

Centrale de Svartisen

Comté de Nordland, Norvège

2 turbines Francis de 350 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Kvaerner Eureka a.s, Oslo, Norvège

Maître d'œuvre: Statkraft, Oslo, Norvège

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	4511	5325	5737
H (m)	460	543	585
Q (m ³ /s)	78,0	71,5	73,0
P (MW)	322	350	386
D _{ie} (m)	2,354	f (Hz)	50
D _{li} (m)	4,307	n (t/s; t/min)	5,55; 333
D _o (m)	4,860	N _{QE} (-)	0,075
B _o (m)	0,282	n _q	25
z _r (-)	15 + 15	v (-)	0,16
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,050
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,053

Caractéristiques

L'aménagement de Svartisen comprend un système de captage d'eau très étendu, composé de quelque 40 prises d'eau dont 2 sont situées sous des glaciers. Les eaux sont amenées par des galeries d'une longueur totale de 80 km dans un lac artificiel fermé par une digue en terre avec un noyau en asphalte. La digue a une hauteur de 110 m et le volume du lac est de $3460 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Un tunnel de 8 km de longueur et de 8,5 m de diamètre sans blindage amène l'eau à la centrale. Celle-ci, souterraine, a une longueur de 82,5 m, une largeur de 18,5 m et une hauteur de 46 m.

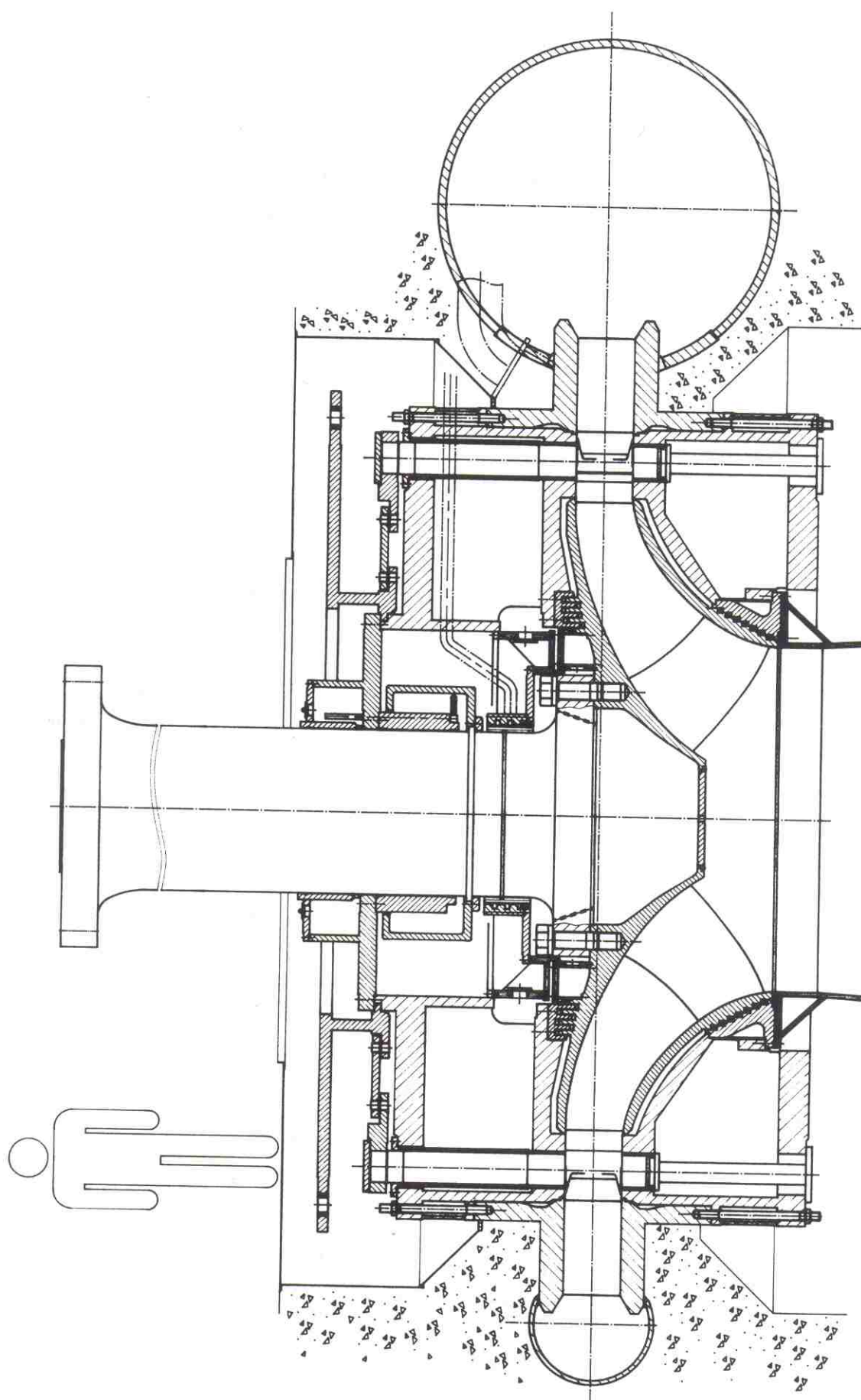
La mise en service des machines est prévue pour la fin de 1992 et la production annuelle moyenne estimée sera de 2,1 TWh.

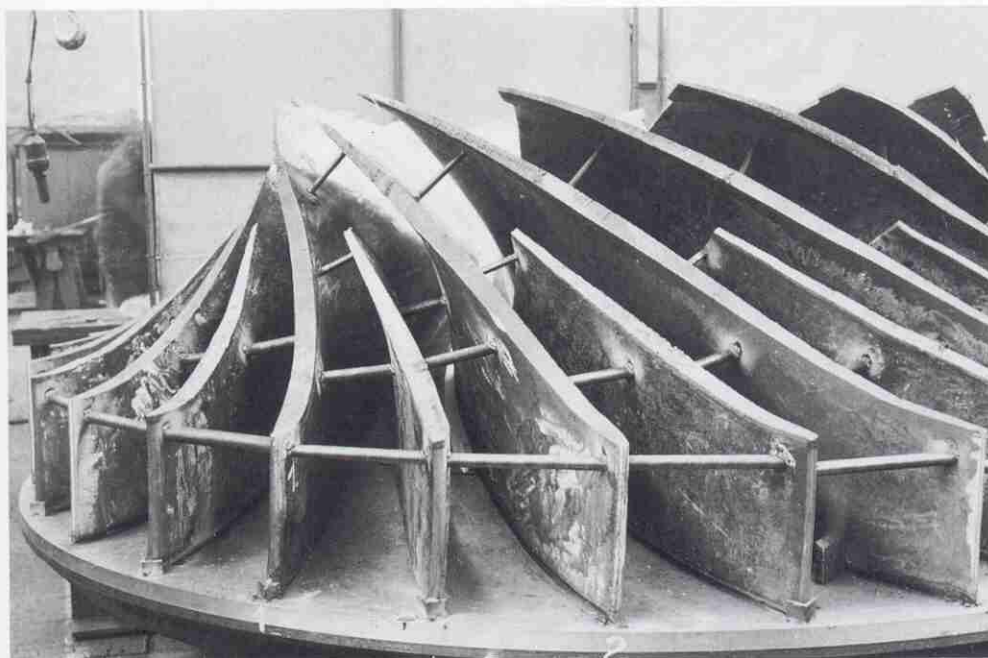
La bêche spirale est du type Piguet avec des bourrelets chanfreinés.

La roue a 15 aubes longues entre lesquelles sont disposées, à l'entrée, 15 aubes plus courtes (fig. 1). Cette particularité améliore l'écoulement, ce qui augmente le rendement à charge partielle et procure une zone de fonctionnement stable plus étendue. La roue est en outre munie d'un anneau de pompage spécial, situé dans le labyrinthe tournant du plafond de la roue. Cet anneau de pompage fournit une pression suffisante pour faire circuler l'eau de fuite dans les réfrigérants de l'alternateur et dans un réservoir d'eau de refroidissement situé à la partie supérieure de la centrale. Les labyrinthes ont aussi un effet filtrant qui simplifie l'installation de filtration. Ce système a l'avantage de supprimer les

Généralités

Conception hydraulique





1. Vue d'une roue, de faible vitesse spécifique, avec des aubes intermédiaires (photo Kvaerner Eureka).

fuites à l'arbre lorsque la machine est en fonctionnement et permet de donner un certain jeu au joint, ce qui diminue les pertes par frottement. Le rendement total de l'installation est ainsi amélioré.

La bêche spirale et l'avant-distributeur sont en construction soudée. L'avant-distributeur est fabriqué en ateliers puis transporté d'une pièce sur le chantier. Les viroles de la bêche sont en acier à grain fin, ce qui permet de les souder sur le site sans traitement thermique.

Les fonds supérieur et inférieur ainsi que l'avant-distributeur sont très rigides de manière à limiter les déformations. En effet, pour les turbines lentes, le jeu entre les directrices et les flasques supérieur et inférieur doit avoir une valeur minimale. Des mesures effectuées sur une turbine de même vitesse spécifique, d'une puissance de 50 MW sous une chute de 340 m, ont montré qu'un accroissement du jeu aux directrices de 0,5 mm provoquait une baisse de rendement de 0,4%.

Les surfaces des fonds supérieur et inférieur sont recouvertes d'acier inoxydable pour éviter des érosions dues aux très grandes vitesses d'écoulement.

Les aubes directrices sont également en acier inoxydable mais d'une dureté différente pour éviter des grippages.

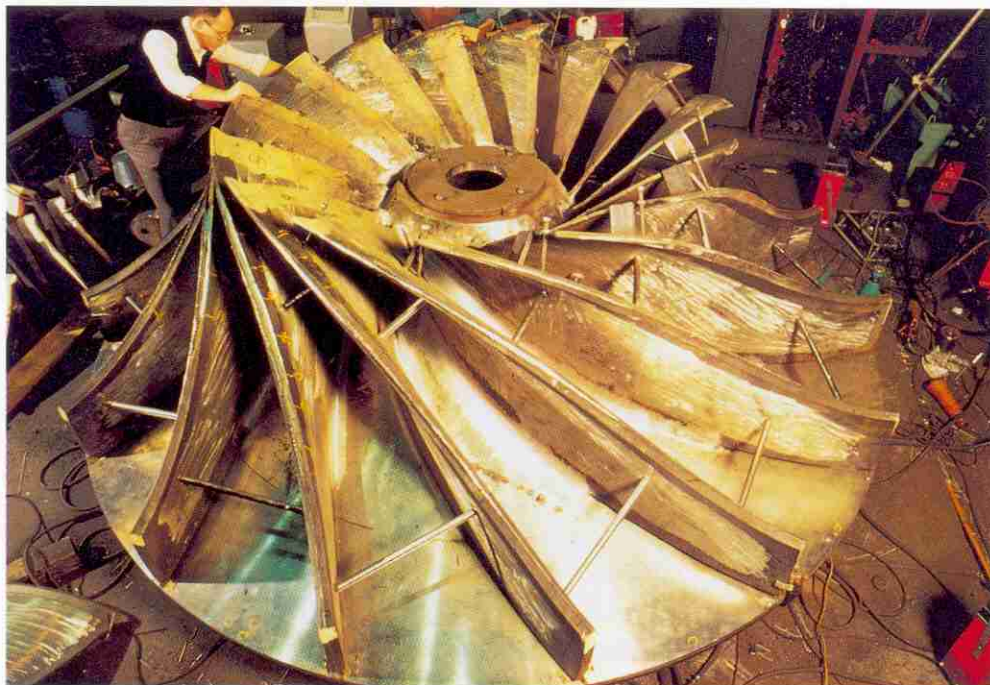
La roue (fig. 2), est en construction soudée en acier inoxydable 16 Cr - 5 Ni. Les aubes sont usinées puis matricées (fig. 3).

Le couple de la roue est transmis à l'arbre par un accouplement à friction. Les boulons sont creux pour permettre un préchauffage lors de leur mise en tension.

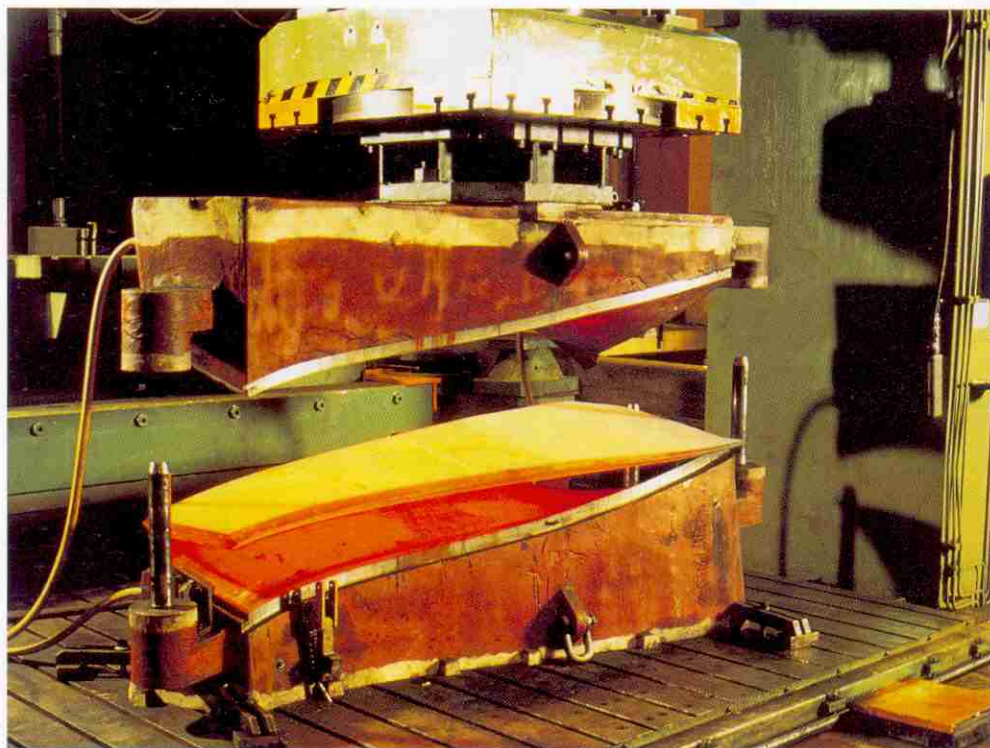
Le palier de turbine, d'une construction très rigide, est lubrifié naturellement sans pompe auxiliaire.

Conception mécanique

2. Roue en cours de soudure en ateliers. Les aubes intermédiaires ne sont pas encore placées (photo Kvaerner Eureka).



3. Matriçage à chaud d'une aube de la roue (photo Kvaerner Eureka).



Le fond inférieur et le cône du diffuseur ne sont pas bétonnés, de manière à permettre le démontage de la roue par le bas.

Bibliographie

- H. Brekke. The influence from the guide vane clearance gap on efficiency and scale effect for Francis turbines. Comptes rendus du 14^e Symposium AIRH, section Machines et cavitation, Trondheim, 1988.

Centrale de Alto Lindoso

Région de Minho, Portugal

2 turbines Francis de 317 MW

Conception hydraulique et mécanique: Neyrpic, Grenoble, France

Fabrication: Sorefame, Amadora, Portugal et Neyrpic, Grenoble

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

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	2144	2703	2754
H (m)	218,6	275,6	280,8
Q (m ³ /s)	108,7	126,0	123,3
P (MW)	215,3	317,0	317,0
D _{ie} (m)	3,770	f (Hz)	50
D _{li} (m)	4,976	n (t/s; t/min)	3,57; 214
D _o (m)	6,100	N _{QE} (-)	0,11
B _o (m)	0,716	n _q	36
z _r (-)	13	v (-)	0,23
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,167
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,215

Caractéristiques

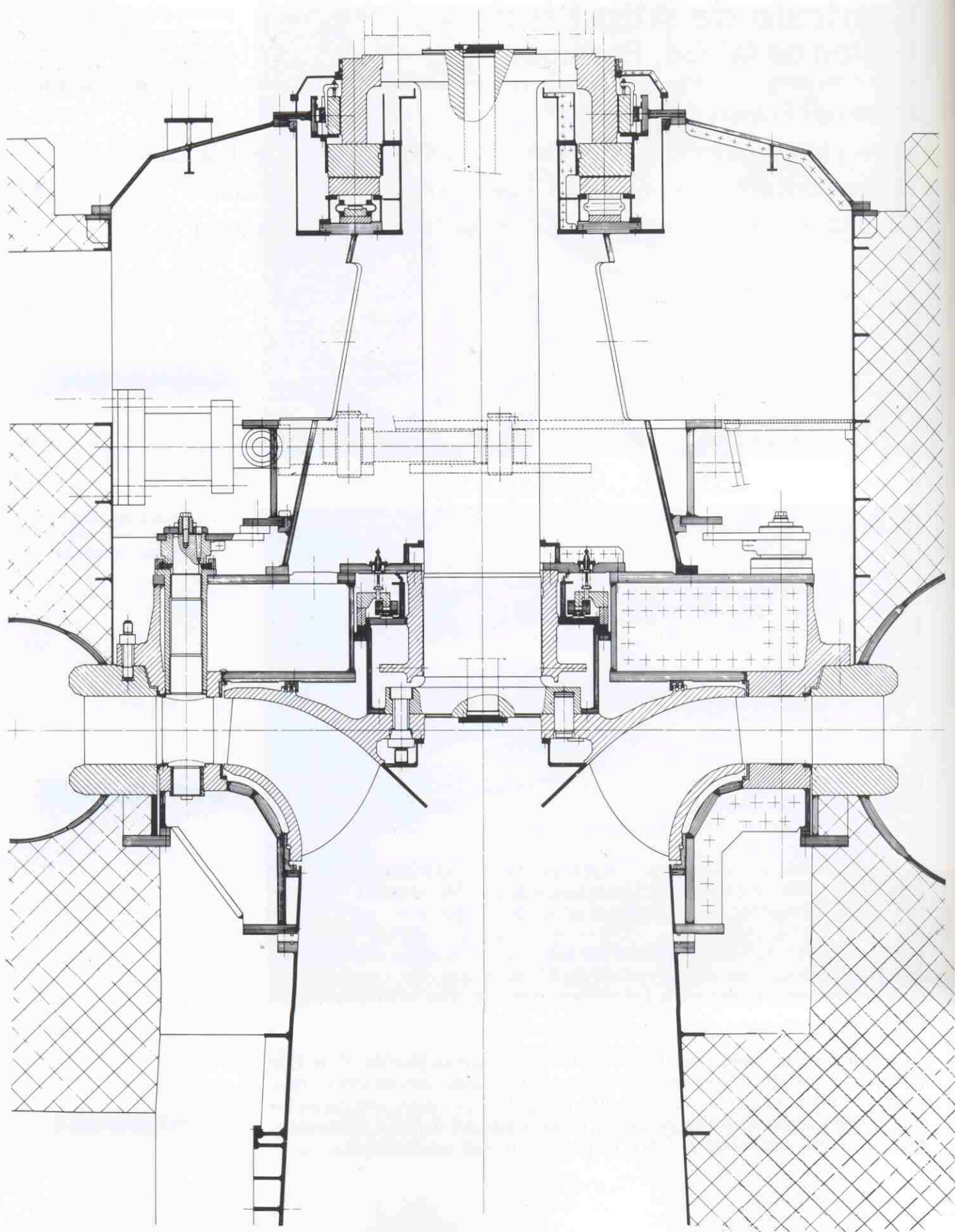
L'aménagement de Alto Lindoso est situé sur la rivière Lima qui coule d'est en ouest tout au nord du Portugal avant de se jeter dans l'Atlantique près de Viana do Castelo. La centrale se trouve à 60 km à l'est de cette ville.

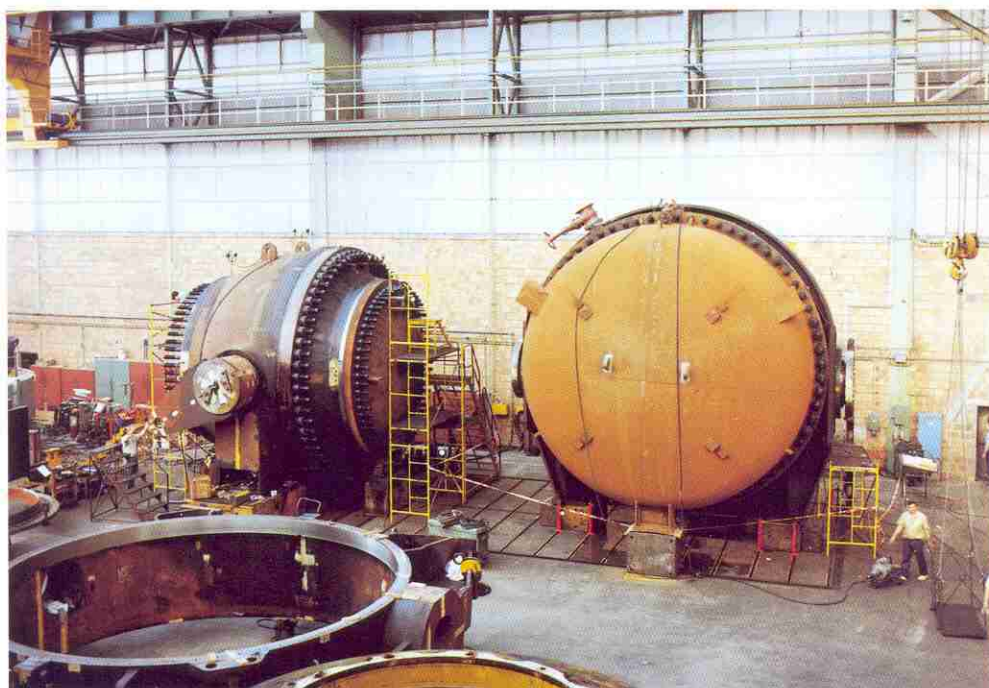
Généralités

Le barrage-voûte en béton a une hauteur de 110 m pour une longueur au couronnement de 300 m environ. L'évacuateur de crues comprend 6 passes de 6 m de largeur équipées de vannes secteur de 10 m de hauteur.

Les 2 groupes sont alimentés chacun par une galerie à faible pente de 6 m de diamètre et par un puits blindé vertical de 5,1 m de diamètre. Les longueurs cumulées galerie et puits sont de 455 m pour un groupe et de 503 m pour l'autre groupe.

La centrale, souterraine, a une longueur de 91 m et une largeur de 20 m. Elle comprend 2 chambres de vannes amont et aval. Les vannes amont sont du type sphérique, elles ont un diamètre de 3,400 m (fig. 1). Ces vannes sont parmi les plus grandes construites à ce jour. Leur masse totale est de 400 t, l'obturateur ayant à lui seul une masse de 100 t. La pression d'essai est de 58 bar.





1. Vannes sphériques de turbine pendant l'essai de pression en atelier (diamètre 3,400 m, masse 400 t) (photo Sorefame).

À l'aval, les turbines sont reliées à une cheminée d'équilibre par 2 galeries blindées de 5,75 m de diamètre.

Le canal de fuite unique est très long, 5 km environ, et son diamètre est de 8,3 m.

Des vannes papillon-treillis, de 5,750 m de diamètre, sont placées à la sortie des turbines pour protéger la centrale d'une éventuelle inondation. La contre-pression aval maximale est en effet de 85 m.

La production annuelle moyenne prévue est de 877 GWh. Les groupes ont été mis en service en 1991.

La bêche spirale a un diamètre d'entrée de 3,600 m. Elle est composée de 24 viroles.

L'avant-distributeur Piguet a des bourrelets d'un diamètre relativement grand, étant donné la forte épaisseur de la tôle des flasques (320 mm). Les avant-directrices sont planes avec des chanfreins (voir LG 4 et Tucurui).

Les aubes directrices ont un profil dissymétrique avec un côté plan. Leur épaisseur relative est de 0,225.

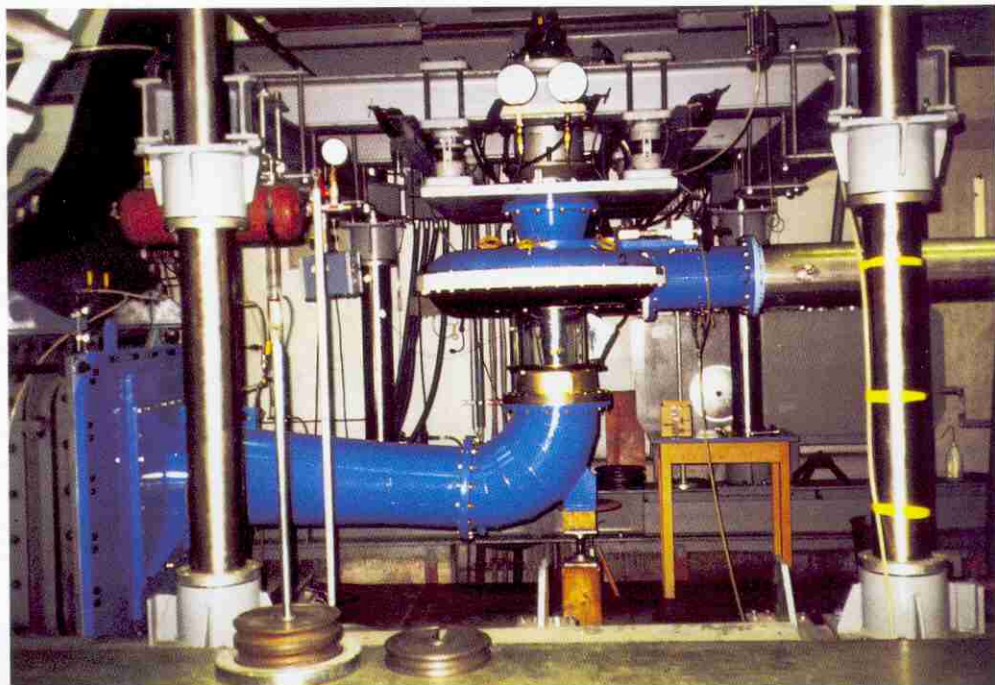
La roue a un profil hydraulique classique compte tenu de sa vitesse spécifique ($v_A = 0,21$).

Le diffuseur est entièrement composé de viroles coniques. La section de sortie est donc circulaire.

La profondeur relative $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}}$ est assez grande avec une valeur de 3,66.

**Conception
hydraulique**

2. Modèle d'essai d'un diamètre $D_{I_e} = 310$ mm pendant l'essai de réception officiel dans le laboratoire de l'IMHEF (photo IMHEF).



3. Avant-distributeur en cours de soudure. On remarque les brûleurs de préchauffage ainsi que la très grande épaisseur de tôles des 2 flasques (320 mm) (photo Sorefame).



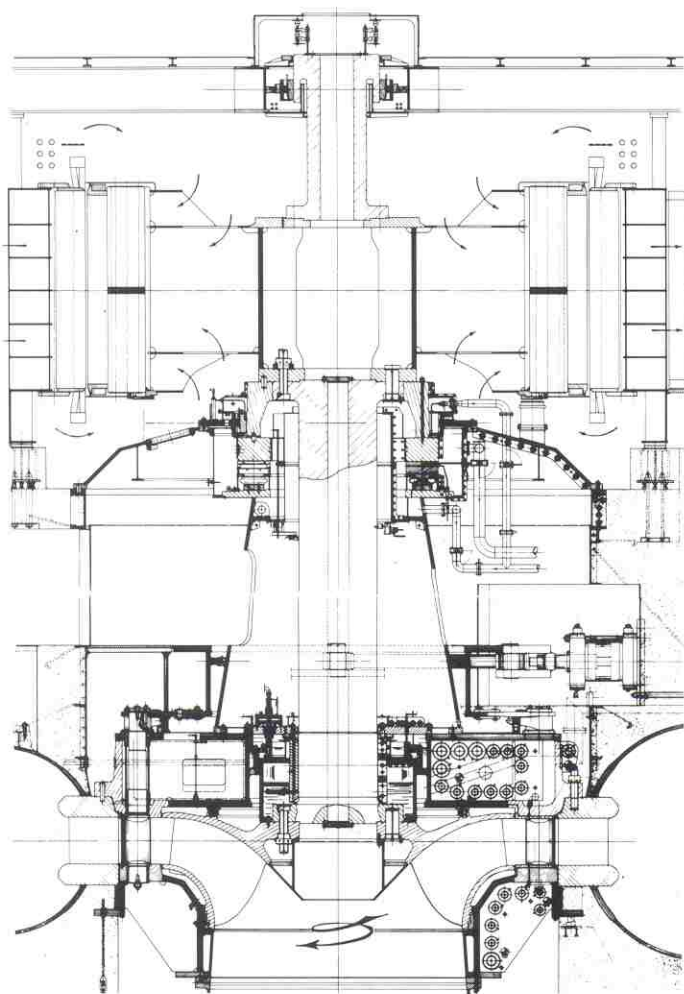
Les essais de réception officiels sur modèle réduit ont été effectués par l'IMHEF à l'aide d'un modèle d'un diamètre $D_{I_e} = 310$ mm et sous une chute $H = 22,5$ m (chute en similitude de Froude) (fig. 2).

Conception mécanique

Les viroles de la bache spirale, d'une masse totale de 79 t, sont soudées sur le site à l'avant-distributeur. Celui-ci est composé de 24 avant-directrices et de 2 anneaux en tôle d'acier E 36-4 Z 45 de 320 mm d'épaisseur. L'avant-distributeur est divisé en 2 parties soudées sur le chantier (fig. 3 et 4).

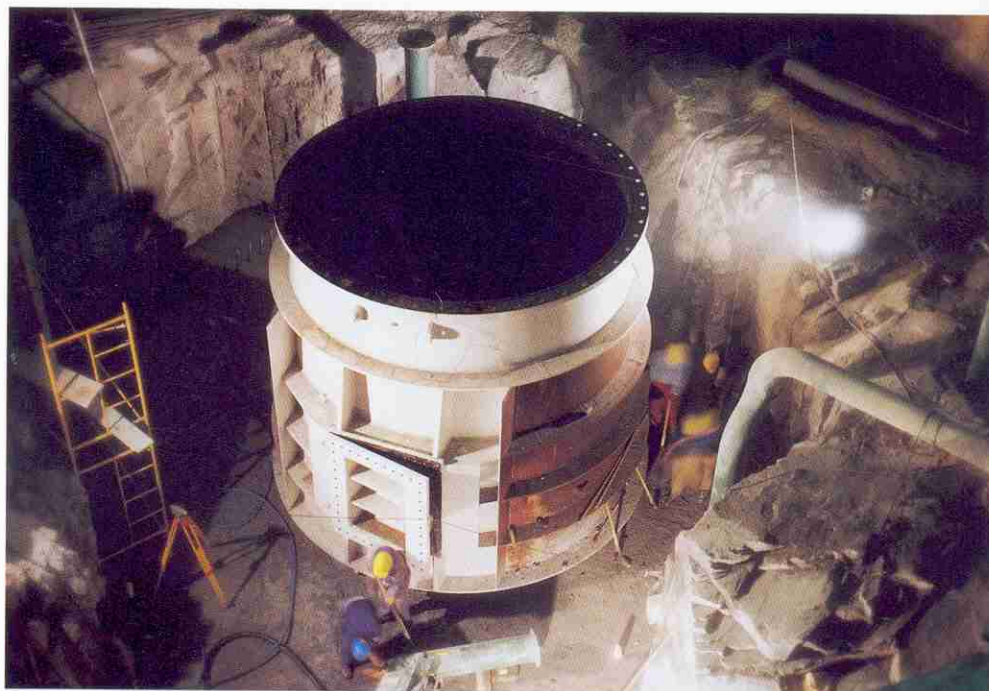


4. Assemblage des 2 moitiés de l'avant-distributeur avant usinage final (photo Sorefame).



5. Coupe du groupe sur laquelle on remarque la ligne d'arbre complète avec l'alternateur et les 3 paliers (document Neyrpic).

6. Mise en place du cône d'aspirateur dans la centrale (photo Sorefame).



Les directrices à 3 paliers sont en acier inoxydable coulé Z 5 CN 12 04 M; elles ont une masse de 1470 kg chacune.

La roue, d'une masse de 58 t, est en acier inoxydable 17 Cr - 4 Ni, coulée d'une pièce.

Le fond supérieur, d'une masse de 103 t, est en partie coulé en acier ASTM A 643 et en partie mécano-soudé en acier E 28-4.

Le fond inférieur est entièrement mécano-soudé en acier E 28-4 et sa masse est de 68,3 t.

Les 2 fonds sont divisés en 2 parties boulonnées sur le site.

L'arbre a 3 paliers, 1 palier sur le fond supérieur, 1 palier butée sous l'alternateur et 1 palier au-dessus de l'alternateur (fig. 5). Le palier turbine est à cuve tournante, celle-ci comprenant le joint carbone.

L'arbre est en acier forgé ASTM A 668 grade E et sa masse est de 62,5 t.

Le diffuseur est entièrement blindé, jusqu'à la chambre d'équilibre aval, avec de la tôle TSt E 355 d'une épaisseur de 27 mm.

La figure 6 montre le cône du diffuseur lors de sa mise en place à la centrale.

