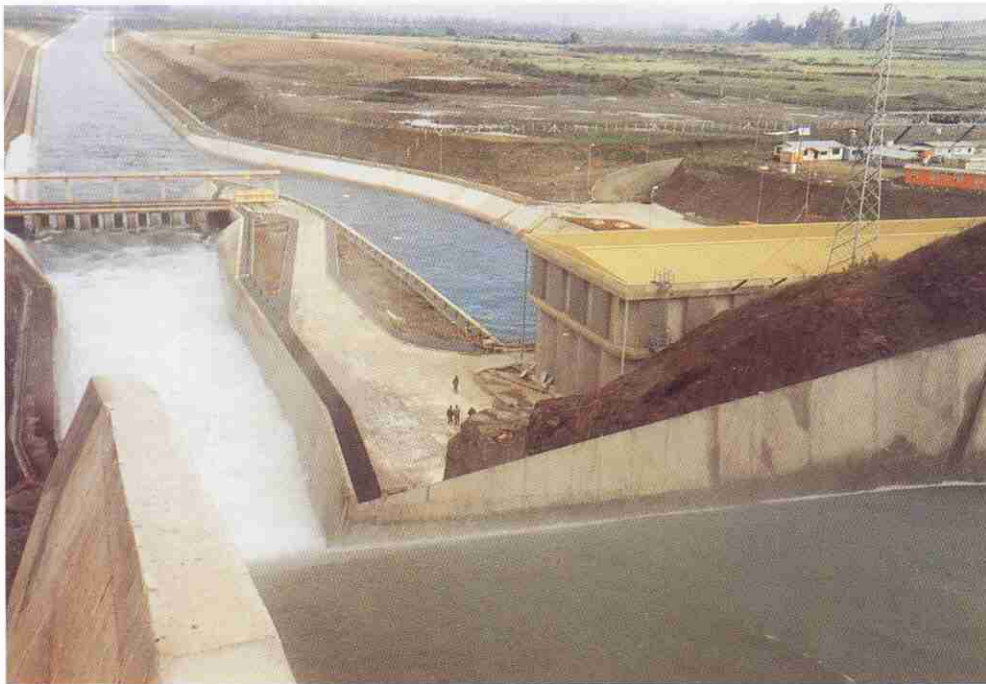
La retenue, d'un volume total de $55 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et d'un volume utile de $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, est constituée par deux barrages en terre au milieu desquels se trouvent la centrale en surface et l'évacuateur de crues du type saut de ski. Il est équipé de 2 vannes de 6,6 m de largeur et 6,0 m de hauteur, calculées pour un débit maximum de 280 m³/s (fig. 1).

La coupe longitudinale de la centrale (fig. 2) montre que les turbines sont alimentées par deux tunnels d'adduction obliques d'une longueur de 205 m et d'un diamètre de 8,4 m. La partie terminale, d'une longueur de 26 m, est blindée et a un diamètre de 5,6 m. Une vanne wagon permet d'en fermer l'entrée, alors que le diffuseur est muni de batardeaux.

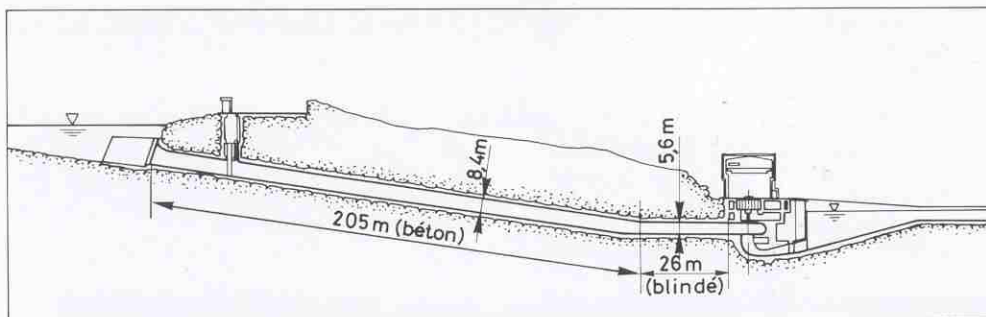
La première machine a été mise en service en 1985. La production annuelle moyenne de la centrale est de 550 GWh.

Généralités





1. Evacuateur de crues et, à droite, bâtiment de la centrale (photo IMHEF).



2. Coupe longitudinale de la centrale (document Empresa Electrica Colbun Machicura).

La bête spirale a un diamètre d'entrée de 5,600 m; elle comprend 24 viroles.

L'avant-distributeur est du type Piguet avec des avant-directrices profilées et courbées sur les 2 faces. Les bourrelets sont toriques.

Les aubes directrices ont une épaisseur maximale de 137 mm pour une longueur de 700 mm. Le distributeur a une tendance à la fermeture dans tout le domaine de fonctionnement.

Le manteau de la roue est cylindro-sphérique. Le diffuseur a une profondeur relative assez faible de $\frac{\Delta Z_d}{D_e} = 2,40$. La trompette est divisée par un pilier central en 2 canaux munis de rainures de batardeaux. La section de sortie est rectangulaire, avec 4,50 m de hauteur et 13,00 m de largeur.

Les essais sur modèle réduit ont été effectués dans le laboratoire de Voith, à Heidenheim en présence d'un représentant d'Endesa, sous la supervision de

**Conception
hydraulique**

l'IMHEF. Le modèle avait un diamètre $D_e = 340$ mm. Le programme comprenait les essais suivants:

- rendement et puissance sous une chute d'essai de $H = 15$ m;
- cavitation en 9 points de fonctionnement sous une chute d'essai de $H = 15$ m;
- emballement;
- fluctuations de pression;
- couple statique et fluctuant sur 8 aubes du distributeur;
- étalonnage des prises de pression Winter-Kennedy.

Conception mécanique

La bêche spirale, d'une masse de 56 t, est constituée de 33 pièces soudées sur le site. Ses dimensions hors tout sont de 19,0 m par 15,0 m.

L'avant-distributeur, d'une masse de 49 t, est en tôle d'acier TT St E 36. Ses aubes ont 84 mm d'épaisseur.

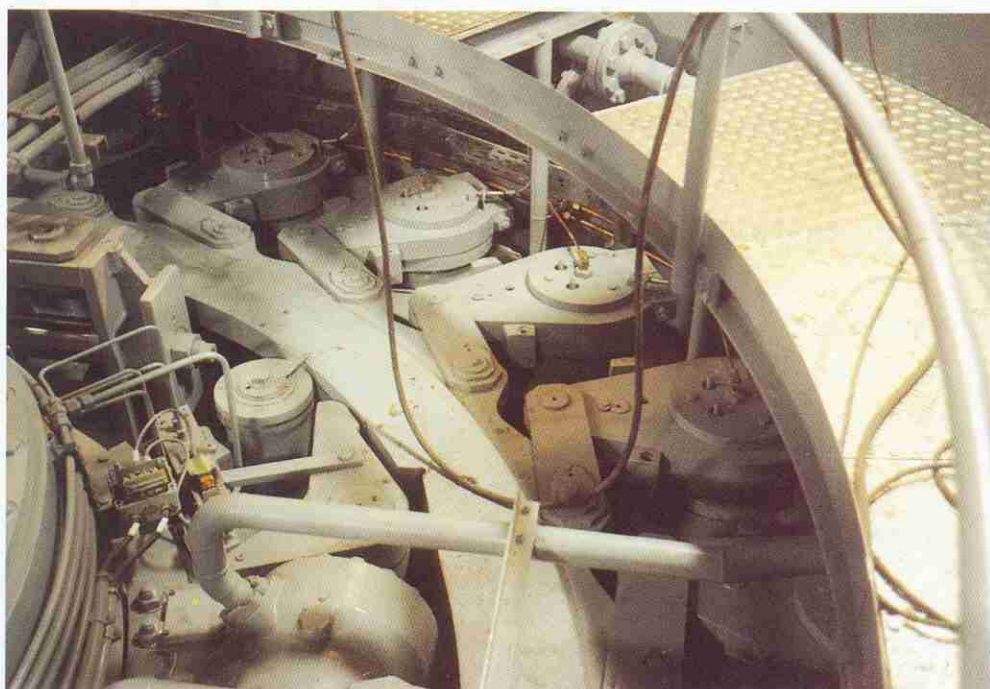
Les aubes directrices (fig. 3) sont en acier inoxydable G-X5 Cr Ni 13.4. Elle ont une masse de 830 kg. Leurs paliers sont autolubrifiés; l'étanchéité est obtenue à l'aide de joints toriques. Le distributeur est actionné par 4 servomoteurs agissant sur un cercle de vannage. Les aubes sont protégées par des tiges de rupture (fig. 4).

Le contrôle dimensionnel de la roue a été effectué par l'IMHEF. Les pales (fig. 5) sont en acier inoxydable G-X5 Cr Ni 13.4 coulé. La masse totale de la roue est de 31 t.

Le couvercle de la turbine a un diamètre de 5,750 m et une masse de 34,4 t. Il est en acier GS 20 Mn 5, coulé.

3. Distributeur en cours de prémontage en ateliers. On distingue les 4 servomoteurs et le cercle de vannage (photo Voith).





4. Vue du mécanisme de commande des aubes directrices complètement monté en centrale (photo IMHEF).



5. Roue en cours de finition (photo Voith).

L'anneau inférieur a un diamètre de 5,54 m et une masse de 11,1 t. Il est en construction mécano-soudée en acier R St 37-2.

L'arbre de la roue, en acier forgé CK 35, est accouplé à l'arbre du générateur au droit de la butée. Il a une masse de 17 t et une longueur de 5,325 m; son diamètre intérieur est de 750 mm, et son diamètre extérieur de 1300 mm. Il est maintenu radialement par 3 paliers dont un palier turbine situé juste au-dessus de la roue.

Le diffuseur est blindé sur une longueur de 7 m, mesurée horizontalement depuis l'axe de la roue, avec de la tôle d'acier R St 37-2.

Centrale de Ligga III

Comté de Norrbottens, Suède

1 turbine Kaplan de 182 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Kvaerner Turbin AB, Trollhättan, Suède

Maître d'œuvre: Swedish State Power Board, Stockholm, Suède

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	345,3	382,6	384,5
H (m)	35,2	39,0	39,2
Q (m ³ /s)	535	516	516
P (MW)	168,4	181,7	182,6
D _e (m)	7,500	f (Hz)	50
D _i (m)	3,850	n (t/s; t/min)	1,79; 107,1
D _o (m)	8,354	N _{QE} (-)	0,47
B _o (m)	2,700	n _q	156
z _r (-)	5	v (-)	0,99
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,612
z _{avd} (-)	19	σ _{max} (-)	0,722

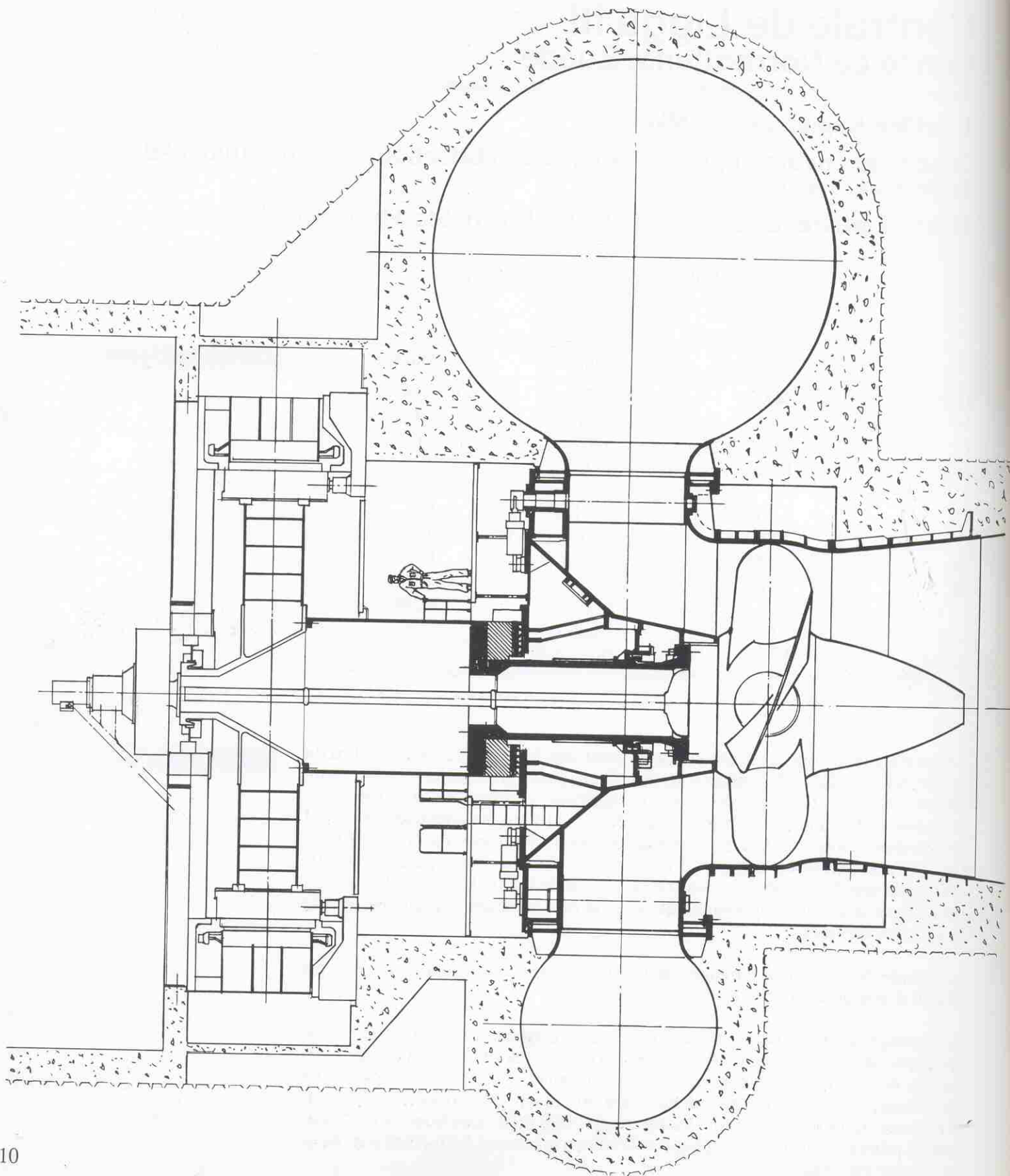
Caractéristiques

La centrale de Ligga est située sur la rivière Lule, à environ 25 km au nord du cercle polaire. Les 15 centrales hydro-électriques qui se trouvent sur cette rivière fournissent le quart de l'énergie électrique consommée en Suède dans une année moyenne. La première partie de la centrale a été construite au début des années 50 avec deux turbines Kaplan de 83 MW mises en service en 1954. La nouvelle extension comprend une centrale souterraine appelée Ligga III (fig. 1), et une élévation du niveau de la retenue de 0,8 m. La nouvelle centrale est équipée d'une turbine Kaplan qui était la plus puissante du monde lors de sa mise en service.

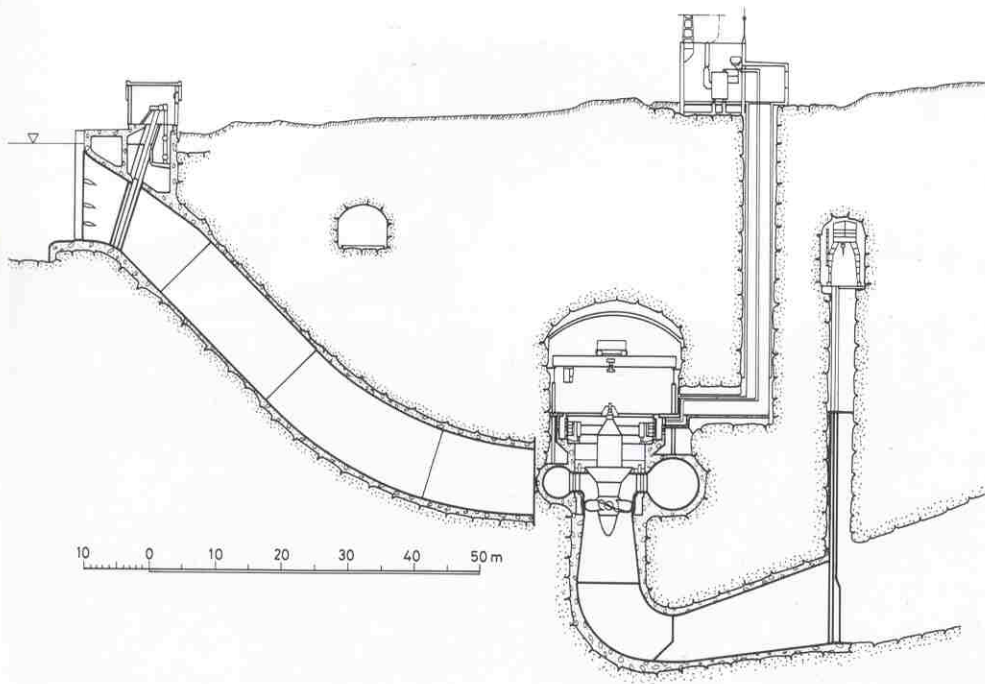
Généralités

La galerie de fuite a une longueur de 1140 m et une section de 322 m². Elle est munie d'une chambre d'équilibre.

Le barrage, du type poids, avec un noyau imperméable en moraine, a une longueur de 352 m et une hauteur de 35 m. L'évacuateur de crues comprend 4 passes de 20 m de largeur, dont 3 sont munies d'une vanne secteur. La quatrième, équipée de batardeaux seulement, n'est utilisée qu'en cas d'urgence. Leur débit total maximum est de 3000 m³/s. Les trois vannes ainsi que les piliers de guidage sont chauffables électriquement. La turbine a été mise en service en 1982.



1. Coupe schématique de la centrale (document Kvaerner Turbin).



La bêche spirale, constituée de 24 viroles soudées, a un diamètre d'entrée de 9,94 m et une largeur hors tout de 26,9 m.

L'avant-distributeur à double courbure a des entretoises de deux types différents (12 + 7), qui ont un profil incurvé; elles sont chanfreinées sur leur bord de fuite.

Les aubes directrices ont une épaisseur de 294 mm. Elles sont à double courbure, avec une tendance à la fermeture sur toute leur plage d'utilisation.

Les pales de la roue (fig. 2) ne sont pas munies de lèvres anti-cavitation, ce qui est une caractéristique particulière pour la chute relativement élevée de Ligga III.

Le diffuseur a un rapport profondeur-diamètre de 3,16. La trompette, étroite, est construite sans pilier.

Les essais de réception sur modèle ont été réalisés dans le laboratoire du maître d'œuvre, à Motala, en Suède.

Les performances du prototype se sont révélées très satisfaisantes, notamment en ce qui concerne les dégâts de cavitation. En effet, lors de la première révision en 1987, après 5 ans (environ 27 000 h) de fonctionnement, les dégâts de cavitation ont été réparés avec seulement 5 kg d'acier inoxydable dont 1/3 pour la roue, le reste pour le manteau. La masse érodée tolérée par la norme CEI 609, pour une machine des dimensions de Ligga III et pour une durée de fonctionnement équivalente, est de 110 kg.