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

Centrale de Colbun

VII Region del Maule, Chili

2 turbines Francis de 213,5 MW

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

Maître d'œuvre: Empresa Electrica Colbun Machicura SA, Santiago du Chili, Chili

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1289	1628	1732
H (m)	131,4	166,0	176,6
Q (m ³ /s)	130,0	138,6	155,0
P (MW)	155,0	213,5	251,0
D _{1e} (m)	3,990	f (Hz)	50
D _{1i} (m)	4,295	n (t/s; t/min)	3,12; 187,5
D ₀ (m)	5,230	N _{QE} (-)	0,14
B ₀ (m)	0,890	n _q	48
z _r (-)	13	v (-)	0,30
z ₀ (-)	24	σ _{min} (-)	0,087
z _{avd} (-)	23	σ _{max} (-)	0,138

Caractéristiques

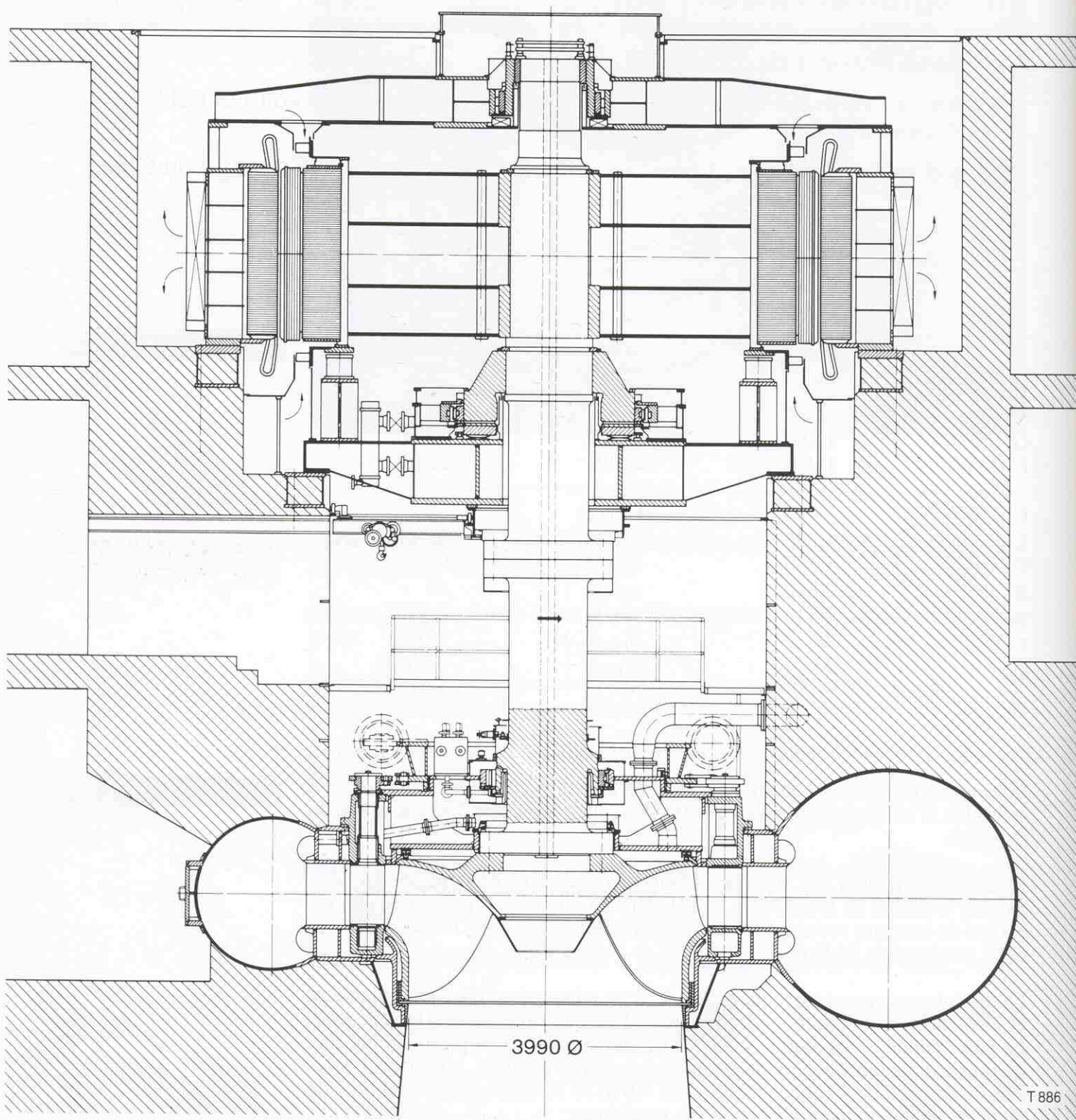
La centrale de Colbun constitue, avec celle de Machicura, un complexe de 2 centrales, d'une puissance totale de 490 MW, situé à environ 300 km au sud de Santiago.

Généralités

Le barrage principal, sur la rivière Maule, est une digue en terre de 116 m de hauteur et 550 m de longueur. L'évacuateur de crues, du type saut de ski, est équipé de 4 vannes secteur de 14,4 m de largeur prévues pour laisser passer un débit maximal de 7500 m³/s.

La centrale en caverne est reliée à la prise d'eau par un tunnel de 8 m de diamètre et 2650 m de longueur, muni d'une cheminée d'équilibre à son extrémité aval. Le puits blindé, d'un diamètre de 7,2 m, est vertical. Il se prolonge par une section horizontale de 80 m de longueur avec la bifurcation, une chambre des vannes équipée de 2 vannes papillon de 4,6 m de diamètre et une conduite de 50 m de longueur jusqu'à l'entrée des machines.

La production moyenne annuelle est de 2,45 TWh. La première machine a été mise en service en 1984.





1. Avant-distributeur de type Piguet à bourrelets et avant-directrices planes (photo VOITH).

La bêche spirale est du type Piguet avec un diamètre d'entrée de 4,430 m et de 3,960 m à l'axe de la machine.

Les avant-directrices sont planes avec des chanfreins à l'amont et à l'aval. Elles sont assez similaires à celles de LG 4 et Tucurui (fig. 1).

Les directrices ont un profil symétrique, avec une hauteur de distributeur de 890 mm.

La roue a un dessin très classique avec un labyrinthe cylindrique à l'extérieur et un labyrinthe à peigne au plafond. Les fuites sont évacuées par 3 tuyaux reliés au diffuseur.

L'aspirateur a une profondeur $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}} = 3,1$. La trompette d'aspirateur, de section carrée sans pilier central, est extrêmement longue: 45 m.

Des essais de réception très complets, supervisés par l'IMHEF, ont été exécutés chez le constructeur avec un modèle de diamètre $D_{ie} = 358,6$ mm et sous une chute de 35 m environ.

Le programme d'essai comprenait des mesures de: rendement, cavitation, vitesse d'emballement, fluctuations de pression et de couple avec et sans aération, couple sur les directrices.

Le maître d'oeuvre a en outre chargé l'IMHEF de procéder à un contrôle détaillé de la similitude entre le modèle et le prototype. Cette opération est en effet très importante pour assurer la transposition précise des résultats mesurés sur modèle au prototype (fig. 2 et 3).

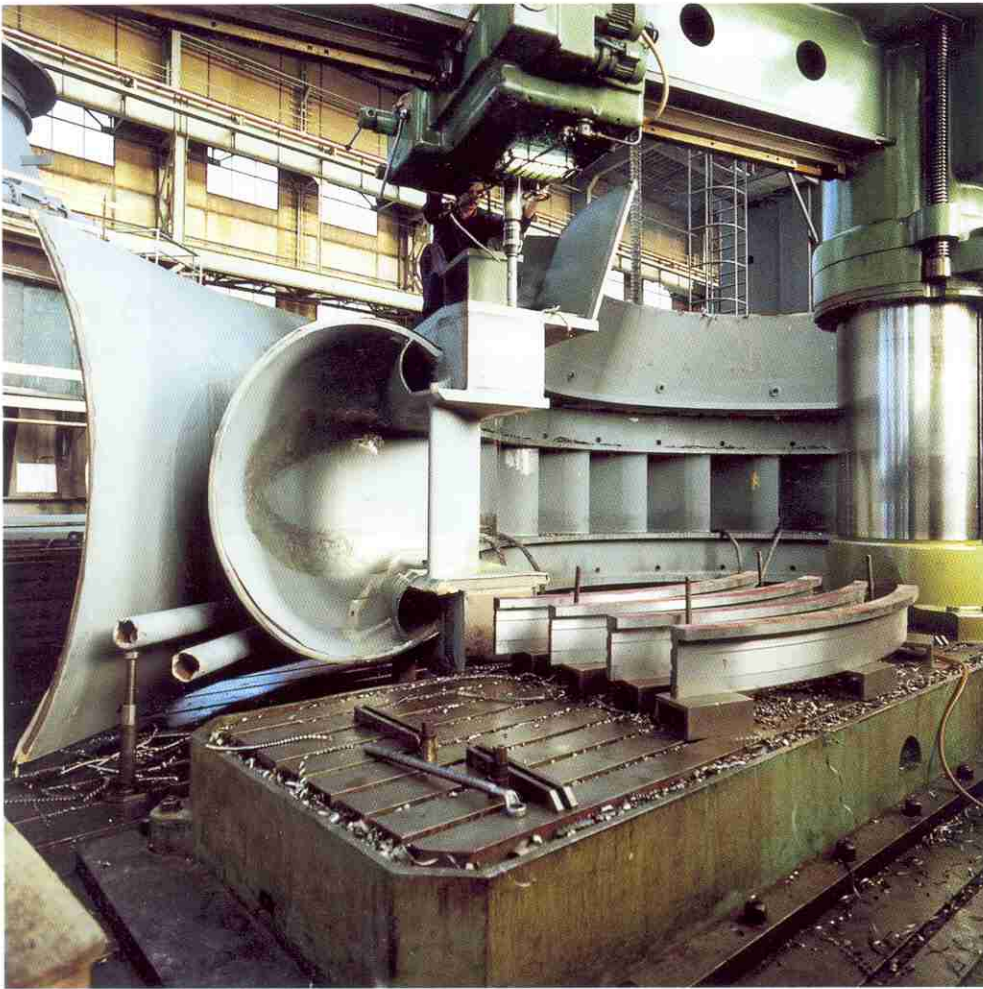
Conception hydraulique

2. Contrôle de la forme des aubes à l'entrée de la roue, à l'aide de 4 gabarits (photo IMHEF).



3. Contrôle de la forme des aubes à la sortie de la roue, à l'aide de gabarits (photo IMHEF).





4. Usinage d'une moitié de l'avant-distributeur. La photographie montre la partie terminale de la bache (photo VOITH).

La bache spirale est en tôle soudée sur le chantier. Elle comprend 23 viroles.

L'avant-distributeur est composé de 2 anneaux creux en tôle soudée qui transmettent l'effort de la bache aux avant-directrices. L'avant-distributeur est divisé en deux parties boulonnées sur le chantier (fig. 4).

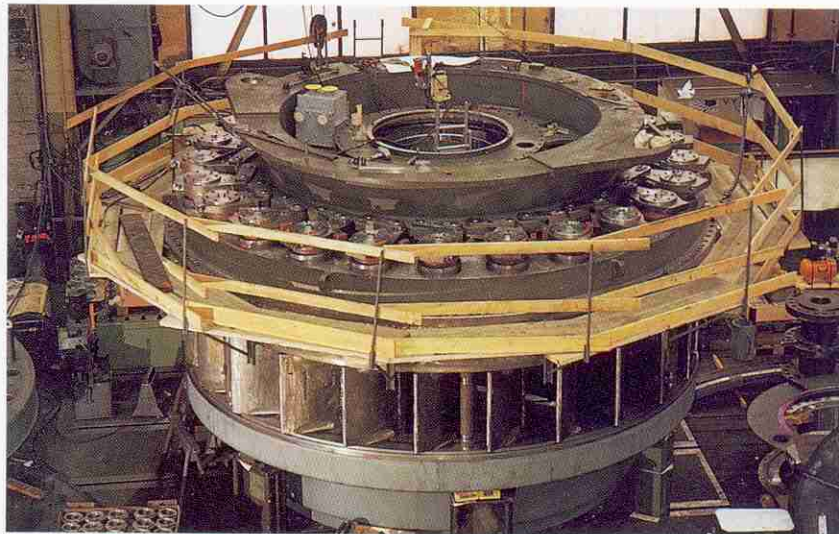
Les aubes directrices sont en acier inoxydable coulé. Les anneaux inférieur et supérieur du distributeur sont en acier coulé GS 20 Mn 5. Les aubes sont guidées par 3 paliers avec des douilles en bronze lubrifiées par un système de graissage central. La commande du distributeur est classique avec levier - biellettes et cercle de vannage commandé par 2 servomoteurs.

Le système de protection des aubes directrices comprend une goupille de rupture ainsi qu'un système de frein pour éviter une rupture en cascade des goupilles (fig. 5).

La roue, d'une masse de 52 170 kg, est en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4, coulée d'une pièce (fig. 6).

**Conception
mécanique**

5. Distributeur en cours de prémontage en atelier. On peut voir tout le système de commande des aubes comprenant le cercle de vannage, les biellettes et les leviers (photo VOITH).



6. Roue en cours de contrôle dimensionnel par l'IMHEF (photo THYSSEN).



L'arbre, en acier forgé CK 35 N, a un diamètre de 1150 mm, une longueur de 4375 mm et une masse de 45 t.

Le palier turbine, d'un diamètre de 1500 mm, est du type cloche avec des patins de guidage.

Centrale de El Cajon

Départements de Cortès et Yoro, Honduras

4 turbines Francis de 75 MW

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

Maître d'œuvre: Empresa Nacional de Energia Electrica (ENEE), Tegucigalpa, Honduras

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1108	1530	1765
H (m)	113,0	156,0	180,0
Q (m ³ /s)	43,0	53,6	57,2
P (MW)	41,4	75,0	91,6
D _{ie} (m)	2,475	f (Hz)	60
D _{li} (m)	2,624	n (t/s; t/min)	5,0; 300
D _o (m)	3,310	N _{QE} (-)	0,15
B _o (m)	0,495	n _q	50
z _r (-)	15	v (-)	0,32
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,179
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,220

Caractéristiques

L'aménagement de El Cajon est situé sur la rivière Comayagua, à 80 km au sud-est de San Pedro Sula. Le barrage-voûte en béton a une hauteur de 226 m pour une longueur de crête de 382 m. L'évacuateur de crues, équipé de vannes secteur, est dimensionné pour un débit de 14 300 m³/s.

La centrale est souterraine. Chaque groupe possède une vanne sphérique d'un diamètre de 2300 mm. Il est prévu de doubler la puissance de la centrale, qui atteindra ainsi 600 MW.

La première machine a été mise en service en 1985. La production annuelle moyenne totale de la centrale sera de 1,35 TWh.

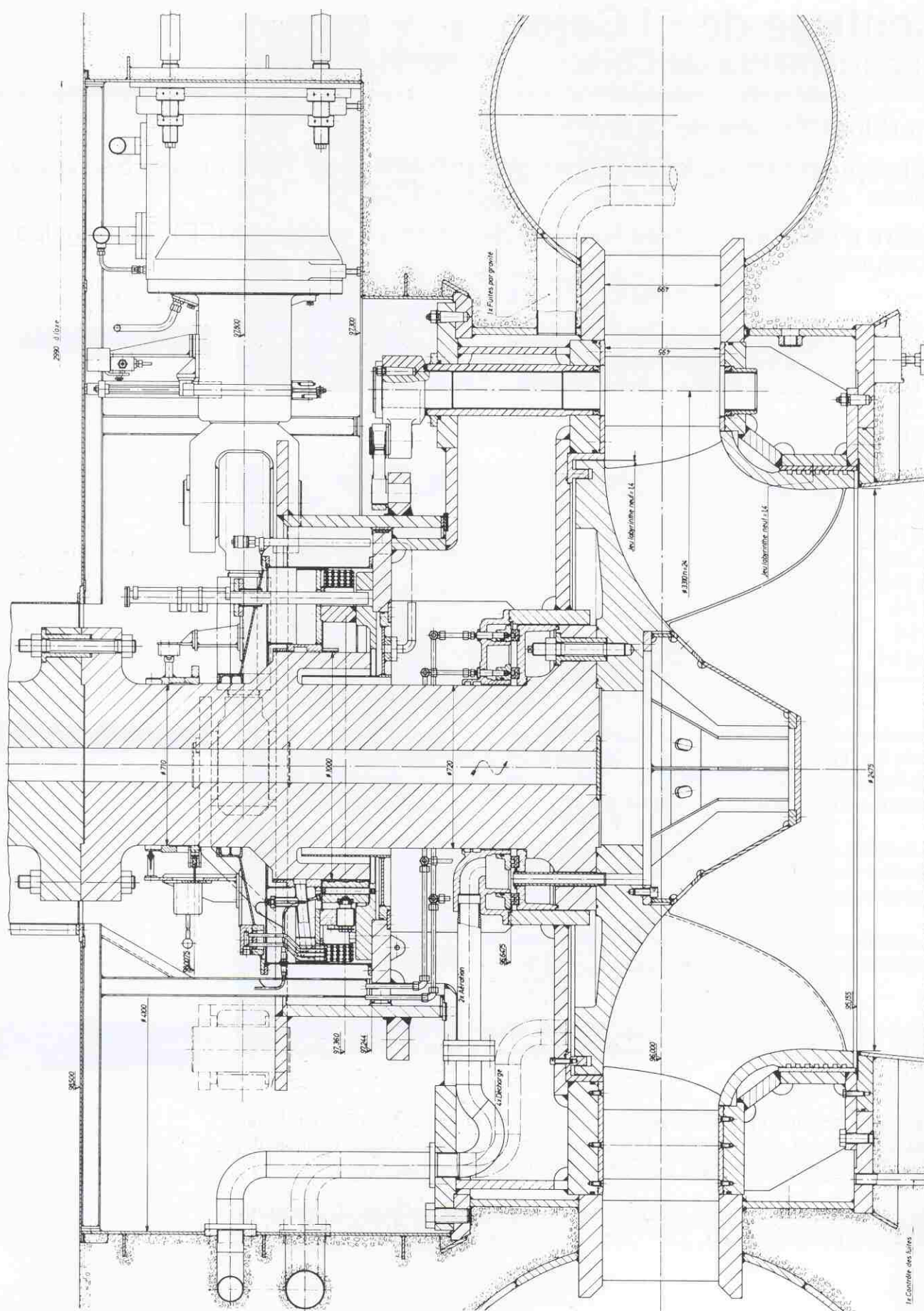
La bêche spirale est subdivisée en 23 viroles, son diamètre d'entrée est de 2,60 m pour une largeur de 8,55 m qui conduit à un entre-axe des groupes de 15,0 m.

L'avant-distributeur Piguet ne possède pas de bourrelets; les plaques parallèles sont simplement chanfreinées. Les avant-directrices sont légèrement incurvées. Elles sont chanfreinées à l'entrée et effilées à la sortie.

Les aubes directrices sont asymétriques avec l'intrados plan. L'épaisseur relative au pas est de 0,20.

Généralités

Conception hydraulique



La roue a un canal très classique, compte tenu de sa vitesse spécifique optimale $v_s = 0,27$.

Le diffuseur est relativement profond avec $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,15$. La trompette est étroite et ne possède pas de pilier central.

Les essais de réception ont été effectués dans le laboratoire de Hydro Vevey avec un modèle de diamètre $D_{1e} = 280$ mm et sous une chute $H = 15$ m.

La bache spirale a été partiellement assemblée en atelier et expédiée sur le chantier par groupe de 3 ou 4 viroles.

L'avant-distributeur a été entièrement terminé en atelier. Il se compose de 2 anneaux en acier St E 36 Z de 100 mm d'épaisseur et de 24 avant-directrices de 50 mm d'épaisseur en acier St E 36 (fig. 1).

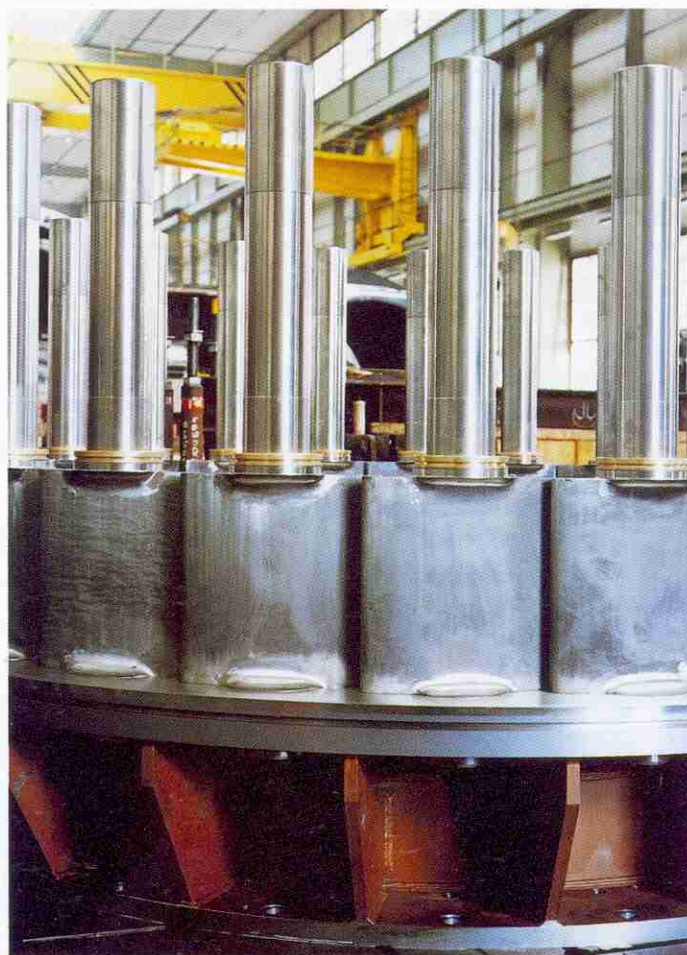
La masse totale de la bache et de l'avant-distributeur est de 72,5 t.

Conception mécanique

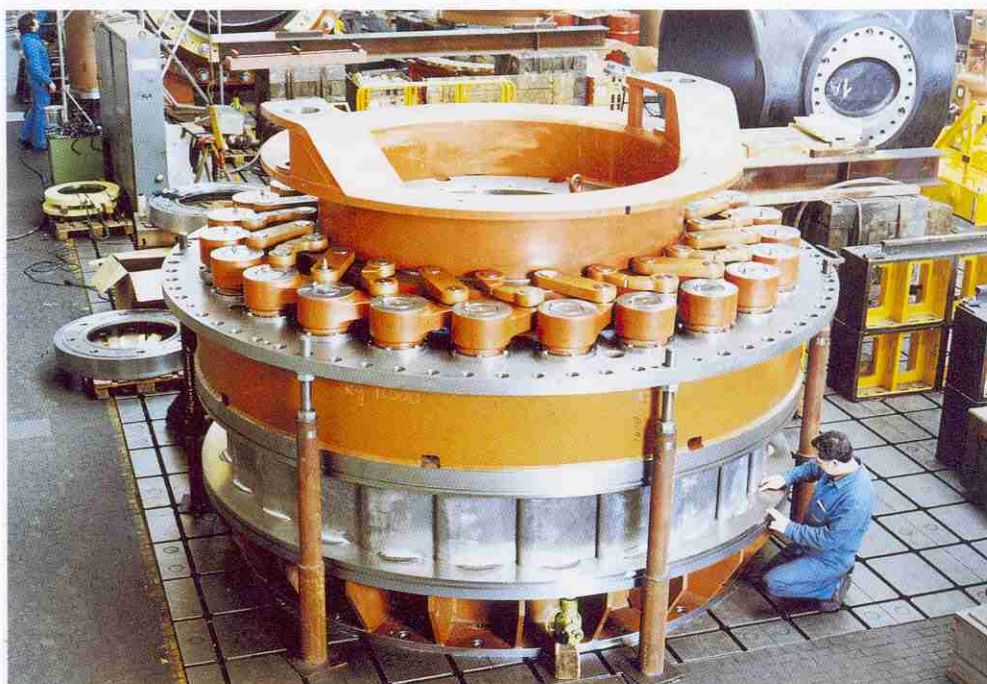


1. Avant-distributeur terminé en ateliers (photo Hydro Vevey).

2. Aubes directrices en cours de montage (photo Hydro Vevey).



3. Distributeur avec tout son système de commande prémonté en ateliers (photo Hydro Vevey).





4. Roue en cours de tournage (photo Hydro Vevey).



5. Fond supérieur monté dans la centrale (photo Hydro Vevey).

Les aubes directrices, à 3 paliers, sont en acier inoxydable coulé G - X5 Cr Ni 13.4 (fig. 2). Le système de protection est classique avec une bielle de rupture pour une paire d'aubes (fig. 3).

La roue, d'une masse de 13,35 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4 (fig 4).

Les fonds supérieur et inférieur sont en construction mécano-soudée en acier St E 26 Z 15 pour le fond supérieur et St E 26 pour le fond inférieur. La masse totale est de 22 t (fig. 5).

L'arbre est divisé en 2 parties, toutes deux en acier forgé CK 35. L'arbre inférieur comporte une cloche pour le palier turbine. La ligne d'arbre a 3 paliers, le palier turbine, un palier butée sous le rotor de l'alternateur et un palier au-dessus.

Bibliographie

- J.L. Pagès. L'aménagement hydroélectrique à buts multiples de El Cajon, de Empresa Nacional de Energia Electrica (ENEE), Honduras. Bulletin technique Vevey 1985.

Centrale de Atatürk

Anatolie, Turquie

8 turbines Francis de 306 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Sulzer-Escher Wyss SA, Zurich, Suisse

Maître d'œuvre: Devlet Su Isleri (DSI), Ankara, Turquie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1128	1483	1537
H (m)	125,25	151,20	156,70
Q (m ³ /s)	102,0	218,5	223,0
P (MW)	111	306	324
D _{ie} (m)	5,150	f (Hz)	50
D _{li} (m)	5,356	n (t/s; t/min)	2,5; 150
D _o (m)	6,710	N _{QE} (-)	0,15
B _o (m)	1,171	n _q	51
z _r (-)	14	v (-)	0,33
z _o (-)	26	σ _{min} (-)	0,108
z _{avd} (-)	26	σ _{max} (-)	0,162

Caractéristiques

La centrale de Atatürk est située sur l'Euphrate à 50 km au nord-ouest de la ville de Elazig. Atatürk fait partie d'un complexe composé de 3 centrales, Keban (8 groupes de 183 MW), Karakaya (6 groupes de 340 MW) et Atatürk (8 groupes de 324 MW).

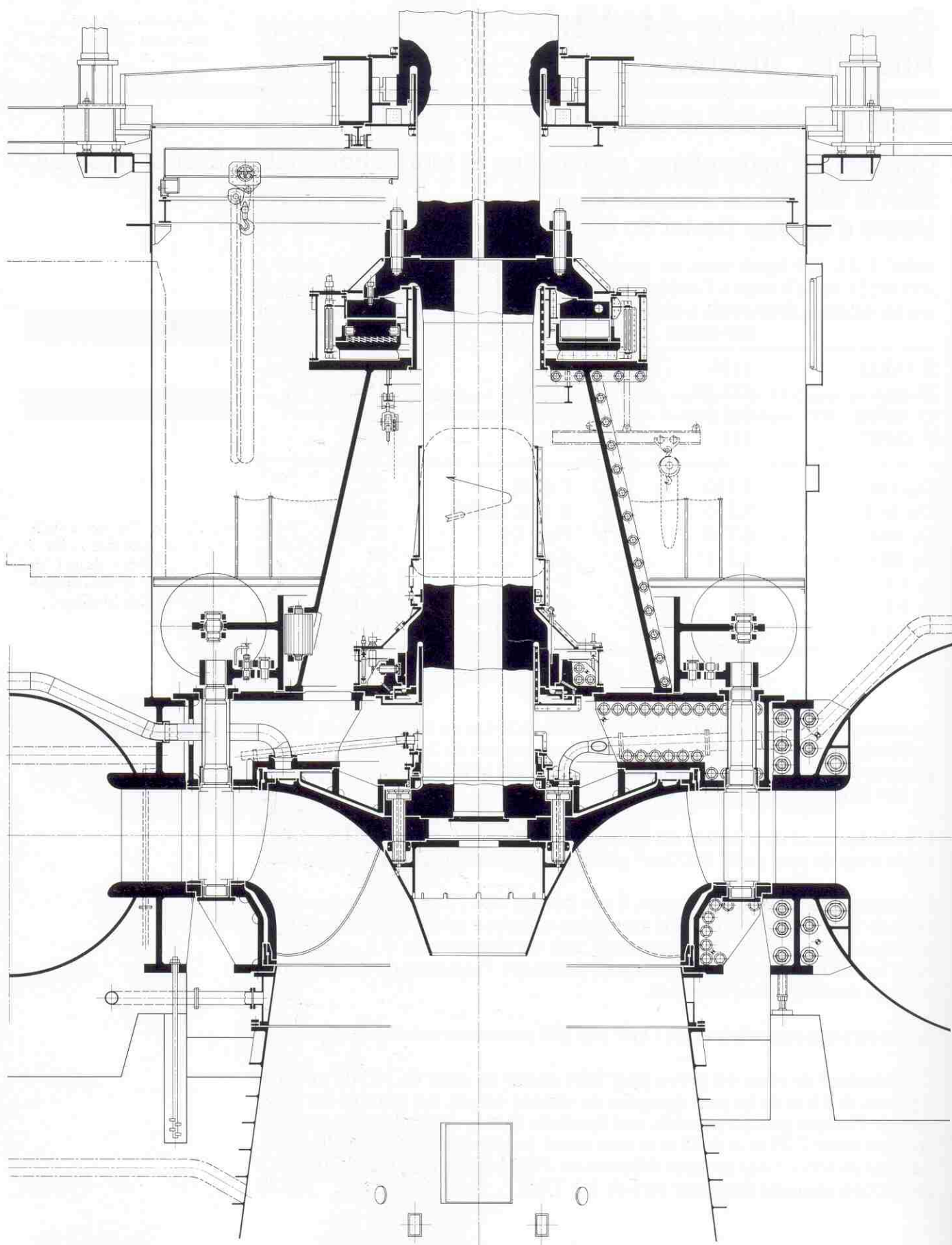
Généralités

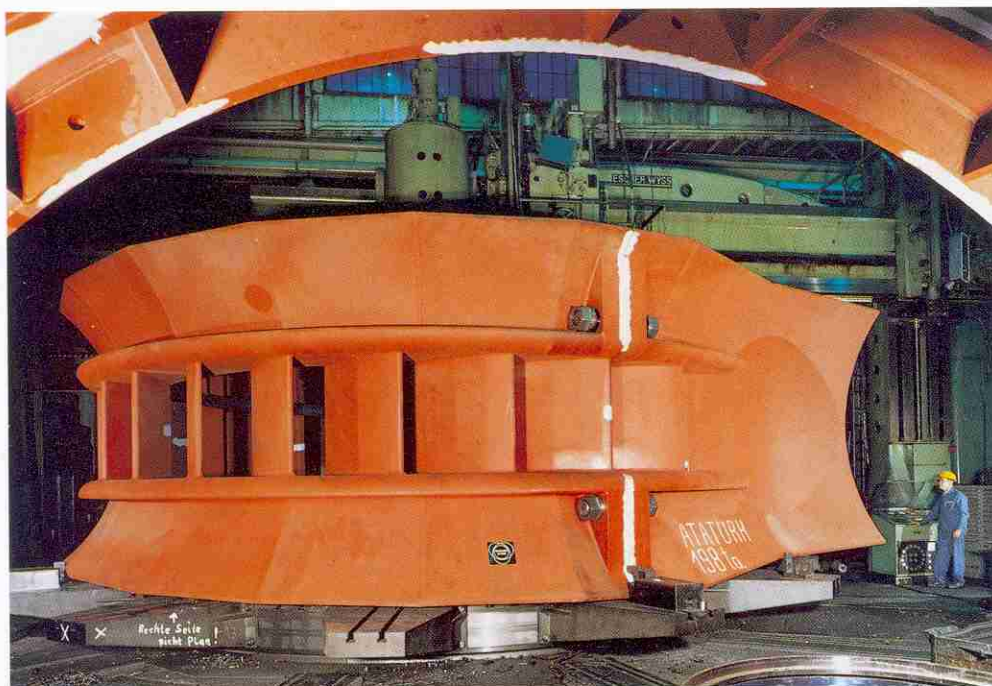
L'aménagement de Atatürk est également destiné à l'irrigation. La surface totale irriguée sera de 10 000 km² grâce à un système très étendu de canaux.

Le barrage, du type digue en terre, a une hauteur de 179 m et une longueur de crête de 1800 m. Il est situé dans une région calcaire à relativement haut risque sismique et est conçu pour supporter une accélération de 0,2 · g. Plus de 1000 km de forages ont été percés pour permettre l'injection de béton destiné à rendre ses fondations étanches.

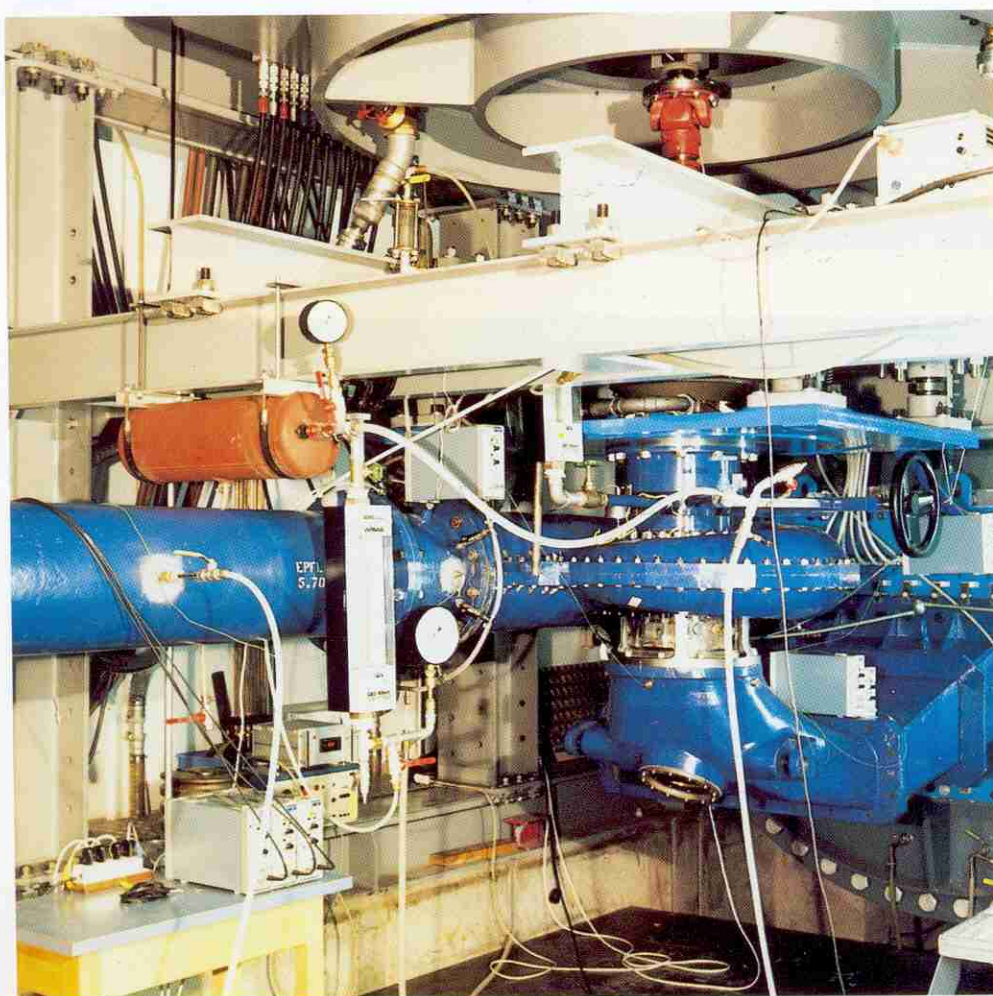
Le lac aura une superficie de 817 km²; 40 000 personnes ont dû être déplacées.

L'évacuateur de crues est prévu pour faire passer un débit de 16 800 m³/s par 6 passes de 16 m de largeur équipées de vannes wagon. La centrale est à ciel ouvert. Chaque groupe possède une conduite forcée d'un diamètre variable compris entre 7,25 m et 6,60 m et une vanne papillon de 5,70 m de diamètre. La mise en service des groupes débutera en 1992 pour se terminer en 1993. La production annuelle moyenne sera de 8,1 TWh.





1. Avant-distributeur d'une masse de 198 t assemblé en ateliers (photo Sulzer-Escher Wyss).



2. Modèle d'essai installé sur la plate-forme No 2 de l'IMHEF durant les essais de réception officiels (photo IMHEF).

Conception hydraulique

La bêche spirale, du type Piguet, a un diamètre d'entrée de 5,300 m. Elle est composée de 18 viroles. Les bourrelets ont un profil semi-circulaire, comme le montre la figure 1.

Les avant-directrices, au nombre de 26, ont un profil légèrement incurvé (fig. 1).

Les directrices ont un profil dissymétrique et le rapport épaisseur-longueur est de 0,15.

La roue a un profil hydraulique comportant un plafond relativement incurvé et une ceinture assez courte.

La profondeur du diffuseur est relativement faible avec un rapport $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 2,28$.

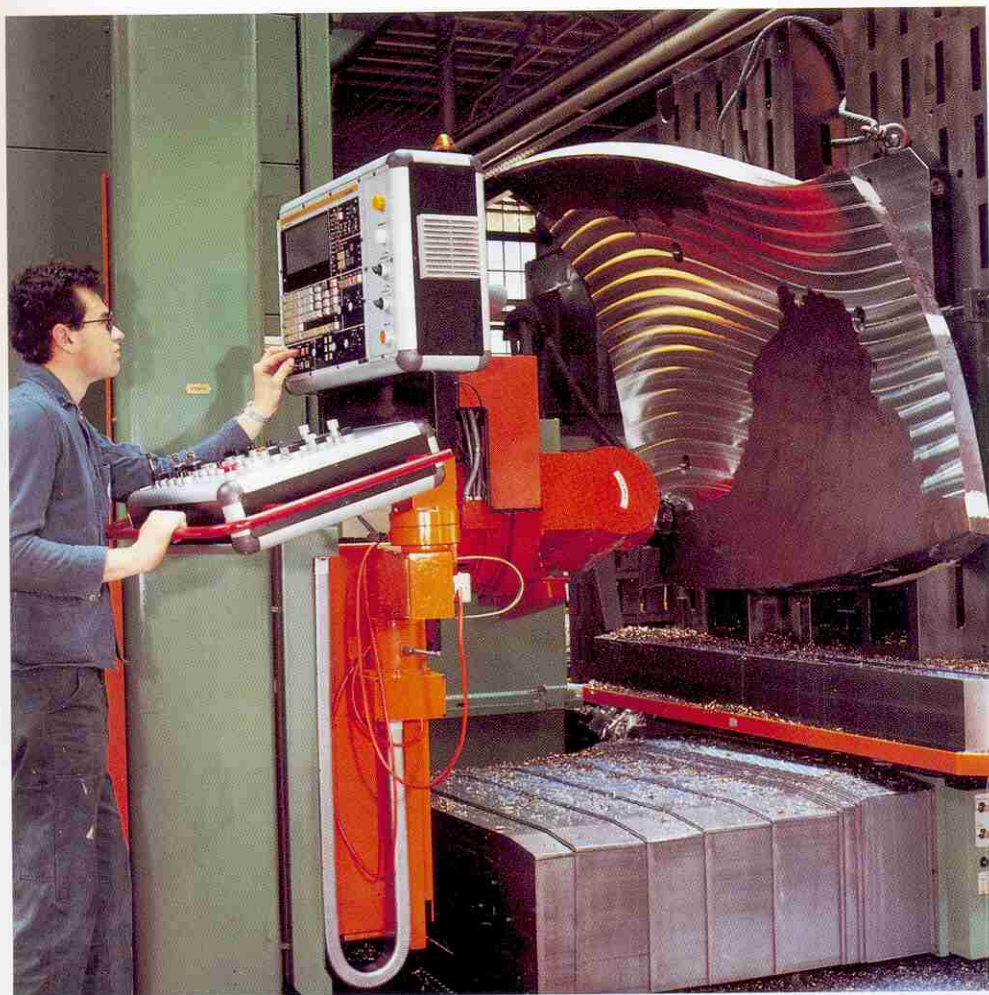
Les essais contractuels sur modèle réduit ont été effectués par l'IMHEF. Le modèle d'essai (fig. 2) avait un diamètre $D_{1e} = 300$ mm et a été essayé sous une chute de 40 m.

Les essais classiques de rendement, cavitation, emballement, fluctuations de pression et de couple, ont été exécutés en présence du client et de l'ingénieur-conseil.

La figure 3 montre un aspect de la cavitation pour une valeur de σ très inférieure ($\sigma = 0,040$) au σ d'implantation ($\sigma = 0,108$).

3. Aspect de la cavitation à la sortie de la roue pour une valeur de σ très inférieure au σ d'implantation (photo IMHEF).





4. Fraisage des aubes sur une machine à commande numérique (photo Sulzer-Escher Wyss).

La bache spirale est réalisée en tôle d'acier de résistance moyenne, à grains fins.

L'anneau d'entretoises est fabriqué entièrement en tôles d'acier. Soudé et traité thermiquement en atelier, il est divisé en 2 parties qui sont boulonnées, avec une soudure d'étanchéité, sur le chantier. L'anneau supérieur du diffuseur, en acier inoxydable, est relié par un joint souple au blindage du diffuseur.

Le couvercle de turbine est fabriqué en tôles d'acier, de résistance moyenne, à grains fins. Il est soudé en atelier, en deux parties. Il est assemblé sur le site par boulonnage.

Les flasques supérieur et inférieur du distributeur sont protégés par des anneaux amovibles en acier inoxydable. Le flasque inférieur n'est pas bétonné et permet donc l'accès aux paliers inférieurs du distributeur.

La roue est composée de 14 aubes en acier inoxydable coulé 13 Cr - 4 Ni, de la ceinture coulée dans le même acier et du moyeu coulé en acier au manganèse. Les aubes sont fraisées par commande numérique (fig. 4) puis finies et polies par un robot (fig. 5). Les aubes et la ceinture sont ensuite soudées par «electroslag» (fig. 6 et 7) avant les traitements thermiques et l'usinage final (fig. 8).

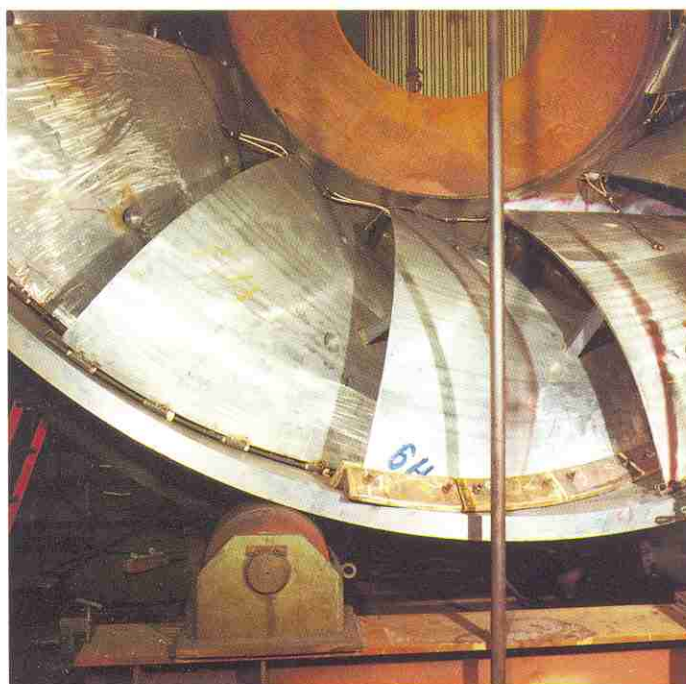
**Conception
mécanique**

5. Finition des aubes par meulage exécuté par un robot automatique (photo Sulzer-Escher Wyss).



6. Roue préassemblée prête pour la soudure des aubes (photo Sulzer-Escher Wyss).





7. Préparation de la roue pour la soudure «electroslag» des aubes sur la ceinture. On remarque les tubes de guidage des fils de métal d'apport ainsi que les sabots de confinement du bain de soudure (photo Sulzer-Escher Wyss).



8. Roue en cours de tournage final (photo Sulzer-Escher Wyss).

Le groupe comporte 3 paliers, 1 palier turbine et 2 paliers alternateur. La poussée axiale est reprise par une butée supportée par un cône s'appuyant sur le couvercle de la turbine. Les paliers sont du type à patins munis d'une fixation réglable. Les patins de la butée sont supportés par des ressorts hélicoïdaux pour répartir la charge.

Bibliographie

- G. Schröder, F. Mez, M. Schurtenberger, M. Singer: Electromechanical equipment for the Atatürk scheme. Publication EJVA 1988.
- Atatürk secures Turkey's power base and sets new records. Water Power and Dam Construction, January 1987.
- J. Müller: Atatürk 2400 MWe Hydropower Station. Revue technique Sulzer No 2, 1986.
- Atatürk 2400 MWe hydropower project supplies largest irrigation scheme. Modern Power Systems magazine, London, march 1985.

Centrale de Sayano-Shushenskaya

Sibérie, Fédération de Russie

10 turbines Francis de 735 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

Leningradsky Metallichesky Zavod (LMZ), St. Pétersbourg, Fédération de Russie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1716	1902	2157
H (m)	175	194	220
Q (m ³ /s)	335	360	358
P (MW)	550	650	735
D _{le} (m)	6,250	f (Hz)	50
D _{li} (m)	6,350	n (t/s; t/min)	2,38; 142,8
D _o (m)	7,900	N _{QE} (-)	0,16
B _o (m)	1,170	n _q	52
z _r (-)	16	v (-)	0,33
z _o (-)	20	σ _{min} (-)	0,10
z _{avd} (-)	19	σ _{max} (-)	0,20

Caractéristiques

L'aménagement de Sayano-Shushenskaya est situé sur le fleuve Iénisseï à environ 70 km au sud d'Abakan; il constitue le palier à l'amont de la centrale de Krasnojarsk (6000 MW).

Généralités

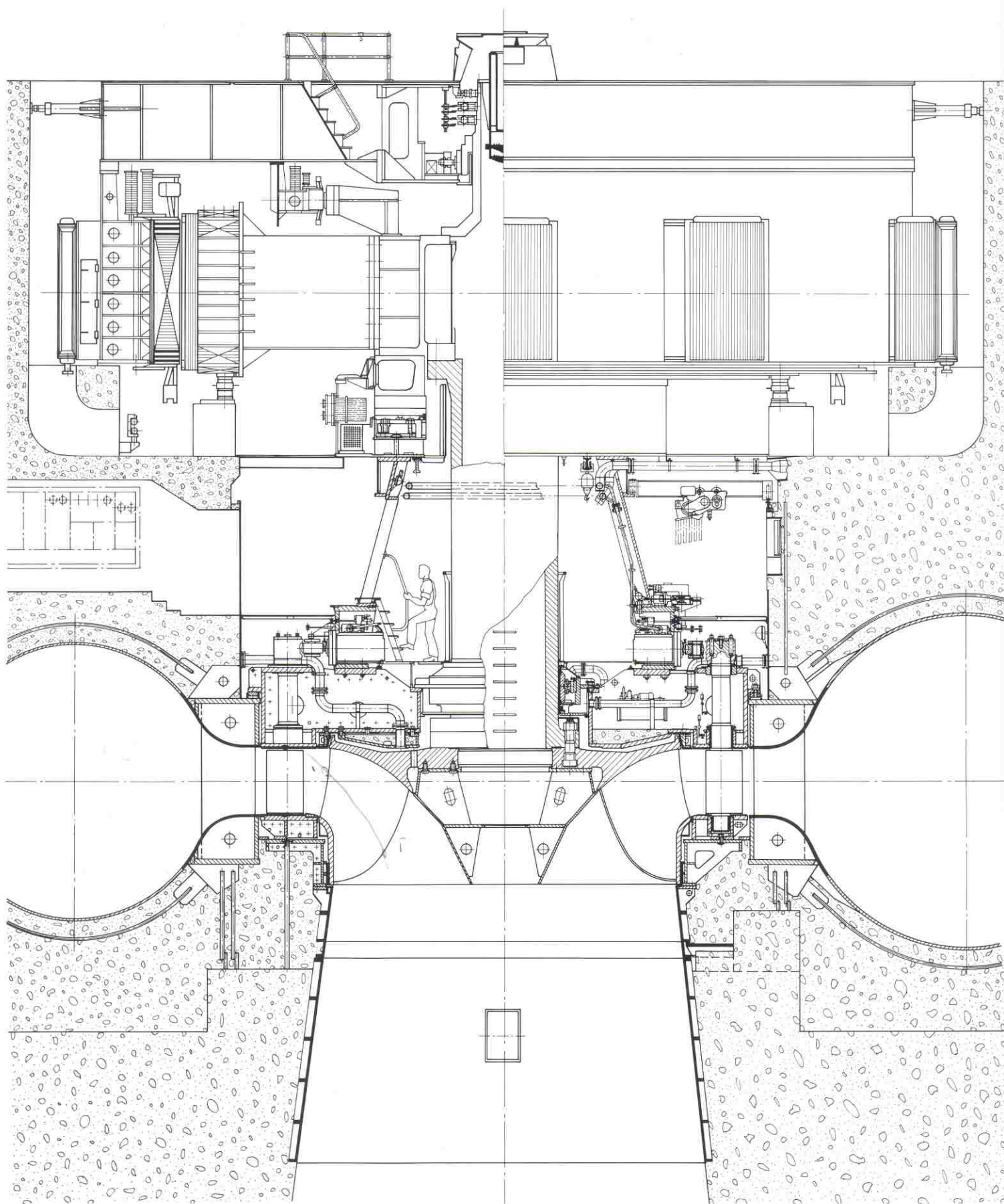
Le barrage en béton, du type poids à arches, a une hauteur de 245 m et un volume de $10 \cdot 10^6$ m³. Il est construit dans un canyon relativement étroit. L'évacuateur de crues est dimensionné pour un débit de 13 600 m³/s. Le remplissage du lac devant durer plusieurs années, il a été décidé d'installer 2 roues prévues pour fonctionner sous une chute réduite, avant d'être remplacées par les roues définitives. Ces roues ont été conçues pour une gamme de chute de 60 à 140 m et une puissance de 150 à 400 MW. Leurs dimensions étaient les suivantes:

$$\begin{aligned} D_{le} &= 6,250 \text{ m} \\ D_{li} &= 4,320 \text{ m} \\ D_{le} &= 6,050 \text{ m} \end{aligned}$$

Ces roues provisoires, d'une masse de 90 t, étaient en construction mécano-soudée en acier au carbone avec un revêtement en acier inoxydable appliqué par explosion.

Toutes les roues ont été transportées de Leningrad à la centrale par bateau en passant par l'océan Arctique, puis en remontant le Iénisseï.

La première machine a été mise en service en 1978.



Conception hydraulique

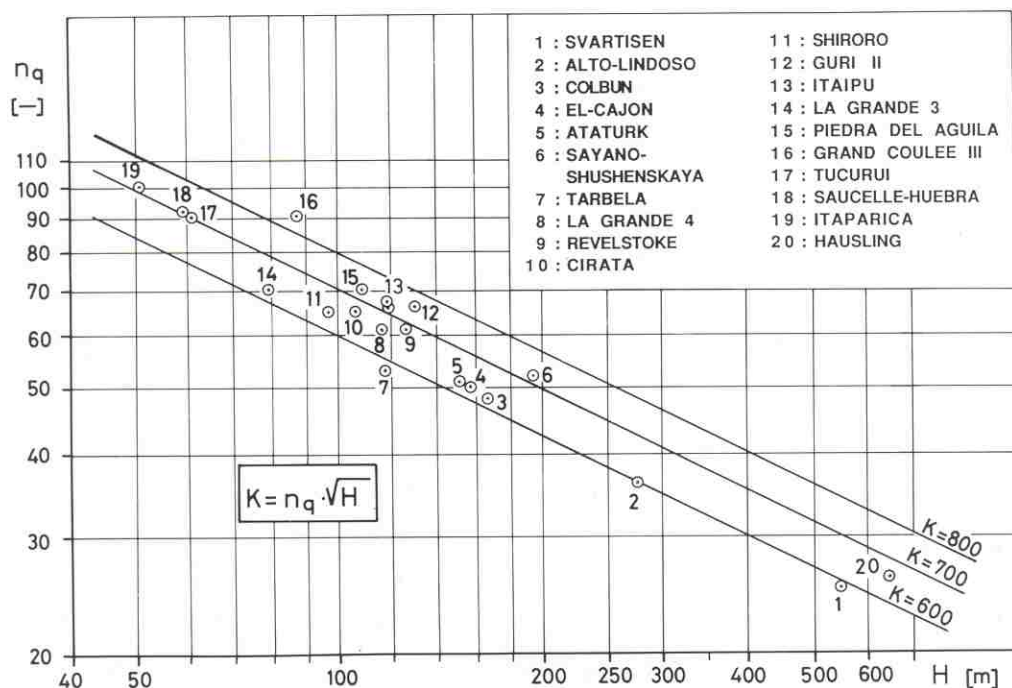
Un programme de recherche très complet a été entrepris pour la conception hydraulique de ces machines, qui étaient les plus puissantes du monde à l'époque de leur mise en service.

Le profil hydraulique des roues a été optimisé en utilisant un programme d'analyse d'écoulement potentiel quasi 3D. L'interaction dynamique des avant-directrices, des directrices et de la roue a également été étudiée en détail.

Les essais sur modèle ont été très complets. En plus des mesures classiques de rendement, de cavitation et d'emballement, les essais suivants ont été réalisés:

- détermination des zones d'érosion de cavitation et de l'intensité de cavitation;
- mesure des forces et des couples sur les directrices synchronisées et désynchronisées;
- études visant à diminuer les fluctuations de pression dans le diffuseur à charge partielle et à basse chute.

Ces essais ont permis d'obtenir un excellent rendement du modèle (92,8%) et du prototype (de l'ordre de 96%), une augmentation de la vitesse spécifique et un fonctionnement stable et exempt de vibrations de la machine, ceci malgré la vitesse spécifique relativement grande de ces machines par rapport à leur chute, comme le montre la figure 1.



1. Diagramme liant la vitesse spécifique n_q à la chute H . On remarque que les turbines de Sayano-Shushenskaya ont une vitesse spécifique élevée, $n_q = 52$ pour leur chute nominale $H = 194$ m (document IMHEF).

Conception mécanique

Des essais sur modèle réduit ont également été entrepris pour mesurer plusieurs grandeurs nécessaires au dimensionnement mécanique de la machine:

- mesure des fluctuations de pression sur les aubes de la roue;
- mesure des contraintes et détection des apparitions de fissures dans la bêche; une pression cyclique de 28,6 bar a été appliquée dans la bêche; les contraintes se sont stabilisées après 750 cycles et ont atteint 180 MPa (contraintes de traction) et de 50 MPa (contraintes de flexion) dans la section d'entrée, et de 140 MPa dans les avant-directrices;
- mesure de contraintes dans la roue pour toute la zone de fonctionnement; les contraintes maximales mesurées étaient de 60 MPa avec une composante dynamique de ± 5 MPa pour la pleine charge (735 MW) et sous la chute de 212 m; en outre, une corrélation claire a été trouvée, pour tous les points de fonctionnement, entre les fluctuations de pression à basse fréquence et les contraintes dynamiques sur la roue;
- détermination des modes et des fréquences propres de vibration de la roue.

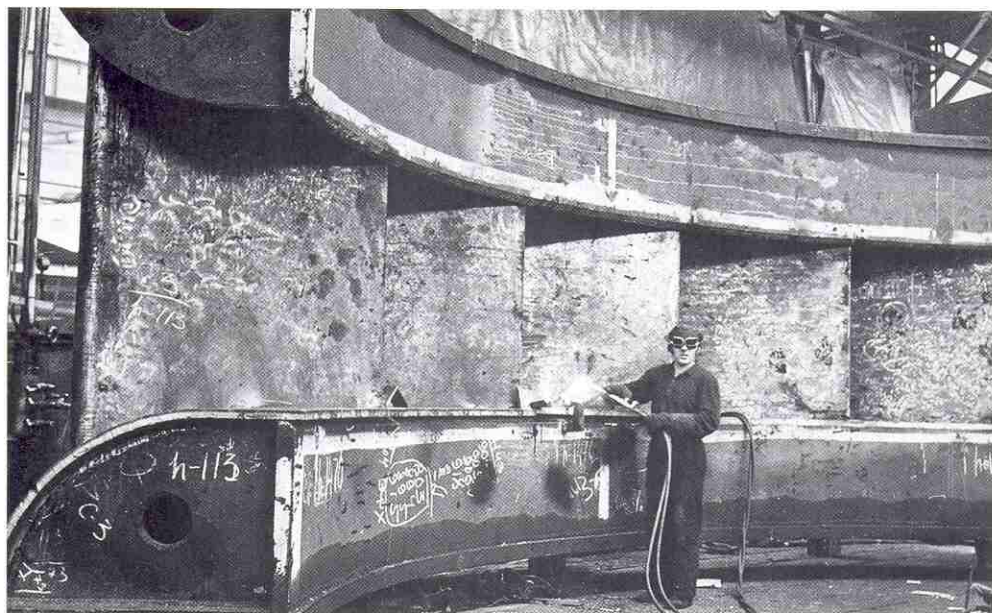
Pour éviter des résonances à basse fréquence, le nombre d'avant-directrices et de directrices a été choisi égal à 20, pour une roue à 16 aubes.

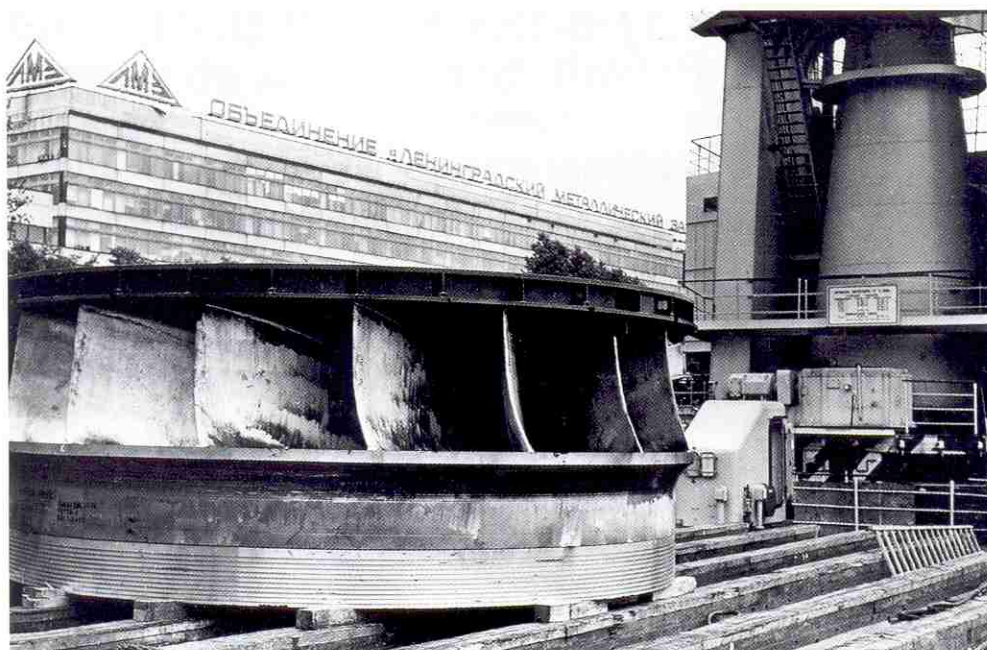
Les essais sur modèle ont, en outre, montré un important effet amortisseur des labyrinthes qui élimine pratiquement les résonances pour plusieurs modes de vibrations radiales.

Les efforts dans la bêche spirale sont repris en bonne partie par le béton, ce qui permet l'utilisation de tôles relativement minces (40 mm).

L'avant-distributeur à double courbure (fig. 2) est ancré dans le béton par des barres entourant la bêche, ce qui permet de diminuer fortement le moment de flexion sur les avant-directrices.

2. Avant-distributeur à double courbure en cours de fabrication à Leningrad (photo LMZ).





3. Roue en acier inoxydable prête pour le transport. Masse 145 t, diamètre extérieur 6,800 m (photo LMZ).

Les aubes directrices sont commandées par des servomoteurs individuels. Cette conception a été choisie pour permettre une très grande ouverture du distributeur. En effet, l'ouverture nécessaire pour les roues provisoires était de 43% supérieure à l'ouverture maximale des roues définitives.

Les roues définitives, d'une masse de 145 t, sont en acier inoxydable. Le moyeu est coulé en 2 pièces. Les aubes sont matricées à chaud et soudées au moyeu et à la ceinture.

L'arbre est creux, avec une épaisseur de paroi de 232,5 mm, il a un diamètre de 1,945 m et sa masse est de 85 t.

Le palier turbine (diamètre 1,970 m) a la particularité d'avoir des patins lubrifiés à l'eau. Les patins sont recouverts de caoutchouc. La poussée radiale maximale est de 70 t, la vitesse périphérique est de 15 m/s, alors que la pression spécifique atteint 1,0 MPa.

- I.M. Gamus. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo N° 1, 1978.
- G.A. Shishov et al. Energomaschino-stroenie, N° 1, 1979.

Bibliographie

Centrale de Tarbela (Extension No 3)

District de Abbottabad, Pakistan

4 turbines Francis de 440 MW (unités 11 à 14)

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

Conception mécanique et fabrication: DBS Escher Wyss, Lachine, Canada

Maître d'œuvre: Water and Power Development Authority of Pakistan (WAPDA)

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	484	1150	1328
H (m)	49,4	117,4	135,6
Q (m ³ /s)		428,4	375,0
P (MW)		440	440
D _{ie} (m)	7,150	f (Hz)	50
D _{li} (m)	6,300	n (t/s; t/min)	1,515; 90,9
D _o (m)	8,693	N _{QE} (-)	0,16
B _o (m)	1,727	n _q	53
z _r (-)	17	v (-)	0,33
z _o (-)	26	σ _{min} (-)	0,11
z _{avd} (-)	26	σ _{max} (-)	0,48

Caractéristiques

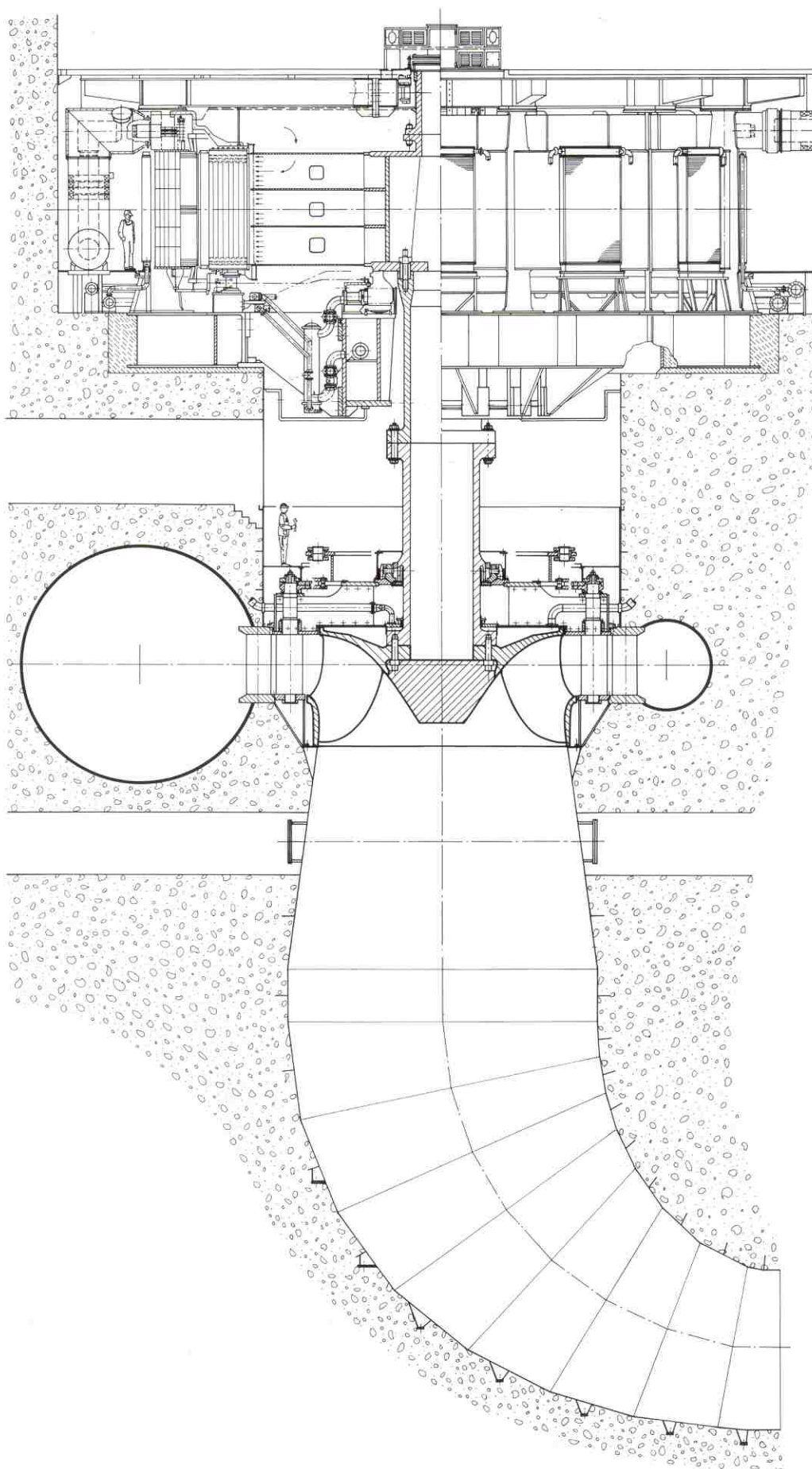
La centrale de Tarbela est située sur l'Indus à environ 100 km au nord-est de Islamabad. Une fois terminée, la centrale comportera 14 groupes turbo-alternateurs d'une puissance totale de 3510 MW. Le barrage a une hauteur de 143 m et le volume de la retenue est de environ $14 \cdot 10^9$ m³. Les unités 1 à 4, d'une puissance de 175 MW, ont été fournies par Hitachi et mises en service en 1977. Les unités 5 à 8, d'une puissance de 178 MW ont été fournies par GE Canada, Dominion Engineering et mises en service en 1982. Les unités 9 et 10, d'une puissance de 178 MW également, ont déjà été fournies par DBS Escher Wyss et mises en service en 1985.

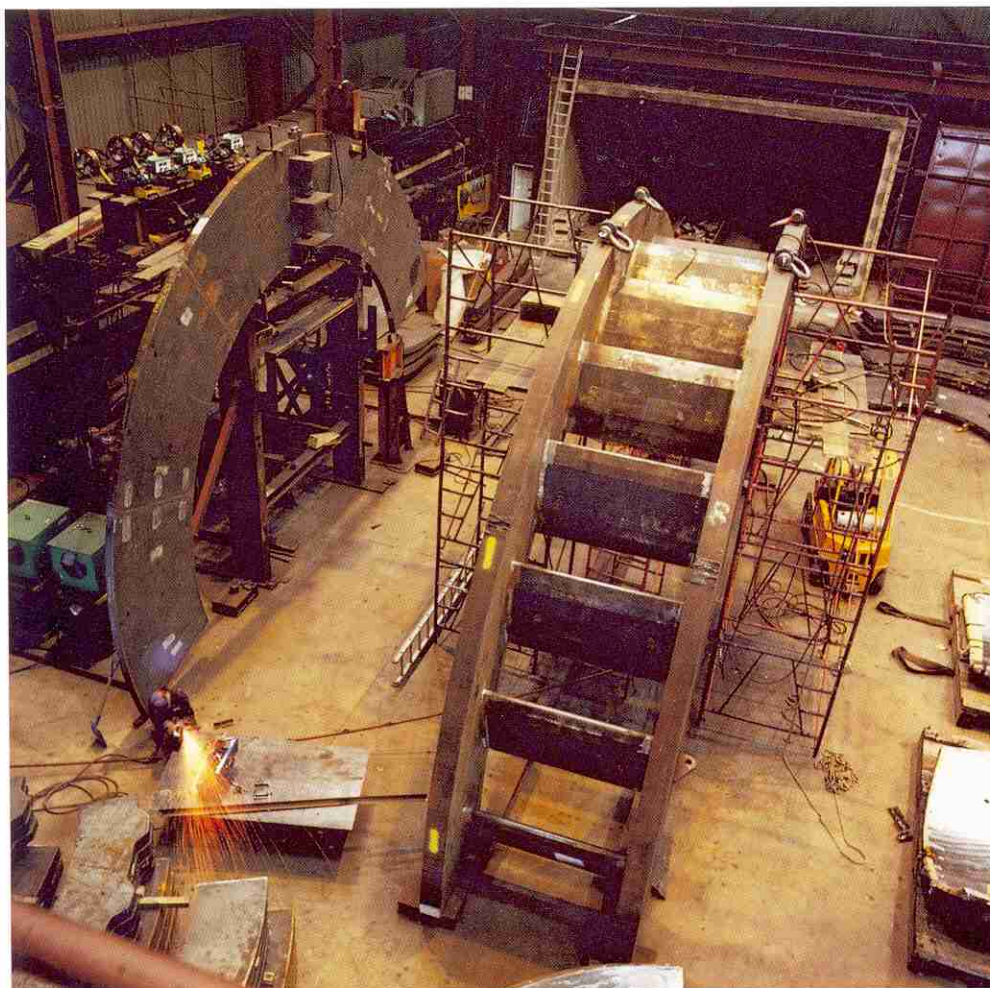
Généralités

Les 4 turbines 11 à 14 sont alimentées par un tunnel unique suivi d'une bifurcation. Chaque turbine possède une vanne papillon de garde. La mise en service des groupes est prévue entre 1992 et 1993.