Conception hydraulique

2. Roue en voie de finition en atelier. Diamètre 7,5 m, masse totale 191 t (photo Kvaerner Turbin).



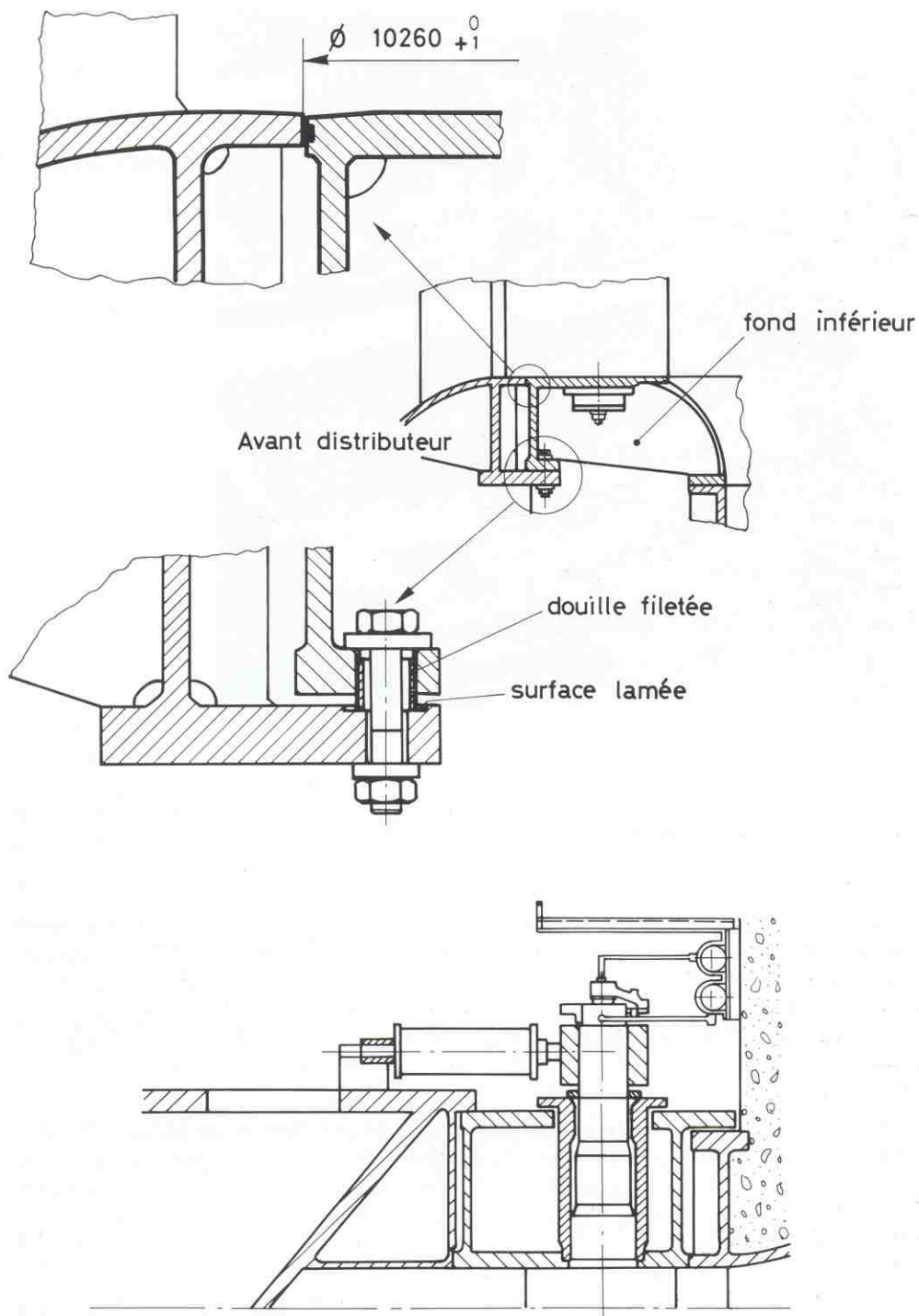
Conception mécanique

Les 24 viroles de la bêche ont été soudées sur le site.

L'avant-distributeur, d'une masse de 180 t, est fabriqué en 6 parties, transportées puis soudées entre elles et avec la bêche spirale sur le site. Une fois le béton coulé, on obtient un ensemble très rigide. Grâce à une colonne centrale provisoire, on exécute le découpage final au chalumeau oxyhydrique et l'usinage des portées du distributeur. Des douilles filetés (fig. 3) sont utilisées pour mettre de niveau et pour régler la hauteur du couvercle et du fond inférieur. Les aubes directrices sont ensuite usinées en longueur pour obtenir les jeux prévus aux extrémités. Les dimensions peuvent ainsi être garanties avec une excellente précision, ce qui facilite l'assemblage avec le distributeur et le couvercle de la turbine en évitant les retouches habituelles.

Les aubes directrices, en construction soudée, sont en acier SIS 143. Elles ont une masse de 4 t chacune. Les parties en contact avec les aubes adjacentes, de même que les tourillons, sont recouverts d'acier inoxydable. Les paliers sont auto-lubrifiés. Les aubes sont équipées d'un servomoteur individuel (fig. 4). On évite ainsi le cercle du distributeur, ce qui permet de placer la butée directement sur le fond de la turbine. Le groupe est ainsi bien plus compact. Il faut remarquer que le niveau de l'alternateur se situe en dessous du niveau maximal aval, ce qui est contraire à la pratique traditionnelle ancienne qui consistait à placer l'alternateur en dessus du niveau aval maximal.

Les servomoteurs sont des vérins à huile commandés par des vannes (fig. 5). Ces vannes sont munies de cames reliées, par l'intermédiaire d'une série de barres formant un cercle, à l'actuateur électrohydraulique central délivrant une force minimale de 35 kN.



3. Détail de conception du système de réglage de la position du couvercle et du fond inférieur de la turbine (d'après un document Kvaerner Turbin).

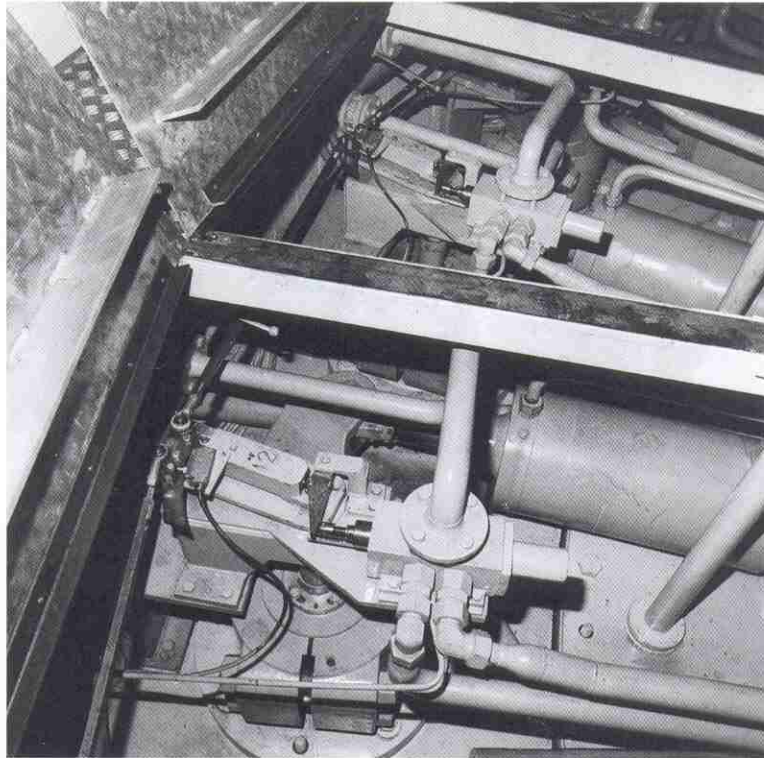
4. Schéma du système de commande des aubes du distributeur (d'après un document Kvaerner Turbin).

Les aubes directrices ont une tendance à la fermeture dans tout le domaine de fonctionnement, ce qui évite l'installation d'un système de blocage.

Les 5 pales de la roue sont coulées en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Le moyeu est en acier SIS 1306. La masse totale de la roue est de 191 t.

Le servomoteur de commande des pales est situé dans le moyeu de la roue. La tête de distribution d'huile est placée au-dessus de l'alternateur.

5. Système de commande des aubes directrices par servomoteurs individuels. On distingue les tiges et les cames de synchronisation. (photo Kvaerner Turbin).



Le couvercle de la turbine a un diamètre de 10,7 m et une masse de 78 t. Il est fabriqué en construction soudée en acier SIS 2171. Les 4 sections sont assemblées par boulonnage sur le site.

L'arbre est exécuté en deux parties, assemblées au niveau du pivot. La partie supérieure, composée d'un tube en tôle de 60 mm d'épaisseur et de 2 brides en acier coulé, a un diamètre de 3600 mm et une longueur de 4200 mm pour une masse de 52 t. La partie inférieure, d'une masse de 34 t, est forgée d'une pièce. Son diamètre est de 1800 mm, son épaisseur de paroi de 110 mm et sa longueur de 5 m.

Le groupe comporte 2 paliers. Le palier turbine est situé juste au-dessus de la roue. D'un diamètre de 2080 mm, il comporte 28 patins ajustables séparément pour régler le jeu. La pression nécessaire à la circulation de l'huile dans le palier et dans les échangeurs de chaleur est fournie directement par la rotation de l'arbre.

La butée est conçue par une charge axiale totale de 22 600 kN dont 14 200 kN de poussée hydraulique.

Bibliographie

- P.G. Fällström. Turbine developments on the Lule River. Water Power and Dam Construction, March 1982.
- G.B. Benkö, C.E. Ringholm, E.F. Säaw, T.E. Vallebrant. The 182 MW Kaplan turbine of Ligga III power station. International Symposium on Large Hydraulic Machinery and Associated Equipments. 1989, Beijing, China.
- Technical data Ligga, Statens Vattenfallswerk.

Centrale de Manavgat

Région de Pamphylie, Turquie

2 turbines Kaplan de 22 MW

Conception hydraulique et mécanique: Hydro Vevey SA, Vevey, Suisse

Fabrication: Hydro Vevey SA, Güris, Ankara, Turquie

Maître d'œuvre: Kepez ve Antalya Havalisi Elektrik Santrallari T.A.S., Antalya, Turquie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	90,25	204,05	222,70
H (m)	9,2	20,8	22,7
Q (m ³ /s)	115	115	130
P (MW)	8,92	21,80	24,00
D _e (m)	4,340	f (Hz)	50
D _i (m)	1,860	n (t/s; t/min)	2,5; 150
D _o (m)	5,400	N _{QE} (-)	0,50
B _o (m)	1,735	n _q	165
z _r (-)	5	v (-)	1,05
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,57
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	1,54

Caractéristiques

La rivière Manavgat, au sud de la Turquie, se jette dans la Méditerranée près de la ville de Manavgat, à environ 80 km d'Antalya. L'aménagement se situe à 18 km à l'aval de la centrale d'Oymapinar et à 15 km de l'embouchure. Le barrage est constitué d'une digue en terre de 29 m de hauteur et de 360 m de longueur. La retenue a un volume de $88 \cdot 10^6$ m³. La centrale est à ciel ouvert. Les turbines sont alimentées par des conduites presque horizontales (fig. 1).

Généralités

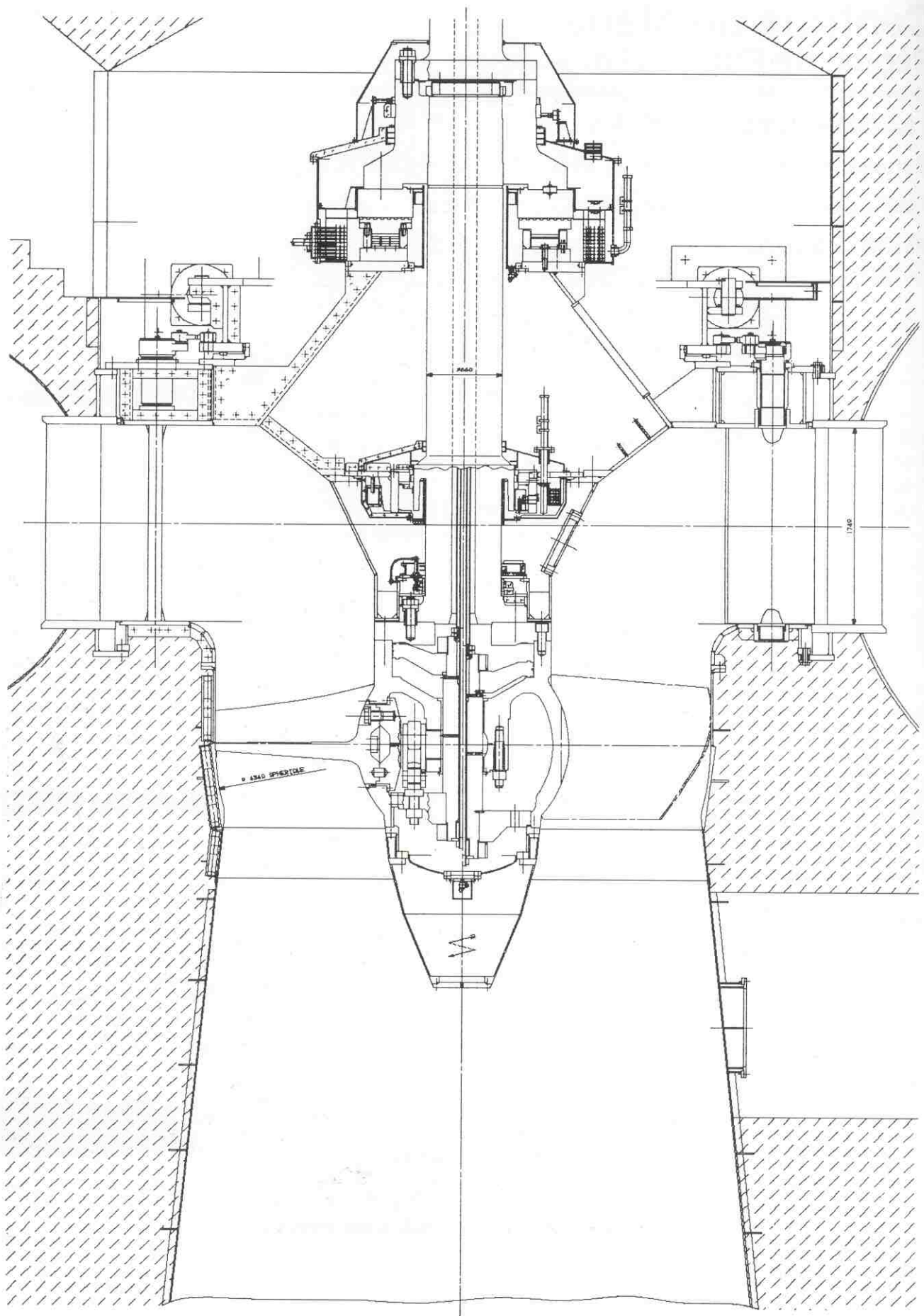
L'évacuateur de crues comporte 3 passes, équipées de vannes secteur, dimensionnées pour un débit maximal de 4000 m³/s.

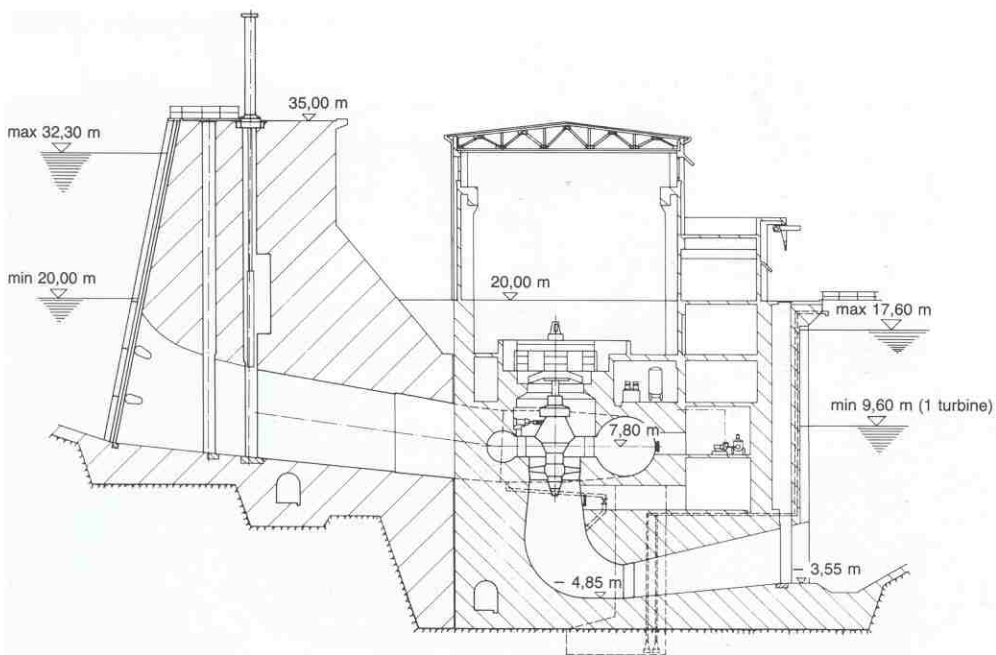
Les machines ont été mises en service en 1987 et 1988. La production annuelle moyenne est de 220 GWh.

Les conduites sont blindées entre la vanne de sécurité et la bêche spirale, par une construction en tôle soudée, passant de la section rectangulaire de la vanne à une section circulaire de 6 m de diamètre à l'entrée de la turbine (fig. 1).

Conception hydraulique

La bêche spirale (fig. 2), divisée en 24 viroles, est du type Piguet. Son diamètre d'entrée est de 5,940 m et ses dimensions hors tout de 16,5 m par 14,20 m.





1. Coupe de l'aménagement (document Hydro Vevey).



2. Bâche spirale et avant-distributeur en cours de prémontage en ateliers (photo Hydro Vevey).



3. Prémontage des diffuseurs en ateliers (photo Hydro Vevey).

L'avant-distributeur se compose de 2 semelles chanfreinées et d'avant-directrices à profil incurvé. Le manteau de la roue est cylindro-sphérique. Les pales sont munies de lèvres anticavitation.

Le diffuseur a un coude du type tulipe (fig. 3) d'une profondeur relative $\frac{\Delta Z_d}{D_e} = 2,91$; un pilier central est disposé dans le tronçon aval.

Le groupe turbine-alternateur est guidé par 2 paliers. Le palier inférieur est situé au-dessus de la roue, dans le fond central de la turbine. Le palier supérieur est incorporé au croisillon inférieur de l'alternateur. Le pivot du groupe se trouve entre les 2 paliers; il est prévu pour une charge de 500 t.

Le montage sur le site a nécessité des dispositions particulières en vue d'en réduire la durée. Il a été réalisé par Güris sous la supervision d'Hydro Vevey. Contrairement à la pratique courante, le montage s'est effectué en parallèle avec la construction de la centrale, ce qui a posé des problèmes de levage. Les aspirateurs, préassemblés en ateliers, ont été mis en place par petits éléments à l'aide d'une grue de chantier. Toutes les soudures ont été exécutées sur le site.



4. Montage en centrale, de la roue, de l'arbre et du cône supportant le pivot (photo Hydro Vevey).

Pour permettre le montage rapide des bâches spirales, une plage extérieure, munie d'une voie de roulement provisoire destinée au pont roulant, a été créée en prolongement de la future centrale. Au fur et à mesure de l'avancement de la construction du bâtiment, la voie de roulement était prolongée vers l'intérieur de la centrale. Le montage de la première bâche spirale a débuté à l'aide d'une grue mobile, le pont roulant n'étant pas encore en service. Lorsque la voie de roulement a atteint l'emplacement final de la bâche spirale, celle-ci était prête à être descendue dans sa fosse.

La bâche spirale, d'une masse de 78 t, est en acier St 37-2. Les viroles sont soudées en ateliers par groupes de 3 ou 4, puis assemblées sur le site.

L'avant-distributeur, également en acier St 37-2, est exécuté en 2 pièces en ateliers, puis soudé sur le site. Les 2 anneaux ont une épaisseur de 70 mm et la masse totale de l'avant-distributeur est de 36,5 t.

**Conception
mécanique**

Les aubes du distributeur, d'une masse de 1,05 t chacune, sont réalisées en acier forgé St 52-3. Elles sont guidées par 3 paliers autolubrifiants en «Fiberglide». Le cercle de vannage est actionné par 2 servomoteurs à double effet. Les aubes sont protégées par des biellettes de rupture à raison d'une aube sur 2 pour éviter une rupture en cascade.

La roue a une hauteur de 3,245 m et une masse totale de 31,5 t. Les pales sont en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni et le moyeu est en acier 20 Mn 5.

Le servomoteur est composé d'un cylindre et d'un piston situés au-dessus de l'axe des pales et d'un croisillon, relié aux leviers des tourillons par des biellettes et placé en dessous de l'axe des pales. Le servomoteur est alimenté par des tubes d'adduction d'huile, d'une longueur de près de 13 m, qui conduisent l'huile du chapeau de réglage au sommet du groupe jusqu'au cylindre dans la roue. La pression de service est de 50 bar.

Le couvercle de la turbine est composé d'un anneau de distributeur, vissé sur l'avant-distributeur et sur le fond central de la turbine comprenant le cône-support de la butée axiale et le support du palier de turbine.

Ces 2 pièces, d'une masse totale de 20 t, sont exécutées en construction mécano-soudée en acier St 37-2; elles sont divisées en 2 parties boulonnées sur le chantier.

Le fond inférieur ainsi que le manteau de la roue sont bétonnés.

L'arbre de la turbine est fabriqué en acier forgé 42 Cr Mo 4, sa masse est de 13 t pour une longueur de 4,810 m. Le plateau d'accouplement de la roue a un diamètre de 1200 mm alors que le manchon de la butée axiale fait office de plateau d'accouplement pour l'alternateur. Il est à noter que ce manchon, en acier forgé 20 Mn 5, d'une masse de 9,3 t, est fixé à l'arbre par un cône sans clavette et monté par pression d'huile selon le système SKF.

Le joint d'arbre est un joint plan avec un anneau en carbone.

Bibliographie

- D. Schuseil. L'aménagement hydroélectrique de Manavgat. Bulletin technique Vevey, 1988.

Centrale de Limestone

Province du Manitoba, Canada

10 turbines hélices de 125,4 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

GE Canada, Ateliers d'Ingénierie Dominion (AID), Lachine, Canada

Maître d'œuvre: Manitoba Hydro, Winnipeg, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	252,0	270,7	276,5
H (m)	25,7	27,6	28,2
Q (m ³ /s)	485	500	500
P (MW)	114,0	125,4	128,8
D _e (m)	7,938	f (Hz)	60
D _i (m)	2,728	n (t/s; t/min)	1,5; 90,0
D _o (m)	9,364	N _{QE} (-)	0,50
B _o (m)	3,238	n _q	167
z _r (-)	5	v (-)	1,06
z _o (-)	20	σ _{min} (-)	0,657
z _{avd} (-)	20	σ _{max} (-)	0,721

Caractéristiques

La centrale de Limestone se trouve dans la province du Manitoba, au centre du Canada, à 750 km au nord de Winnipeg. Elle se situe sur la Nelson River, dont le bassin versant couvre une superficie de plus de 1 000 000 kilomètres carrés. Son débit moyen est de 1900 m³/s.

Généralités

La figure 1 montre l'ensemble du complexe hydroélectrique de la rivière Nelson et de ses affluents entre le lac Winnipeg et la Baie d'Hudson.

Le barrage, digue en terre, a une longueur de 800 m pour une hauteur de 40 m. L'évacuateur de crues est équipé de 7 vannes de 13 m de largeur; il est dimensionné pour un débit total de 9500 m³/s.

La centrale, aménagée en surface, a une longueur de 299 m pour une largeur de 56,5 m.

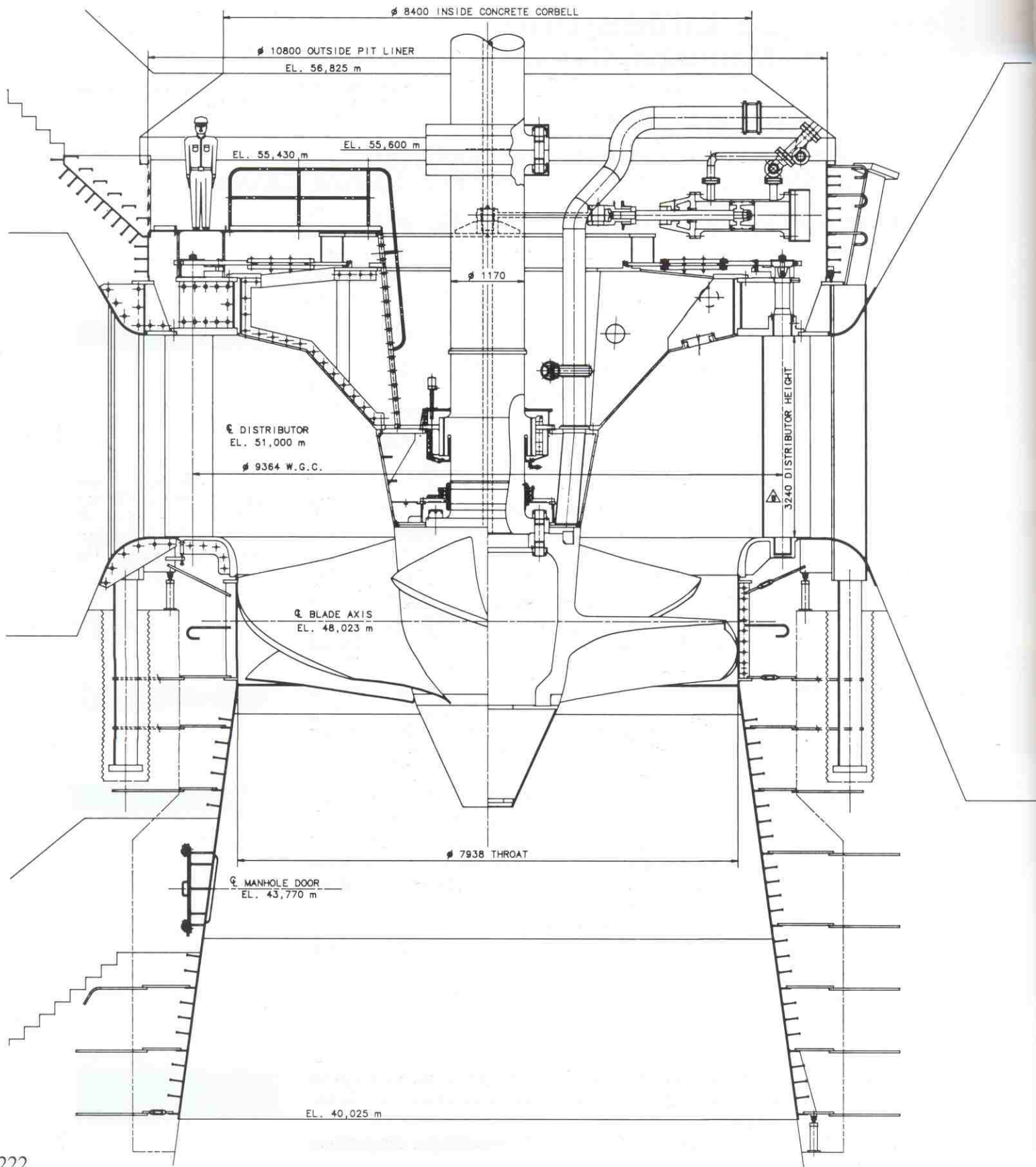
Le premier groupe a été mis en service en 1990. Le dernier le sera en 1992.

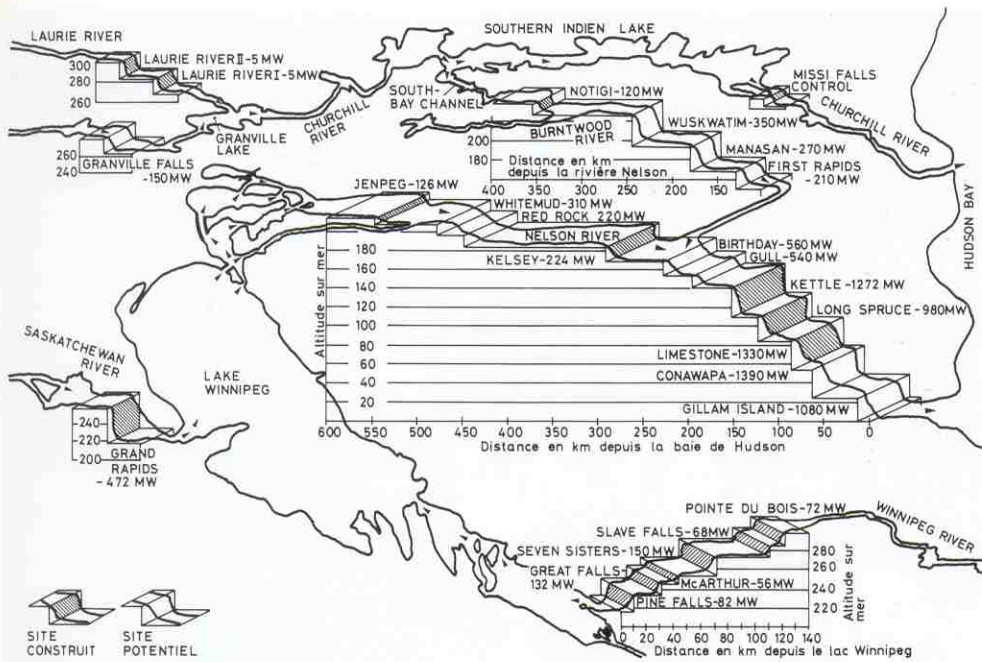
La bêche est du type semi-spirale avec une section d'entrée de 21,54 m de largeur et une hauteur de 20,57 m. Les avant-directrices sont à faces parallèles.

Conception hydraulique

Le distributeur est équipé d'aubes directrices à profil symétrique d'épaisseur relative 0,094.

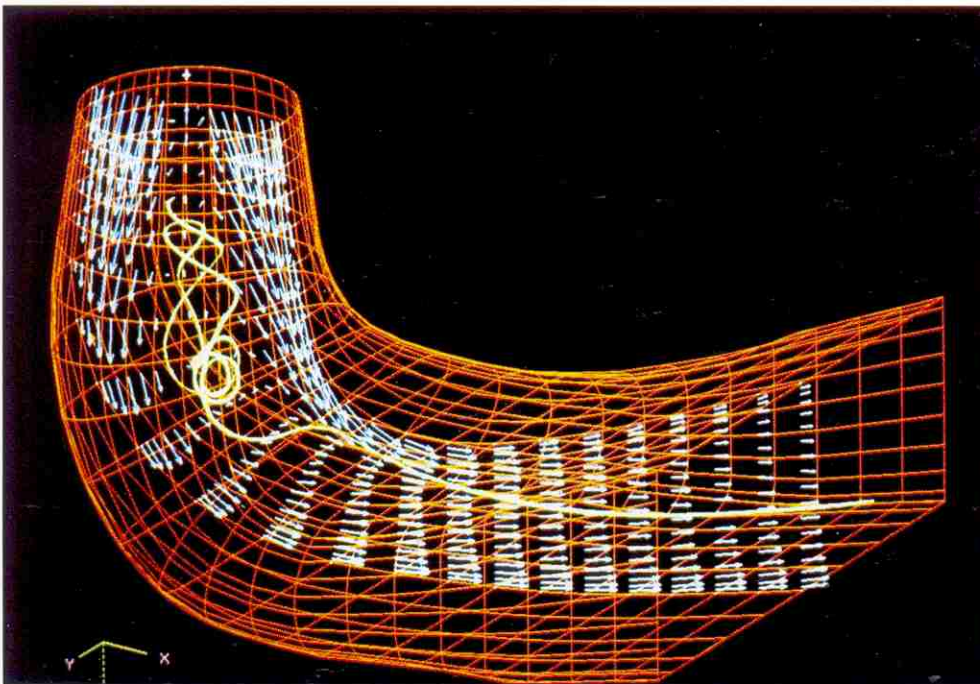
Centrale de Limestone, Canada





1. Aménagements hydro-électriques sur la rivière Nelson dans la région Lac Winnipeg - Baie d'Hudson (d'après un document Manitoba Hydro).

2. Résultats de calcul d'écoulement dans le diffuseur obtenu par un code de calcul Navier-Stokes (document GE Canada-AID).



Les aubes de la roue ont des lèvres anticavitation.

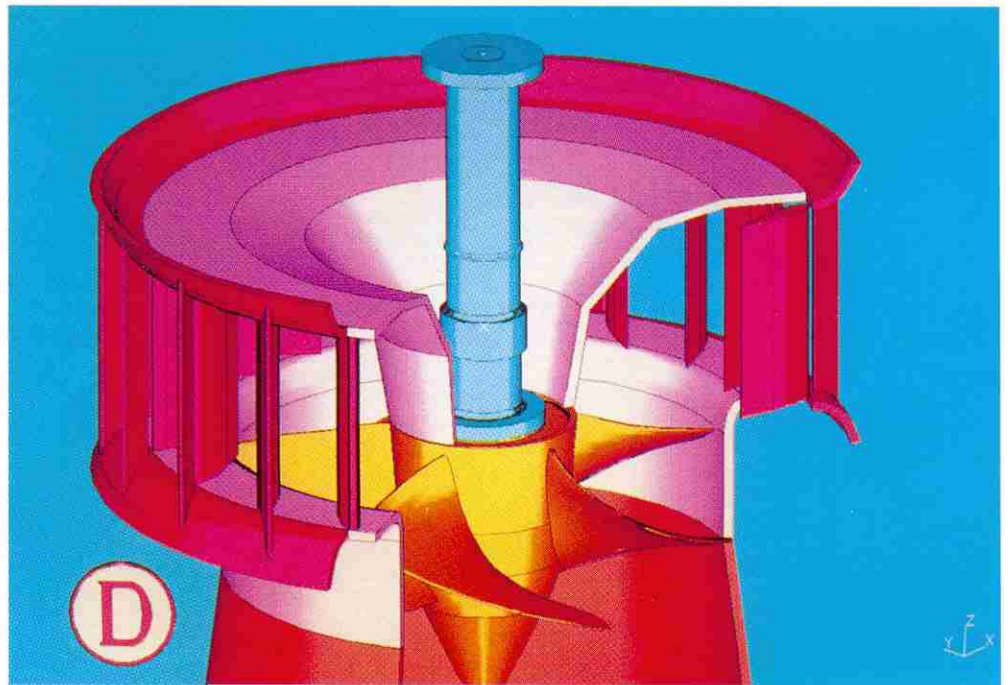
Le diffuseur possède un seul pilier et sa profondeur est relativement importante

avec un rapport $\frac{\Delta Z_d}{D_e} = 2,86$.

Des calculs d'écoulement dans le diffuseur ont été exécutés par un programme utilisant les équations de Navier-Stokes (fig. 2).

Les essais de réception sur modèle réduit (fig. 3 et 4) ont été exécutés dans le laboratoire de GE Canada - AID.

3. Dessin de la partie centrale du modèle réduit obtenu par un programme de calcul CAO (document GE Canada-AID).

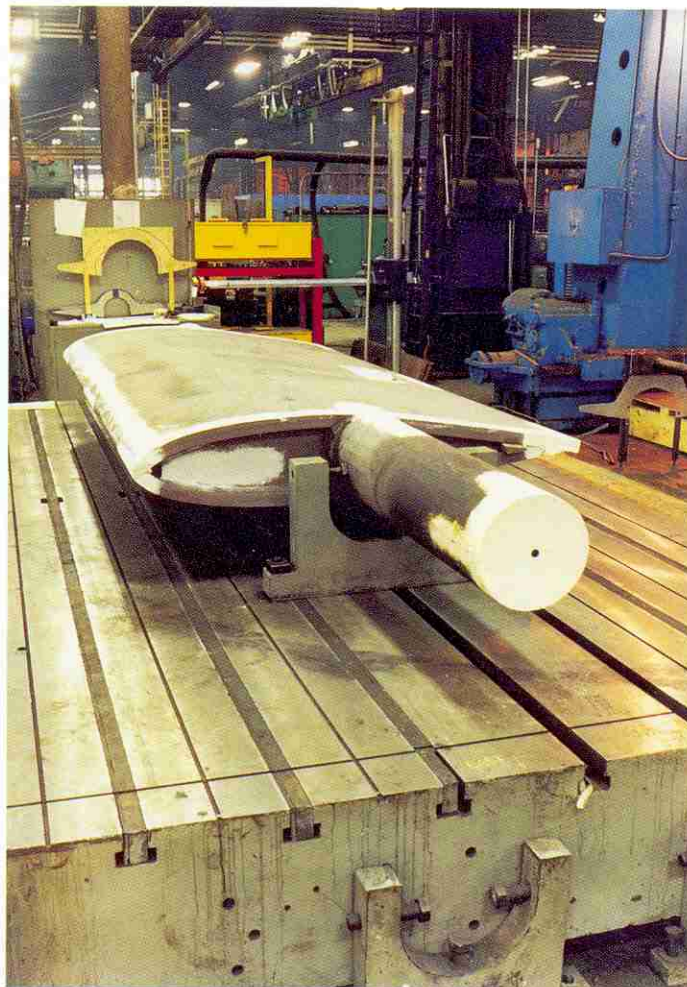


4. Roue modèle d'un diamètre de 406 mm en cours de contrôle dimensionnel sur une machine à mesurer à 3 dimensions (photo GE Canada-AID).





5. Avant-distributeur en 4 parties. Hauteur des avant-directrices 3,4 m; masse 110 t (photo GE Canada-AID).



6. Aubes du distributeur en construction mécano-soudée (photo GE Canada-AID).

7. Distributeur en cours de prémontage en ateliers. On remarque les 3 parties du couvercle de turbine ainsi que l'anneau inférieur en acier coulé (photo GE Canada-AID).



Conception mécanique

La bêche semi-spirale est entièrement en béton. L'avant-distributeur (fig. 5), d'une masse totale de 110 t, est divisé en 4 parties qui sont boulonnées lors du montage en centrale. La tôle d'acier, ASTM A-516 grade 70, a une épaisseur maximale de 110 mm.

Les aubes du distributeur sont fabriquées à partir de tôles d'acier ASTM A-516 grade 60 et ont une masse de 4,3 t (fig. 6). Aucune protection n'est prévue étant donné la chute relativement faible (fig. 7).

La roue est constituée de 5 segments comprenant 1/5 du moyeu et 1 aube. Chacune des parties, en acier coulé ASTM A-27 grade 65/35, a une hauteur de 2,9 m et une masse de 20,5 t.

Après usinage par commande numérique (fig. 8), les aubes sont recouvertes d'acier inoxydable sur une épaisseur de 3 mm dans les zones (surface 4 m²) présentant un danger d'érosion par cavitation (fig. 9). Les 5 segments sont ensuite assemblés par des frettes en acier forgé placées aux deux extrémités du moyeu (fig. 10).

Le couvercle de turbine est divisé en 3 parties:

- Partie intérieure soudée en une pièce, d'une masse de 9,6 t;
- Partie intermédiaire, 4 éléments en construction soudée, assemblés en centrale par boulons, masse totale 54 t;
- Partie extérieure également divisée en 4 éléments boulonnés en centrale, diamètre 8,2 m, masse totale 37,2 t.

Les 3 parties sont réalisées en acier ASTM A-516 grade 55.



8. Usinage des aubes sur une machine à commande numérique à 5 axes (photo GE Canada-AID).



9. Contrôle de la géométrie de la roue au moyen d'un système optique composé de 2 théodolites numériques reliés à un ordinateur. On remarque la partie rechargée en acier inoxydable à la périphérie de la roue (photo GE Canada-AID).

10. Roue assemblée avec des brides et des boulons provisoires avant la pose des 2 frettes (photo GE Canada-AID).



L'anneau inférieur du distributeur est en acier coulé ASTM A-27 grade 65/35. Il est divisé en 4 éléments de 7,2 t, chacun assemblés sur le chantier par boulons.