La bêche spirale est du type Piguet: les viroles sont soudées directement sur les flasques supérieur et inférieur. L'entrée de l'avant-distributeur ne comporte pas de bourrelets, mais un simple chanfrein.

Conception hydraulique





1. Avant-distributeur avec aubes à faces parallèles en cours de fabrication en ateliers (photo DBS Escher Wyss).

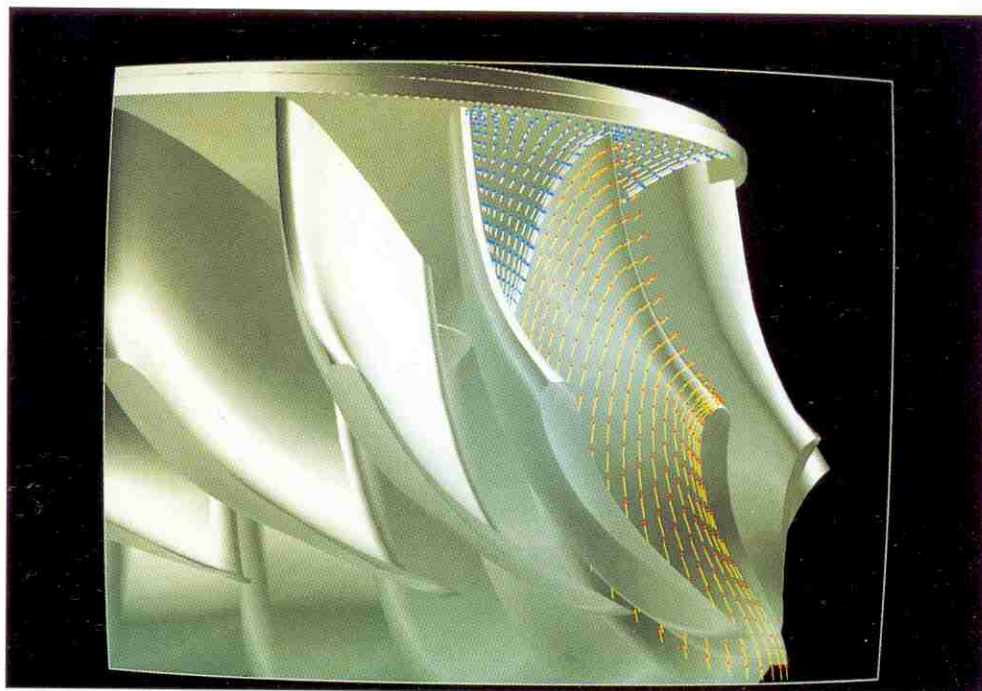
Les avant-directrices, au nombre de 26, sont à faces parallèles chanfreinées (fig. 1).

Le tracé hydraulique de la roue a été rendu particulièrement délicat par la très grande variation de chute. Il est en effet difficile d'obtenir un bon rendement sur toute la plage de fonctionnement tout en évitant la cavitation d'entrée. Ce tracé a été exécuté à l'aide du programme de calcul 3D, basé sur les équations d'Euler et développé en grande partie par l'IMHEF. Les figures 2, 3 et 4 montrent des résultats de calcul.

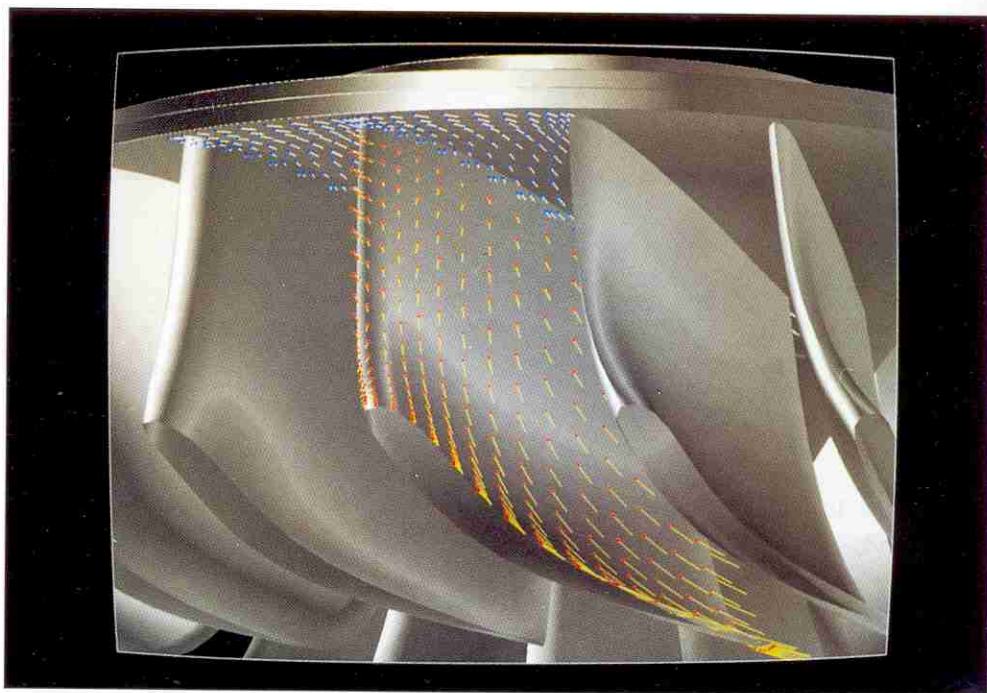
Le diffuseur a un tracé classique avec une profondeur confortable $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}} = 3,13$. Il comprend 2 piliers.

Les essais de réception sur modèle réduit ont été exécutés dans le laboratoire de Sulzer-Escher Wyss à Zurich (fig. 5). Les résultats ont montré un comportement satisfaisant aussi bien en rendement qu'en cavitation, malgré la grande variation de chute. Aucune cavitation n'était visible sur les aubes dans une gamme de chute de 49,4 à 107 m.

2. Résultats du calcul d'écoulement Euler. Répartition des vitesses à l'extrados des aubes (document Sulzer-Escher Wyss).

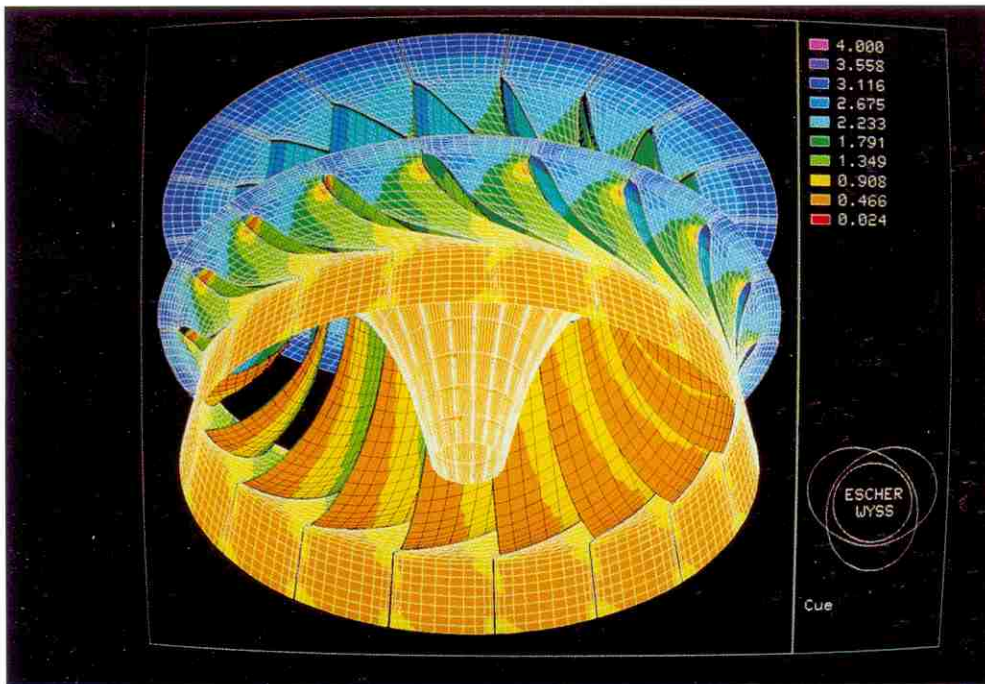


3. Résultats du calcul d'écoulement Euler. Répartition des vitesses à l'intrados des aubes (document Sulzer-Escher Wyss).

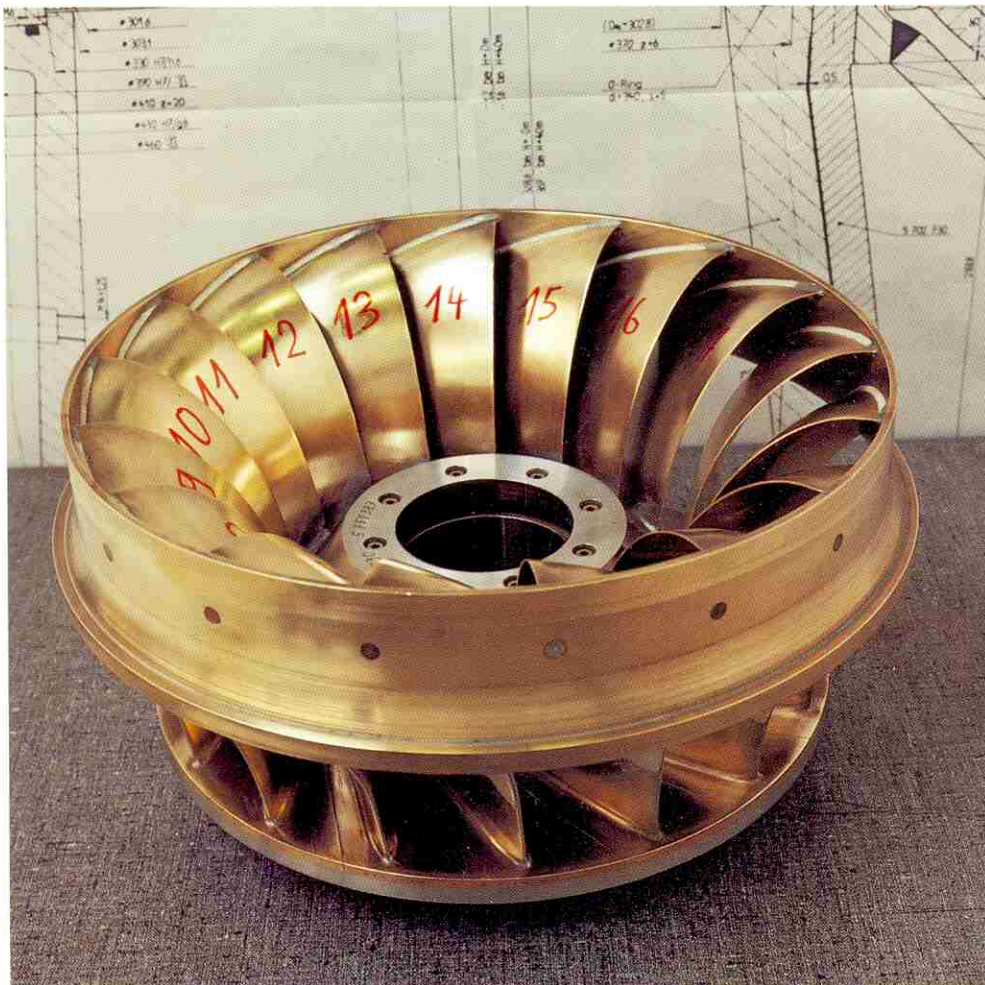


Conception mécanique

La bêche spirale d'une masse de 360 t, est réalisée en tôle d'acier au carbone à grain fin. Les viroles ont été soudées directement sur les flasques de l'avant-distributeur qui sont simplement des tôles épaisses. L'avant-distributeur (160 t) est divisé en 2 parties qui sont ensuite soudées sur le site (fig. 1).

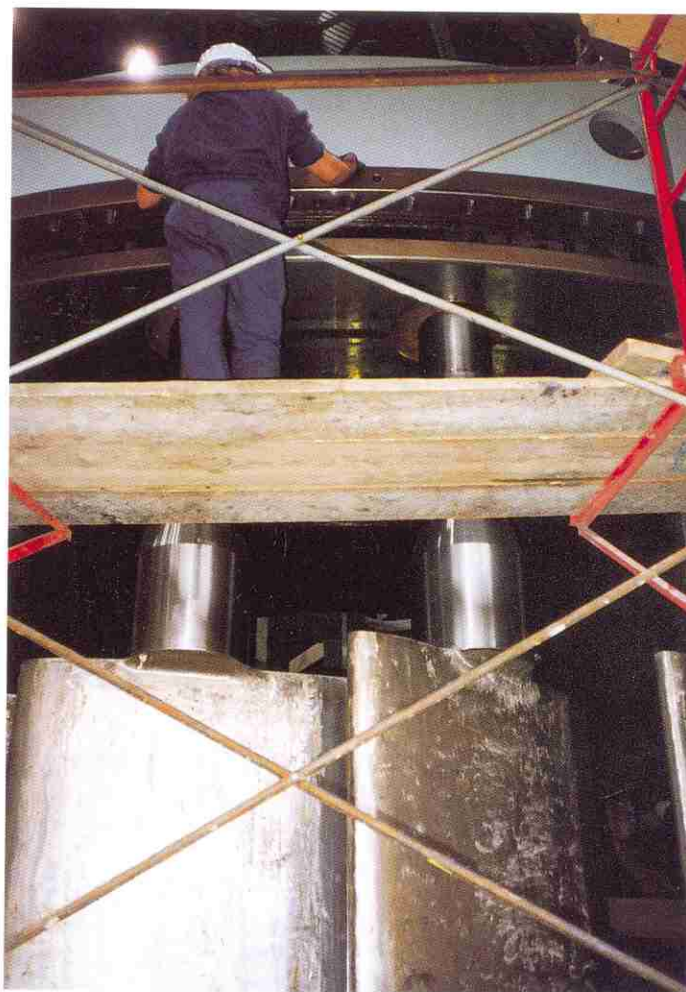


4. Répartition de pression dans la roue obtenue par le calcul d'écoulement Euler (document Sulzer-Escher Wyss).



5. Roue du modèle d'essai d'un diamètre de 300 mm (photo Sulzer-Escher Wyss).

6. Prémontage du flasque supérieur du distributeur en ateliers (photo IMHEF).



Le distributeur comprend 26 aubes en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni coulé. Les aubes sont guidées par 3 paliers en bronze lubrifiés à la graisse (fig. 5). Ces aubes sont protégées par des tiges de rupture dimensionnées pour casser lorsque le couple sur une directrice atteint une valeur de 1,7 fois le couple normal en position fermée.

La roue, d'une masse de 200 t, est entièrement en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Le moyeu, la couronne et les aubes (fig. 7 et 8) ont été coulés séparément, usinés par commande numérique et assemblés par le procédé «electroslag». Celui-ci consiste à faire fondre les fils de métal d'apport par effet joule. Les fils sont guidés par des tubes disposés dans le futur cordon de soudure (fig. 9). Ces tubes fondent également au fur et à mesure de la progression du bain en fusion. Le bain est confiné dans une sorte de coffrage formé de sabots de cuivre creux refroidis à l'eau (fig. 10) qui donnent la forme presque définitive du congé. Le bain de fusion doit être maintenu à peu près horizontal, ce qui nécessite le placement de la roue dans un positionneur (fig. 11). Ce bain est protégé de l'oxydation par un laitier. Le débit-masse de métal est d'environ 15 kg à l'heure.

Le couvercle est entièrement fabriqué en acier au carbone à grain fin. Sa masse est de 135 t pour un diamètre de 10 m environ. Il est en 2 parties boulonnées sur le site. La face en contact avec les directrices fermées est recouverte d'acier

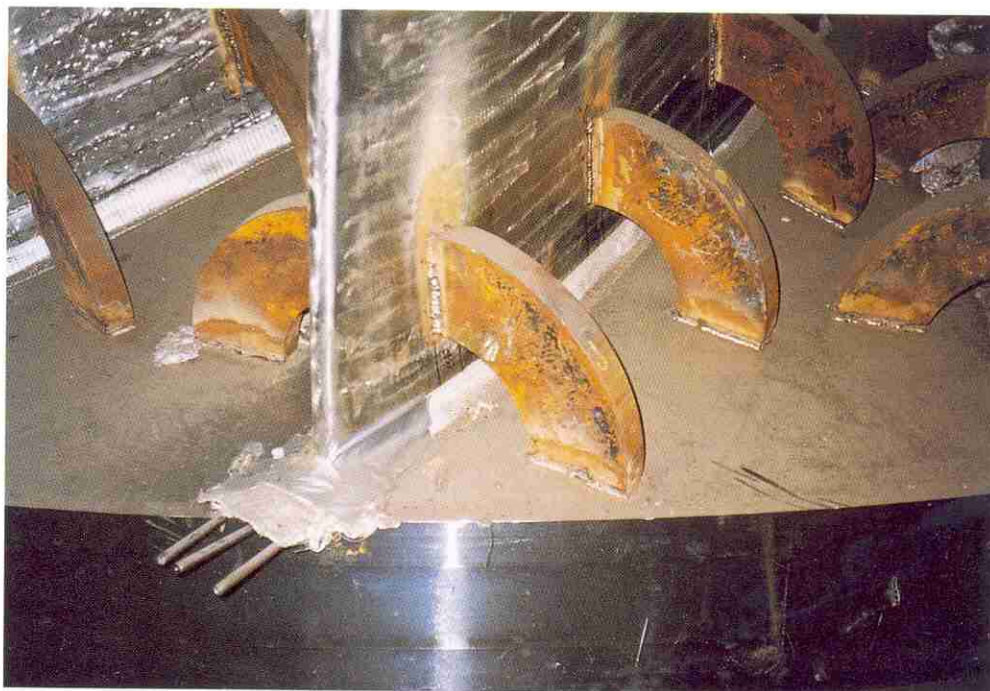


7. Aubes de la roue, usinées par machine à commande numérique, prêtes pour l'assemblage (photo IMHEF).



8. Assemblage de la roue et préparation avant soudure (photo DBS Escher Wyss).

9. Tubes de guidage des fils de métal d'apport pour la soudure «electroslag» (photo IMHEF).



10. Sabots de cuivre refroidis à l'eau pour le confinement du bain de soudure «electroslag» (photo IMHEF).



inoxydable. L'anneau d'usure du labyrinthe en acier inoxydable est chassé dans le couvercle lors du montage final. Six tuyaux de 250 mm de diamètre conduisent l'eau de fuite dans l'aspirateur.

L'air nécessaire à l'aération à charge partielle pénètre sous le joint d'arbre et passe par des trous percés dans les boulons d'accouplement avant de rejoindre le cône de la roue.



11. Roue en cours de soudure dans le positionneur destiné à assurer la position horizontale du bain de métal liquide. Au premier plan, tôles des flasques de l'avant-distributeur (photo DBS Escher Wyss).

L'anneau inférieur du distributeur comprenant l'anneau d'usure du labyrinthe inférieur n'est pas bétonné et, de ce fait, est démontable.

L'arbre, d'une masse de 90 t et d'un diamètre de 2,2 m, est fabriqué en acier au carbone forgé en 4 parties: les 2 brides et 2 parties cylindriques. Le tout est soudé, détentionné et usiné.

Le palier turbine du type cloche comprend des patins séparés et ajustables en acier, recouverts de métal antifriction.

L'aspirateur est blindé jusqu'à la sortie du coude avec la partie immédiatement sous la roue en acier inoxydable 304.

- P.J. Jermann, J. Nesvadba. Tarbela - Third extension project units 11 to 14: 440 MW Francis turbine design. Proceedings Water Power 89, Niagara Falls 1989.

Centrale de La Grande 4

Province de Québec, Canada

9 turbines Francis de 300 MW

Conception hydraulique: Neyrpic, Grenoble, France

Conception mécanique et fabrication: GEC Alsthom, Tracy, Canada

Maître d'œuvre: Société d'Energie de la Baie James (SEBJ), Montréal, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1133	1144	1163
H (m)	115,5	116,7	118,6
Q (m ³ /s)	277	278	280
P (MW)	295	300	307
D _{1e} (m)	5,550	f (Hz)	60
D _{1i} (m)	5,045	n (t/s; t/min)	2,14; 128,6
D ₀ (m)	6,630	N _{QE} (-)	0,18
B ₀ (m)	1,376	n _q	61
z _r (-)	13	v (-)	0,39
z ₀ (-)	24	σ _{min} (-)	0,13
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,17

Caractéristiques

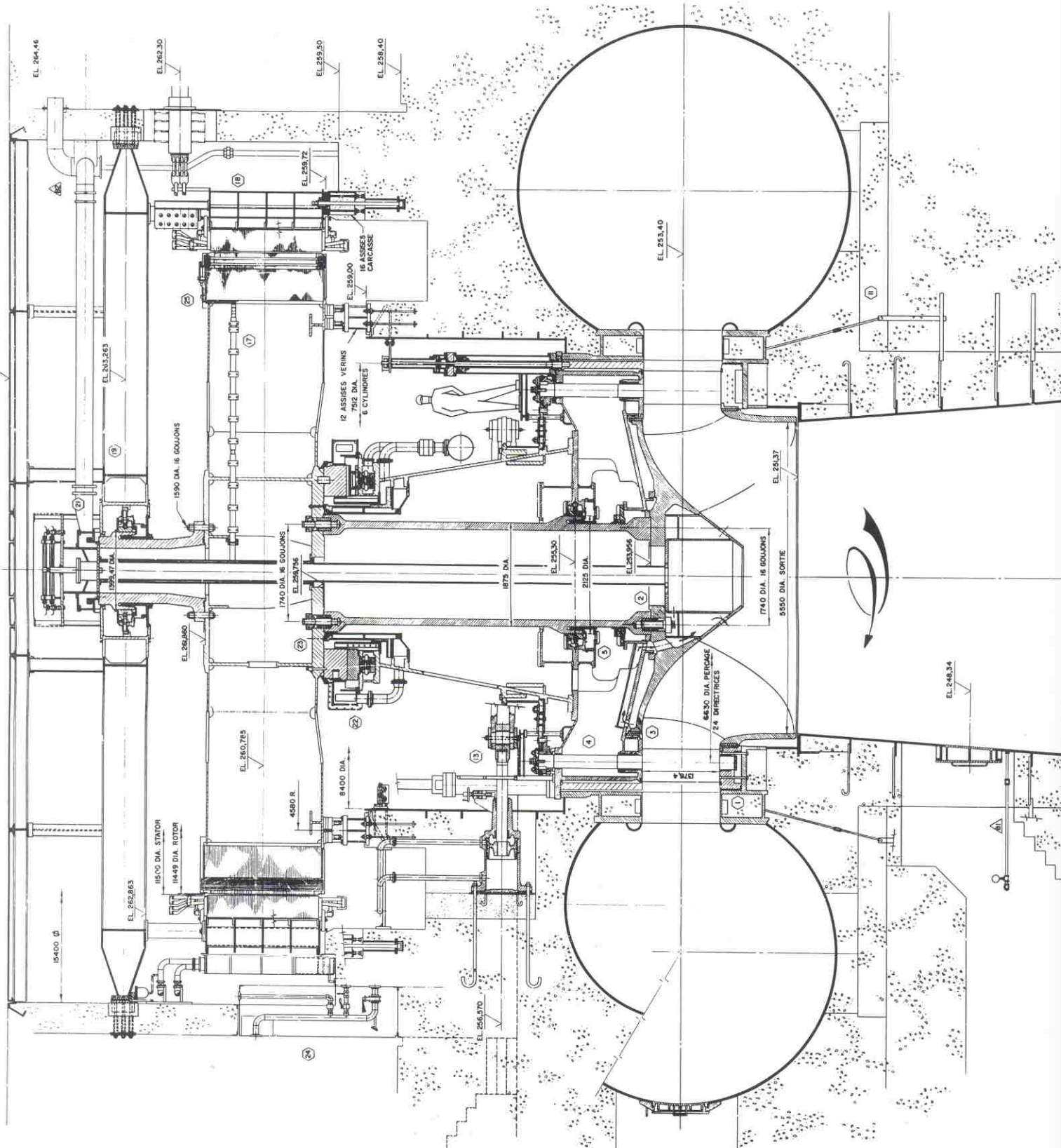
La centrale de La Grande 4, la plus à l'amont du Complexe La Grande, est située à 463 km de l'embouchure de la Grande Rivière dans la Baie James. Le site choisi est très favorable, le barrage et les digues ayant ainsi une longueur minimale. L'évacuateur de crues du type saut de ski est dimensionné pour un débit nominal de 7335 m³/s. La centrale est située au pied du barrage. Elle est à ciel ouvert excavée dans le granit à une profondeur maximale très importante de 115 m environ. La coupe de la centrale ressemble beaucoup à celle de LG 3. Chaque machine est alimentée par sa propre conduite forcée d'un diamètre de 7 m. Les machines ont été mises en service entre avril 1984 et mars 1985. La puissance installée totale est de 2650 MW et la production annuelle moyenne est de 14,1 TWh.

Généralités

La bêche spirale est du type Piguet; un cône d'entrée, asymétrique, ramène le diamètre à 7,000 m à l'entrée à 5,700 m au droit de l'axe de la turbine.

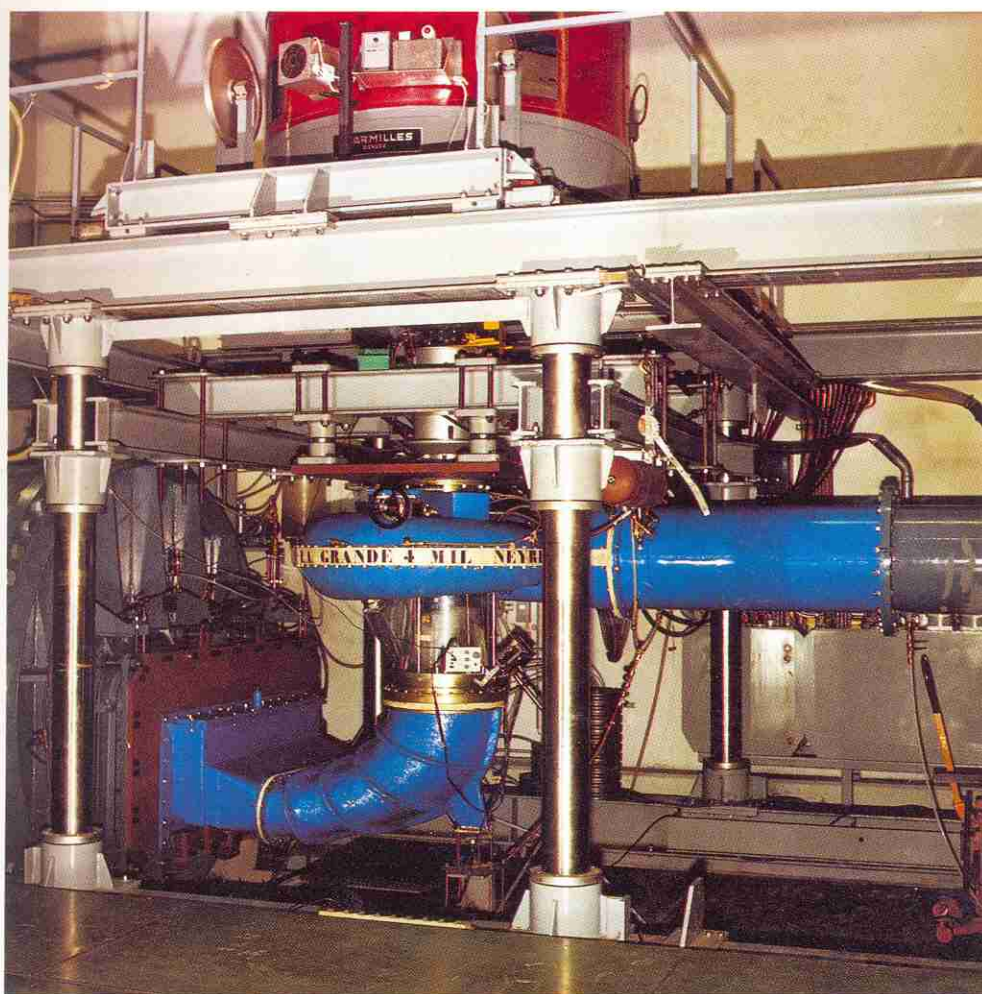
Conception hydraulique

Les avant-directrices sont planes avec arête d'entrée profilée et chanfrein à la sortie, comme le montre la figure 1.



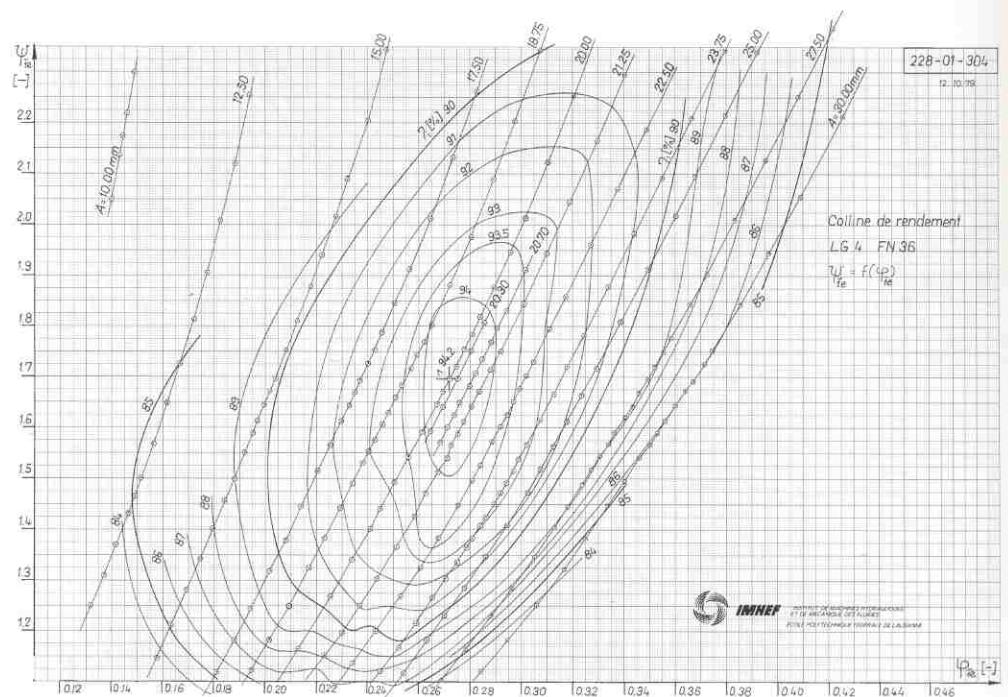


1. Plan de l'avant-distributeur et du distributeur (d'après un document Neyrpic).

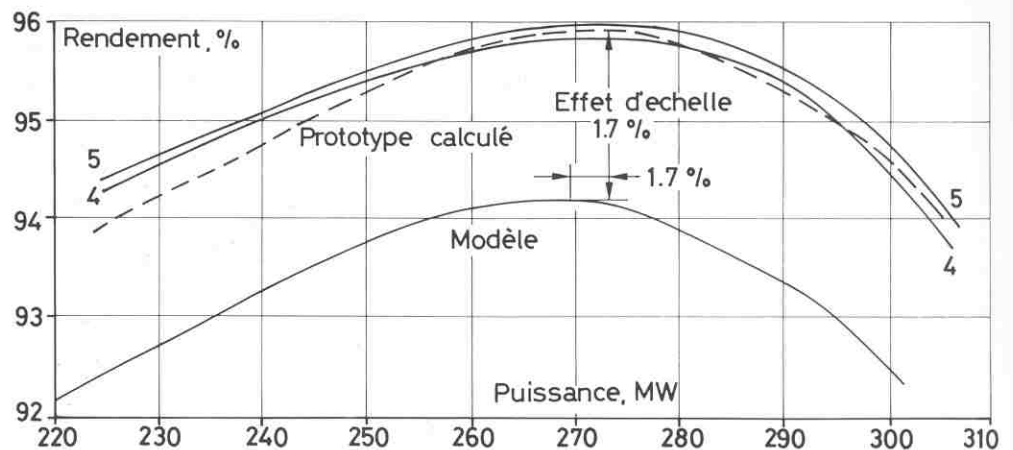


2. Modèle réduit de la turbine en cours d'essai dans le laboratoire de l'IMHEF (photo IMHEF).

3. Résultat des mesures de performances sur modèle réduit sous la forme d'une colline de rendement (document IMHEF).



4. Comparaison des résultats de mesure sur modèle réduit et sur prototype (document IMHEF).



Les directrices sont relativement épaisses, la partie convexe est située à l'intérieur (fig. 1).

La machine comporte une vanne fourreau, ce qui augmente la distance entre l'avant-distributeur et le distributeur.

La roue a un profil hydraulique avec une couronne extérieure cylindrique.