L'arbre, en acier forgé ASTM A-668 grade D, a un diamètre de 1170 mm et une longueur de 6,150 m ce qui lui donne une masse totale de 59 t.

Le cône du diffuseur est blindé sur une hauteur de 6,960 m avec de l'acier ASTM A-36. La partie supérieure est en acier inoxydable ASTM A-240 304 L sur une longueur de 450 mm.

Centrale de Taquaruçu

Etat de São Paulo, Brésil

5 turbines Kaplan de 103 MW

Conception hydraulique et mécanique: Voith GmbH, Heidenheim, RFA

Fabrication: Voith S.A., São Paulo et Voith GmbH, Heidenheim

Maître d'œuvre: Companhia Energetica de São Paulo (CESP), Brésil

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	173,6	214,8	261,8
H (m)	17,7	21,9	26,7
Q (m ³ /s)	486	511	443
P (MW)	78,8	103,0	110,0
D _e (m)	7,700	f (Hz)	60
D _i (m)	3,296	n (t/s; t/min)	1,43; 85,7
D _o (m)	9,310	N _{QE} (-)	0,58
B _o (m)	2,864	n _q	191
z _r (-)	5	v (-)	1,21
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,53
z _{avd} (-)	12	σ _{max} (-)	1,10

Caractéristiques

La centrale de Taquaruçu se trouve à 200 km au nord de Curitiba sur le Rio Paranapanema, qui coule d'est en ouest et se jette dans le Paraná. Il s'agit d'une centrale au fil de l'eau, avec un bâtiment en surface. La mise en service est prévue en 1993.

Généralités

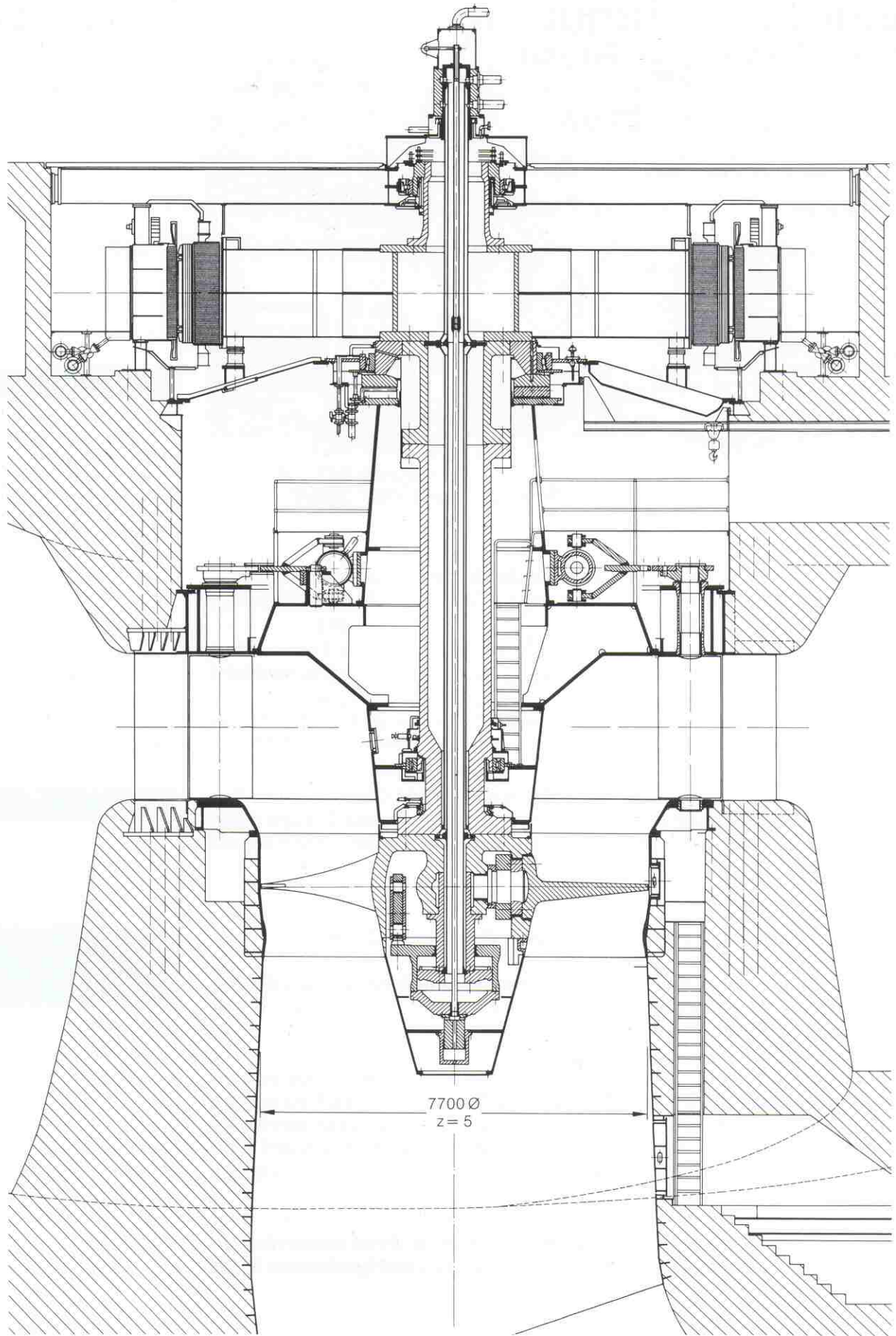
La bache semi-spirale, en béton, a une largeur d'entrée de 22,650 m.

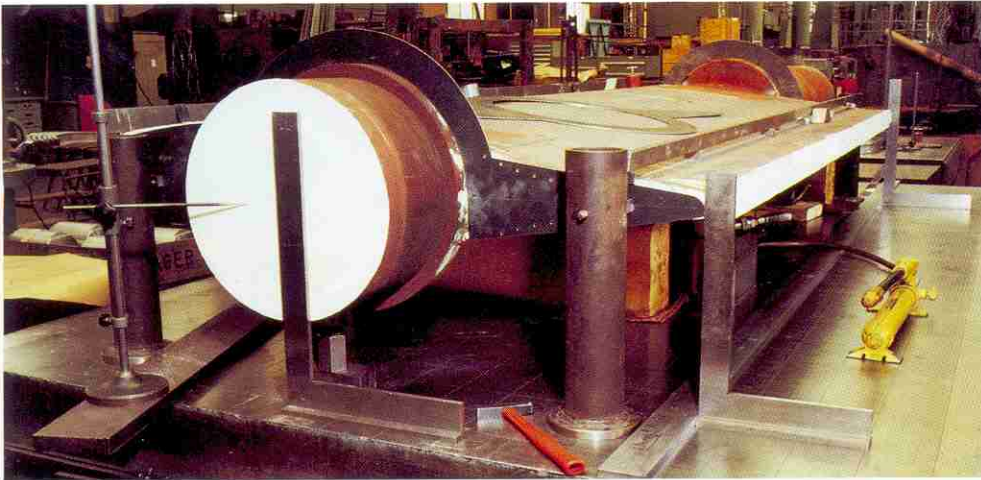
Conception hydraulique et mécanique

L'avant-distributeur a une masse de 125 t; il est construit avec des tôles de 37,5 mm d'épaisseur. Les 12 aubes avant-directrices sont creuses; elles ont une épaisseur de 170 mm.

Les aubes du distributeur (fig. 1) dont les paliers sont autolubrifiés sont en construction mécano-soudée, en tôle d'acier TT StE 36. Les tourillons sont en acier coulé GS 20 Mn 5. Leur masse est de 4,7 t, et l'arête de sortie en contact avec l'aube suivante en position fermée est rechargée par soudure avec de l'acier au chrome. L'anneau de vannage est actionné par 4 servomoteurs, et chaque aube a 3 paliers.

La roue (fig. 2) a une masse de 166 t. Les pales, munies de lèvres anticavitation, sont coulées en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4. Elles sont boulonnées à leur





1. Contrôle dimensionnel d'une aube du distributeur (photo Voith).



2. Roue en prémontage à l'atelier. On distingue les boulons de fixation des aubes sur les tourillons ainsi que le croisillon de commande des aubes (photo Voith).

tourillon pour permettre leur démontage pour le transport. Le moyeu (fig. 3), également coulé, est en acier au manganèse GS 20 Mn 5.

Le couvercle de la turbine a un diamètre de 10,620 m et une masse de 63 t. Il est exécuté en construction mécano-soudée en acier St 37, de même que le fond inférieur qui a un diamètre de 10,280 m et une masse de 46 t. Ces 2 pièces sont divisées en 2 parties pour le transport.

L'arbre a un diamètre de 1400 mm, une épaisseur de paroi de 150 mm et une longueur de 9,9 m. Il est en acier forgé CK 35 et a une masse de 74 t. La ligne d'arbre comprend 3 paliers. Le palier intermédiaire, combiné avec la butée

3. Ajustage final des pales de la roue. On distingue les 2 paliers des tourbillons des aubes, dans le moyeu (photo Voith).



axiale, est situé juste sous le rotor de l'alternateur. La butée est supportée par un cône s'appuyant sur le couvercle de la turbine et fixé radialement par une coque conique.

Les paliers sont du type à patins réglables.

Le diffuseur est muni d'un blindage en acier St 37 dans sa partie conique.

Centrale de Verbois, Canton de Genève, Suisse

4 turbines Kaplan de 25 MW

Conception hydraulique, mécanique et réalisation des transformations:
Hydro Vevey SA, Vevey, Suisse

Maître d'œuvre: Services Industriels de la Ville de Genève (SIG), Genève, Suisse

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	168,7	178,5	199,0
H (m)	17,20 (17,25)	18,20 (19,2)	20,30 (20,8)
Q (m ³ /s)	160,0 (121,5)	155,0 (125,0)	144,0 (127,5)
P (MW)	24,5 (18,1)	25,3 (21,0)	26,7 (23,2)
D _e (m)	4,800 (4,500)	f (Hz)	50
D _i (m)	2,050 (2,200)	n (t/s; t/min)	2,27; 136,4
D _o (m)	5,600	N _{QE} (-)	0,58
B _o (m)	1,600	n _q	193
z _r (-)	4 (6)	v (-)	1,22
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,49
z _{avd} (-)	11 + 1	σ _{max} (-)	0,74

Caractéristiques

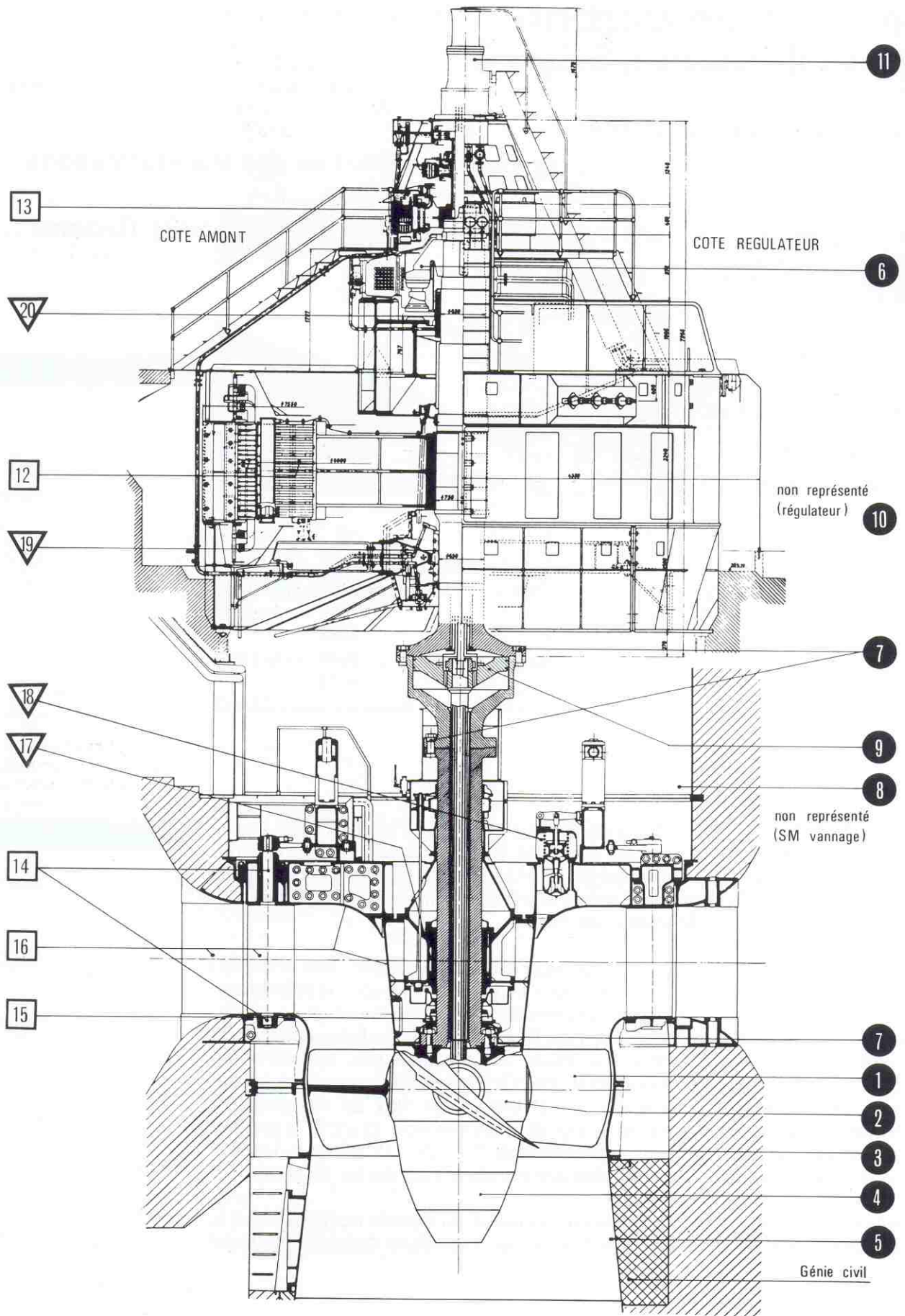
() valeurs avant transformation

La centrale de Verbois a été construite entre 1937 et 1944 sur le Rhône, à mi-distance entre Genève et la frontière française. Elle a été équipée à l'époque de 4 turbines Kaplan à 6 pales fournies par les Ateliers des Charmilles qui, étant donné l'expérience acquise sur d'autres machines similaires, ne jugèrent pas nécessaire de procéder à des essais sur modèle.

L'âge commençant à marquer l'équipement électromécanique, une révision avec un changement des organes principaux s'imposait. En outre, la régulation du niveau du lac Léman, assurée par la nouvelle centrale du Seujet située 15 km à l'amont, sera dans le futur beaucoup plus fine. Dans ces conditions, le maître d'œuvre, SIG, a décidé, après une étude économique très approfondie, d'augmenter la puissance de la centrale. En effet, une modulation du débit du Rhône – rétention aux heures creuses et durant les fins de semaines et accentuation du débit aux heures de pointe – est possible grâce à la grande surface du Léman (582 km²). Un supplément de débit de 135 m³/s pendant 12 heures ne provoque en effet qu'un abaissement du niveau du lac de 10 mm.

Afin de déterminer le nouveau débit d'équipement, un modèle mathématique a été développé par SIG. Le calcul a montré que l'optimum économique était

Généralités



atteint pour un débit équipé de $620 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que le débit actuel est de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. En outre, une étude d'impact sur l'environnement a abouti à la conclusion que le débit de $620 \text{ m}^3/\text{s}$ ne pouvait que difficilement être dépassé.

La production annuelle passera ainsi de 434 GWh à 466 GWh, soit une augmentation de 7,4% alors que l'augmentation de puissance sera de 22,6%.

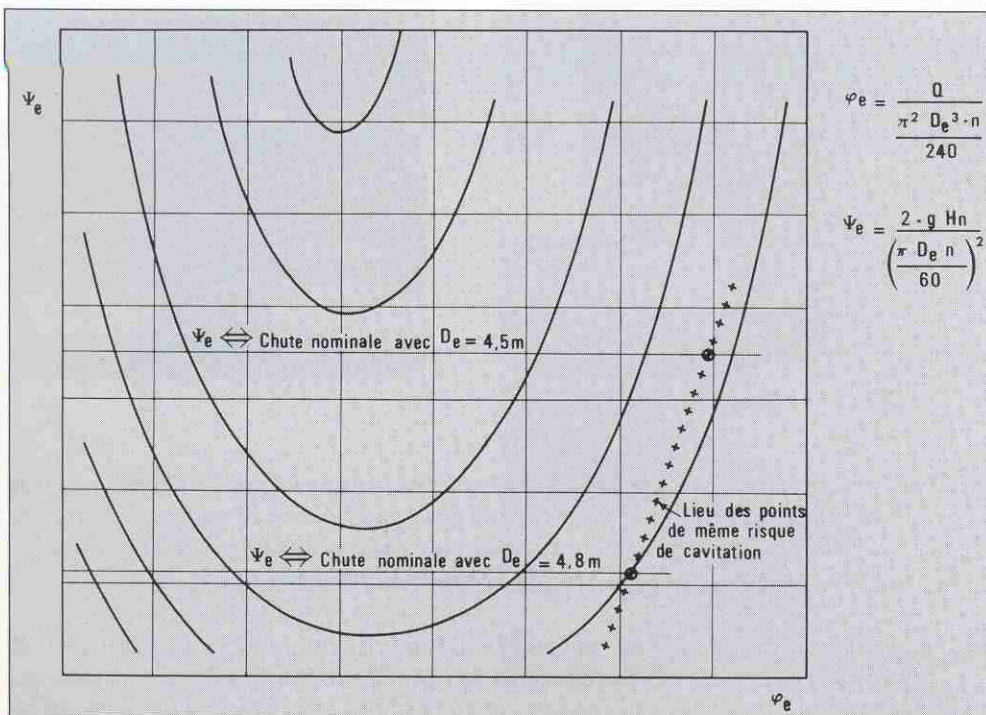
Plusieurs solutions ont été envisagées pour augmenter la puissance et le rendement des turbines sans détériorer leur comportement en cavitation, et en conservant une vitesse d'emballement sensiblement égale. Les études ont porté sur des modifications limitées à la roue et à son environnement:

- nombre de pales 4, 5, 6
- diamètre du moyeu 1,8 m et 2,2 m
- diamètre de la roue 4,5 m et 4,8 m

7 variantes combinant les modifications ci-dessus ont été examinées en détail.