Le diffuseur est très profond avec une distance, axe bêche spirale - fond du diffuseur, de 18 m, ce qui donne un rapport profondeur-diamètre de roue de

$$\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,24.$$

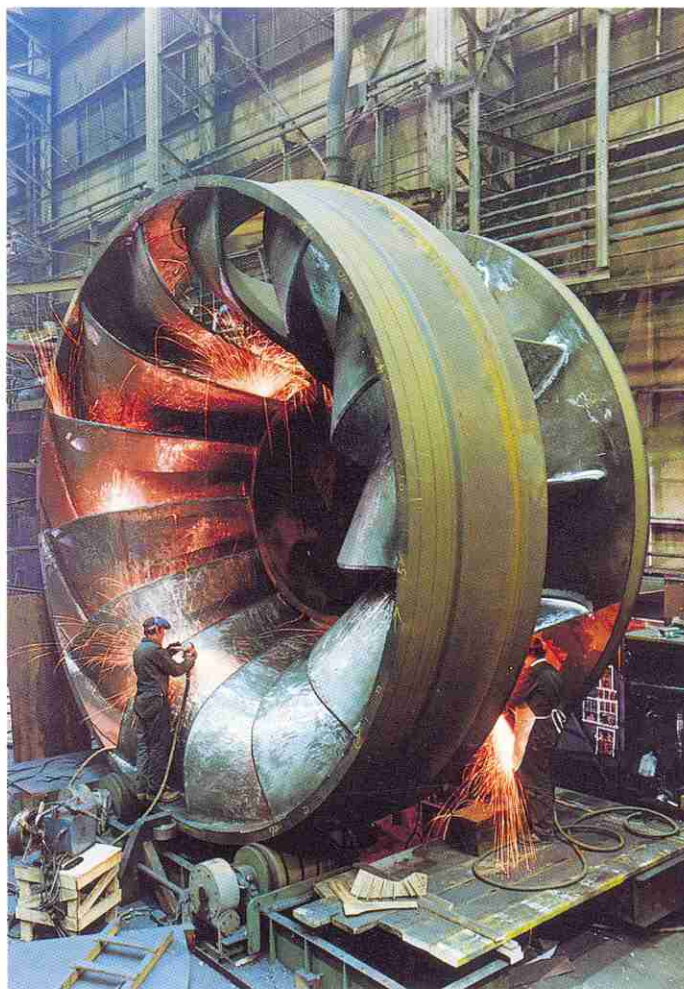


5. Demi avant-distributeur. On remarque les soudures longitudinales des avant-directrices dans les caissons (photo MIL Tracy).



6. Prémontage du distributeur en atelier (photo MIL Tracy).

7. Usinage par meulage de la roue coulée monobloc en acier doux (photo MIL Tracy).



Les essais de réception officiels ont été exécutés par l'IMHEF. Le modèle était de construction Neyrpic avec un diamètre de sortie roue de 416 mm. La chute d'essai était de 15 m.

Le programme d'essai comprenait des mesures de rendement, cavitation, emballement et fluctuations de pression.

Un essai supplémentaire a permis de mesurer l'influence des cache-rainures pour le batardeau aval sur le rendement de la turbine.

La colline de rendement du modèle est donnée par la figure 3.

Des essais très complets ont été exécutés sur le prototype en utilisant la méthode de mesure du débit par ultrasons.

Les résultats (fig. 4) montrent que le rendement du prototype calculé à partir des rendements mesurés sur le modèle concorde parfaitement avec les mesures effectuées sur le site sur les turbines N^{os} 4 et 5.

Le calcul de l'effet d'échelle a été fait en utilisant la formule de la norme N^o 995 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

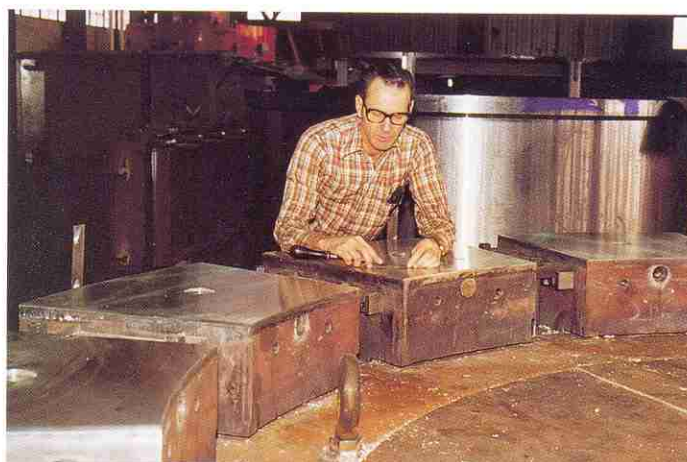


8. Arbre de la turbine. Les boulons d'assemblage sont dans l'axe de la paroi. On remarque la portée usinée pour les joints et la cloche du palier de turbine (photo MIL Tracy).



9. Supports des patins de la butée montés sur la couronne d'appui qui transmet les efforts au cône support. Cette couronne renferme les canaux d'huile qui répartissent la pression dans les supports à membranes. Photographie prise durant l'essai de pression (photo MIL Tracy).

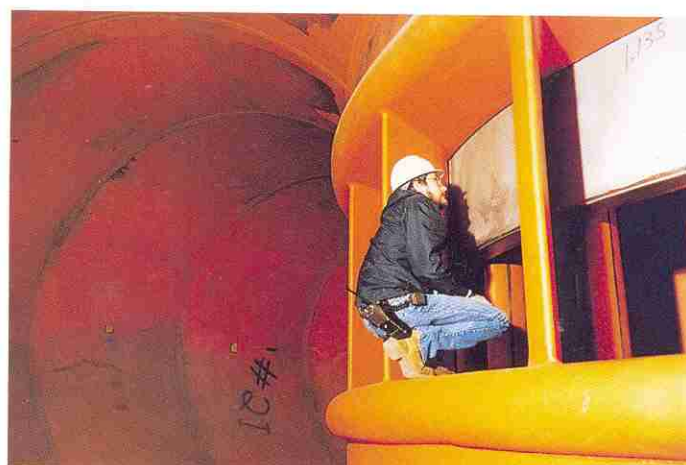
10. Usinage final de la couche de métal antifriction des patins de la butée (photo MIL Tracy).



11. Montage du fond supérieur de la turbine et de la vanne fourreau munie de ses 6 servomoteurs (photo MIL Tracy).



12. Vanne fourreau en cours d'essai dans la turbine complètement montée (photo MIL Tracy).





13. Servomoteur de la vanne fourreau avec la roue dentée de synchronisation à son sommet (photo MIL Tracy).

La bête, du type Piguet, est entièrement réalisée en tôle soudée. Elle comprend 22 viroles et 24 avant-directrices. Les viroles sont soudées sur des caissons de manière que les lignes de forces passent par le centre de gravité des caissons pour limiter les moments de flexion.

L'avant-distributeur est exécuté en atelier. Il est en 2 pièces qui sont ensuite soudées sur le chantier sans boulonnage (fig. 5). Les caissons sont ensuite remplis de béton. Comme pour LG 3, les tôles utilisées sont en acier ASTM A-516, grade 70.

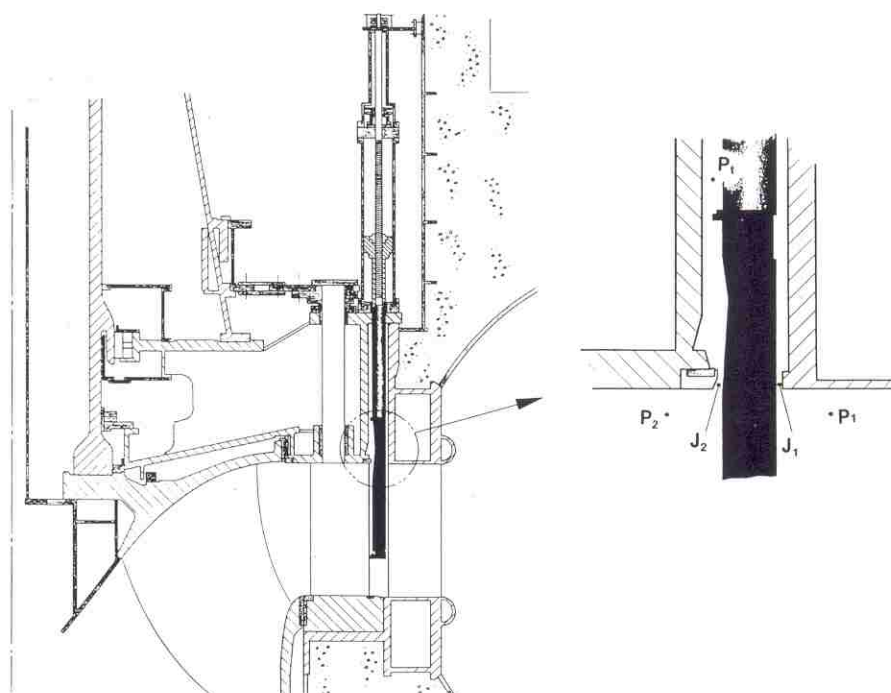
Les directrices sont fabriquées en tôle cintrée assemblée par soudage. Le distributeur a été préassemblé en atelier comme le montre la figure 6.

La roue est en acier doux ASTM A-27 grade 70-40, coulée d'une pièce (fig. 7). Les surfaces où de l'érosion par cavitation est à craindre sont revêtues d'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni. Les labyrinthes sont en acier inoxydable trempé et revenu, frettés sur la roue. Ces labyrinthes sont cylindriques, munis de rainures. Les jeux radiaux sont de 1,5 mm pour le labyrinthe supérieur et de 2,0 pour le labyrinthe inférieur.

L'arbre est en acier mécano-soudé et ne comporte pas de brides classiques. Les boulons d'assemblage sont disposés dans des épaissements et alignés sur l'axe des parois pour éliminer les moments de flexion des brides. On arrive ainsi à un arbre d'une rigidité supérieure de 30% pour un poids inférieur de 50% par rapport à une solution forgée (fig. 8).

**Conception
mécanique**

14. Coupe de la vanne fourreau montrant les servomoteurs et les jeux variables amont et aval de la vanne (document MIL TRACY).



La butée axiale est située sous l'alternateur. Elle est supportée par un cône s'appuyant sur le fond supérieur de la turbine. La figure 9 montre les supports des patins (fig. 10) à pression d'huile.

La machine est munie d'une vanne fourreau placée entre l'avant-distributeur et le distributeur, d'un diamètre de 7,640 m (fig. 11 et 12). Cette vanne, du type autoclave, est actionnée par 6 servomoteurs à huile. La synchronisation est effectuée par un écrou fixé au piston du servomoteur (fig. 13). Cet écrou fait tourner une vis. La rotation des 6 vis est synchronisée par une chaîne reliée aux vis par une roue dentée.

La fermeture des vannes est obtenue directement par le poids et la pression de l'eau dans la chambre au-dessus de la vanne. Cette pression est réglée au cours de la descente par une variation des jeux amont et aval de la vanne, comme le montre la figure 14. On obtient ainsi une force résultante plus constante au cours de la manœuvre.

Bibliographie

1. S. Casacci, B. Lourdeaux, M. Wegner. Comportement dynamique des avant-distributeurs de grandes turbines Francis. Comptes-rendus du Symposium AIRH, section des Machines et cavitation, Amsterdam, 1982.
2. P. Henry, A. Leroux, J.M. Levesque, J.G. Miron. Performance of the LG-4 turbines. Comptes-rendus du 14^e Symposium de la section des Machines et cavitation de l'AIRH, Trondheim, 1988.
3. P. Henry. Les centrales du complexe de la Baie James. Bulletin technique de la Suisse romande No 14, 1980.
4. P. Hudon. Recent developments on cylindrical gates. Comptes-rendus du 13^e Symposium de la section Machines et cavitation de l'AIRH, Montréal, 1986.
5. Société d'énergie de la Baie James. Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière. Société d'énergie de la Baie James et Editions Chenelière inc., 1987, Montréal.

Centrale de Revelstoke

Province de la Colombie britannique, Canada

4 turbines Francis de 495 MW

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

Maître d'œuvre: British Columbia Hydro and Power Authority, Vancouver, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1079	1243	1277
H (m)	110,0	126,8	130,2
Q (m ³ /s)	384,2	419,4	436,2
P (MW)	370	467	495
D _{le} (m)	6,121	f (Hz)	60
D _{li} (m)	6,393	n (t/s; t/min)	1,88; 112,5
D _o (m)	7,800	N _{QE} (-)	0,18
B _o (m)	1,597	n _q	61
z _r (-)	14	v (-)	0,39
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,119
z _{avd} (-)	23	σ _{max} (-)	0,157

Caractéristiques

La centrale, située sur la rivière Columbia, est l'avant-dernière centrale avant la frontière avec les USA.

Généralités

Elle est située au pied d'un barrage en béton dans une vallée relativement étroite. L'évacuateur de crues équipé de 3 vannes secteur fait partie intégrante du barrage. Une fois terminée, la centrale comportera 6 groupes d'une puissance totale de 2700 MW. Les 4 premiers groupes ont été mis en service en 1984.

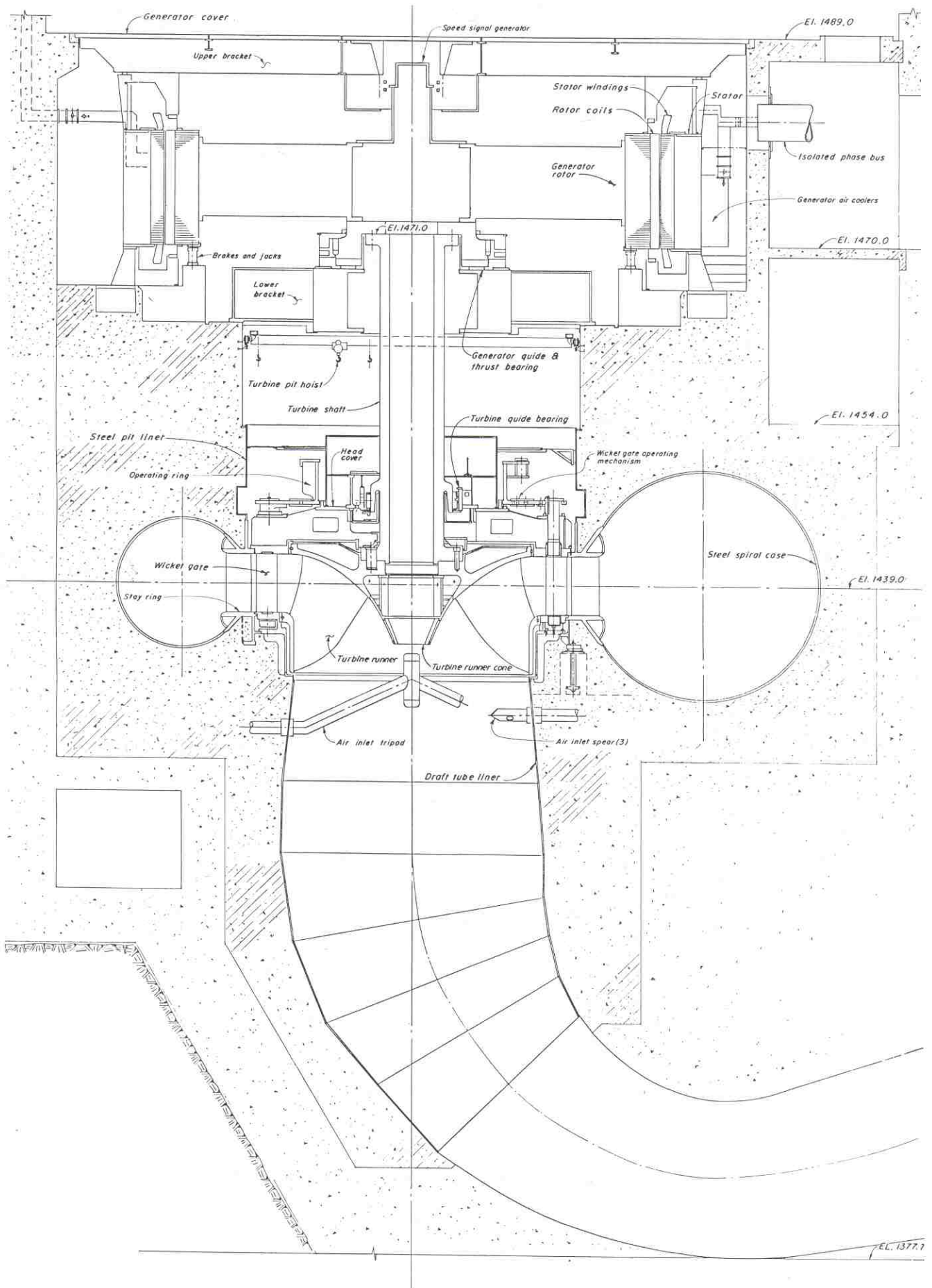
Chaque turbine est alimentée par sa propre conduite forcée et ne comporte pas de vanne de turbine.

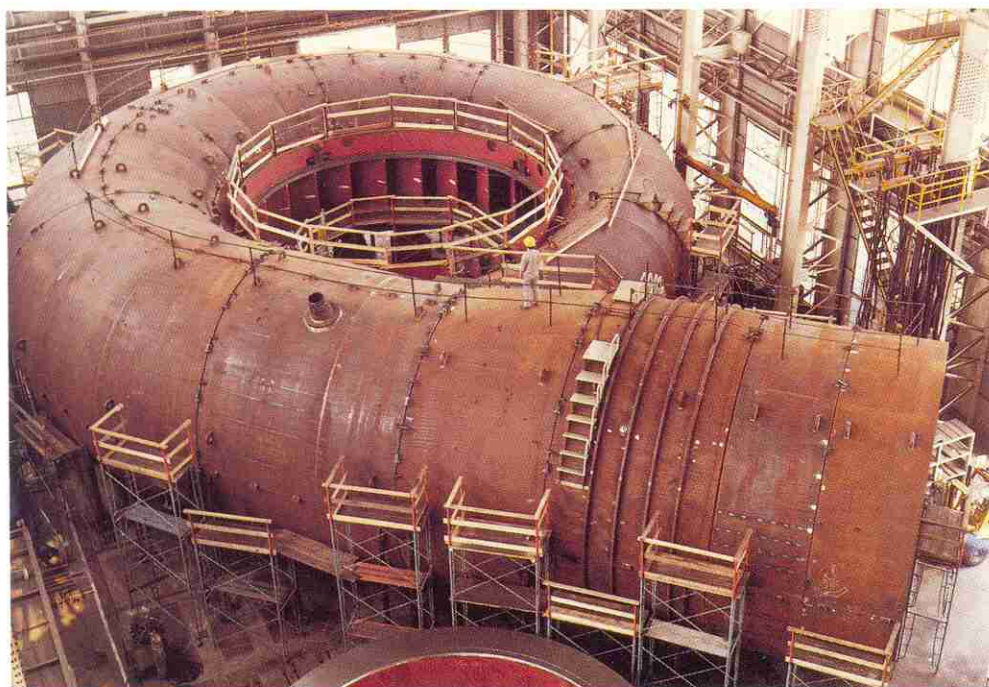
La bêche spirale, du type Piguet, est divisée en 22 viroles. Le diamètre d'entrée est de 7,315 m (fig. 1 et 2). L'avant-distributeur comporte 23 avant-directrices à faces parallèles comme le montre la figure 3.

Conception hydraulique

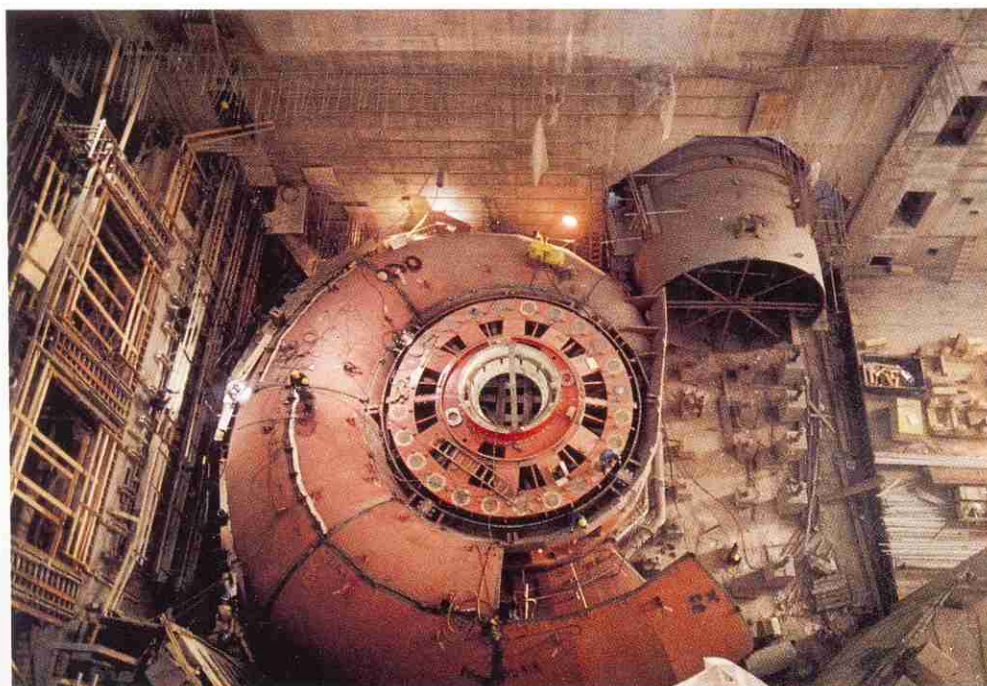
Le distributeur a 24 aubes (fig. 4).

La roue a un profil hydraulique assez classique. On remarque que la couronne extérieure est cylindrique et que l'arête de sortie est relativement tendue.





1. Bâche spirale et avant-distributeur en cours de prémontage en atelier (photo Fuji Electric).



2. Bâche spirale et fond supérieur en montage à la centrale (photo British Columbia Hydro).

Les fuites au labyrinthe supérieur sont évacuées par 6 conduites reliées au cône du diffuseur.

Pour diminuer la quantité de béton à mettre en œuvre, le diffuseur a une largeur de 23,5 m à sa sortie alors que le pas entre 2 machines est de 26,5 m. Dans ces conditions, 2 piliers ont été prévus.

3. Avant-distributeur du type Piguet en 4 parties (photo Fuji Electric).



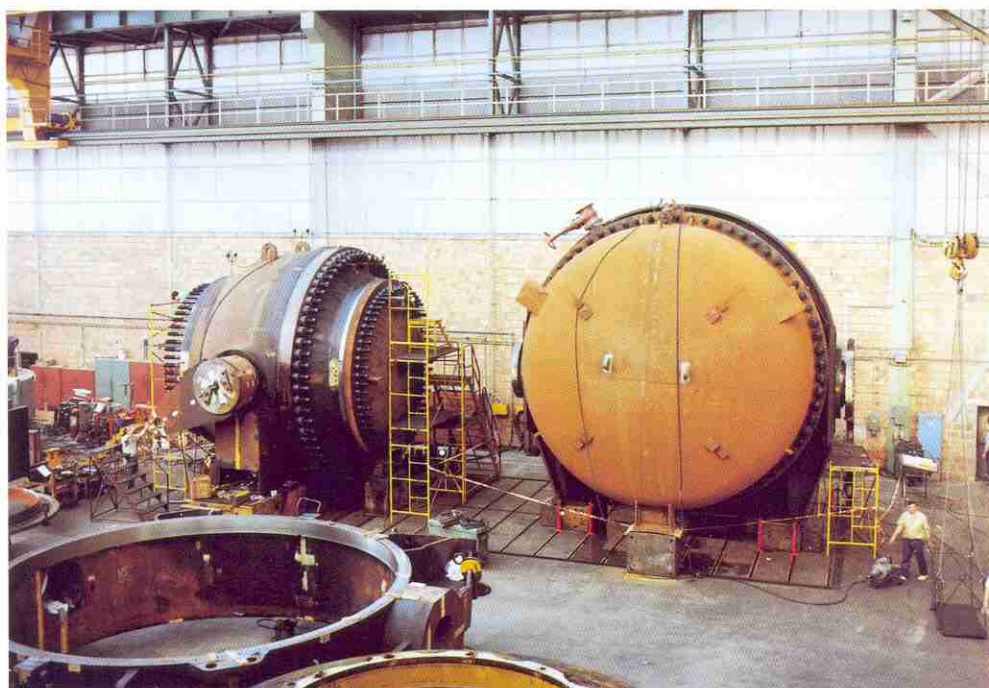
4. Prémontage du distributeur en atelier. On remarque les lignes de contact protégées par de l'acier inoxydable (photo Fuji Electric).



Une étude soignée a été effectuée pour minimiser les pertes de charge du diffuseur afin de ne pas affecter son rendement.

Un tripode permet l'aération à la sortie de la roue (fig. 5).

L'essai de réception officiel a été effectué par l'IMHEF. Le modèle, d'un diamètre de sortie roue de 410 mm (fig. 6), était équipé d'un système de mesure



1. Vannes sphériques de turbine pendant l'essai de pression en atelier (diamètre 3,400 m, masse 400 t) (photo Sorefame).

A l'aval, les turbines sont reliées à une cheminée d'équilibre par 2 galeries blindées de 5,75 m de diamètre.

Le canal de fuite unique est très long, 5 km environ, et son diamètre est de 8,3 m.

Des vannes papillon-treillis, de 5,750 m de diamètre, sont placées à la sortie des turbines pour protéger la centrale d'une éventuelle inondation. La contre-pression aval maximale est en effet de 85 m.

La production annuelle moyenne prévue est de 877 GWh. Les groupes ont été mis en service en 1991.

La bêche spirale a un diamètre d'entrée de 3,600 m. Elle est composée de 24 viroles.

L'avant-distributeur Piguet a des bourrelets d'un diamètre relativement grand, étant donné la forte épaisseur de la tôle des flasques (320 mm). Les avant-directrices sont planes avec des chanfreins (voir LG 4 et Tucurui).

Les aubes directrices ont un profil dissymétrique avec un côté plan. Leur épaisseur relative est de 0,225.

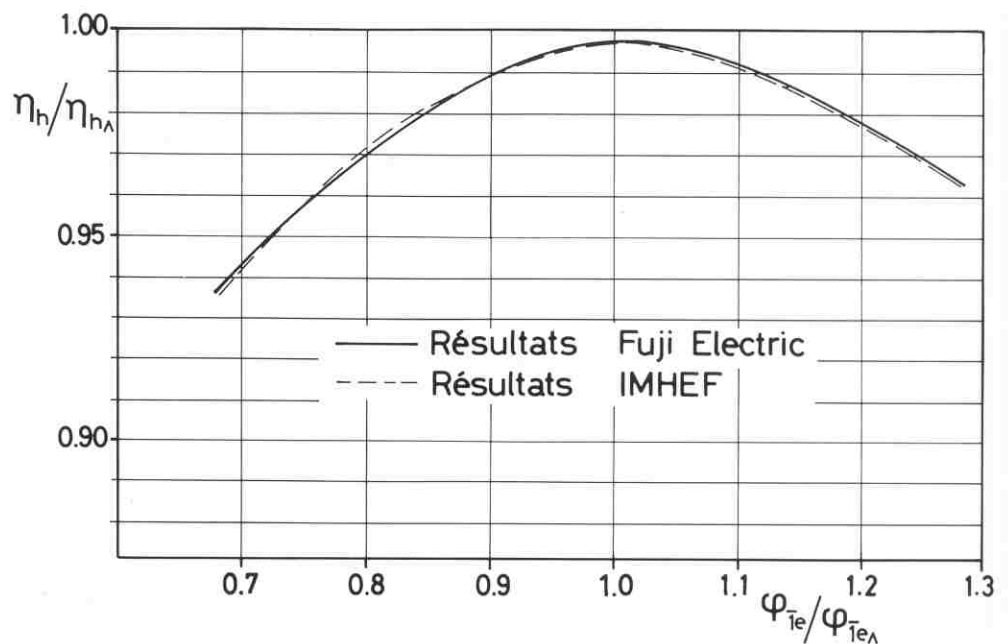
La roue a un profil hydraulique classique compte tenu de sa vitesse spécifique ($v_s = 0,21$).

Le diffuseur est entièrement composé de viroles coniques. La section de sortie est donc circulaire.

La profondeur relative $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}}$ est assez grande avec une valeur de 3,66.

**Conception
hydraulique**

7. Comparaison des résultats d'essai obtenus dans les laboratoires Fuji Electric et IMHEF (d'après un document Fuji Electric).



des fuites au labyrinthe supérieur de manière à obtenir une bonne mesure de la poussée axiale. Les essais de rendement ont été faits sous des chutes de 3,5 et 35 m pour mettre en évidence les effets d'échelle dus à la différence des nombres de Reynolds.

La concordance entre les résultats d'essai obtenus par Fuji Electric et par l'IMHEF est excellente. La différence maximale, comme le montre la figure 7, est inférieure à 0,2%.

Conception mécanique

Les machines n'étant pas munies de vannes, un élément souple ainsi qu'une section de fermeture divisée en 4 parties ont été prévus pour les révisions des turbines.

La bête est réalisée en 29 parties pour permettre son transport. L'épaisseur maximale de la tôle est de 59 mm et la matière est l'acier SM 50 B modifié pour obtenir une haute résilience. La pression d'essai est de 23,8 bar alors que la pression était maintenue à 8,6 bar durant le bétonnage.

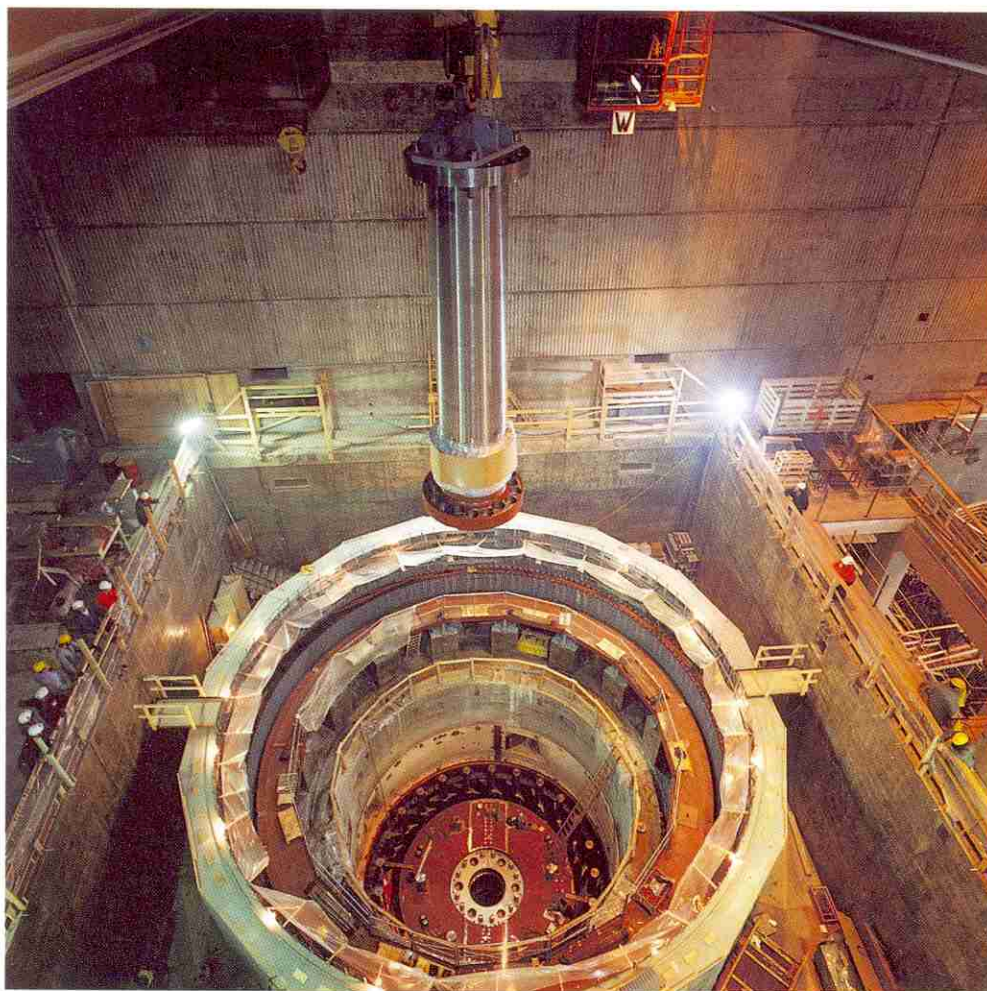
L'avant-distributeur est du type Piguet, divisé en 4 sections boulonnées. Sa masse est d'environ 200 t.

Le distributeur possède 24 aubes en acier coulé. Il a une tendance à fermer en dessous de 20% d'ouverture. Les flasques inférieur et supérieur sont en acier protégé par un revêtement en acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni. Les paliers des aubes directrices sont du type autolubrifié.

La roue est en acier coulé au carbone, d'une pièce. Une protection d'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni est appliquée aux endroits exposés à la cavitation. La roue a été coupée en 2 parties (fig. 8) pour le transport. Le moyeu a été



8. Roue en cours d'équilibrage en centrale après soudure des 2 parties (photo British Columbia Hydro).



9. Montage de l'arbre en centrale. On remarque les aubes du distributeur et le plafond de la roue (photo British Columbia Hydro).

réassemblé par des boulons alors que les aubes et la couronne ont été soudées sur le site. L'usinage final et l'équilibrage de la roue ont également été exécutés sur le site à l'aide de machines spéciales.

Les labyrinthes fixes ont des bagues d'usure en acier inoxydable 13 Cr - 3,8 Ni.

L'arbre est réalisé en acier forgé. Il a un diamètre de 1700 mm, une longueur de 9200 mm et une masse de 100 t (fig. 9).

Bibliographie

- H. Matsuyama, K. Haneda, T. Miyajima. 495 MW Francis turbines and generator for Columbia River Revelstoke Project, Fuji Electric Review, Vol. 28, No 1, 1982.
- H. Lang, T. Kubota, S. Nakamura: An experimental study of efficiency step-up with 500 MW Francis. Comptes-rendus du 13^e Symposium de la section Machines et cavitation de l'AIHR, Montréal, 1986.

Centrale de Cirata

Java, Indonésie

4 turbines Francis de 130 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Voest-Alpine MCE, Linz, Autriche

Maître d'œuvre: Perusahaan Umum Listrik Negara, Jakarta, Indonésie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	954	1047	1248
H (m)	97,25	106,80	127,25
Q (m ³ /s)	125,2	132,0	111,0
P (MW)	112,0	129,6	129,6
D _{ie} (m)	3,485	f (Hz)	50
D _{li} (m)	3,457	n (t/s; t/min)	3,125; 187,5
D _o (m)	4,250	N _{QE} (-)	0,20
B _o (m)	0,980	n _q	65
z _r (-)	16	v (-)	0,41
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,216
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,282

Caractéristiques

La centrale de Cirata est située à environ 100 km au sud-est de Jakarta, sur la rivière Citanum qui se dirige en direction du nord et se jette dans la mer de Java.

Généralités

Le barrage (fig. 1) est une digue en terre, avec un évacuateur sous forme d'un tunnel situé en rive gauche. La centrale, également en rive gauche, est souterraine.

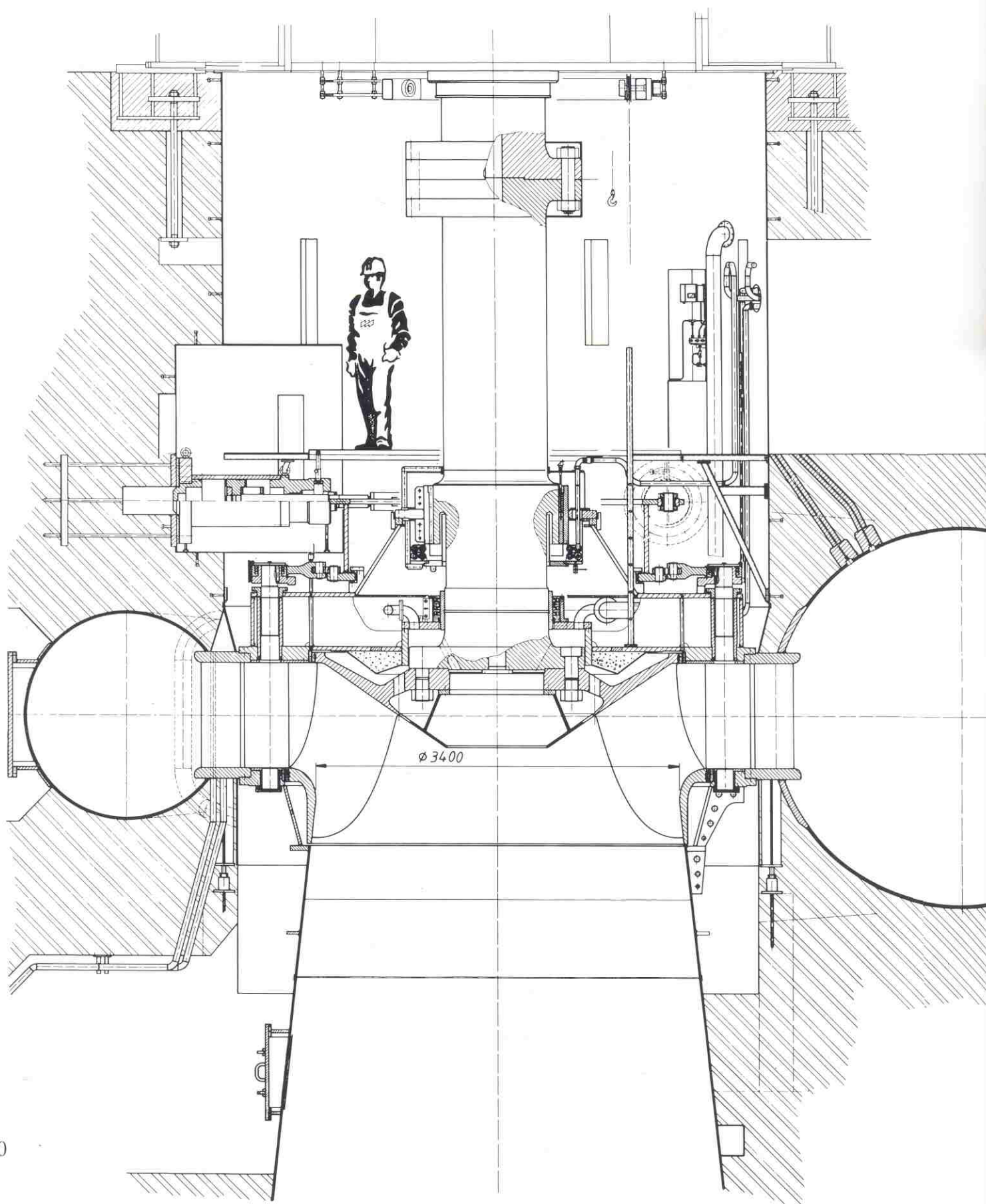
Les machines ont été mises en service en 1988 et la production annuelle moyenne est de 1,43 GWh.

La bêche spirale, du type Piguet, a un diamètre d'entrée de 4,30 m et comporte 20 viroles. Les avant-directrices ont un profil incurvé à épaisseur constante.

Conception hydraulique

Les directrices ont une tendance à la fermeture dans toute la zone de fonctionnement.

La roue a un profil hydraulique assez particulier. Le plafond est complètement conique; la ceinture, avec un rayon de courbure relativement grand à l'entrée, a un point d'intersection avec l'arête d'entrée situé très près du distributeur. Le diffuseur est très profond $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}} = 3,79$ et ne comporte pas de pilier dans la trompette.





1. Barrage du type digue en terre, hauteur 125 m, longueur de crête 454 m (photo Voest-Alpine).



2. Modèle d'essai sur la plate-forme de Voest-Alpine MCE à Linz ($D_{ie} = 348,5$ mm) (photo Voest-Alpine).

Les essais de réception sur modèle réduit ont été exécutés dans le laboratoire de Voest-Alpine à Linz avec un modèle de diamètre $D_{ie} = 348,5$ mm et sous une chute $H = 30$ à 45 m (fig. 2).

Conception mécanique

La bêche, d'une masse de 81 t, est partiellement soudée et traitée thermiquement en ateliers puis assemblée et soudée au chantier.

L'avant-distributeur est composé de 2 anneaux et de 24 avant-directrices en acier Al 50, soudé et traité thermiquement en atelier. Il est transporté en 2 pièces qui sont ensuite boulonnées et soudées sur le site. La masse de l'avant-distributeur est de 35 t.

Les aubes directrices sont coulées en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Elles comportent 3 paliers autolubrifiés, le palier inférieur est accessible par une galerie située autour du blindage du diffuseur. Le système de protection est à friction, sans organe de rupture (fig. 3).

La roue (fig. 4) est en construction mécano-soudée en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Les aubes sont usinées à l'aide d'une machine à commande numérique.

Le couvercle de turbine, mécano-soudé en acier Ald 41, est divisé en 2 parties qui sont boulonnées sur le chantier. Sa masse est de 22 t.

L'arbre, d'une masse de 32 t, est en acier ASTM A 668 grade D forgé. Le palier turbine, du type cloche, est situé sur le fond supérieur. Les joints sont munis d'anneaux de carbone.

Le groupe comporte 3 paliers; la butée axiale est placée sous l'alternateur.

3. Vue de la commande du distributeur. On distingue les leviers des directrices, le cercle de vannage et un des servomoteurs (photo IMHEF).





4. Roue en acier inoxydable ($D_{ie} = 3,485 \text{ m}$) (photo Voest-Alpine).

Centrale de Shiroro

Etat du Niger, Nigeria

4 turbines Francis de 155 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:
Voest-Alpine MCE, Linz, Autriche

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

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	686	951	1079
H (m)	70,0	97,0	110,0
Q (m ³ /s)	151,5	180,0	173,0
P (MW)	87,7	155,0	171,0
D _{ie} (m)	4,460	f (Hz)	50
D _{li} (m)	4,358	n (t/s; t/min)	2,50; 150
D _o (m)	5,226	N _{QE} (-)	0,20
B _o (m)	1,132	n _q	65
z _r (-)	18	v (-)	0,41
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,110
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,383

Caractéristiques

La centrale de Shiroro utilise les eaux de la rivière Kaduna qui est un affluent en rive gauche du Niger.

Généralités

La centrale est située à environ 70 km au nord-est de Minna, capitale de l'état du Niger.

Le barrage est une digue en terre avec un évacuateur de crues situé en rive droite comprenant 4 passes munies de vannes secteur (fig. 1).

La centrale en surface est située au pied du barrage.

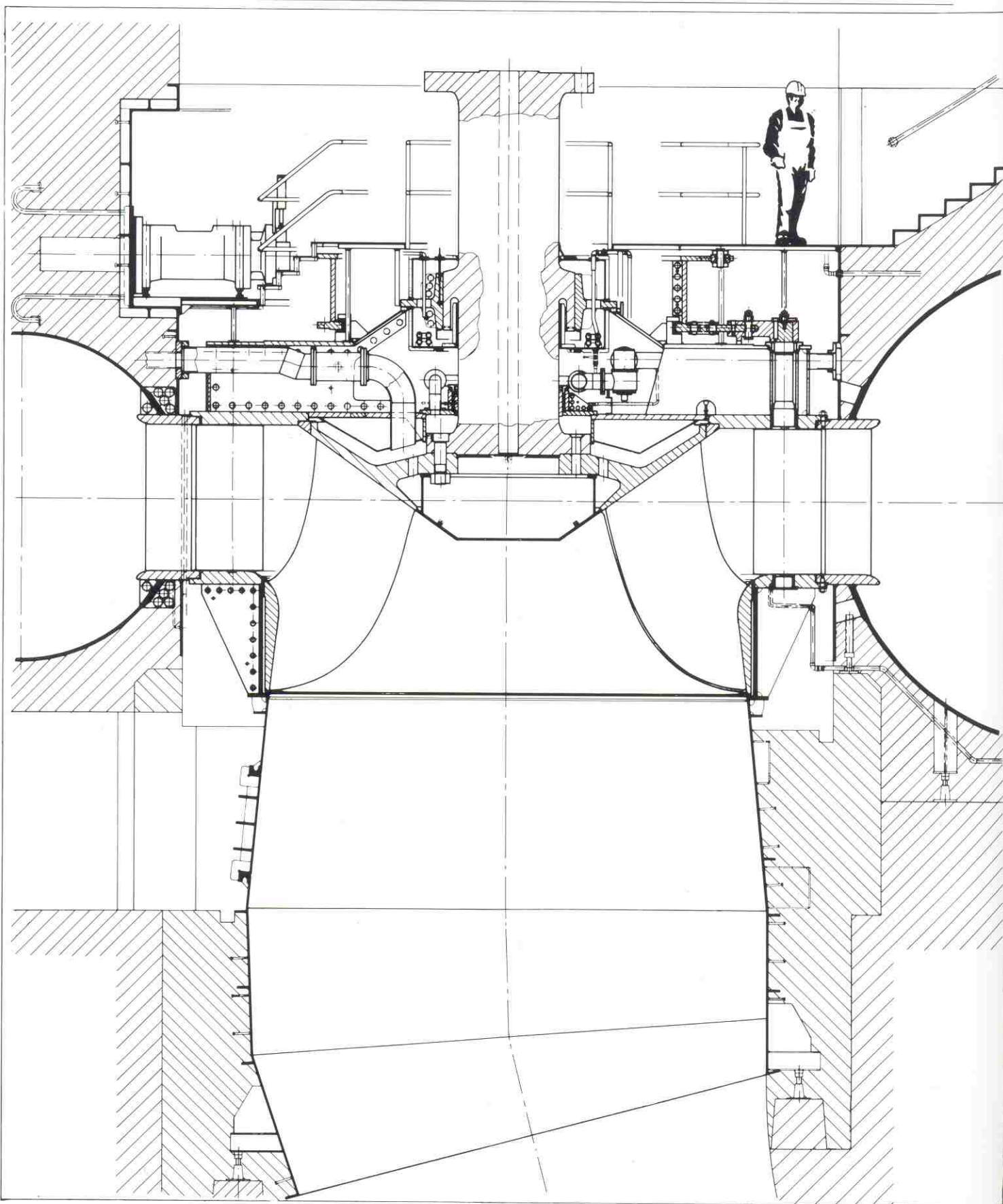
Les groupes ont été mis en service en 1989-1990.

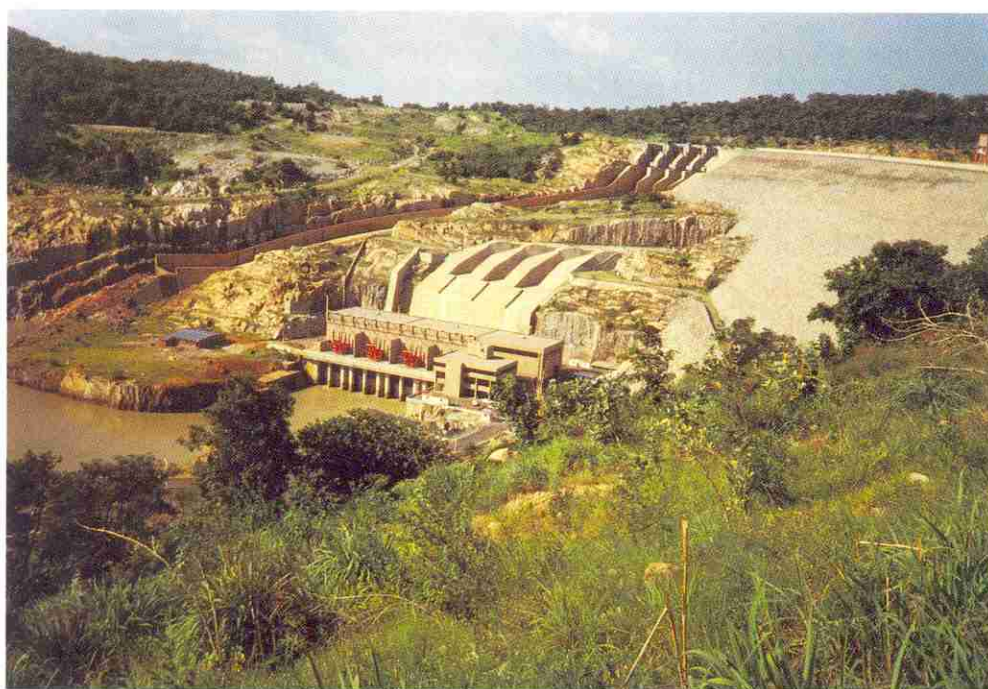
La bêche est subdivisée en 23 viroles. Elle est du type Piguet avec un diamètre d'entrée de 5,00 m.

Conception hydraulique

Les avant-directrices ont un profil incurvé.

La roue a un profil hydraulique assez classique à la couronne extérieure. Le moyeu est conique sur toute la longueur du filet intérieur. Le nombre d'aubes est relativement grand (18) .





1. Centrale, évacuateur de crues à 4 passes et barrage du type digue en terre (photo Voest-Alpine).



2. Roue à 18 aubes, en phase d'ajustement, avant soudure. On remarque en outre la roue modèle d'un diamètre de 340 mm (photo Voest-Alpine).

La trompette du diffuseur est munie de rainures de batardeau et comporte un pilier central. La profondeur du diffuseur est de 14,00 m et $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,14$.

Les essais de réception sur modèle réduit ont été effectués dans le laboratoire du constructeur à Linz avec un modèle d'un diamètre $D_{1e} = 0,340$ m et sous une chute $H = 30$ à 45 m.

Conception mécanique

La bêche spirale, d'une masse de 200 t, est partiellement soudée en atelier et sur le chantier. L'avant-distributeur, en acier ASTM A 516 grade 70, est fabriqué en atelier en 2 pièces qui sont boulonnées et soudées sur le site. Sa masse est de 72 t.

Les directrices sont en acier Al dur AF 55 avec une protection d'acier inoxydable aux extrémités et aux lignes de contact. L'arbre des directrices est à 3 paliers autolubrifiés. La protection est assurée par des tiges de rupture.

La roue est en construction soudée entièrement en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni, sa masse totale est 45 t. Les aubes sont usinées sur une machine à commande numérique et soudées sur le moyeu et la ceinture. La figure 2 montre une roue durant l'opération de positionnement des aubes avant la soudure.

Les fonds supérieur et inférieur (35 t) sont fabriqués en construction mécano-soudée en acier St 37 T, en 2 parties boulonnées sur le site.

L'arbre, d'un diamètre de 1220 mm et d'une masse de 43 t, est en acier forgé CK 35. Le palier turbine est de construction classique. Le groupe à 3 paliers, la butée est placée sous l'alternateur.

Centrale de Guri II

Province de Bolivar, Venezuela

10 turbines Francis de 610 MW

Conception hydraulique et mécanique: Hitachi Ltd, Hitachi, Japon

Fabrication: Consortium Hitachi-Toshiba, Japon

Maître d'œuvre: Electrificación del Caroni (EDELCA), Caracas, Venezuela

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	1089	1275	1432
H (m)	111,0	130,0	146,0
Q (m ³ /s)	472,0	513,0	585,0
P (MW)	476,0	610,0	767,0
D _{le} (m)	6,900	f (Hz)	60
D _{li} (m)	6,900	n (t/s; t/min)	1,875; 112,5
D _o (m)	8,300	N _{QE} (-)	0,20
B _o (m)	1,632	n _q	66
Z _r (-)	15	v (-)	0,42
Z _o (-)	20	σ _{min} (-)	0,123
Z _{avd} (-)	20	σ _{max} (-)	0,211

Caractéristiques

L'aménagement de Guri comprend 2 centrales. La première, Guri I, est équipée de 3 groupes de 180,2 MW, 3 groupes de 223 MW, 1 groupe de 340 MW et de 3 groupes de 370 MW, tous de construction Hitachi. La deuxième centrale, Guri II, est équipée de 10 groupes de 610 MW.

Généralités

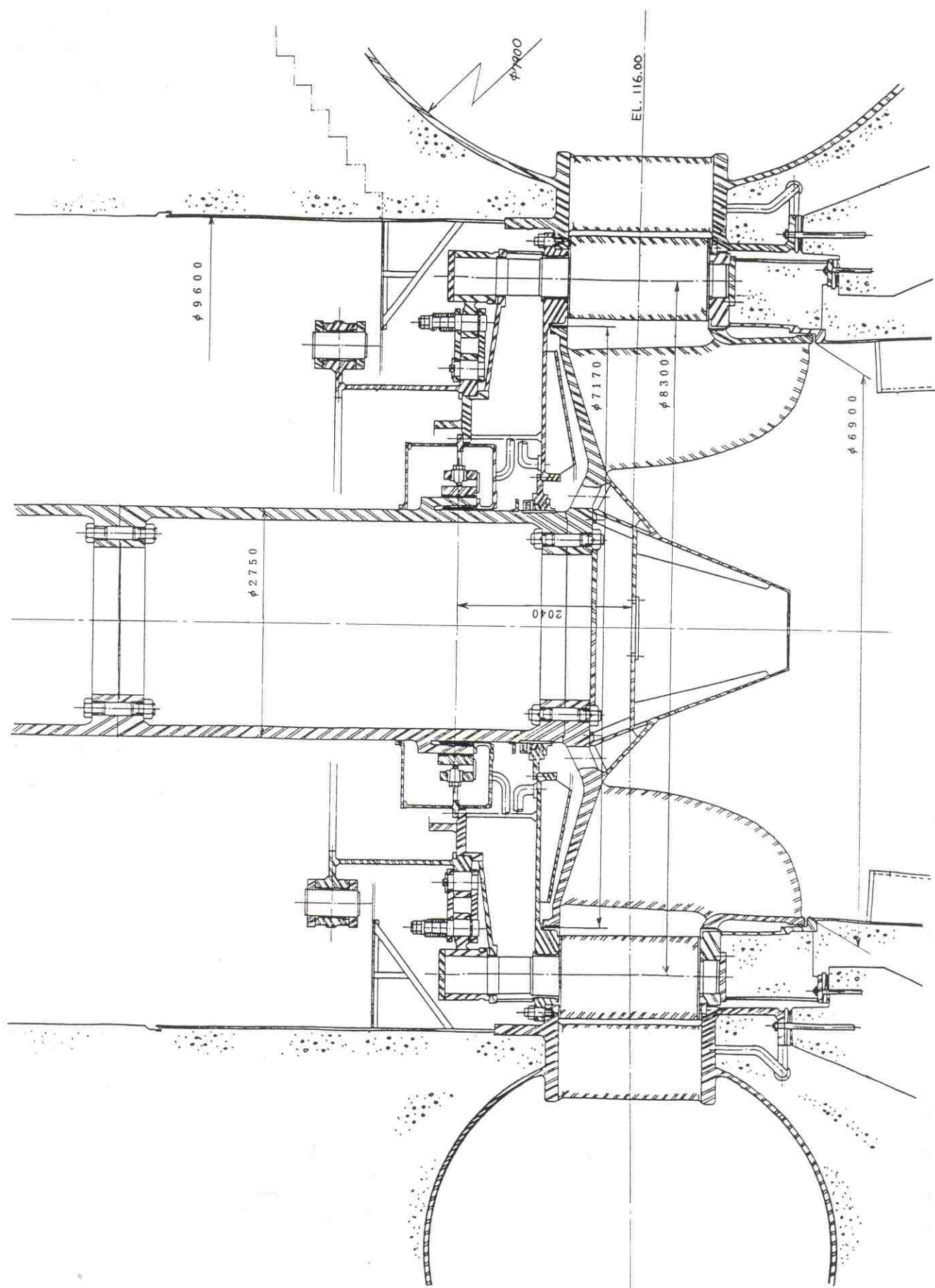
Les centrales sont sur le fleuve Caroni, à 100 km au sud de Ciudad Guyana, ville située au confluent du Caroni et de l'Orénoque.

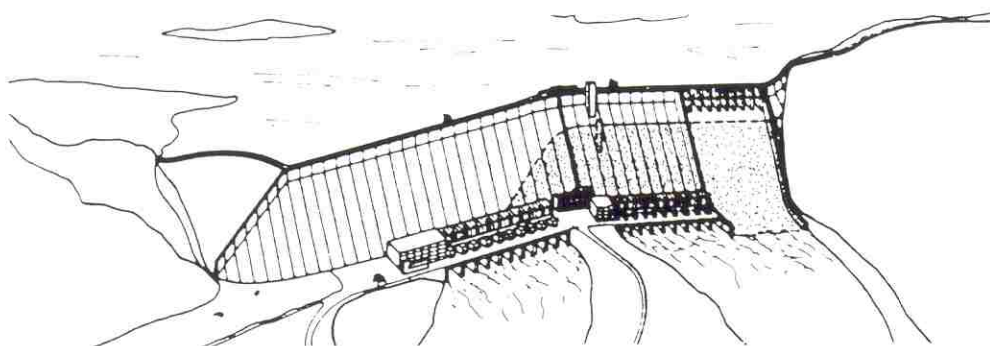
L'aménagement a été construit en 2 étapes.

La première, terminée en 1978, comprenait la centrale de Guri I équipée de 10 groupes et d'un évacuateur de crues (fig. 1).

Il a été décidé par la suite de surélever le barrage de 52 m en construisant 2 barrages supplémentaires en rives gauche et droite et une nouvelle centrale d'une puissance totale maximale de 7670 MW. Cette opération a été très délicate. Il s'agissait en effet de maintenir en exploitation la centrale et les 2/3 de l'évacuateur de crues. Celui-ci comprend 9 passes équipées de vannes secteur de 15 m de largeur et de 22 m de hauteur. Le débit maximal est de 30 000 m³/s.

La dernière unité de Guri II a été mise en service en 1986. La production annuelle moyenne est de 50 TWh.





1. Vue de l'aménagement terminé. La première étape est ombrée (document Water Power and Dam Construction).

La bâche spirale est du type Piguet alors que pour les machines de la première centrale (unités 1 à 10), l'avant-distributeur était à double courbure.

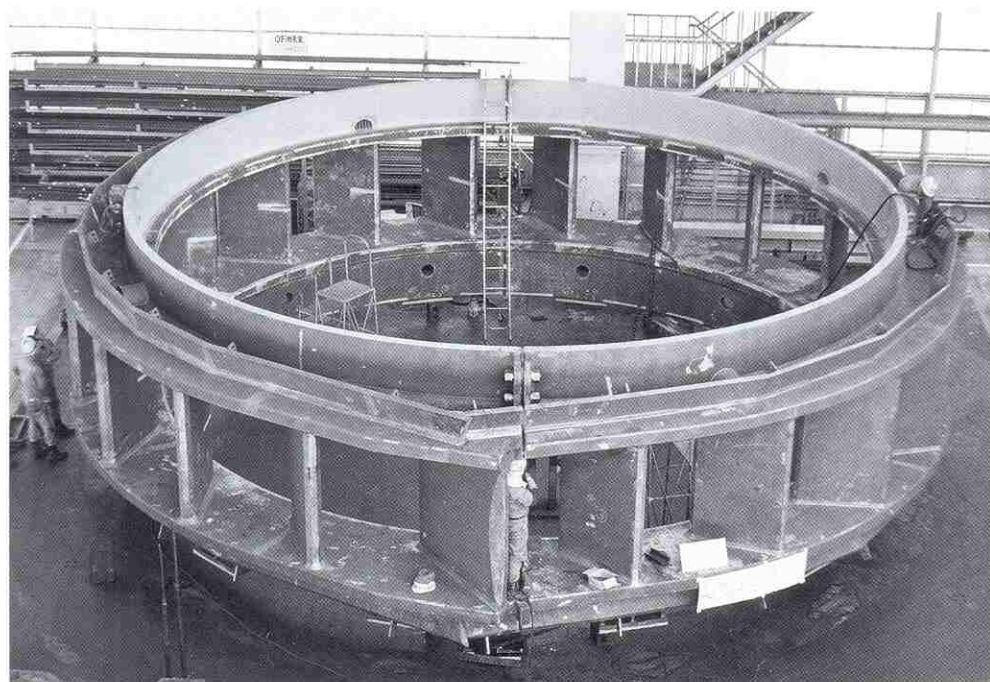
Les avant-directrices sont planes et chanfreinées à l'entrée et à la sortie (fig. 2), alors que les flasques n'ont ni bourrelet ni chanfrein à l'entrée.

Les directrices ont un profil légèrement courbé sans face plane. Le rapport épaisseur / longueur est de 0,215.

La roue a un profil hydraulique avec un plafond complètement conique. L'arête d'entrée est verticale, ce qui est une caractéristique particulière étant donné la vitesse spécifique de la machine. L'équilibrage de la poussée axiale est réalisé par des trous situés dans la roue.

Le cône du diffuseur est muni d'ailettes (fins) pour diminuer l'amplitude des fluctuations de pression; ces dernières ont diminué d'un facteur de l'ordre de 1,6.

Conception hydraulique



2. Avant-distributeur en cours d'assemblage en atelier (photo Hitachi).

Les essais de réception ont été exécutés dans le laboratoire Hitachi avec un modèle de diamètre $D_{Ie} = 355,6 \text{ mm}$ et sous une chute $H = 10 \text{ m}$.

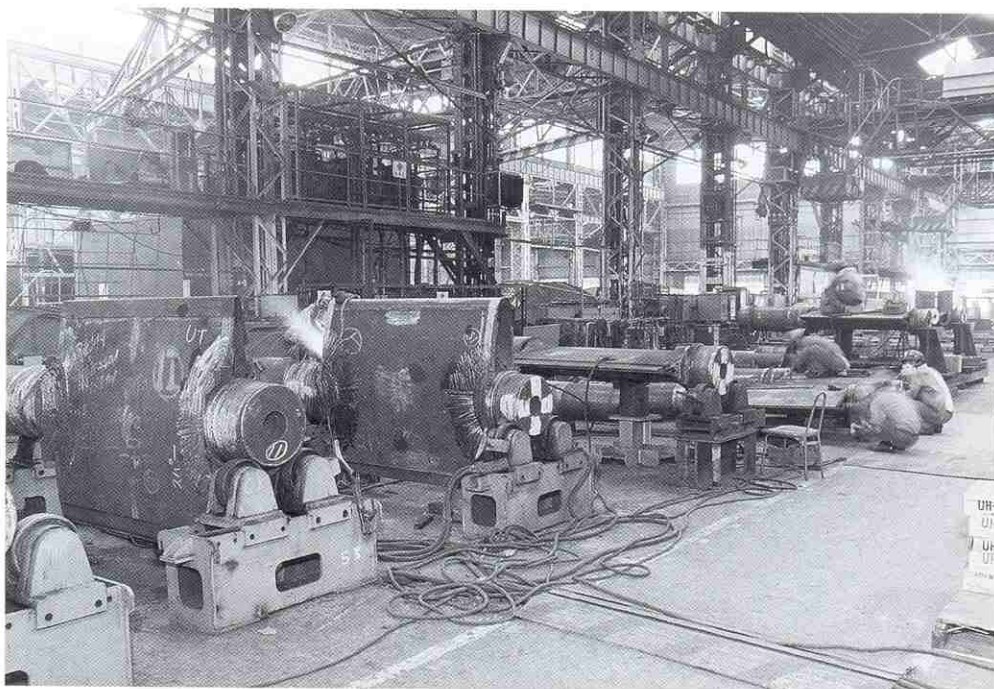
Le rendement maximum espéré du prototype, basé sur l'essai modèle, est de $\eta = 0,958$.

Conception mécanique

3. Bâche spirale préassemblée dans les ateliers du constructeur. Diamètre d'entrée 7,900 m (photo Hitachi).

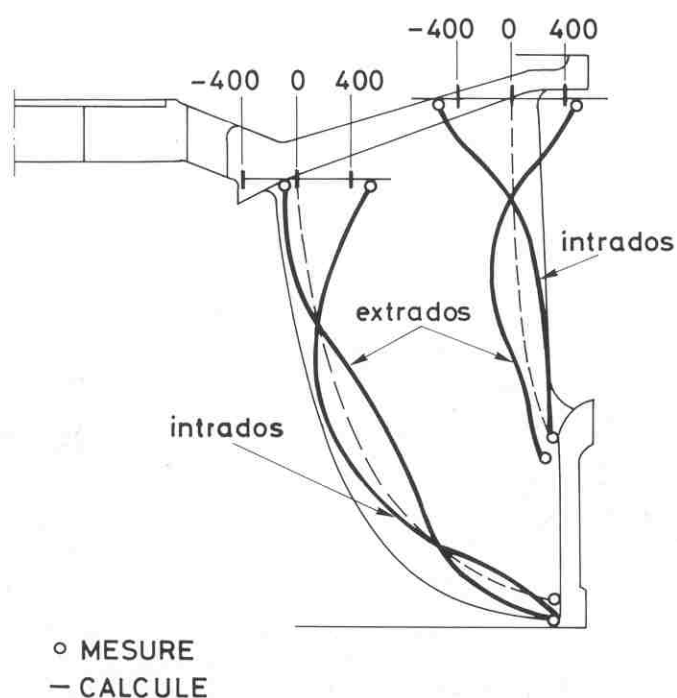


4. Aubes directrices en construction mécano-soudée, en cours de fabrication (photo Hitachi).





5. Roue et arbre prêts au montage en centrale (masse totale 250 t) (photo Hitachi).

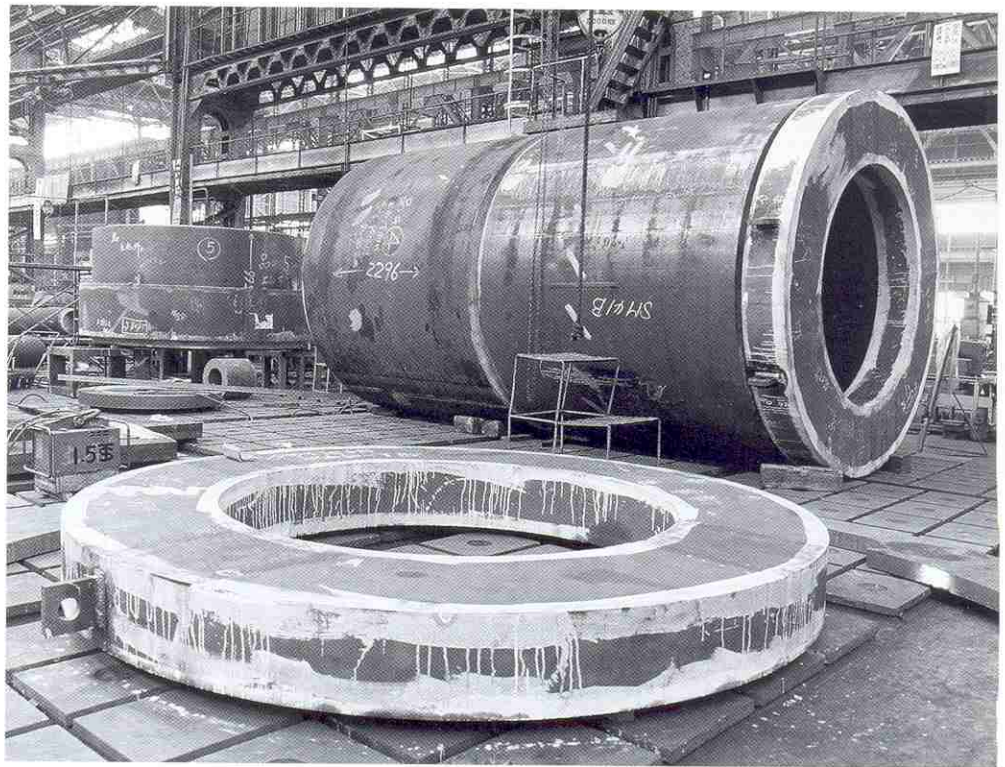


6. Distribution des contraintes N/mm^2 dans 2 sections proches des arêtes d'entrée et de sortie, à l'emballlement, à la chute maximale $H = 146$ m, et à l'ouverture maximale de 102,5% (d'après un document Hitachi).