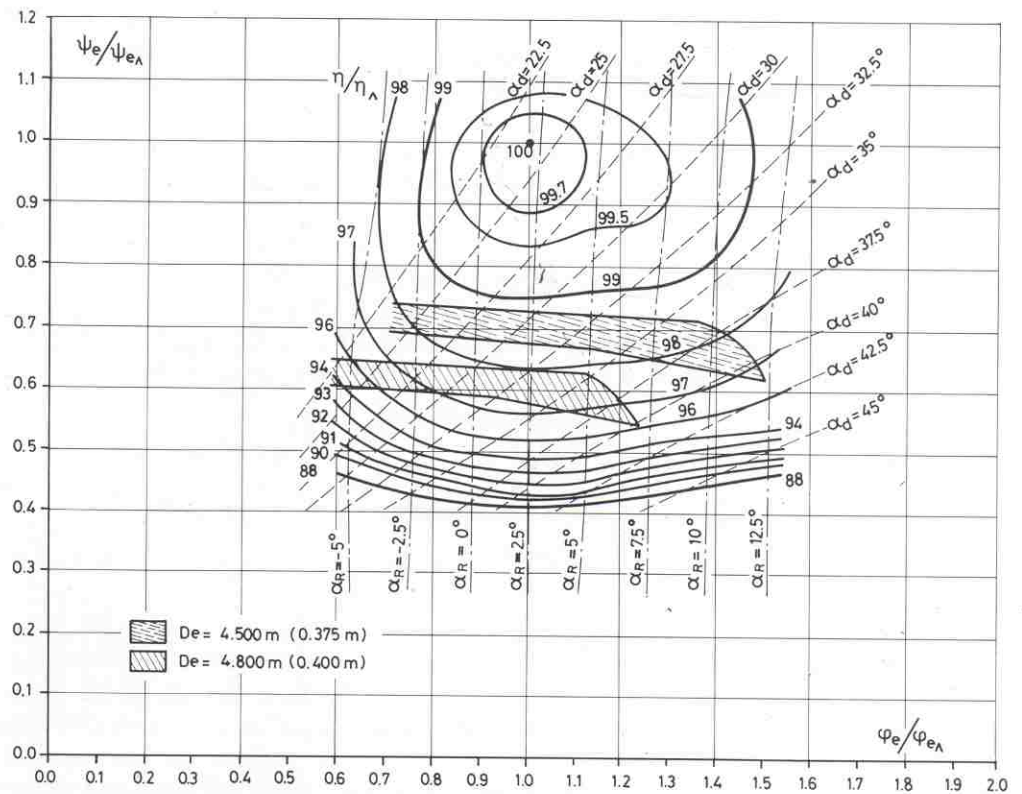
La solution finalement retenue consiste en une diminution du nombre de pales de 6 à 4 et en une augmentation du diamètre de la roue de 4,500 m à 4,800 m (fig. 1). La figure 2 montre que la seule modification du diamètre sans changement du tracé d'aubage et du nombre de pales aurait conduit à un décalage important du domaine de fonctionnement de la machine par rapport au sommet de la colline. Le passage de 6 à 4 pales avec un nouveau tracé d'aubage a permis de diminuer fortement la valeur de ψ_e au sommet et de recentrer la colline sur la valeur de ψ_e correspondant au domaine de fonctionnement pour le diamètre $D_e = 4,800 \text{ m}$.

Conception hydraulique de la rénovation



1. Coupe montrant les modifications apportées au canal hydraulique (document Hydro Vevey).

2. Domaines de fonctionnement de 2 roues à 6 pales d'un diamètre de 4,500 m et de 4,800 m (d'après un document Hydro Vevey).

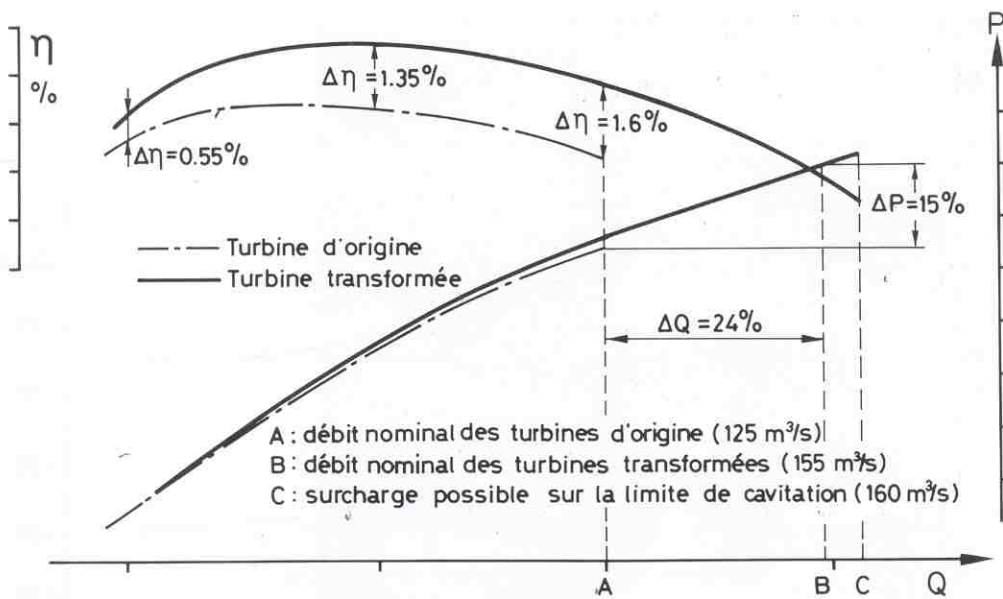


3. Roues modèles. A gauche, l'ancienne roue à 6 pales, $D_e = 375$ mm, à droite la nouvelle roue à 4 pales, $D_e = 400$ mm (photos Hydro Vevey).



Une campagne d'essai a été réalisée, avec la participation de l'IMHEF, sur un modèle à l'échelle 1:12 dans lequel la roue d'origine $D_e = 375$ mm et la nouvelle roue $D_e = 400$ mm (fig. 3) ont été essayées successivement dans le but d'obtenir une comparaison complète des performances des 2 roues.

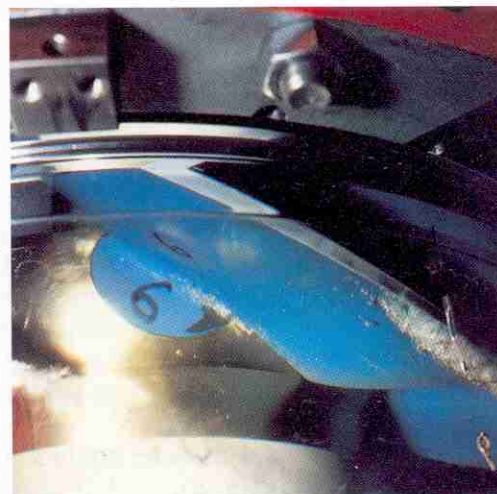
On a pu mesurer ainsi la valeur précise des écarts de puissance et de rendement (fig. 4) permettant de calculer le gain de productivité. La comparaison du comportement en cavitation (bulles, courbes $\eta - \sigma$) donne une indication



4. Comparaison des rendements et des puissances lorsque les 4 groupes sont en service (d'après un document Hydro Vevey).

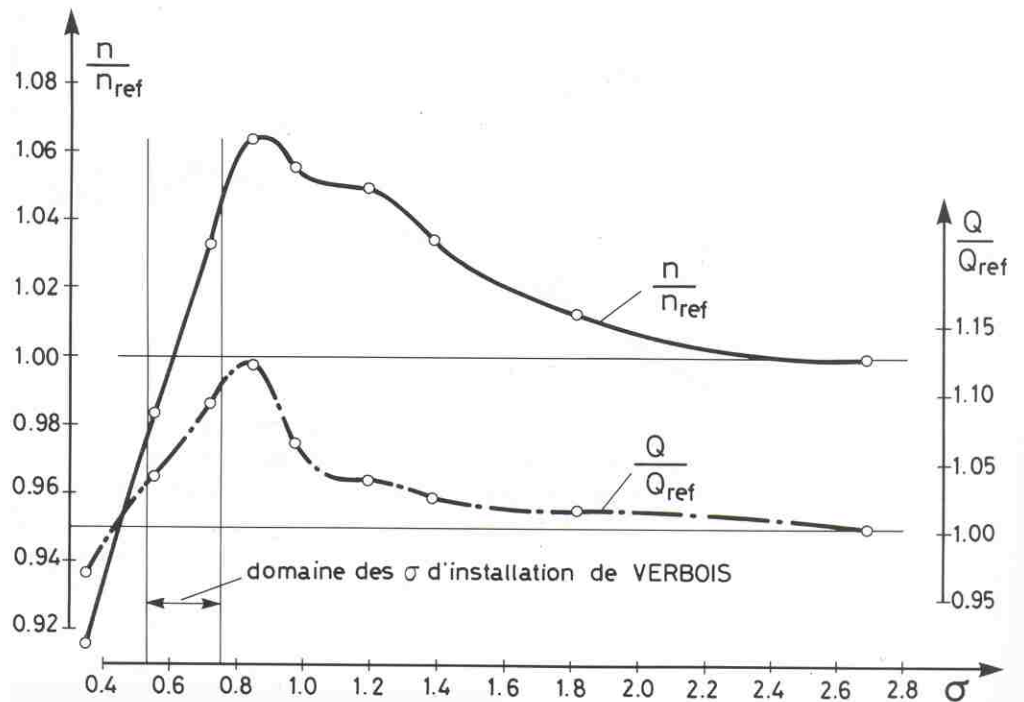


5. Aspect de la cavitation sur l'ancienne roue pour un point de fonctionnement à un groupe à pleine charge (photos Hydro Vevey).



6. Aspect de la cavitation sur l'ancienne roue pour un point de fonctionnement à 4 groupes à pleine charge (photos Hydro Vevey).

7. Influence du coefficient de cavitation sur la vitesse et le débit d'emballlement (d'après un document Hydro Vevey).



précieuse pour l'évaluation du risque d'érosion sur les nouvelles roues, compte tenu de l'expérience acquise sur les anciennes roues.

Les 2 photographies des figures 5 et 6 montrent l'aspect de la cavitation observée sur le modèle de l'ancienne roue à la puissance 100% pour le fonctionnement à 1 et à 4 groupes. Cette cavitation n'a entraîné que des dégâts insignifiants durant la période de fonctionnement de près de 50 ans, dégâts qui n'ont pas nécessité de réparations. Les pales de la roue d'origine étaient en acier inoxydable 13 Cr - 1 Ni, sans lèvres anticavitation.

En outre, la comparaison des vitesses d'emballlement est importante car, pour les anciennes roues, qui n'ont pas été essayées sur modèle réduit, cette valeur était mal connue. De plus, la vitesse d'emballlement est très influencée par la cavitation, comme le montre la figure 7.

Les mesures d'efforts mécaniques suivantes ont également été effectuées:

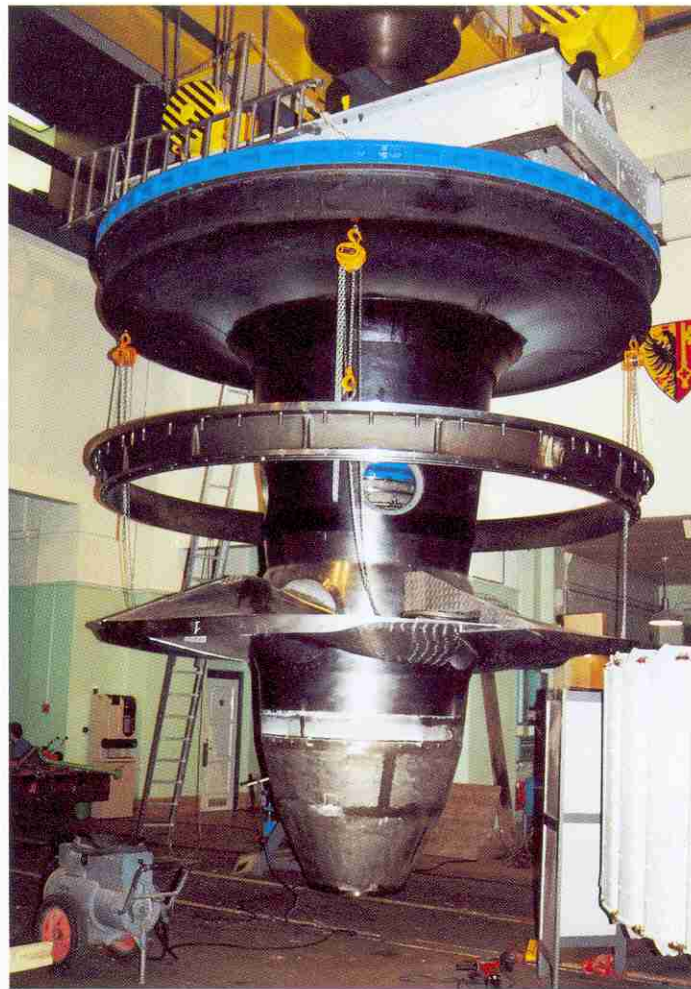
- couple sur les aubes directrices;
- couple sur les pales de la roue;
- poussée axiale.

Ces résultats sont nécessaires pour le calcul des nouveaux servomoteurs du distributeur et de la roue, ainsi que de la butée axiale.

Travaux de transformation

La rénovation de la centrale a exigé les travaux de transformation et la fourniture des éléments suivants (voir coupe de la machine):

1. Un jeu de 4 pales en acier coulé inoxydable 13 Cr - 4 Ni, munies de lèvres anticavitation (fig. 8).



8. Bloc turbine, comprenant la roue, le palier et le fond supérieur, prêt au montage (photo SIG).

2. Un moyeu en acier coulé inoxydable contenant le mécanisme de liaison pales-servomoteur de roue.
3. Un manteau de roue en acier coulé inoxydable (fig. 8).
4. Une ogive en tôle d'acier inoxydable (fig. 8).
5. Un cône d'aspirateur en tôle d'acier inoxydable d'un diamètre adapté à la nouvelle roue requérant la démolition du béton entourant le cône actuel (30 m³), l'alignement, le scellement et le bétonnage du nouveau cône (fig. 9).
6. Un nouveau pivot à patins séparés auto-ajustants rendu nécessaire par l'augmentation de la poussée hydraulique.
7. Tous les boulons d'accouplement de la ligne d'arbre.
8. Deux nouveaux servomoteurs de vannage adaptés à l'augmentation du couple hydraulique sur les directrices.

9. Découpage du cône de la turbine existante par carottage et sciage (photo SIG).



9. Modification de la course du servomoteur de roue existant pour l'adapter à la nouvelle roue et adjonction d'un servomoteur complémentaire dans le moyeu de celle-ci.
10. Transformation du système de réglage, notamment nouveau régleur à microprocesseurs et augmentation de la capacité de l'accumulateur air-huile.
11. Adaptation du chapeau de réglage à la nouvelle course du servomoteur de roue.
12. Rénovation de l'alternateur (empilage statorique, bobinages statorique et rotorique), la puissance apparente passant de 27,5 à 33 MVA.
13. Rénovation de l'excitatrice correspondante.
14. Suppression du graissage centralisé par téflonage des paliers des directrices.
15. Modification du joint-plan.

16. Sablage et peinture de toutes les surfaces mouillées du profil hydraulique pour diminuer les pertes par frottement. Un jeu de directrices neuves pour la première turbine transformée.
17. Révision du palier de guidage de la turbine.
18. Révision des soupapes d'entrée d'air.
19. Révision du palier de guidage inférieur de l'alternateur.
20. Révision du palier de guidage supérieur de l'alternateur.

Le programme des travaux prévoit la transformation des turbines entre 1989 et 1993, à raison de 1 groupe par an, l'indisponibilité de chacun d'eux étant limitée à 9 mois.

- G. Vullioud et W. Walther. Rénovation avec augmentation de puissance de l'aménagement hydroélectrique de Verbois. Bulletin technique Vevey, 1988.

Bibliographie

Centrale de Gezhouba

Province de Hubei, République populaire de Chine

Usine d'Erjiang: 2 turbines Kaplan de 176 MW et 5 turbines Kaplan de 129 MW

Usine de Dajiang: 14 turbines Kaplan de 129 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

groupes de 176 MW: Dongfang Electric Machinery Works, Deyang, R.P.C.

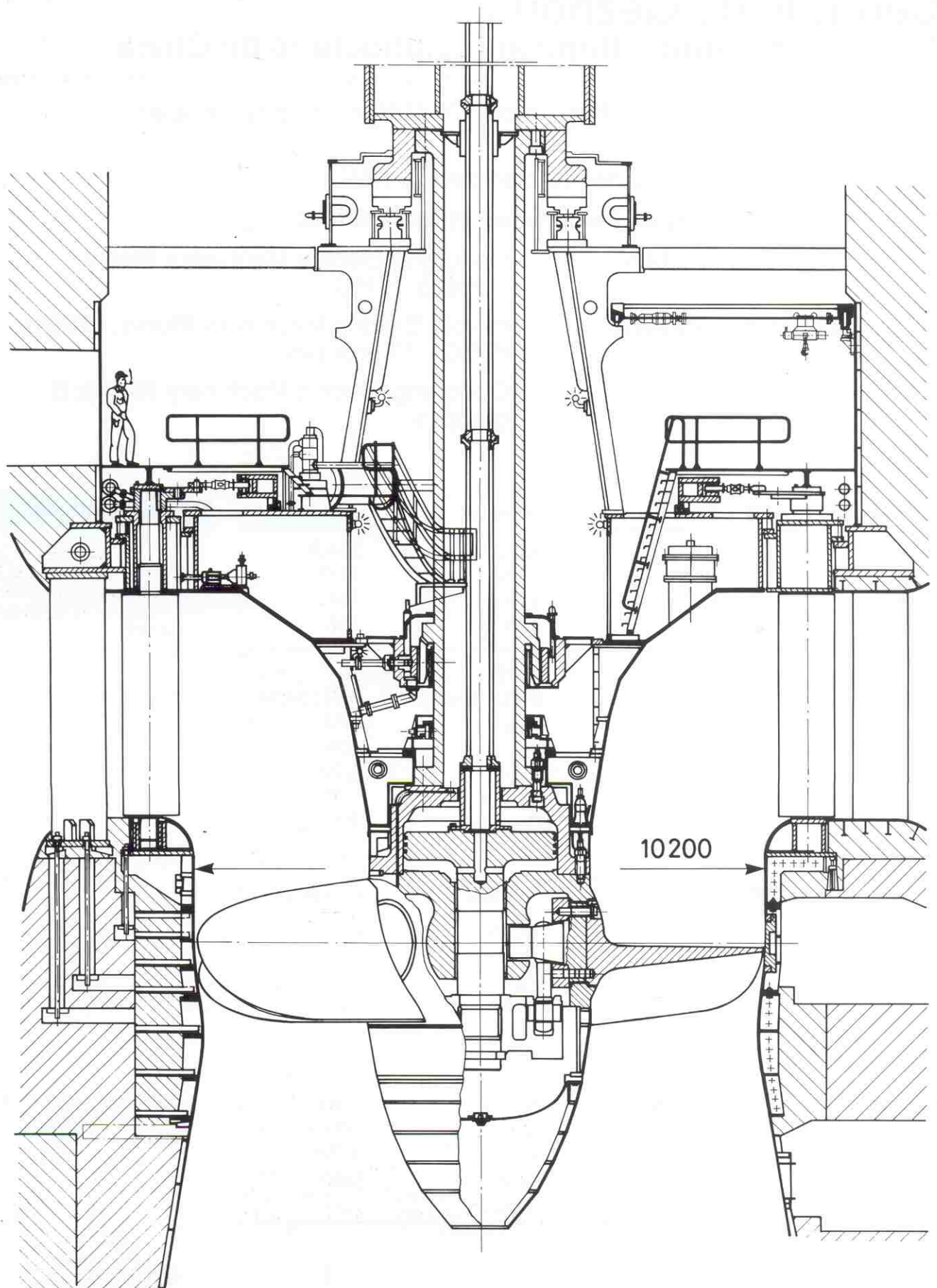
groupes de 129 MW: Harbin Electric Machinery Works, Harbin, R.P.C.: 13 groupes

Dongfang Electric Machinery Works: 6 groupes

turbines de 176 MW	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	104,0	182,4	264,8
H (m)	10,6	18,6	27,0
Q (m ³ /s)	852	1130	714
P (MW)	74	176	176
D _e (m)	11,300	f (Hz)	50
D _i (m)	4,520	n (t/s; t/min)	0,91; 54,54
D _o (m)	13,100	N _{QE} (-)	0,61
B _o (m)	4,520	n _q	203
z _r (-)	4	v (-)	1,29
z _o (-)	32	σ _{min} (-)	0,65
z _{avd} (-)	17	σ _{max} (-)	2,10

Caractéristiques

turbines de 129 MW	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	104,0	182,5	264,8
H (m)	10,6	18,6	27,0
Q (m ³ /s)	630	825	526
P (MW)	53,4	129,0	129,0
D _e (m)	10,200	f (Hz)	50
D _i (m)	4,480	n (t/s; t/min)	1,04; 62,50
D _o (m)	11,800	N _{QE} (-)	0,60
B _o (m)	4,080	n _q	200
z _r (-)	5	v (-)	1,27
z _o (-)	32	σ _{min} (-)	0,65
z _{avd} (-)	17	σ _{max} (-)	2,11





1. Maquette de l'usine montrant au premier plan l'écluse No 3, un évacuateur de crues, l'écluse No 2 puis l'usine d'Erjiang, l'évacuateur de crues central, l'usine de Dajiang et enfin l'écluse No 1 (photo IMHEF).



2. Salle des machines de la centrale d'Erjiang. Les 2 machines 176 MW sont au premier plan (photo IMHEF).

L'usine de Gezhouba est la première construite sur le fleuve Yangtse. Elle se trouve à 6 km en aval de la ville de Yichang et constitue le plus grand projet hydroélectrique réalisé à ce jour en Chine. En plus de la production d'énergie électrique, l'ouvrage a pour fonction de régulariser le cours du fleuve, améliorant ainsi les conditions de navigation et les possibilités d'irrigation. Sa capacité de retenue représente le 3% de la quantité d'eau débitée annuellement.

Généralités

Il s'agit donc plutôt d'une installation du type au fil de l'eau, avec un niveau amont constant et un niveau aval très fluctuant, obligeant les machines à fonctionner entre 6 et 27 m de chute.

L'aménagement complet comporte 3 écluses, l'usine de Erjiang sur la rive gauche avec 2 machines de 176 MW et 5 de 129 MW, des évacuateurs de crues au centre, conçus pour un débit de 86 000 m³/s et l'usine de Dajiang sur la rive droite avec 14 turbines de 129 MW (fig. 1 et 2). La première machine, de 175 MW, a été mise en service en juillet 1981, et la dernière en décembre 1988.

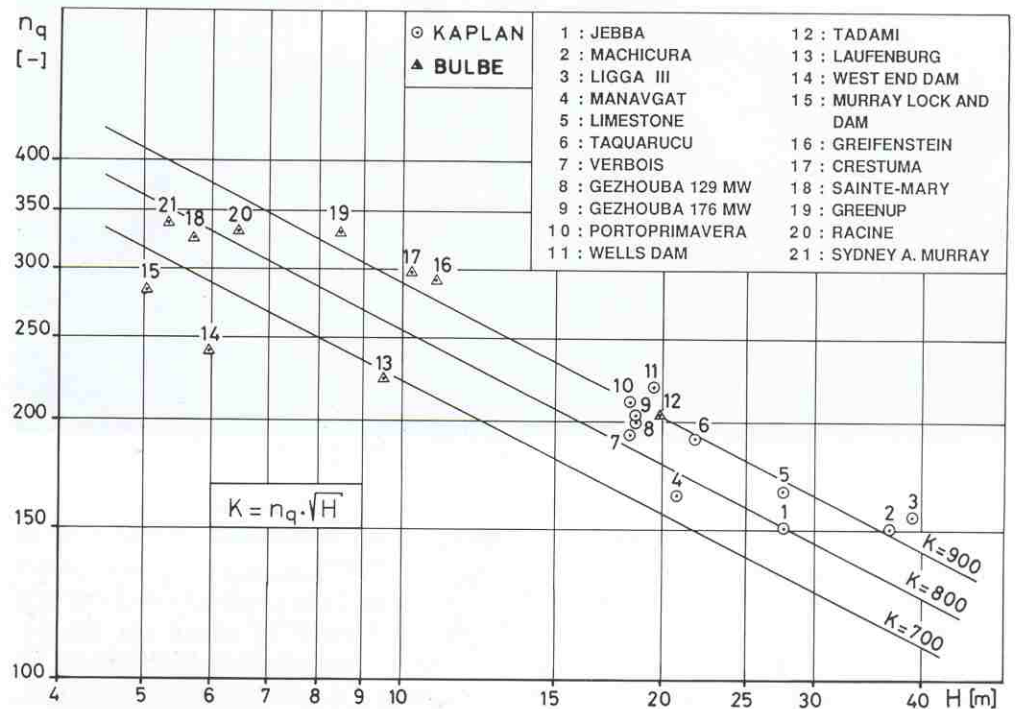
Le débit minimal enregistré du fleuve est de 2270 m³/s, alors que le débit maximal est de 71 000 m³/s. L'eau est très chargée en sédiments: la moyenne annuelle est de 1,2 kg/m³ alors que le maximum est de 10,5 kg/m³; l'érosion des machines constitue donc un point sensible.

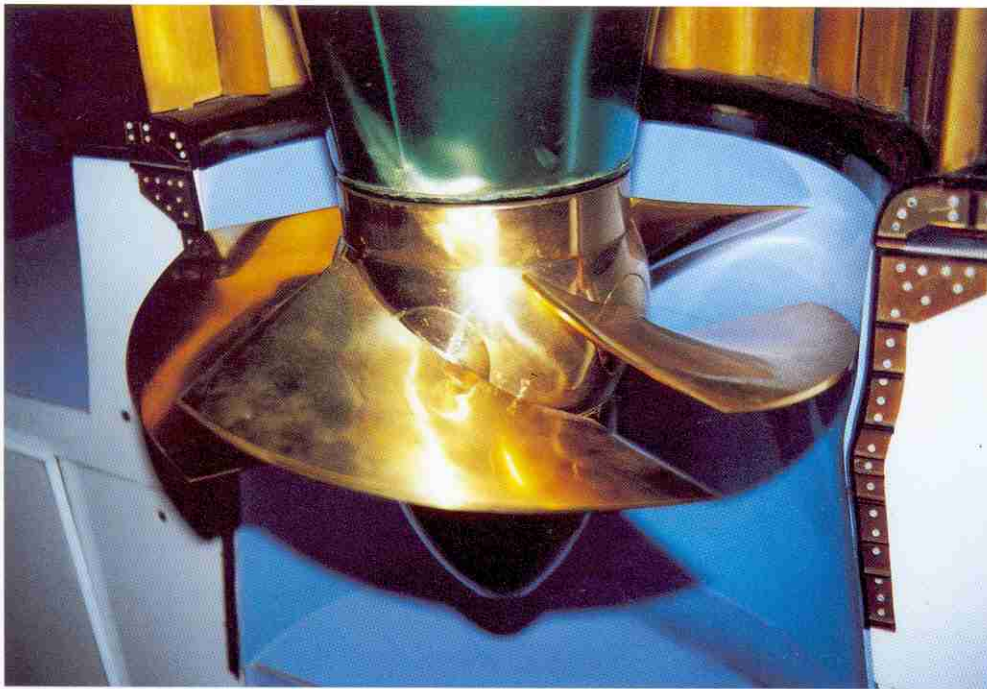
La production moyenne annuelle est de 15,7 TWh.

Conception hydraulique

Les études préliminaires ont commencé au début des années 70 par une série d'essais avec 6 modèles disponibles en Chine ayant de 4 à 6 aubes; il s'agissait de réaliser des machines aussi grandes que possible afin de minimiser les coûts et rendre possible l'installation des machines dans les centrales relativement courtes d'Erjiang et Dajiang. Le choix s'est porté sur 2 machines de 176 MW, équipées de 4 aubes, de 11,3 m de diamètre, qui sont actuellement les plus grandes turbines Kaplan réalisées dans le monde. Pour des questions de fiabilité, des machines à 5 aubes de 10,2 m de diamètre et de 129 MW ont été choisies pour équiper le reste de la centrale. Ces machines ont une vitesse spécifique très élevée en regard de leur chute (fig. 3).

3. Relation entre la vitesse spécifique n_q et la chute (document IMHEF).



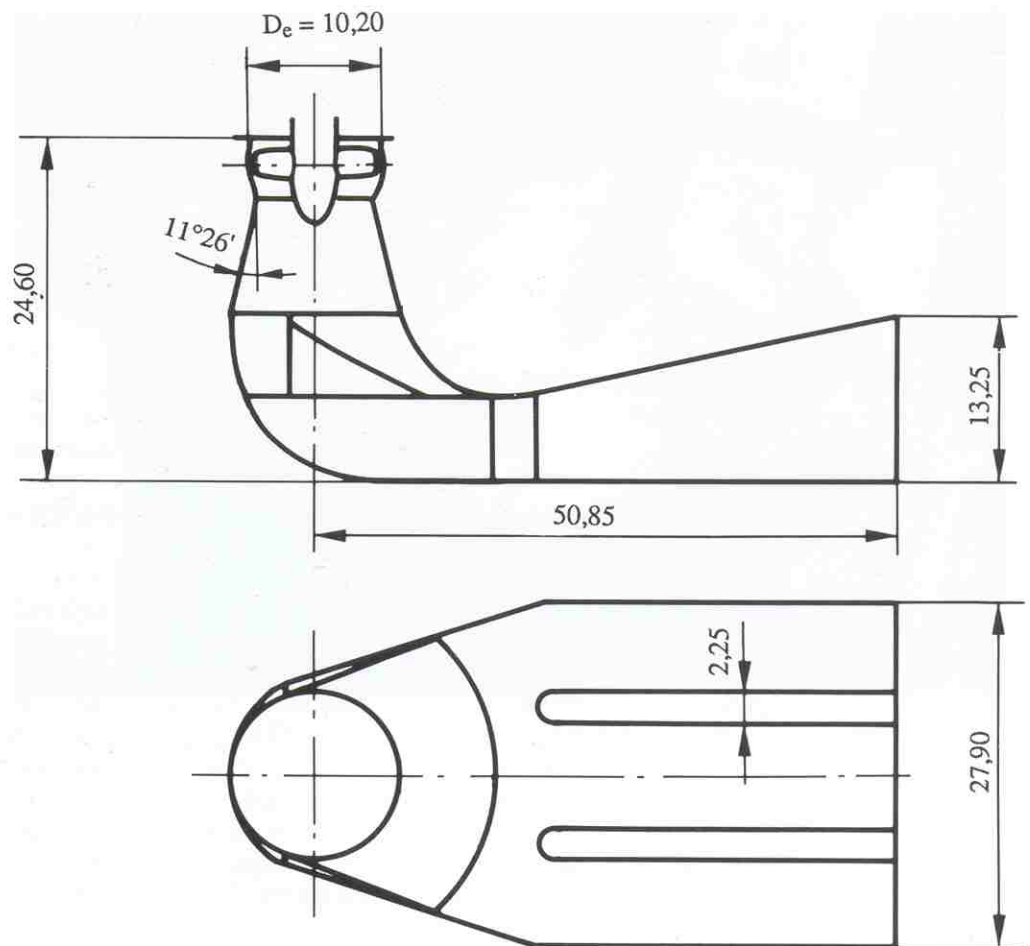


4. Modèle de la turbine de 129 MW (photo IMHEF).

Le profil hydraulique des turbines de 129 MW a les particularités suivantes:

- les bâches semi-spirales, en béton, ont une largeur maximale de 26,8 m et un rapport largeur/hauteur de 1,76;
- les avant-directrices sont profilées;
- les aubes directrices ont un profil symétrique;
- la roue est placée relativement bas par rapport au distributeur; ainsi la différence de niveau relative entre le fond du distributeur et l'axe des tourillons des pales est de 0,233; cette caractéristique améliore l'écoulement dans le domaine des fortes charges;
- le diamètre du moyeu a été choisi le plus petit possible, compte tenu de l'espace nécessaire au logement du système de commande des pales; un petit diamètre améliore les caractéristiques en cavitation à puissance égale; le rapport choisi est $r_i = \frac{D_i}{D_e} = 0,439$;
- le dimensionnement du diffuseur a fait l'objet de nombreux essais sur modèle; en particulier, des angles de cône de $8^{\circ}32'$, $9^{\circ}55'$ et $11^{\circ}26'$ ont été essayés, la valeur la plus grande étant finalement la meilleure; les dimensions du diffuseur sont données par la figure 5.

5. Dimension du diffuseur des turbines de 129 MW (d'après un document Harbin).



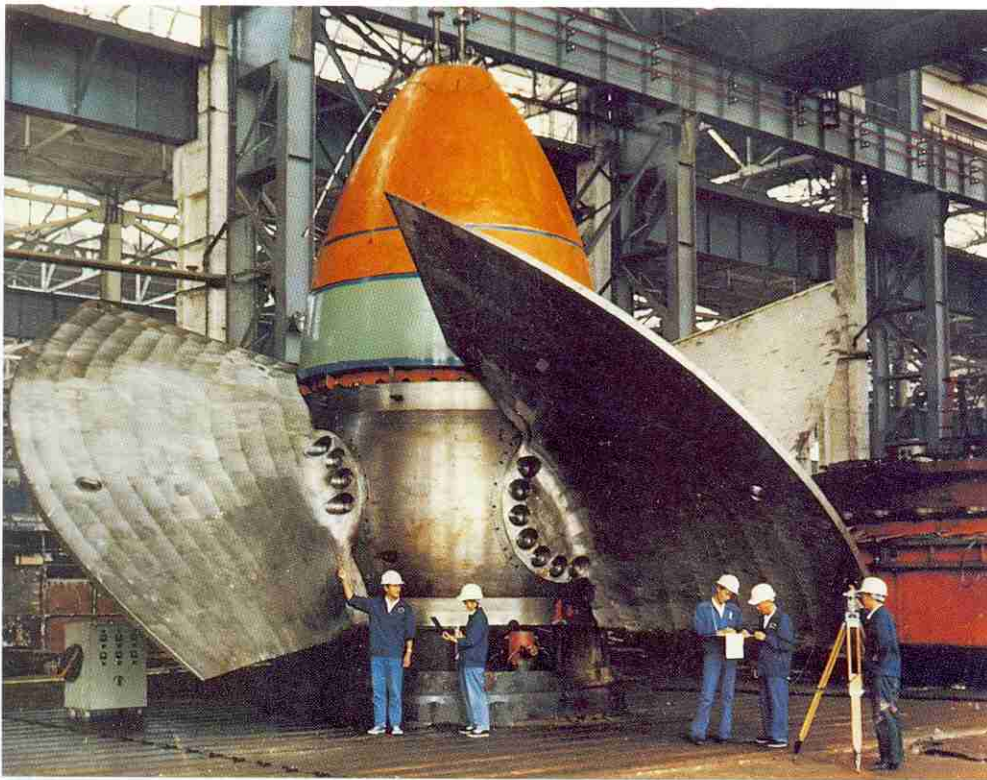
Les essais sur modèle de la turbine de 176 MW ont été réalisés avec une roue de 460 mm de diamètre. De plus, en 1977, des essais sur un modèle de 3000 mm de diamètre, installé dans une centrale, ont permis de mesurer les répartitions de pression et de contraintes sur les aubes, sous des chutes de 23 et 24,6 m. Aucun phénomène d'instabilité n'a été observé.

Les essais sur modèle des machines de 129 MW ont été réalisés entre 1974 et 1975 (fig. 5). Les rendements, la cavitation, la vitesse d'emballement, la poussée axiale ainsi que les couples sur les aubes ont été mesurés.

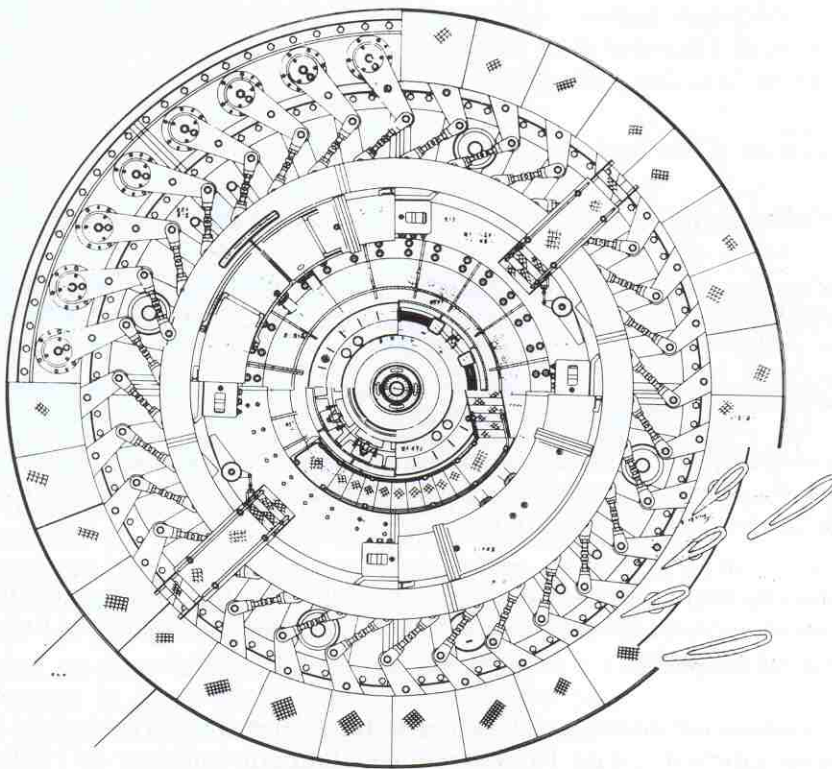
Conception mécanique

Toutes les machines ont la particularité d'avoir 17 entretoises et 32 aubes directrices. Pour les machines de 129 MW, le cercle de vannage est entraîné par 4 servomoteurs, alors qu'il est mû par 2 servomoteurs toriques sur les machines de 176 MW (fig. 5).

Les pales des turbines de 176 MW (fig. 6), en acier 15 Mn Mo V Cu, ont été calculées pour une chute de 23 m; la contrainte maximale est de 275 N/mm^2 .



6. La roue de 176 MW lors du contrôle dimensionnel (photo Dongfang).



7. Vue en plan du système de commande du distributeur de la turbine de 176 MW (document Dongfang).

Le servomoteur de commande est placé en dessous de l'axe des pales. Le piston est fixe et le cylindre mobile fait office de croisillon; il est relié aux pales par des bielles et des leviers (fig. 8). Cependant, pour fonctionner sous la chute maximale de 27 m, il a été décidé de fabriquer les turbines suivantes avec 5 aubes, et en acier inoxydable. Par la suite, les pales des turbines de 176 MW ont été remplacées par des pales en acier inoxydable.

La butée se trouve sur le couvercle de la turbine. Pour les turbines de 176 MW, elle est calculée pour une poussée de 37 300 kN. Immérgés dans l'huile, les 20 patins ont une surface de 3390 cm² chacun. Ils sont refroidis à l'eau et une injection d'huile sous pression assure les phases de démarrage et d'arrêt.

Les caractéristiques mécaniques principales des machines de 129 MW sont les suivantes.

L'avant-distributeur est divisé en 4 parties; 10 des avant-directrices sont en construction mécano-soudée et 7 sont coulées. Pour éviter des dégradations du béton de la bête, un blindage en tôle de 10 mm d'épaisseur est placé dans le joint entre la bête et l'avant-distributeur.

Les aubes du distributeur sont en construction mécano-soudée. Leur longueur totale est de 6,260 m. Les paliers sont autolubrifiés grâce à des douilles en Nylon 1010. Les servomoteurs du distributeur, au nombre de 4, sont rectilignes et ont un diamètre de 600 mm. L'ouverture maximale du distributeur est de 840 mm.

La roue, d'une masse totale de 420 t, est composée d'un moyeu en acier coulé 20 Mn Si, d'une masse de 101 t et de 5 pales en acier inoxydable d'une masse de 22,5 t chacune.

Le mécanisme de commande des pales est constitué d'un piston mobile, situé au-dessus de l'axe des pales, qui est relié par un arbre au croisillon, placé en dessous de l'axe des pales (fig. 9).