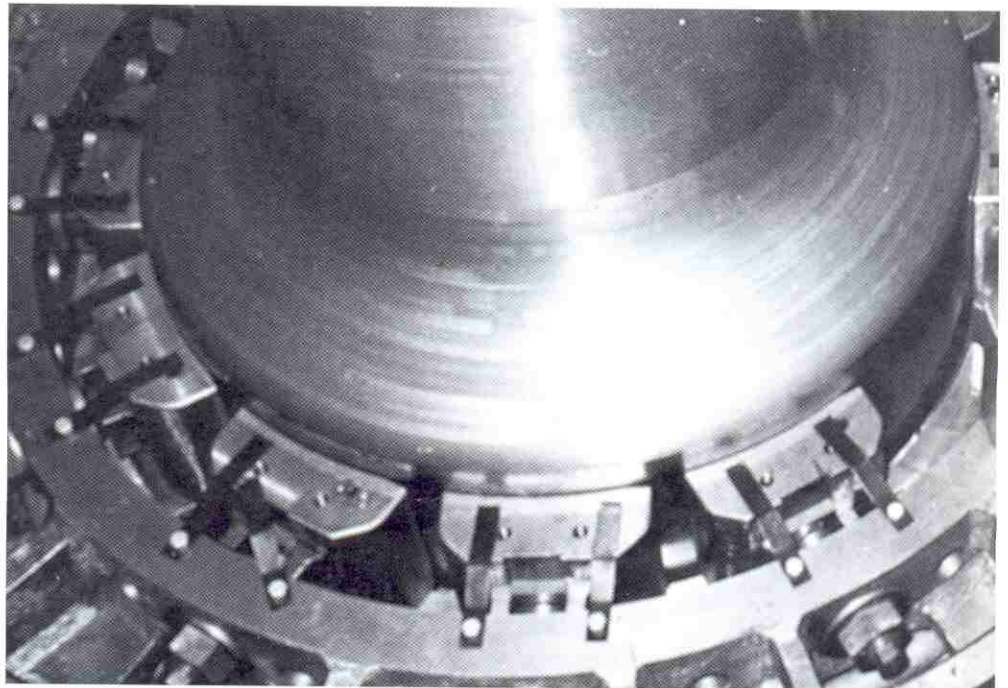
L'avant-distributeur est en construction mécano-soudée à partir de tôle d'acier JIS-63106 SM41B pour les flasques et JIS-63106 SM50A pour les avant-directrices. Il est divisé en 4 parties boulonnées et soudées sur le chantier (fig. 2).

Les aubes directrices sont également en construction mécano-soudée en utilisant en partie la technique de l'«electroslag» (fig. 4). Les extrémités ainsi que les lignes de contacts sont protégées par un revêtement en acier inoxydable.

7. Arbre en construction mécano-soudée en cours de fabrication dans les ateliers du constructeur (photo Hitachi).



8. Palier de turbine à patins ajustables (photo Hitachi).



La roue est coulée d'une pièce en acier inoxydable 13 Cr - 1Ni et sa masse est de 130 t (fig. 5).

Une analyse des contraintes a été exécutée par la méthode des éléments finis. Des mesures sur modèle réduit ont confirmé les résultats des calculs (fig. 6).

L'arbre, d'un diamètre de 2750 mm, est exécuté en tôles d'acier JIS-63106 SM41A et SM41B de 130 mm d'épaisseur, soudées par la technique de l'arc submergé (fig. 7). L'arbre a une masse totale de 120 t. Le palier turbine est constitué de 20 patins (fig. 8) ajustables.

- H.G. Beltran, R.W. Fazalare, M. Kawano. The 10000 Megawatts of Hydraulic Project. American Power Conference, 41st Annual Meeting Chicago, 1979.
- Hitachi Francis type Hydraulic turbines, Publication Hitachi.
- Hitachi Hydroelectric Equipement, Publication Hitachi.
- H. Roog. Final stage of Guri completed. Water Power and Dam Construction, October 1986.

Bibliographie

Centrale d'Itaipu

Brésil et Paraguay

18 turbines Francis de 740 MW

Conception hydraulique: Neyrpic, Grenoble, France

Conception mécanique: J.M. Voith GmbH, Heidenheim, RFA

Fabrication: Consorcio Itaipu Electro-mecânico (CIEM)

Europe: Brown, Boveri & Cie AG, Alsthom Atlantique, Creusot Loire, Neyrpic, Siemens AG, J.M. Voith GmbH

Brésil: BBC Brown, Boveri S.A., Bardella S.A. Industrias Mecânicas, BSI Industrias Mecanicas, Siemens S.A., Mecânica Pesada S.A., Voith S.A. Maquinas e Equipamentos

Paraguay: CIE Consorcio de Ingenieria, Electromecánica S.A.

Maître d'œuvre: Itaipu Binacional

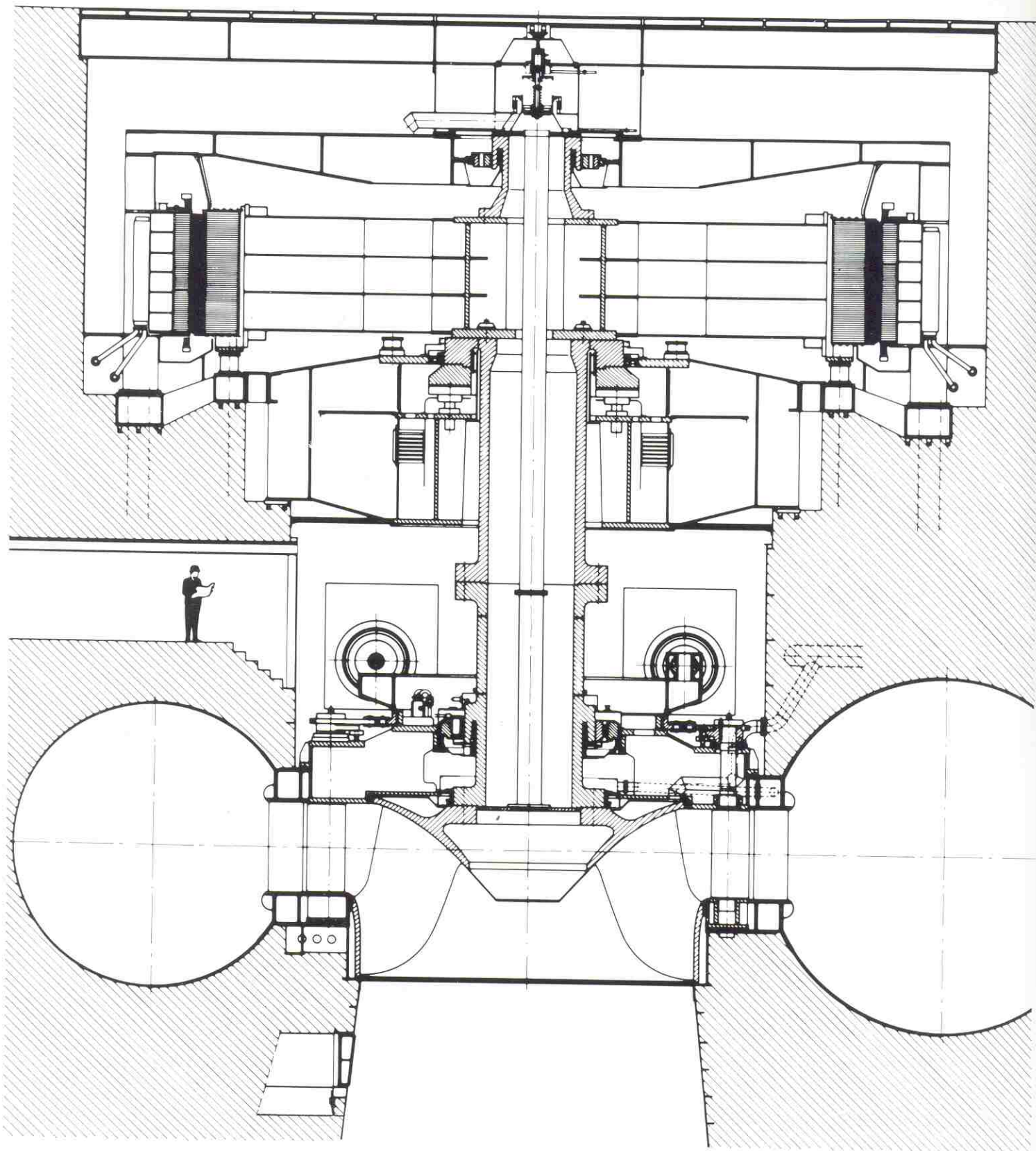
	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	811	1161	1243
H (m)	82,9	118,4	126,7
Q (m ³ /s)	545	677	621
P (MW)	400	740	740
No des machines		1 - 9	10 - 18
n (t/s; t/min)		1,515; 90,9	1,538; 92,3
f (Hz)		50	60
D _{ie} (m)	8,100	N _{QE} (-)	0,198
D _{li} (m)	7,115	n _q	66
D _o (m)	9,680	v (-)	0,418
B _o (m)	2,203		0,424
z _r (-)	13		
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,137
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,764

Caractéristiques

Le 26 avril 1973, les présidents du Brésil et du Paraguay signent le traité qui donne naissance à la compagnie Itaipu Binacional, chargée de la construction de la centrale d'Itaipu. La construction du barrage commence en octobre 1975.

Généralités

Itaipu, qui veut dire «le rocher chantant» en indien Guarani, est le nom d'une petite île sur le rio Paraná. Ce fleuve, qui a un bassin versant d'environ 3 millions de kilomètres carrés, fait partie des 7 plus grands cours d'eau de la planète. Le barrage, légèrement en amont du point où l'Argentine, le Brésil et le Paraguay se touchent, n'affecte pas les chutes mondialement connues d'Iguaçu. Le lac ainsi créé a 180 km de long, 8 à 10 km de large et 160 m de profondeur.



L'évacuateur de crues, conçu pour un débit de $62\,000\text{ m}^3/\text{s}$, comporte 14 passes de 20 m de largeur munies de vannes secteur d'un rayon de 20 m.

La centrale est divisée en 2 sections. Celle de la rive droite comporte 14 groupes alors que celle de la rive gauche, située dans le canal de dérivation utilisé pendant les travaux, contient 4 groupes. Chaque turbine a sa propre conduite forcée d'un diamètre de 10,5 m. Il n'y a pas de vannes de turbines.

Le premier groupe a été mis en service en 1984, le dernier en 1991. La production annuelle moyenne prévue est de 60 TWh.

La bache spirale est du type Piguet. L'entrée de la bache est conique avec un diamètre d'entrée de 9,64 m. La bache comporte 22 viroles.

Conception hydraulique

Les avant-directrices sont planes avec le bord d'attaque profilé et le bord de fuite chanfreiné, du même type que celles de La Grande 4. Le problème des vibrations dues aux tourbillons de Karman a été soigneusement étudié de manière à éviter des fissurations.

Le cahier des charges imposait une tendance à fermer sur pratiquement toute la course, ce qui a nécessité une optimisation poussée du profil et conduit à des aubes directrices relativement épaisses.

Le tracé hydraulique de la roue a été délicat à réaliser pour les raisons suivantes:

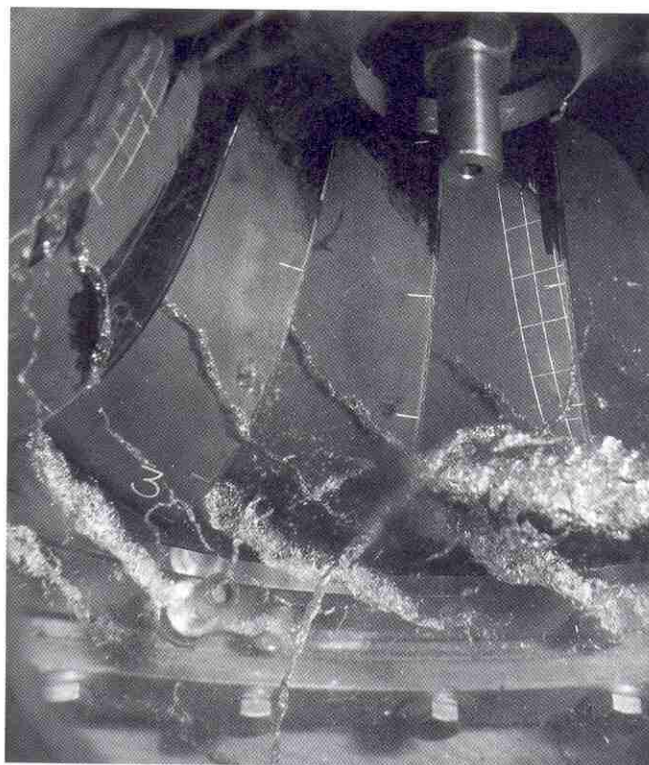
- la gamme de chute (126,7 à 82,9 m) est importante; de la cavitation d'entrée était donc à craindre pour la chute la plus élevée;
- les 3 premiers groupes devaient pouvoir fonctionner à des puissances comprises entre 10% et 30% durant plusieurs années;
- l'érosion par cavitation devait être limitée à un minimum étant donné le nombre et la taille des machines.

Le diffuseur a une profondeur relativement importante avec un rapport profondeur-diamètre de roue de $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,00$. Il comporte un pilier dans la section de sortie.

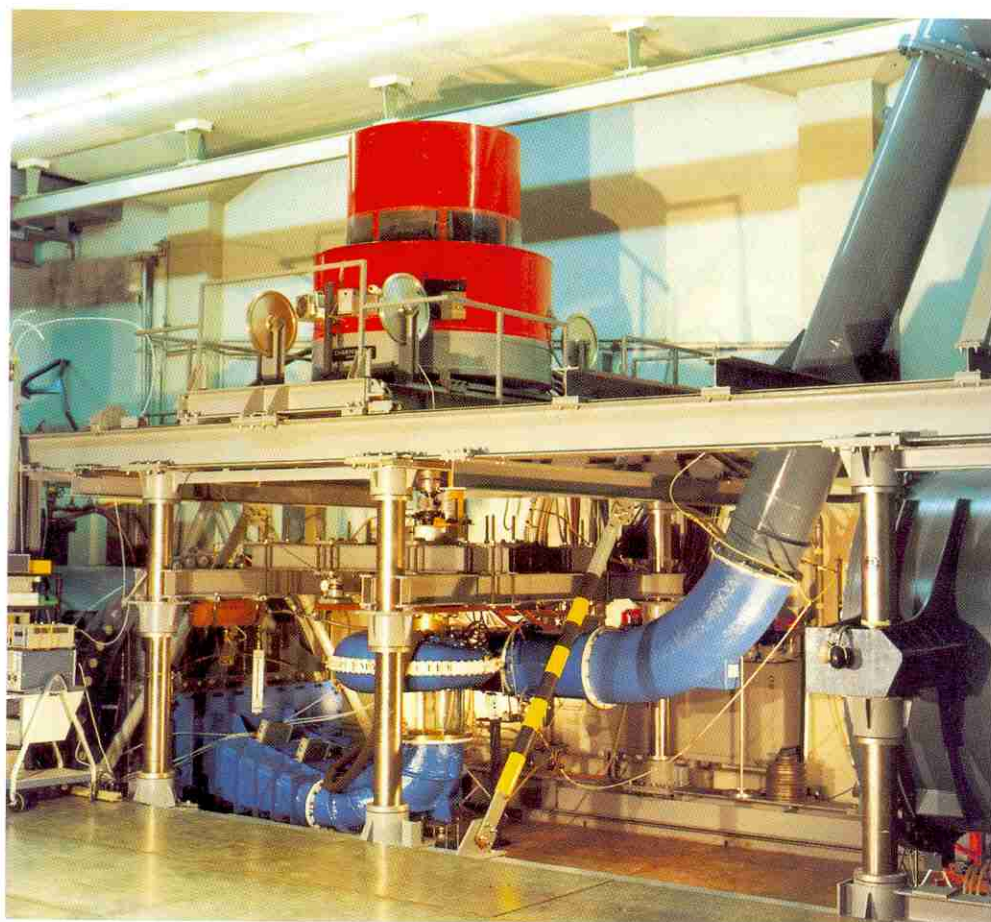
Les essais de réception officiels sur modèle réduit ont été exécutés par l'IMHEF avec un modèle de construction Neyrpic d'un diamètre de sortie roue de 416 mm et sous une chute d'essai de 15 m. Le contrat imposant l'inclusion des pertes du coude d'entrée dans le rendement de la turbine, le modèle reproduisait la conduite forcée avec ce coude (fig. 1 et 2). En plus des essais classiques de rendement, cavitation et emballement, des essais détaillés ont été exécutés pour examiner:

- les fluctuations de pression dans le diffuseur et à l'entrée de la bache spirale (fig. 2);
- les fluctuations de couple;
- l'influence de l'aération sur les fluctuations de pression et de couple;

1. Tourbillons apparaissant entre les aubes à très faible puissance (photo IMHEF).



2. Modèle d'essai comprenant la conduite forcée et le coude de turbine en cours d'essais de réception à l'IMHEF (photo IMHEF).



- la poussée axiale de la roue en fonction du débit de fuite;
- le couple sur les directrices synchronisées et désynchronisées.

Toutes les bâches spirales, les avant-distributeurs et les roues ont été fabriqués au Brésil. Les autres parties ont été fabriquées en RFA (VOITH) et en France (Neyrpic). Il a donc fallu mettre sur pied un programme précis de coordination et de contrôle de qualité en vue de garantir l'interchangeabilité des pièces.

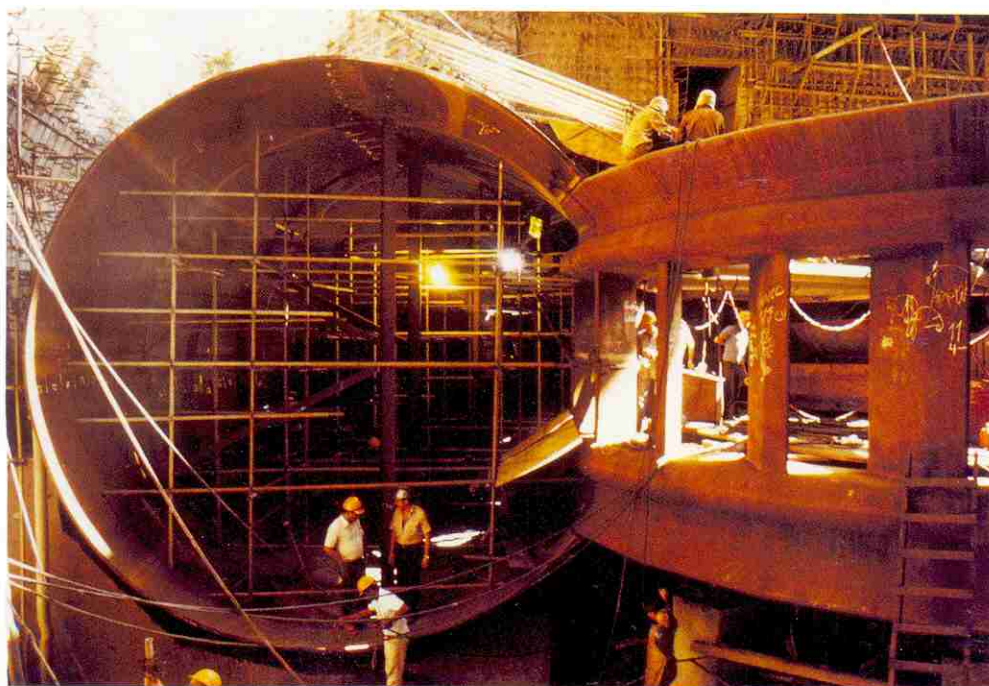
Conception mécanique

La bâche spirale, d'un diamètre total de 27,75 m et d'une masse de 590 t, est exécutée en acier TT St E 36. Les viroles ont été fabriquées en ateliers, puis transportées sur le site de la centrale pour y être assemblées entre elles et avec l'anneau d'entretoises par quelque 60 soudeurs qui mettent 4,5 mois pour réaliser une bâche (fig. 3). Elle a été ensuite testée à 25,2 bar.

L'avant-distributeur, d'une masse d'environ 390 t (fig. 3), est exécuté en acier TT St E 36-Z3. Il est composé de 2 caissons en tôle, d'épaisseur allant jusqu'à 100 mm, reliés par les avant-directrices.

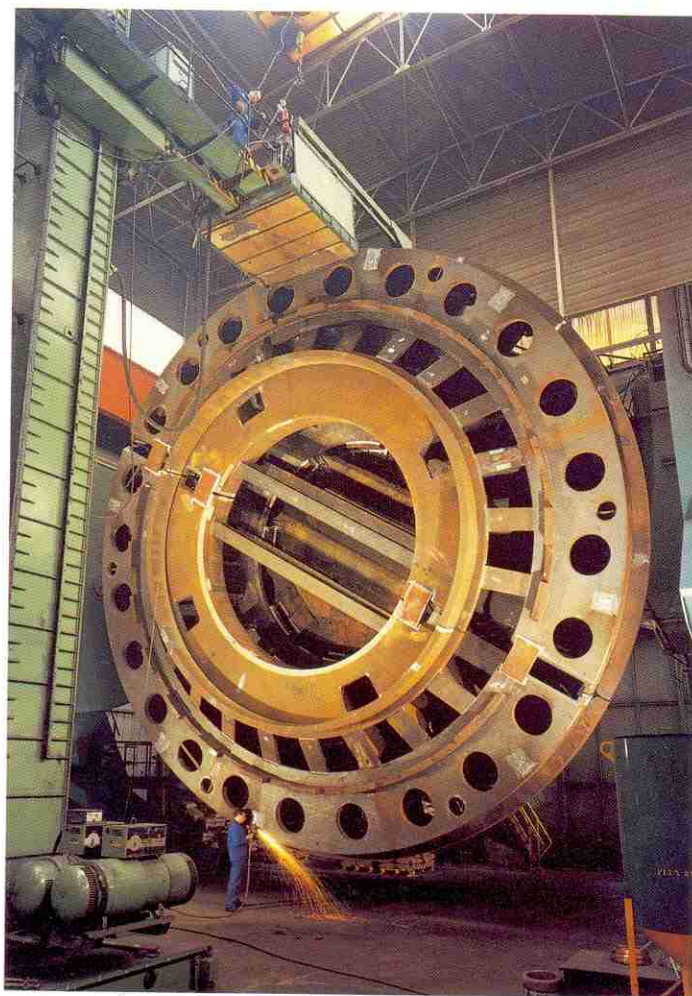
L'avant-distributeur est divisé en 4 parties soudées sur le site.

Les aubes directrices ont une masse de 7,67 t chacune. Elles sont coulées en acier GS 20 Mn 5. Leurs faces supérieures et inférieures sont recouvertes d'une surface de protection en acier inoxydable. Sur chaque aube, les parties en contact avec les voisines lors de la fermeture sont renforcées avec un acier au chrome. Trois paliers autolubrifiants permettent leur rotation. La fuite totale en position fermée est limitée à 3,5 m³/s, soit 0,5% du débit maximum. Le distributeur est actionné à l'aide d'un anneau de vannage par deux servomoteurs fonctionnant entre 40 et 60 bar de pression d'huile.



3. Avant-distributeur et bâche spirale en cours de montage en centrale (photo Neyrpic).

4. Couvercle de la turbine en cours de fabrication en ateliers (photo Neyrpic).



5. Roue en voie d'achèvement dans les ateliers du constructeur (photo Mecânica Pesada).



Les aubes ont une tendance à la fermeture sur toute la plage de fonctionnement. Afin de les protéger contre une rupture en cascade en cas d'introduction d'un corps étranger dans la turbine, les biellettes comportent une section de rupture et des axes équipés d'un frein et de butées qui limitent leur mouvement.

Le couvercle de la turbine, d'une masse de 242 t, est réalisé en tôle d'acier St 37.3 soudée (fig. 4). Le couvercle est divisé en 2 moitiés boulonnées sur le site. L'anneau d'usure supérieur du labyrinthe, en acier au chrome forgé, est boulonné au couvercle. Une protection en acier au chrome est appliquée par soudure dans la région des aubes directrices.

La roue, d'une masse de 300 t (fig. 5), est constituée du moyeu, de la couronne et des aubes. Certaines roues ont été soudées par «electroslag» (fig. 6), alors que d'autres ont été soudées par les méthodes classiques. L'acier coulé utilisé est de l'ASTM A 643 grade A.

Les aubes ont une épaisseur maximale de 171 mm; alors que la longueur de leurs attaches est de 3,5 m sur le moyeu et de 4,3 m à la couronne.



6. Roue en cours de soudure par «electroslag» (photo Voith).

7. Montage d'une roue en centrale (photo Voith).



8. Véhicule spécial à 32 essieux et 256 roues pour le transport des roues des turbines sur le site de la centrale (photo Voith).



Les parties de la roue exposées à la cavitation sont rechargées à l'acier inoxydable. L'épaisseur de la couche est de 5 mm. Après meulage, les roues ont subi un usinage final sur un tour vertical, où le moyeu et la couronne ont été amenés à leur cote exacte.

Grâce à un accès favorable, les roues (fig. 7) peuvent être transportées sur le site de la centrale à l'aide d'un véhicule spécial (fig. 8).

L'arbre, d'une masse de 130 t, est fabriqué en acier forgé. La ligne d'arbre comprend 3 paliers: le palier inférieur turbine; un palier combiné avec la butée, sous le rotor de l'alternateur; un palier supérieur.

Le palier de turbine est composé de 12 segments en acier coulé recouvert de métal antifriction. Le joint principal comprend 2 anneaux de carbone, appuyés sur un anneau tournant en acier au chrome.

Un joint auxiliaire en caoutchouc appliqué contre la surface par de l'air comprimé est utilisé lors des opérations d'entretien du joint principal.

Le fonctionnement des machines s'est révélé très satisfaisant; les groupes sont capables d'atteindre 800 MW en surpuissance.

- A.Teixeira, A. Sauron, J.-C. Diana, M. Wegner. Itaipu. Exemple de résolution de problèmes posés par la conception et la réalisation des turbomachines de grandes dimensions. Revue technique Neyrpic 1984, no 3.
- J.R. Cotrim, H.W. Krauch, J. Gelazio da Rocha, A. Gallico, G.S. Sarkaria. The binational Itaipu hydropower project. Water Power and Dam Construction, October 1977, November 1977.
- J. de Moraes, J. Rodriguez, J.H. Gummer and F. Del Brenna. Turbines for Itaipu. Water Power and Dam Construction. December 1981, January 1982.
- Tiré à part Voith t 2658 e. Itaipu Hydroelectric Power Station.
- E. Hardt. Fertigung eines Spiralgehäuses und eines Turbinenlaufrades für eine Francis-Turbine. Voith Forschung und Konstruktion, Heft 32, Dezember 1986.
- Ch. Liess. Ursache und Vermeidung von Wirbelangeregten Traversen-Schwingungen. Voith Forschung und Konstruktion, Heft 32, Dezember 1986.

Bibliographie

Centrale de La Grande 3

Province de Québec, Canada

12 turbines Francis de 195 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

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

Maître d'œuvre: Société d'Energie de la Baie James (SEBJ), Montréal, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	706	778	781
H (m)	72,0	79,3	79,6
Q (m ³ /s)	265	272	280
P (MW)	169	195	196
D _{ie} (m)	5,714	f (Hz)	60
D _{li} (m)	5,347	n (t/s; t/min)	1,88; 112,5
D _o (m)	6,680	N _{QE} (-)	0,21
B _o (m)	1,397	n _q	70
z _r (-)	13	v (-)	0,44
z _o (-)	20	σ _{min} (-)	0,136
z _{avd} (-)	20	σ _{max} (-)	0,151

Caractéristiques

L'aménagement de LG 3 est situé à 238 km de l'embouchure de la Grande Rivière. Le barrage, du type digue en terre, d'une hauteur de 93 m, est divisé en 2 sections séparées par l'évacuateur de crues saut de ski (fig. 1). Conçu pour débiter environ 10 000 m³/s, cet évacuateur comprend 5 passes équipées de vannes wagon actionnées par des treuils à câbles.

Généralités

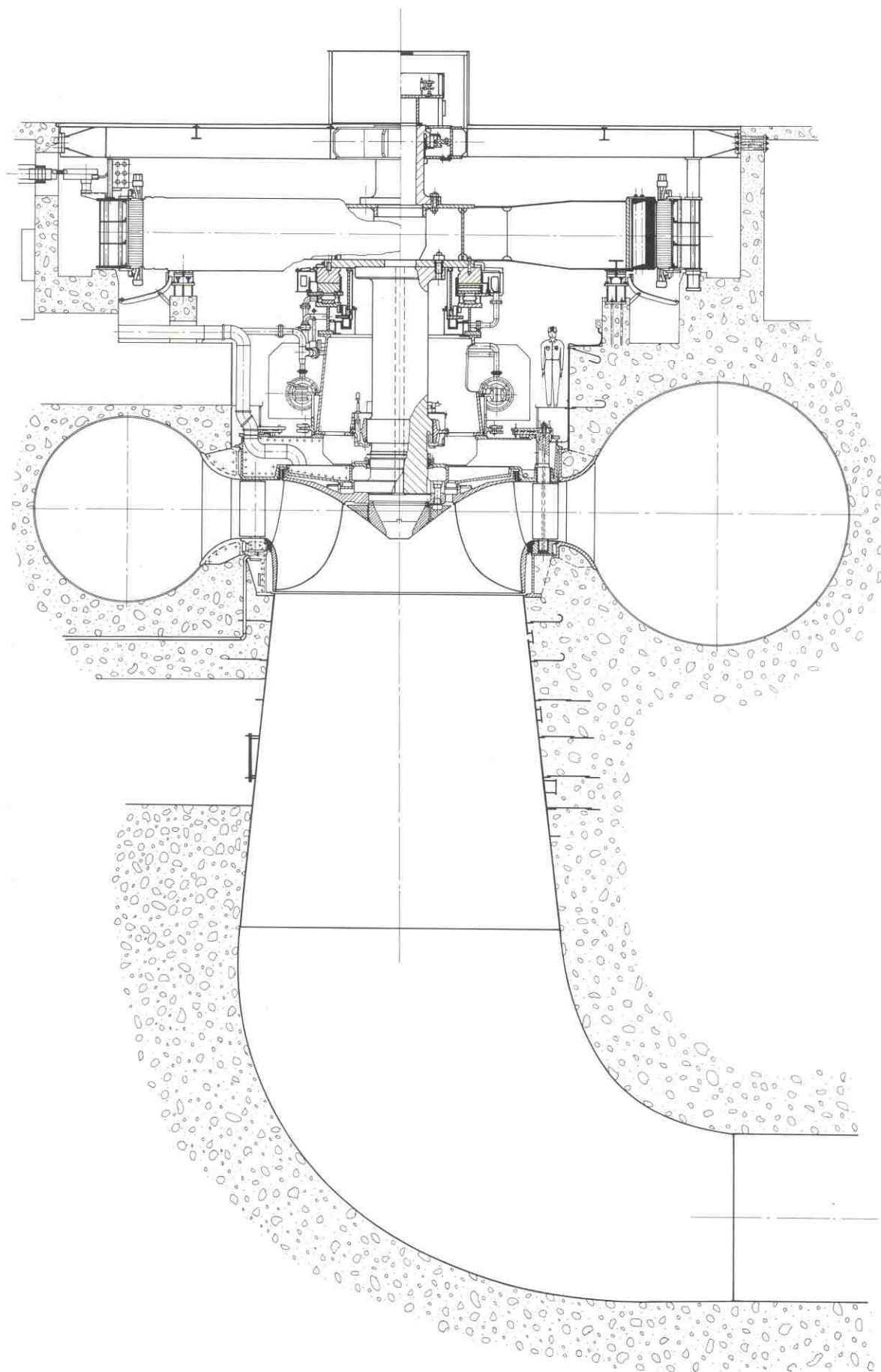
La centrale est aménagée en surface dans une tranchée creusée dans le rocher. La figure 2 montre la coupe à travers un groupe. La puissance totale de la centrale est de 2340 MW et sa production moyenne annuelle est de 12,3 TWh.

Les groupes ont été mis en service entre juin 1982 et janvier 1983.

La conception hydraulique est classique pour une machine de cette vitesse spécifique ($v_s = 0,42$). La bêche est à double courbure et les 20 avant-directrices sont profilées.

Conception hydraulique

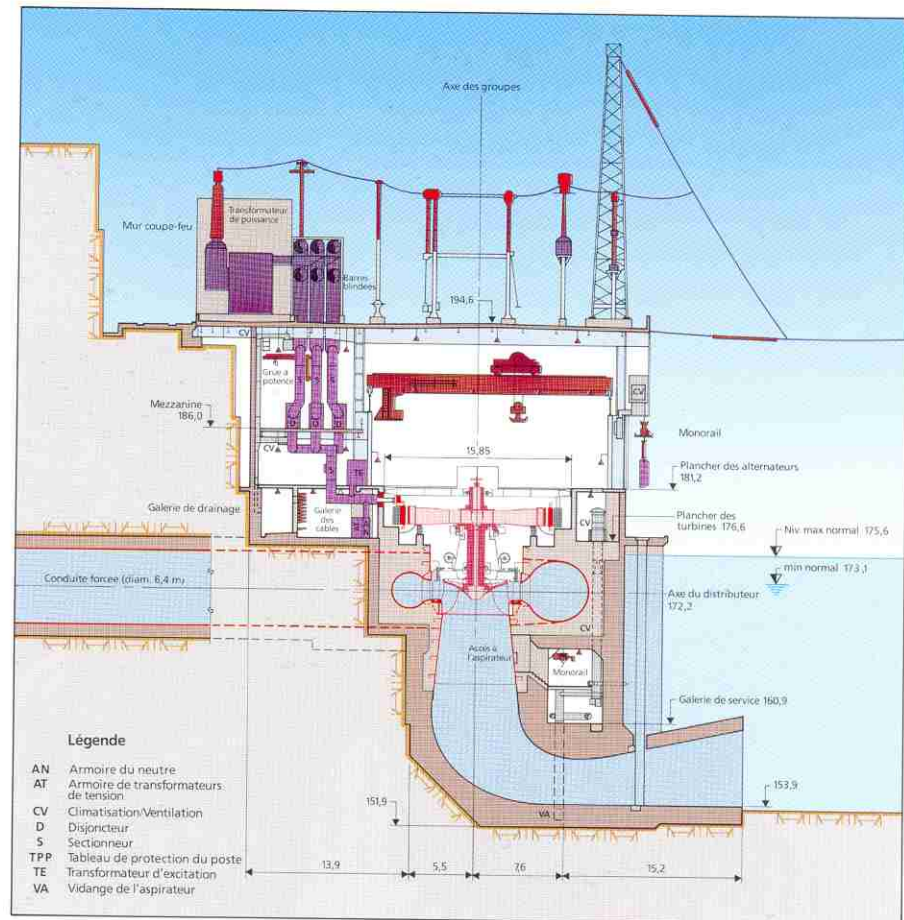
Les 20 directrices ont un profil symétrique, comme le montre la figure 3.