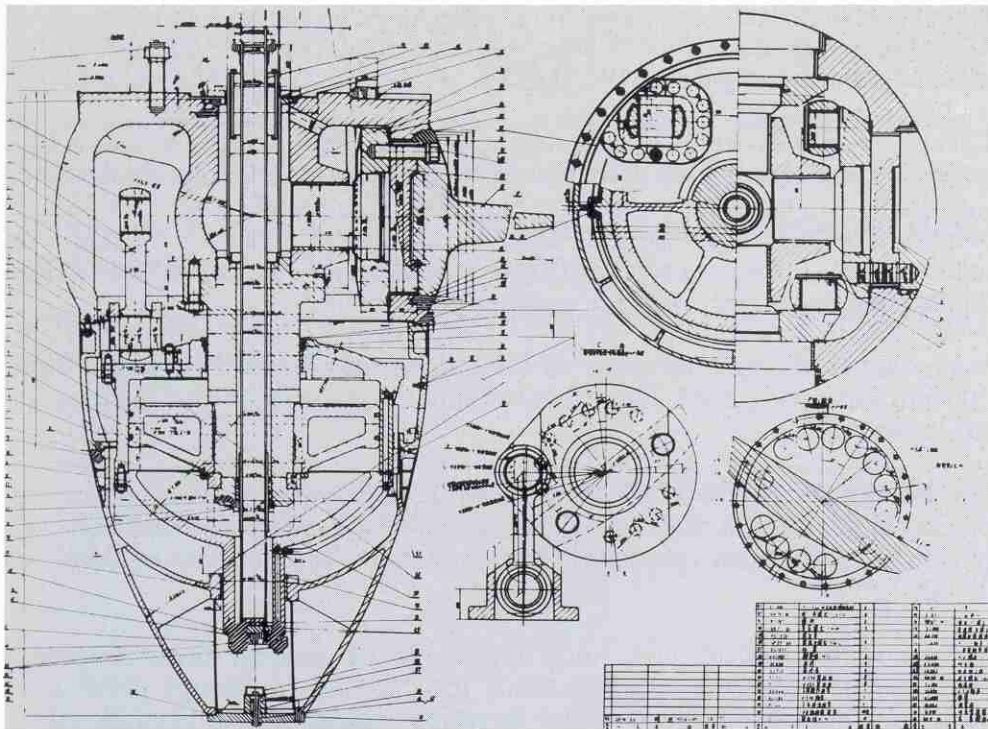
Le manteau, d'une masse totale de 134 t, comprend 3 parties:

- un anneau supérieur en tôle d'acier, divisé en 4 parties pour le transport;
- un anneau intermédiaire usiné, le manteau proprement dit, en tôle d'acier inoxydable de 34 mm d'épaisseur renforcé par des nervures en acier doux;
- un anneau inférieur en tôle d'acier de 40 mm d'épaisseur, divisé en 8 sections.

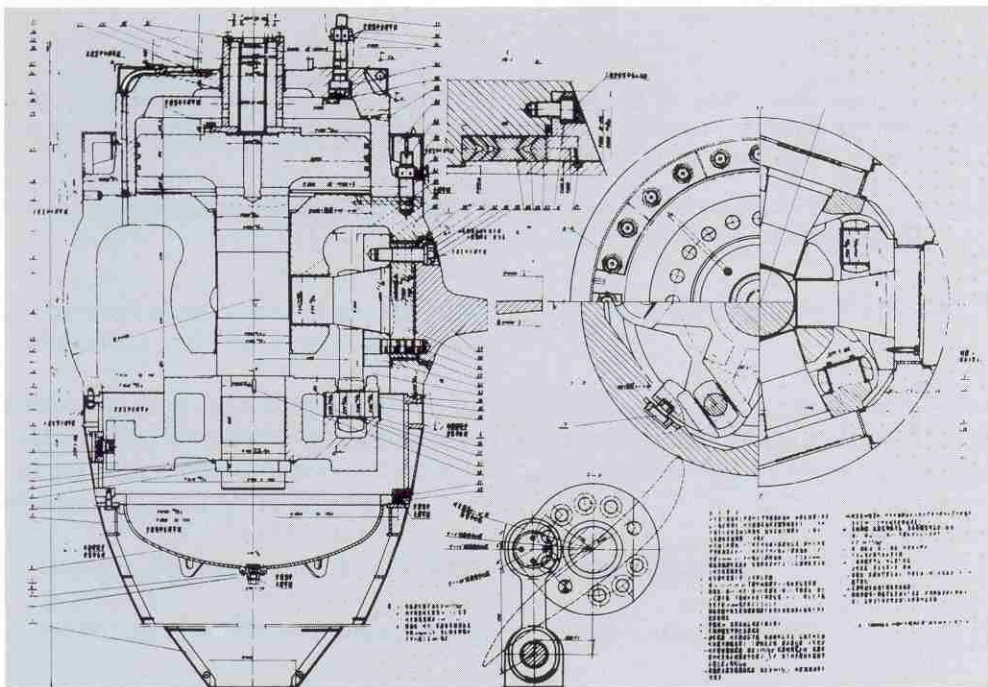
Le couvercle de la turbine, en construction mécano-soudée, est divisé en 4 parties. Il comprend 8 soupapes de 500 mm de diamètre pour aérer le canal en cas de déclenchement du groupe.

Le palier turbine est du type à patins, au nombre de 10, à lubrification naturelle. Le refroidissement est assuré directement par l'eau du canal de la turbine sans échangeur de chaleur.

L'arbre creux, d'une masse de 113 t, est en acier forgé 18 Mn Mo Nb. Son diamètre extérieur est de 1620 mm et son diamètre intérieur de 1290 mm.



8. Servomoteur et commande des pales des turbines de 176 MW (document Dongfang).



9. Servomoteur et commande des pales des turbines de 129 MW (document Dongfang).

Pour les machines de 176 MW, aucun phénomène d'instabilité n'a été constaté sur le modèle de 3,000 m de diamètre, spécialement dans la zone de fonctionnement à très faible puissance, de l'ordre de 10% et en dessous de la puissance nominale, pour des chutes comprises entre 8 et 15 m.

Néanmoins, un mouvement radial de l'arbre, d'environ 1 mm, a été mesuré, ce qui représente le triple de la valeur normale. De plus, les fluctuations de pression atteignent 22% de la chute à l'amont de la roue et 14% dans le cône du diffuseur.

Fonctionnement

Le support du palier a été ensuite renforcé, mais sans succès. Les machines de 129 MW, par contre, restent stables même lorsque, pour une chute de 6,1 m, elles ne produisent que 19 MW.

L'usure due à la cavitation et aux sédiments a été attentivement étudiée sur les groupes 1 et 2. Durant les deux premières années d'exploitation, la masse de métal enlevée, calculée sur une base de 8000 h, a été de 109 kg et 73,3 kg respectivement, ce qui est tout à fait acceptable. Cependant, la partie du manteau de la turbine en acier au carbone, située juste en dessous de la roue, a dû être remplacée par une pièce en acier inoxydable.

Sur les aubes, des traces d'usure par cavitation sont visibles. Longues de 200 à 500 mm, larges de 120 à 150 mm, elles se situent à environ 100 mm du manteau, sur l'extrados.

L'inspection faite après 45 000 heures de fonctionnement a révélé une érosion par sédiments dans la partie inférieure des aubes directrices, au manteau et au moyeu de la roue, ainsi que dans la partie supérieure du cône dans les dernières 20 000 h.

Comme il était très difficile, sinon impossible, de ramener toutes les parties usées à leur géométrie originale dans le court laps de temps prévu pour l'entretien, elles ont été recouvertes de résine époxy, excepté l'extrados de la turbine No 1.

Bibliographie

- W.Y. Shen, D.A. Zeng, G.S. Hu, P.Y. Li. Seven years of Gezhouba turbine since commissioning of the first unit. International symposium on large hydraulic machinery and associated equipments, Beijing, 1989.
- G.N. Liu, F.D. Zhang. The 129 MW Kaplan turbine of Gezhouba Erjiang power station. AIRH Symposium, Montréal, 1986.

Centrale de Wells Dam

Etat de Washington, USA

10 turbines Kaplan de 90 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication des nouvelles roues:
Fuji Electric Co., Ltd., Tokyo, Japon

Maître d'œuvre: Public Utility District No 1 of Douglas County,
East Wenatchee, USA

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	161,5	191,2	222,6
H (m)	16,46	19,50	22,70
Q (m ³ /s)	529,5	518,2	538,0
P (MW)	75,2	89,5	96,9
D _e (m)	7,432	f (Hz)	60
D _i (m)	3,180	n (t/s; t/min)	1,43; 85,7
D _o (m)	8,354	N _{QE} (-)	0,63
B _o (m)	2,897	n _q	210
z _r (-)	5	v (-)	1,33
z _o (-)	20	σ _{min} (-)	0,803
z _{avd} (-)	20	σ _{max} (-)	1,486

Caractéristiques

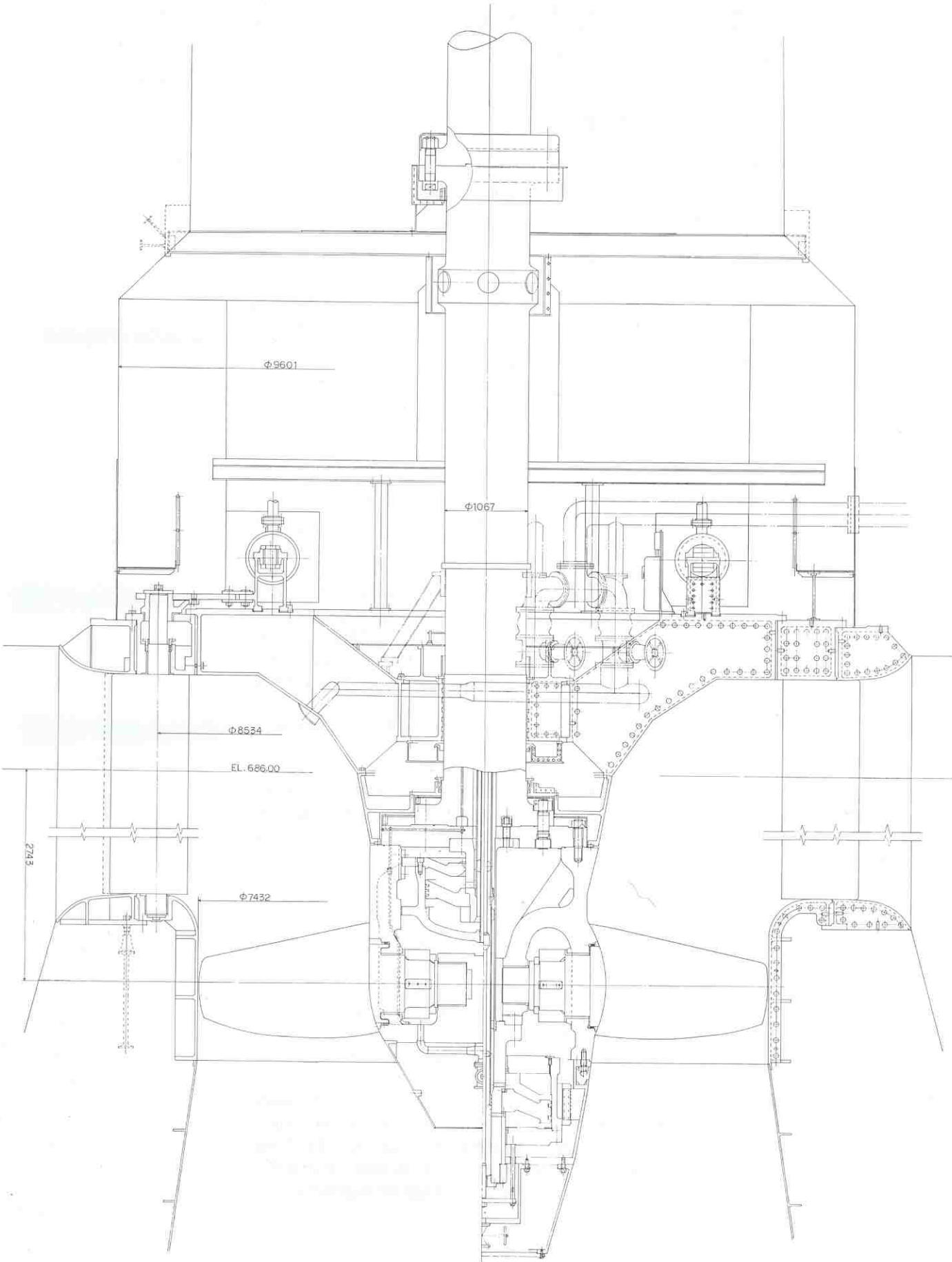
L'aménagement hydro-électrique de Wells est situé sur la rivière Columbia, à 80 km de la ville de Wenatchee.

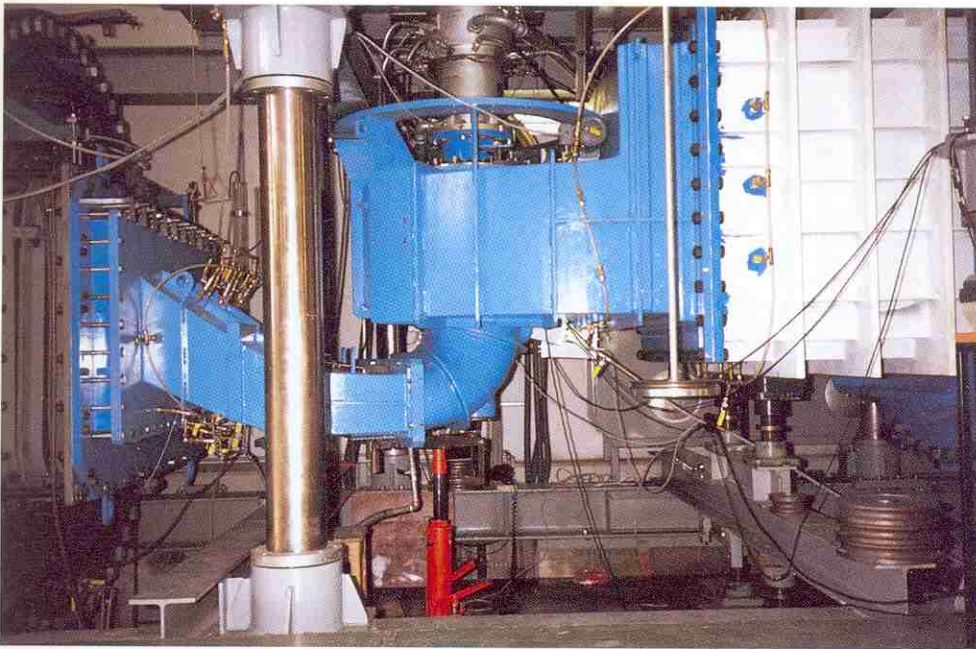
Généralités

Dès sa mise en service en janvier 1969, cette centrale a connu de nombreux problèmes d'exploitation. Après une année seulement, l'érosion de cavitation sur les aubes des turbines a exigé d'importantes et coûteuses réparations. Ces réparations ont été les suivantes:

- soudure d'une couche d'acier inoxydable sur les pales;
- installation de lèvres anticavitation à la périphérie des pales;
- allongement des pales à l'entrée, par soudure d'une pièce de largeur décroissante de la périphérie au moyeu (230 mm à la périphérie).

En 1971, des fuites d'huile se sont produites aux servomoteurs. En 1973, les croisillons de commande des pales se sont déformés au point que des biellettes ont frotté contre les parois internes des moyeux. En 1981, une avarie du palier turbine ayant exigé la mise hors service d'un groupe, on a constaté, à la suite de la rupture d'un axe de liaison (Ø 140 mm), qu'une aube de la roue était folle sur son axe. Une inspection des axes des autres turbines a montré l'existence généralisée de fissures. Le coût du démontage et du remontage de la génératrice,





1. Modèle sur la plateforme de l'IMHEF durant les essais comparatifs ($D_e = 340$ mm) (photo IMHEF).

de la turbine et du moyeu d'une roue étant très élevé, l'exploitant a décidé de ne réparer qu'un seul groupe; les pales des neuf autres roues ont été soudées au moyeu, les turbines fonctionnant ainsi en hélice.

L'importance des travaux de démontage et de remontage a incité l'exploitant à comparer les coûts de réparation au prix de nouvelles roues de conception moderne. Des mesures effectuées sur le groupe réparé ont montré que le rendement maximal était de 89% environ, alors qu'on pouvait espérer une valeur bien plus élevée avec des roues modernes. L'accroissement de revenu obtenu grâce à ce gain de rendement a permis d'envisager l'achat de nouvelles roues et de les amortir en 3 ans. Cette option a été retenue par l'exploitant.

La démarche habituelle qui consiste à lancer un appel d'offres et à choisir un fournisseur sur cette base n'a pas été retenue. Il a été décidé de sélectionner deux constructeurs et de les départager par des essais sur modèle réalisés par un laboratoire neutre. Ainsi, les deux constructeurs pressentis ont obtenu un contrat pour la fabrication d'un modèle réduit homologue et le développement d'une nouvelle roue dans leurs propres laboratoires. Les 2 modèles ont été ensuite essayés dans le laboratoire de l'IMHEF (fig. 1).

Le diamètre des roues modèles était de $D_e = 340$ mm et la chute d'essai comprise entre 10 et 14 m.

D'autre part, pour inciter les fabricants à réaliser la meilleure roue possible, l'exploitant a prévu d'attribuer une prime de $2 \cdot 10^6$ dollars par pour-cent de rendement moyen pondéré mesuré au-dessus d'une valeur fixée à 92%.

Fuji Electric a obtenu finalement le contrat (fig. 2), avec un rendement pondéré prototype de 93,6%, ainsi qu'un comportement en cavitation satisfaisant et une vitesse d'emballement identique à celle des roues d'origine. Les roues prototypes ont ensuite été fabriquées et la première roue a été mise en service en 1988.

2. Roue munie de lèvres anticavitation avant sa sortie de l'atelier (photo Fuji Electric).



3. Equilibrage dynamique d'une roue terminée (photo Fuji Electric).



Le constructeur ayant décidé de maintenir le manteau cylindrique, le tracé d'aubage a été optimisé afin d'obtenir un angle d'ouverture des pales de la roue plus faible. Cela permet de minimiser la cavitation marginale et la baisse de rendement aux fortes charges.

D'autre part, pour éviter les problèmes de résistance mécanique qu'avaient connu les premières roues, les servomoteurs de commande ont été déplacés en dessous de l'axe du tourillon.

Il est à noter que chaque roue a un diamètre différent, adapté au diamètre existant du manteau cylindrique, qui a varié selon les déformations des fondations en béton.

Les aubes ont été coulées et usinées en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni.

- J.M. Noda. *Competitive Model Testing for Replacement Runners at the Wells Hydroelectric Project*. Waterpower 1985, Las Vegas, Nevada.
- J.M. Noda, M. Asce and K.A. Pflueger. *Competitive Model Testing for Replacement Runners at the Wells Hydroelectric Project*. Waterpower 1987, Portland, Oregon.

Conception

Bibliographie

Centrale de Porto-Primavera

Etat de São Paulo, Brésil

18 turbines Kaplan de 103 MW

Conception hydraulique et mécanique: Neyrpic, Grenoble, France

Fabrication: Neyrpic, Grenoble et Mecânica Pesada, Taubate, Brésil

Maître d'œuvre: Companhia Energetica de São-Paulo (CESP), Brésil

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	130,5	179,5	220,2
H (m)	13,30	18,30	22,45
Q (m ³ /s)	502,5	618	506,5
P (MW)	60,5	103,0	105,0
D _e (m)	8,600	f (Hz)	60
D _i (m)	3,741	n (t/s; t/min)	1,25; 75
D _o (m)	10,490	N _{QE} (-)	0,63
B _o (m)	3,150	n _q	211
z _r (-)	4	v (-)	1,34
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,788
z _{avd} (-)	15	σ _{max} (-)	1,33

Caractéristiques

La centrale de Porto Primavera, le plus récent des aménagements hydro-électriques sur le Paraná, est implantée au sud-ouest de l'Etat de São Paulo. Elle est située à 270 km en aval de la centrale de Jupia, à 230 km en amont de celle de Ilha Grande et à 400 km en amont de Itaipu.

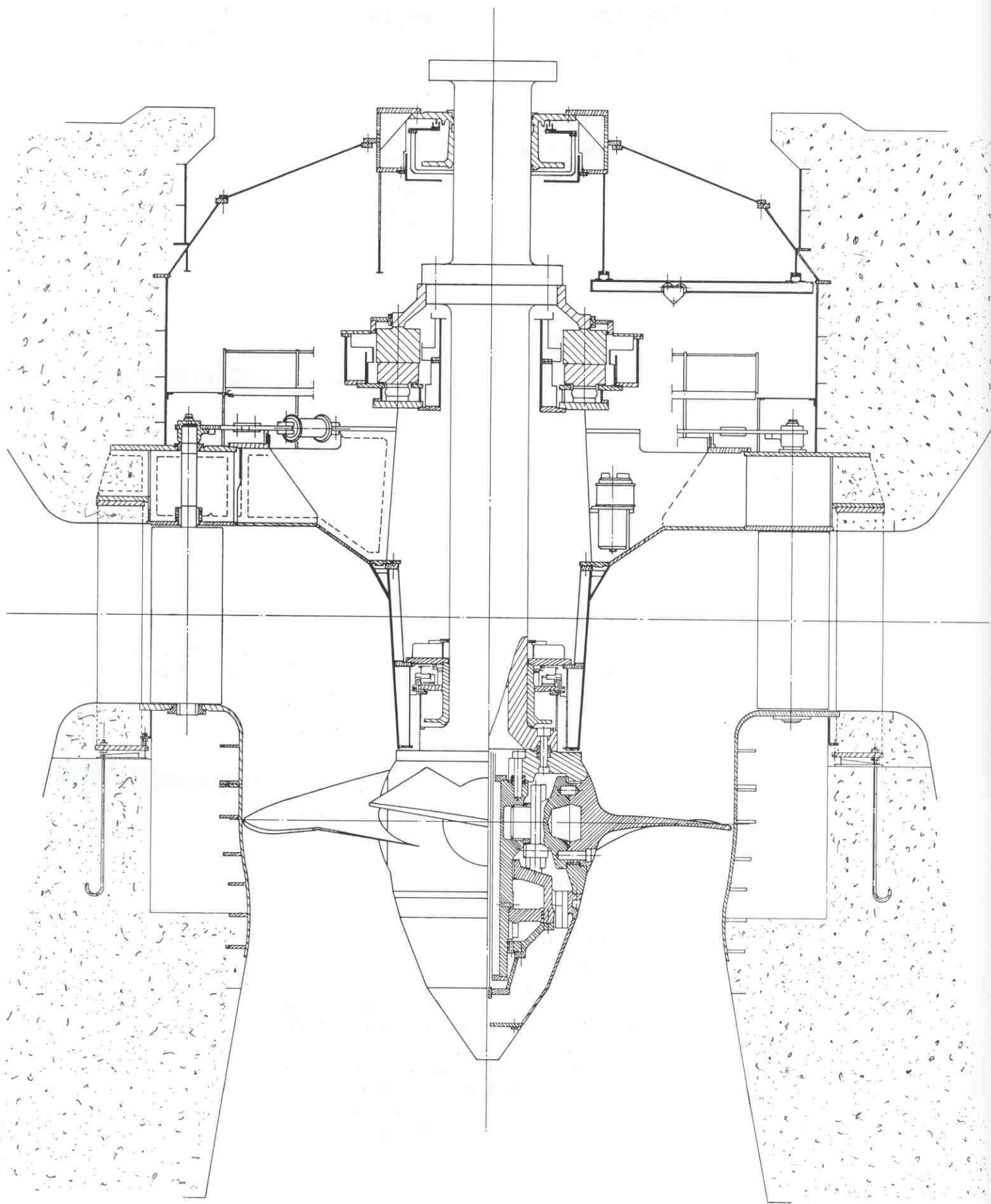
Généralités

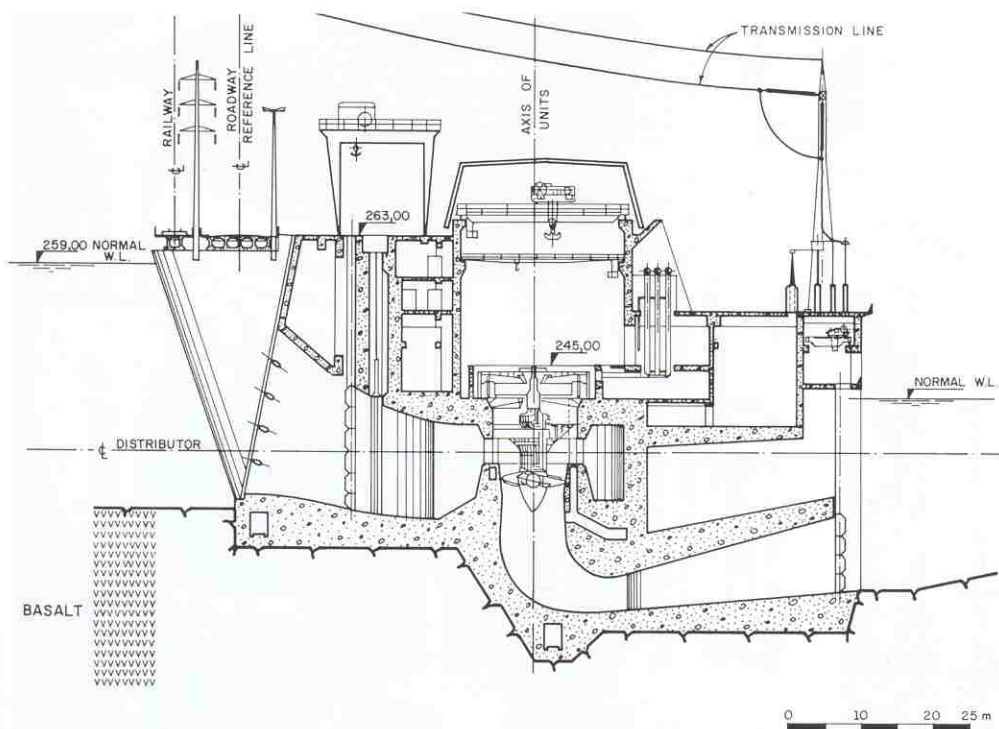
La retenue de Porto Primavera forme un lac de 250 km de long et d'une superficie de 2250 km².

L'aménagement a pour buts d'augmenter de 1800 MW la puissance installée du réseau CESP, de maintenir la navigation sur le Paraná et de relier les deux berges du fleuve par une autoroute et une voie ferrée.

Le barrage est une digue en terre d'une longueur de 5,500 km environ, prolongée en rive gauche par l'évacuateur de crues et par la centrale. L'évacuateur de crues est constitué de 16 pertuis de 15 m de largeur et équipé de vannes secteur de 22,8 m de hauteur. La longueur de l'ouvrage est de 314 m; le débit maximum prévu est de 52 800 m³/s. La centrale abritant les 18 groupes (fig. 1) a une longueur de 558 m pour une hauteur totale de 70,5 m.

Centrale de Porto-Primavera, Brésil





1. Coupe de la centrale au droit d'un groupe (document Neyrpic).

Une écluse de 210 m de longueur et 17 m de largeur est construite en rive gauche.

La production annuelle estimée est de l'ordre de 9 TWh.

La bêche est de type semi-spirale, et les aubes avant-directrices doivent assurer l'équirépartition du débit et l'égalité des angles d'injection sur les aubes du distributeur. Les 3 aubes proches du bec de bêche dans la partie à écoulement frontal ont un profil asymétrique, alors que les 12 aubes de la partie spirale sont symétriques. Il existe également une dissymétrie dans la répartition de leur azimut. En outre, elles sont dimensionnées:

- de manière à réduire les forces excitatrices pulsatoires induites par les tourbillons de Karman sur l'arête de sortie et les décollements sur l'arête d'entrée;
- de sorte qu'il n'y ait pas de résonance entre ces types d'excitation et les fréquences propres de vibration en flexion ou en torsion.

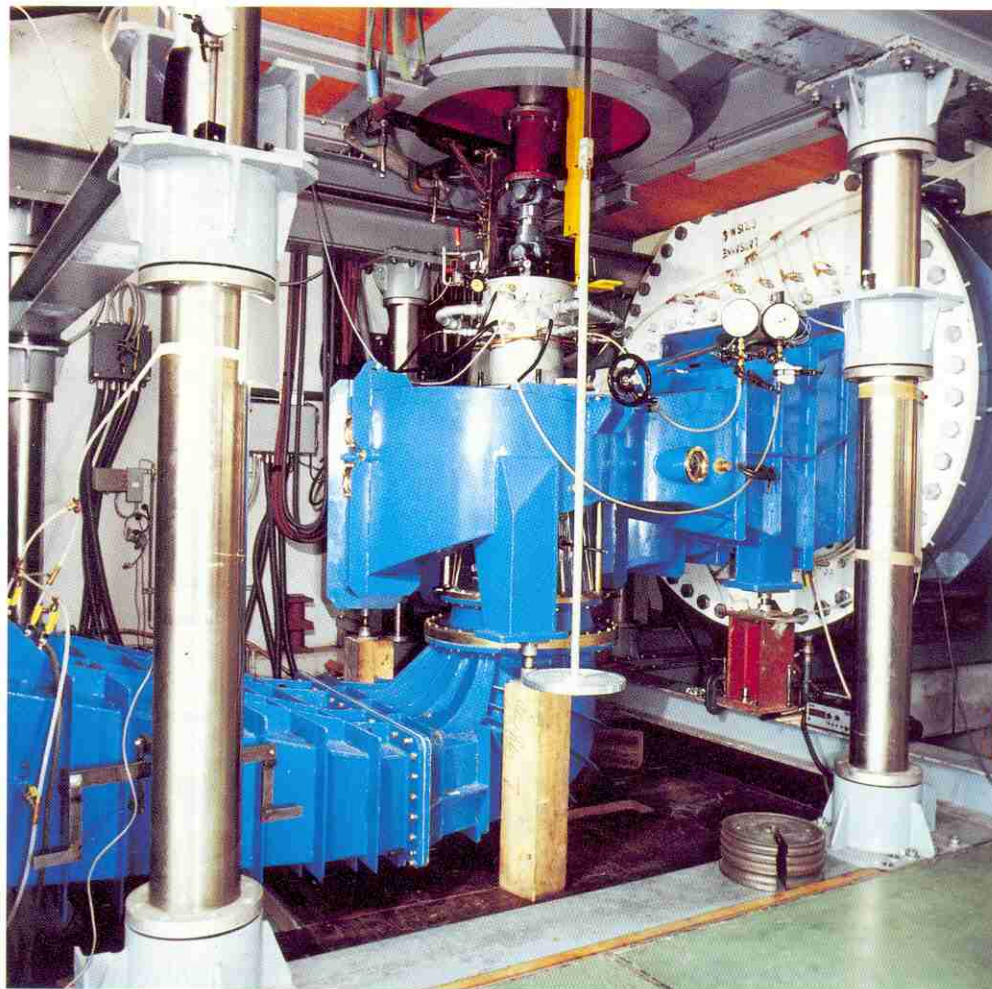
Les 24 aubes du distributeur ont un profil symétrique.

Le diamètre du moyeu de la roue est un compromis entre les critères hydrauliques et les impératifs de résistance mécanique. Un petit diamètre de moyeu augmente la puissance spécifique de la machine, tout en améliorant le rendement et les caractéristiques en cavitation. Toutefois, le dimensionnement mécanique du servomoteur et du système de commande des pales nécessite un diamètre minimum acceptable. Le rapport de rayon choisi est

$$r_i = \frac{D_i}{D_e} = 0,435.$$

**Conception
hydraulique**

2. Modèle d'essai installé sur la plate-forme de l'IMHEF pour les essais de réception ($D_e = 0,500$ m, $H = 3$ m) (photo IMHEF).



L'épaisseur de l'attache des pales doit être suffisante pour éviter des fissurations dues principalement aux vibrations induites par des dissymétries de l'écoulement à l'amont de la roue. Il faut néanmoins remarquer qu'une augmentation d'épaisseur entraîne en général une perte de rendement.

Le diffuseur a un rapport hauteur-diamètre de roue de 2,76. Il est muni d'un seul pilier. La section de sortie a une largeur de 24,30 m et une hauteur de 9,50 m.

Les essais de réception officiels ont été exécutés par l'IMHEF. Le modèle (fig. 2) avait un diamètre $D_e = 0,500$ m et la chute d'essai était $H = 3$ m. Les essais classiques de rendement, de cavitation et d'emballement ont été exécutés en présence d'un représentant de CESP.

Conception mécanique

La bêche semi-spirale est en béton. La section d'entrée, d'une largeur de 25 m, est divisée en 3 sections séparées par des piliers destinés à répartir les efforts.

Dans les turbines basses chutes, de moyennes et grandes dimensions, la structure en béton n'est pas autoporteuse et l'avant-distributeur participe à la résistance de la partie médiane de la centrale. Dans ces conditions, les avant-directrices travaillent en compression lorsque la bêche est vide et en traction

lorsque la bêche est en pression. En outre, la grande hauteur du distributeur conduit à des avant-directrices très longues dont les déformations deviennent importantes et conduisent à des fortes variations du jeu aux extrémités des aubes directrices.

Les avant-directrices sont creuses et ont une épaisseur de 255 mm. Elles sont fabriquées en tôle d'acier de 40 mm d'épaisseur. Des avant-directrices pleines auraient une épaisseur de 130 mm seulement et présenteraient une sécurité plus faible. En effet, la fréquence d'excitation des tourbillons de Karman est relativement proche (environ 2,3 fois plus basse) de la première fréquence propre de flexion des avant-directrices dans l'eau. Avec les aubes épaisses, on multiplie le facteur de sécurité par 3.

Les anneaux supérieurs et inférieurs de l'avant-distributeur sont des structures caissonnées très rigides ancrées dans le béton.

Les aubes directrices ont une hauteur de 3,150 m et sont réalisées en construction mécano-soudée. Le profil creux est soudé sur un tourillon central continu d'une longueur de 5 m.

La sécurité est assurée par un dispositif classique composé d'un doigt de rupture en traction situé entre un levier claveté sur le tourillon de la directrice et un levier fou reliant ce levier claveté et la biellette de commande. Ainsi, même en cas de rupture du doigt, la directrice désolidarisée du système ne peut pas se fermer plus vite que les autres directrices. Tout risque de rupture en chaîne est également exclu. Ce doigt de rupture est dimensionné compte tenu des efforts maximaux obtenus pendant les régimes transitoires, l'emballement ou la désynchronisation éventuelle d'une directrice par rapport à la grille d'aubes.

Le flasque supérieur du distributeur est du type caisson nervuré présentant le maximum de rigidité. Le diamètre intérieur permet le démontage de la roue après enlèvement du fond. Le diamètre extérieur de cette pièce réalisée en 4 parties est de 13,75 m, sa masse est de 145 t.

Le flasque inférieur du distributeur est démontable par le bas et permet l'enlèvement des directrices par le bas, dans une chambre circulaire autour du manteau de la roue.

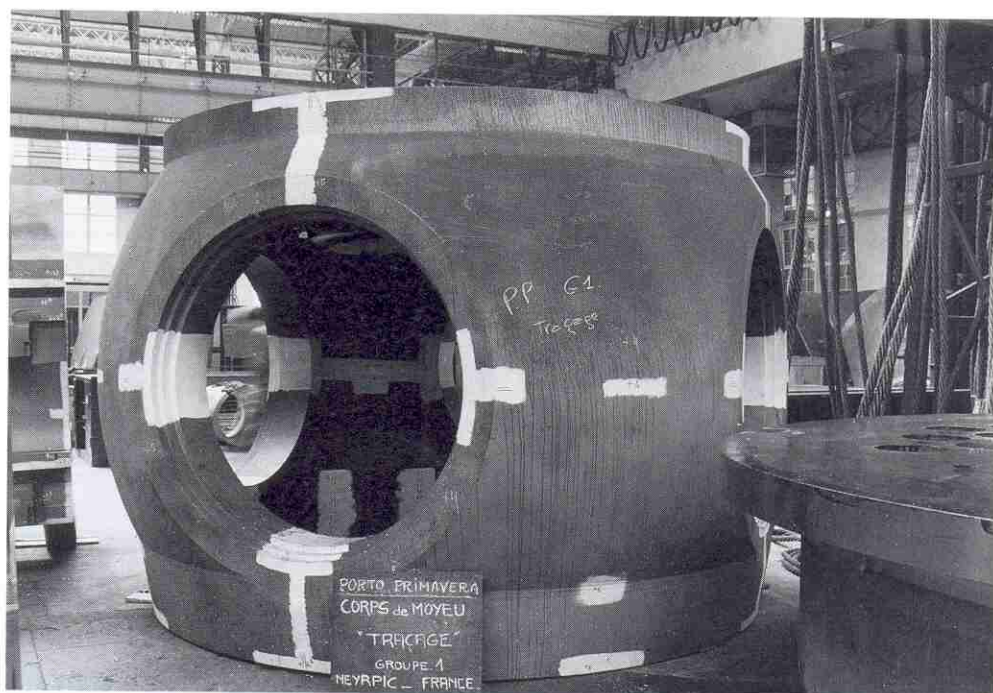
Les pales de la roue, d'une masse de 17 t chacune, sont usinées par commande numérique à partir d'une ébauche coulée en acier inoxydable Z 5 CN 17.4.04 M et Z 5 CN 12.04 M.

Le moyeu (fig. 3) est en acier coulé ASTM A-643 grade A. Sa masse est de 62,5 t.

Les pales sont commandées par le système classique leviers-bielles. Les bielles sont reliées au croisillon qui est en même temps le corps mobile du servomoteur, placé en dessous des pales.

Le dimensionnement du fond supérieur est basé sur des considérations de rigidité et non de contraintes. Sa rigidité a été déterminée pour obtenir une fréquence propre axiale de l'ordre de 29 Hz. Le fond supérieur, d'une masse de 102 t, est en construction mécano-soudée (fig. 4). Il est divisé en 2 parties et supporte le pivot, les servomoteurs de commande du vannage, le cône qui lui *transmet* les efforts en provenance du palier de la turbine et les soupapes d'aération destinées à limiter la dépression dans l'espace distributeur-roue lors des déclenchements.

3. Moyeu de la roue. Sa masse est de 62,5 t (photo Neyrpic).



4. Flasque supérieur et fond de la turbine en position retournée (photo Neyrpic).



Le groupe comporte 3 paliers. Le palier inférieur est du type à coussinet lisse; il a un diamètre de 1350 mm. Il est autolubrifié et refroidi naturellement par son enveloppe extérieure baignant dans l'eau, le joint étant placé au-dessus du palier.

Les charges axiales sont reprises par le pivot qui repose directement sur le fond de la turbine. Il se produit un rééquilibrage partiel entre les charges axiales et les efforts de sens opposé dus à l'action de la pression sur l'ensemble fond-flasque supérieur. Pour améliorer la sécurité des grands pivots, il est indispensable de réaliser une équirépartition automatique des charges. Celle-ci est réalisée par un ensemble de membranes toriques en acier de faible épaisseur, remplies d'huile, et reliées entre elles par un circuit commun.

- A. Teixeira, S. Casacci, J. Bosc. Turbines Kaplan. Revue technique Neyrpic N° 1, 1982.
- A. Casacci, J. Bosc. Evolution des turbines Kaplan et des groupes axiaux pour l'équipement des installations de fortes puissances et basses chutes. La Houille Blanche N° 5/6, 1982.
- R. Silveira, L. Morita, A. Sauron, M. Vivo. Aménagement d'ensemble et turbines Kaplan de la centrale de Porto Primavera. Revue technique Neyrpic N° 4, 1985.

Bibliographie