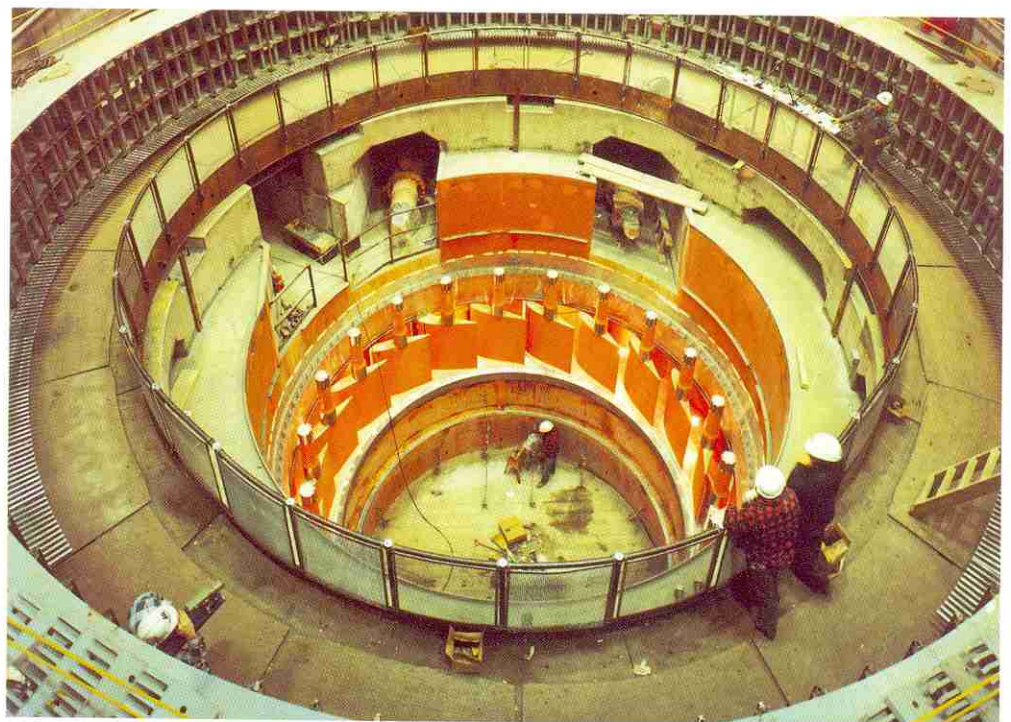


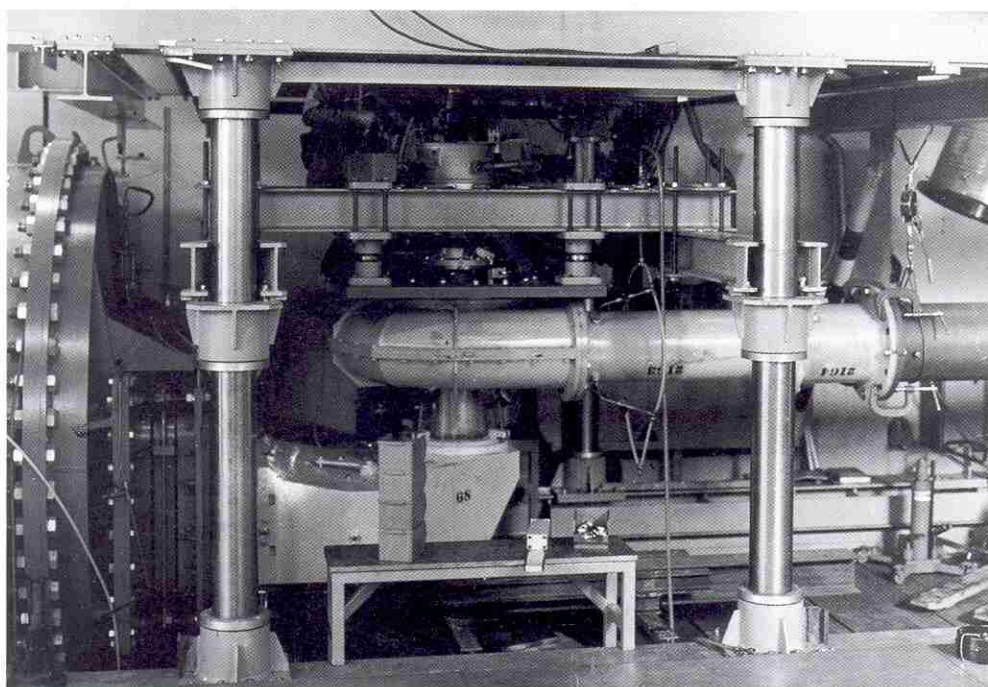
1. Evacuateur de crues de type saut de ski en fonctionnement (débit maximal 10 000 m³/s) (photo SEBJ).

2. Coupe de la centrale à travers un groupe turbo-alternateur (dessin SEBJ).



3. Distributeur en montage. On remarque le profil symétrique des directrices ainsi que les 2 servomoteurs du distributeur (photo GE Canada AID).





4. Modèle d'essai monté sur la plate-forme de l'IMHEF lors de l'essai officiel de réception sur modèle réduit (photo IMHEF).



5. Torche de charge partielle apparaissant dans le cône du diffuseur pour un point de fonctionnement à 60% de la puissance maximale (photo IMHEF).

La turbine ne possède pas de vanne fourreau contrairement aux autres turbines Francis du complexe de la Baie James. La chute étant relativement basse, il est possible de fermer la turbine avec le distributeur seulement, sans craindre de dégâts de cavitation.

La roue est de conception classique avec 13 aubes.

6. Avant-distributeur à double courbure en cours d'assemblage à la centrale (photo SEBJ).



Le diffuseur est très profond avec un rapport $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}}$ de 3,2, ce qui favorise à la fois le rendement et la stabilité de la machine.

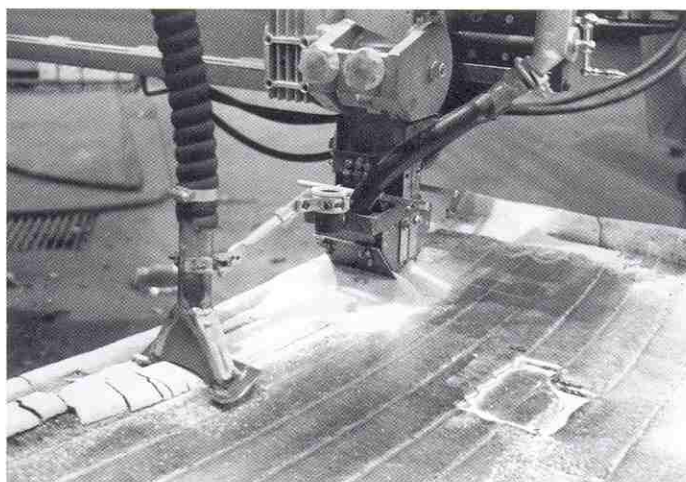
Les essais de réception officiels sur modèle réduit ont été effectués par l'IMHEF avec un modèle complètement homologue d'un diamètre de sortie roue de 298 mm et sous une chute de 37 m environ. En plus des essais classiques de rendement, de cavitation et d'emballement, des mesures détaillées de fluctuations de pression et de profil de vitesse à la sortie de la roue ont été effectuées. La figure 4 représente le modèle d'essai alors que la figure 5 montre une torche typique de charge partielle ($\frac{P}{P_{\max}} = 0,60$).

Conception mécanique

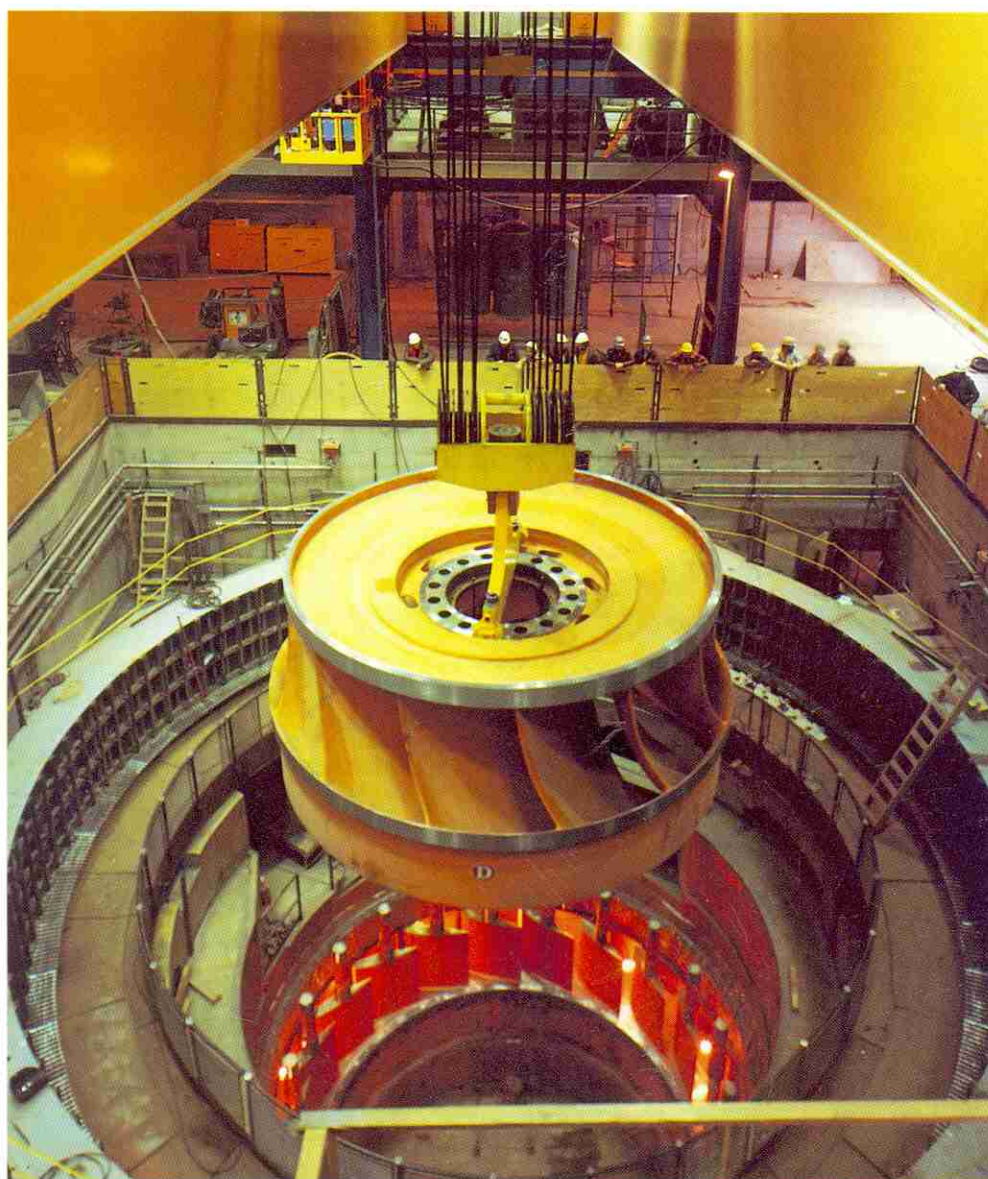
La bête spirale est composée de 17 viroles en tôle d'acier ASTM A-516 grade 70. Elle a été essayée sous une pression de 1500 kPa et bétonnée sous une pression de 414 kPa.

L'avant-distributeur est en acier coulé ASTM A-27 grade 70-40. Il est exécuté en 4 pièces assemblées par boulonnage (fig. 6).

Les aubes du distributeur sont également en acier coulé ASTM A-27 grade 70-40. Les lignes de contacts sont recouvertes d'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni et les bords de fuite sont rechargés en bronze d'aluminium. Les flasques supérieur et inférieur du distributeur sont constitués de segments d'acier coulé ASTM A-27 grade 70-40 protégé par de l'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni au droit des directrices. Cet acier inoxydable a été déposé par soudage à arc submergé comme le montre la photo de la figure 7.



7. Dépose d'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni par soudage à arc submergé sur le flasque inférieur du distributeur (photo GE Canada AID).



8. Roue (masse 83 t) en cours de montage dans la centrale (photo GE Canada AID).

9. Turbines en cours de montage dans la centrale. Au 1er plan une roue, au 2^e plan un cône d'aspirateur, au 3^e plan une bache en cours d'assemblage autour de l'avant-distributeur (photo GE Canada AID).



La roue, d'une masse de 83 t, a été assemblée par mécano-soudure. Elle comprend 13 aubes en acier coulé ASTM A-27 grade 65-35 qui ont été meulées à la main et rechargées d'acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni dans les zones exposées à la cavitation (fig. 8 et 9).

Les anneaux d'usure des labyrinthes de la roue sont en acier inoxydable 18 Cr - 8 Ni alors que les anneaux d'usure fixes sont en fonte dure.

L'arbre est en acier forgé ASTM A-668 grade D et sa masse est de 63 t.

Le palier turbine est en 3 sections recouvertes de métal antifriction. La lubrification est classique par une cuve pénétrant sous la jupe tournante de l'arbre. Le diamètre est de 1524 mm pour une hauteur de 560 mm.

Bibliographie

- Société d'énergie de la Baie James. Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière. Société d'énergie de la Baie James et Editions Chenelière inc. 1987, Montréal.
- P. Henry. Les centrales du complexe de la Baie James. Bulletin technique de la Suisse romande No 14/1980.

Centrale de Piedra del Aguila

Province de Neuquen, Argentine

4 turbines Francis de 356 MW

Conception hydraulique: Fabrique de turbines Jarkov, Jarkov, Ukraine

Conception mécanique et fabrication: IMPSA, Mendoza, Argentine et fabrique de turbines Jarkov

Maître d'œuvre: Hidroelectrica Norpatagonia SA (HIDRONOR)

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	939	1059	1120
H (m)	95,8	108,0	114,2
Q (m ³ /s)	220	353	353
P (MW)	236	356	375
D _{1e} (m)	5,993	f (Hz)	50
D _{1i} (m)	5,196	n (t/s; t/min)	2,08; 125
D _o (m)	7,200	N _{QE} (-)	0,21
B _o (m)	1,900	n _q	70
z _r (-)	16	v (-)	0,44
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,197
z _{avd} (-)	12	σ _{max} (-)	0,219

Caractéristiques

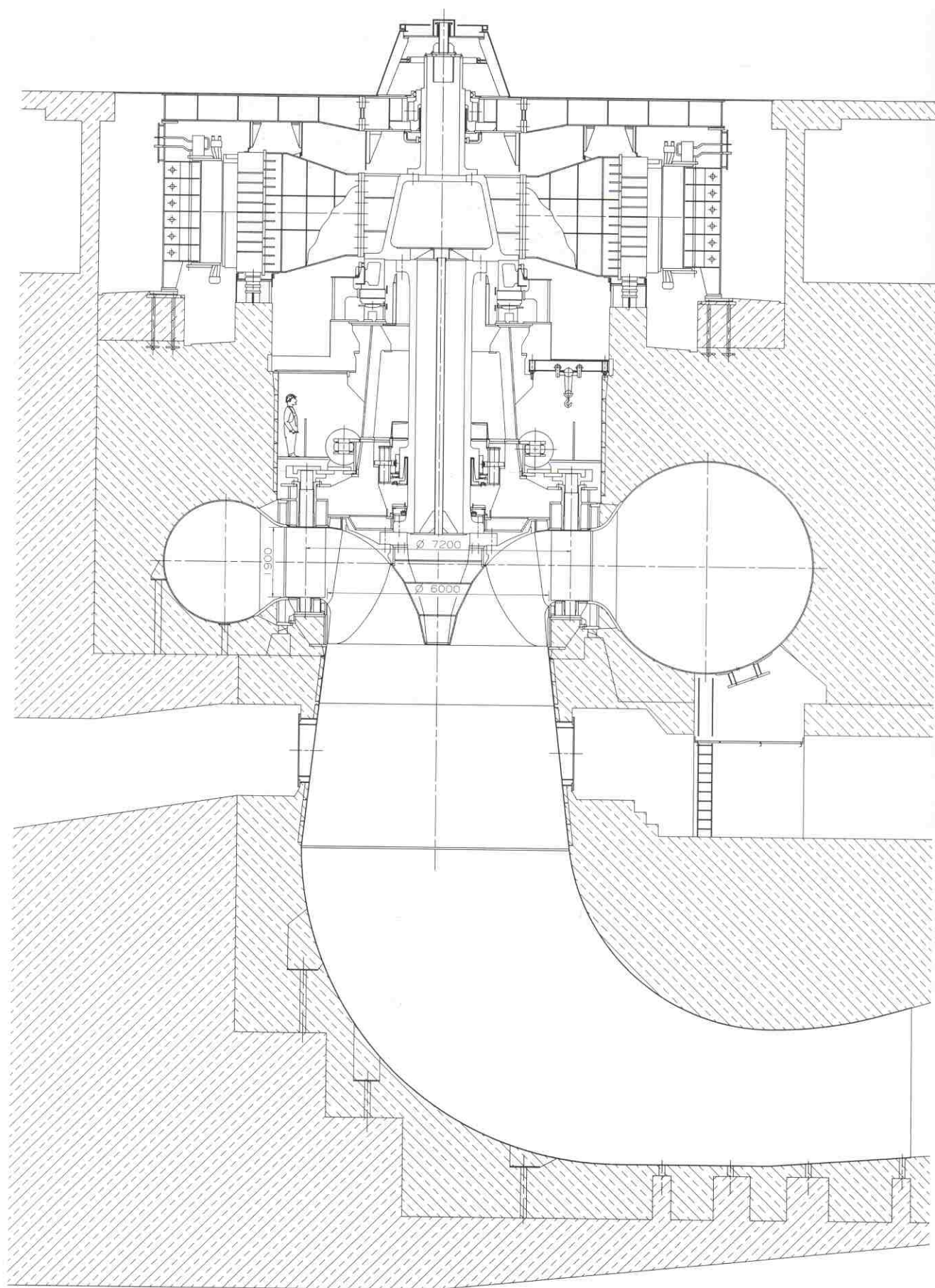
Implantée sur la rivière Limay, la centrale de Piedra del Aguila est située au pied des Andes à environ 110 km de la frontière chilienne et à 240 km de San Carlos de Bariloche.

Généralités

Le barrage, du type poids, a une longueur de 820 m et une hauteur sur fondations de 173 m.

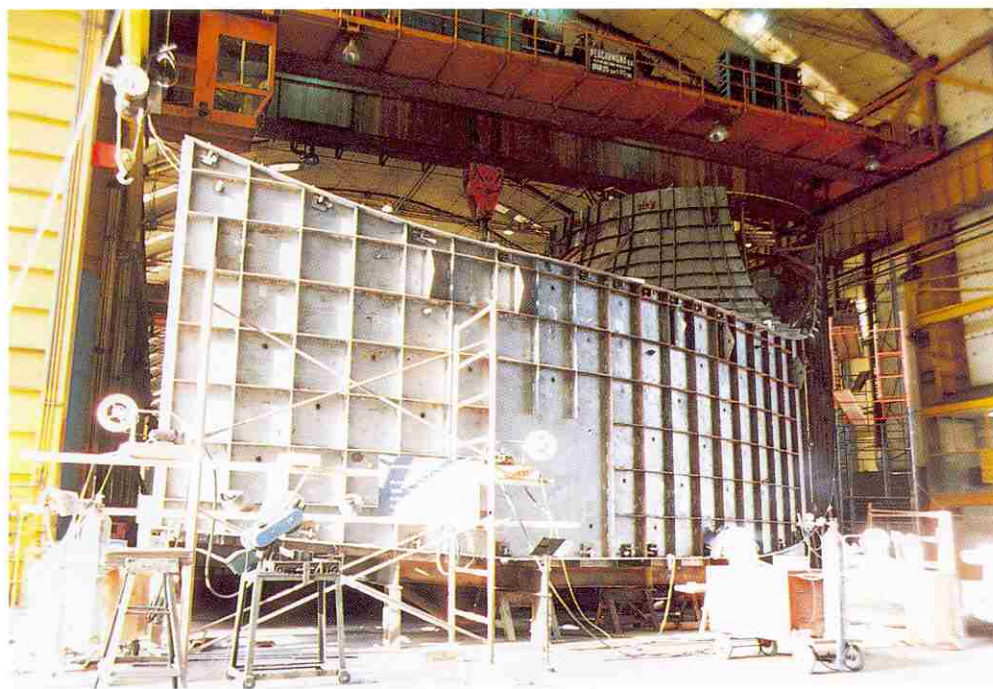
L'évacuateur de crues, dimensionné pour un débit de 10 000 m³/s, est muni de 4 vannes secteur de 21 m de hauteur et 17,5 m de largeur.

La centrale, située au pied du barrage, en son centre, est dimensionnée pour recevoir 6 groupes dans sa phase finale. Les 4 groupes de la première phase fourniront environ 5,5 TWh par année. La mise en service des groupes est prévue entre 1991 et 1993.





1. Avant-distributeur à double courbure assemblé en usine (photo IMPSA).



2. Diffuseur en cours de préassemblage dans les ateliers d'IMPSA (photo IMPSA).

La vitesse spécifique des turbines de Piedra del Aguila ($v = 0,44$) est très élevée en regard de leur chute nominale ($H = 108$ m).

La bache spirale, du type à double courbure, a un diamètre d'entrée de 7,5 m.

Les avant-directrices ont un profil courbé et relativement long, comme le montre la figure 1.

**Conception
hydraulique**

3. Bâche spirale en cours de préassemblage en atelier (photo IMPSA).



La roue a un profil hydraulique caractérisé par un plafond plongeant et une ceinture très courte $\left(\frac{L_{ie}}{R_{ie}} \approx 0,36 \right)$.

Le nombre d'aubes de la roue (16) est un sous-multiple du nombre d'aubes du distributeur (24). Cette particularité, qui pourrait faire craindre des vibrations de la roue, a été étudiée en détail par la fabrique de turbines Jarkov et par l'Institut polytechnique de la même ville.

Le diffuseur a une section de sortie de 18 m de largeur et de 7,5 m de hauteur. Il est divisé en 2 parties par un pilier central de 2,5 m d'épaisseur. La profondeur relative du diffuseur, $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}}$, est de 2,72 (fig. 2).

Les essais sur modèle réduit ont été exécutés dans les laboratoires de la fabrique de turbines Jarkov avec un modèle d'essai de 500 mm de diamètre de sortie roue et sous une chute de 16 à 20 m.

Le rendement maximal, garanti sur prototype, est de 95,4%.

Conception mécanique

La bâche spirale est conçue pour supporter une pression de 150 mCE (chute statique plus surpression). La pression d'essai est de 225 mCE. Le bétonnage est effectué à la pression statique correspondant à la chute maximale, soit 122 mCE. La bâche a été préassemblée en atelier avant son envoi sur le site (fig. 3).

L'avant-distributeur, entièrement en construction soudée, est divisé en 4 parties pour permettre le transport sur le site (fig. 1). Les 4 segments sont assemblés par



4. Aube du distributeur en cours de soudage (photo IMPSA).



5. Revêtement d'acier inoxydable d'un arbre d'aube directrice (photo IMHEF).

des boulons sur des brides. Pour prévenir des fissures dues aux tourbillons de Karman sur les avant-directrices, les aubes ont été conçues avec une fréquence propre triple de celle des tourbillons de Karman.

Les aubes du distributeur sont fabriquées en tôle soudée avec un arbre traversant (fig. 4 et 5). Les paliers des aubes du distributeur sont autolubrifiés. Les faces

6. Roue en acier inoxydable, avec aubes matricées et moyeu coulé, en cours de soudage (photo IMP-SA).



supérieures et inférieures du distributeur ainsi que la ligne de contact des aubes sont protégées par un revêtement d'acier inoxydable. Les aubes ont une tendance à fermer depuis 10% d'ouverture jusqu'à 90% de la pleine ouverture. Le système de sécurité de la commande des aubes comprend des goupilles de rupture ainsi qu'un système à friction pour éviter une rupture en cascade.

L'anneau de distributeur est commandé par 2 servomoteurs à huile dont la pression nominale est de 63 bar.

La roue est fabriquée à partir de 16 aubes en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni matricées, soudées à une couronne et un moyeu également en acier 13 Cr - 4 Ni.

Le moyeu est coulé alors que la couronne est roulée à partir d'une tôle également en 13 Cr - 4 Ni de 180 mm d'épaisseur. La figure 6 montre une roue en cours d'assemblage dans les ateliers d'IMP-SA. Le poids total de la roue avoisine 90 tonnes.

L'arbre est assemblé par soudure à partir de 2 brides forgées, d'une partie centrale comprenant la cloche du palier, également forgée et d'un tube en tôle roulée. Le poids total est de 72 tonnes pour un diamètre de 1700 mm.

Le couvercle de turbine et l'anneau inférieur, en construction soudée, sont divisés en 4 segments assemblés par brides et boulons précontraints, sur le site.

Centrale de Tucuruí

Etat du Pará, Brésil

12 turbines Francis de 360 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication partielle:
Neyrpic, Grenoble, France

Fabrication partielle: Mecânica Pesada, Sao Paulo, Brésil

Maître d'œuvre: Electronorte, Brasilia, Brésil

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	504	596	663
H (m)	51,4	60,8	67,6
Q (m ³ /s)	529	574	598
P (MW)	250	320	369
D _{1e} (m)	8,150	f (Hz)	60
D _{1i} (m)	5,480	n (t/s; t/min)	1,36; 81,8
D ₀ (m)	8,975	N _{QE} (-)	0,27
B ₀ (m)	2,475	n _q	90
z _r (-)	12	v (-)	0,57
z ₀ (-)	26	σ _{min} (-)	0,217
z _{avd} (-)	25	σ _{max} (-)	0,350

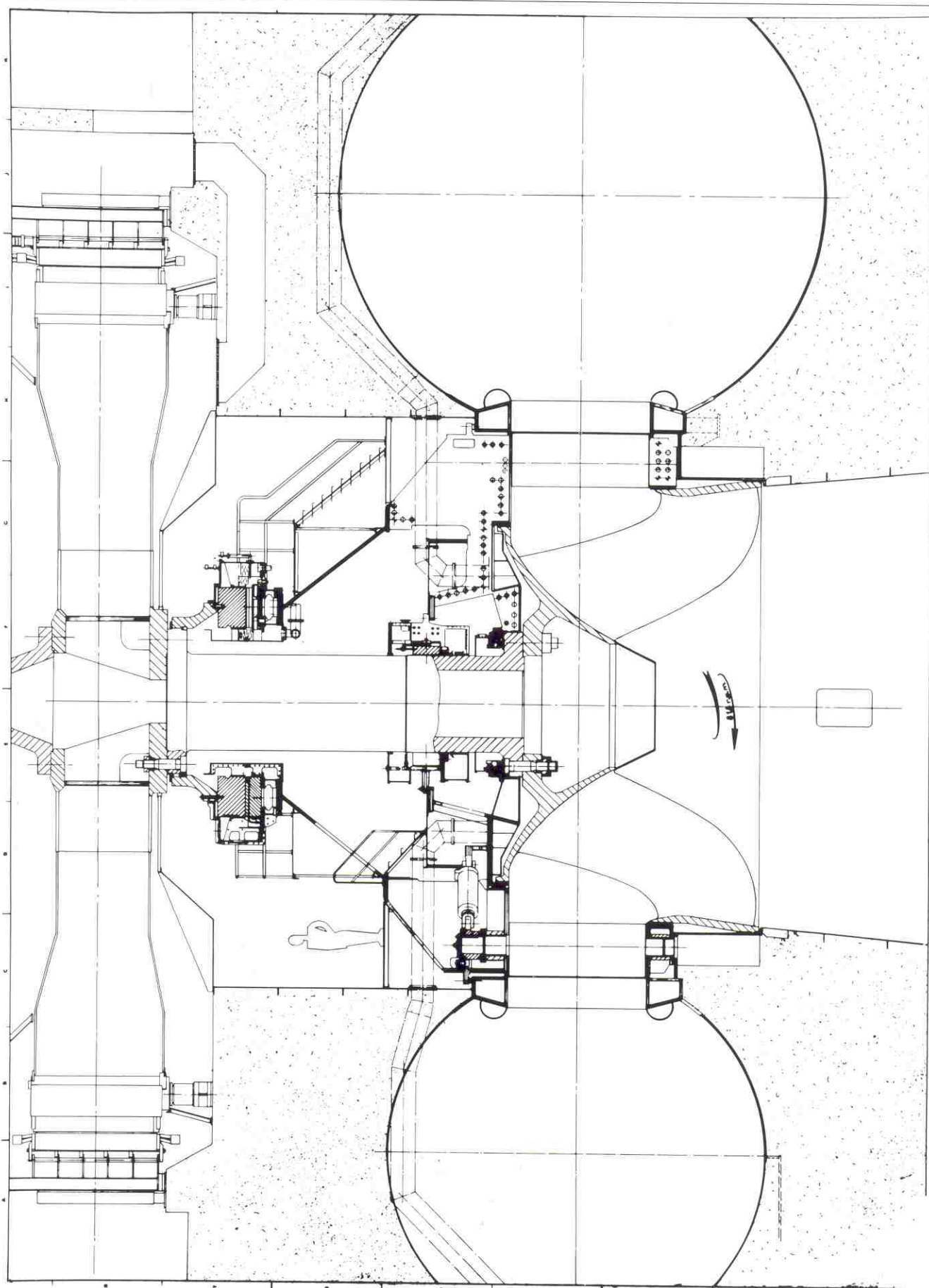
Caractéristiques

La centrale de Tucuruí est située sur la rivière Tocantins à environ 300 km de Bélem. L'aménagement est composé d'un barrage en terre en rive droite, d'un évacuateur de crues au centre et de la centrale en rive gauche (fig. 1). L'évacuateur de crues est conçu pour un débit de 110 000 m³/s et comporte 23 passes d'une largeur de 20 m équipées de vannes secteur.

Généralités



1. Vue aérienne de la centrale en rive gauche et de l'évacuateur de crues dimensionné pour un débit de 110 000 m³/s (photo Electronorte).



Chaque turbine est alimentée par une conduite forcée de 10,4 m de diamètre sans vanne de turbine.

Afin de réduire les dimensions de la machine, une vitesse spécifique très élevée $v = 0,57$ a été choisie, sans toutefois que cela n'affecte l'implantation, qui reste très favorable ($\sigma_{\min} = 0,217$).

Conception hydraulique

La bache spirale est très compacte: son encombrement n'est que de 26,4 m environ et son diamètre d'entrée de 9,85 m.

Les avant-directrices sont à faces parallèles avec des chanfreins aux arêtes d'entrée et de sortie. Un soin tout particulier a été apporté à leur dimensionnement afin d'éviter le phénomène d'autoexcitation produit par des décollements sur l'arête d'entrée et des tourbillons de Karman à l'arête de sortie.

L'épaississement des profils des directrices a permis de limiter l'appui à seulement deux paliers (fig. 2).



2. Plan de l'avant-distributeur et du distributeur (d'après un document Neyrpic).

Malgré un petit nombre d'aubes, 12, la roue présente d'excellentes caractéristiques aussi bien en rendement qu'en cavitation (fig. 3).

Le diffuseur a un profil hydraulique relativement compact, $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 2,5$.

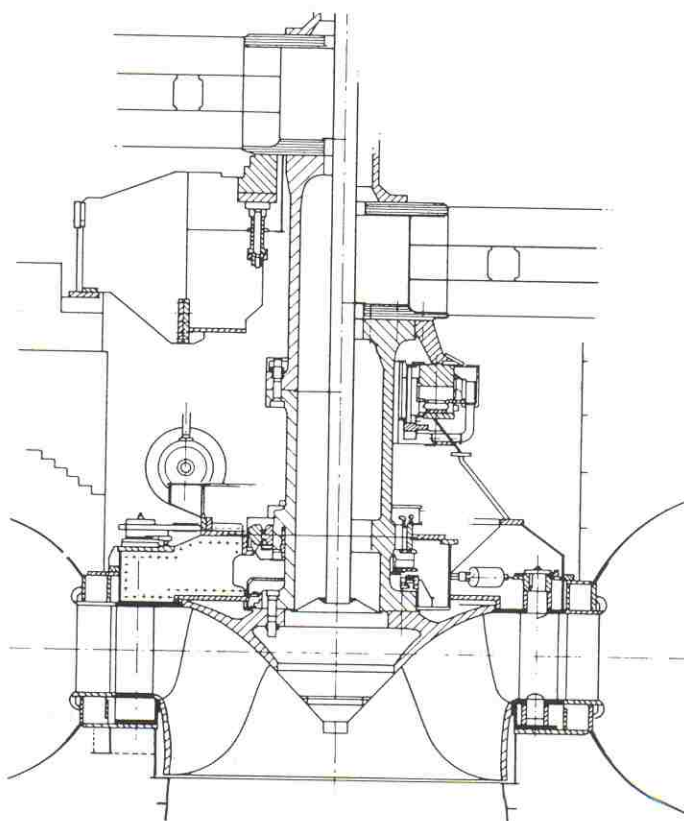
Les groupes sont du type à axe vertical avec deux paliers guides (un palier turbine et un palier alternateur). Le pivot reprenant les charges verticales exercées sur les parties tournantes s'appuie sur le flasque supérieur. Ce flasque supérieur, qui se présente comme une structure très largement ouverte, abrite les 26 servomoteurs et toute la commande des directrices. Cette conception générale conduit à un groupe extrêmement compact. La figure 4 illustre la faible longueur de la ligne d'arbre (et le gain qui en découle sur la centrale) comparée à une construction plus classique.

Conception mécanique

3. Vue de la roue terminée, diamètre extérieur 8,35 m, masse 230 t (photo Mecânica Pesada).



4. Coupe comparée d'un groupe Francis classique et de la solution compacte retenue pour Tucuruí (document Water Power and Dam Construction).





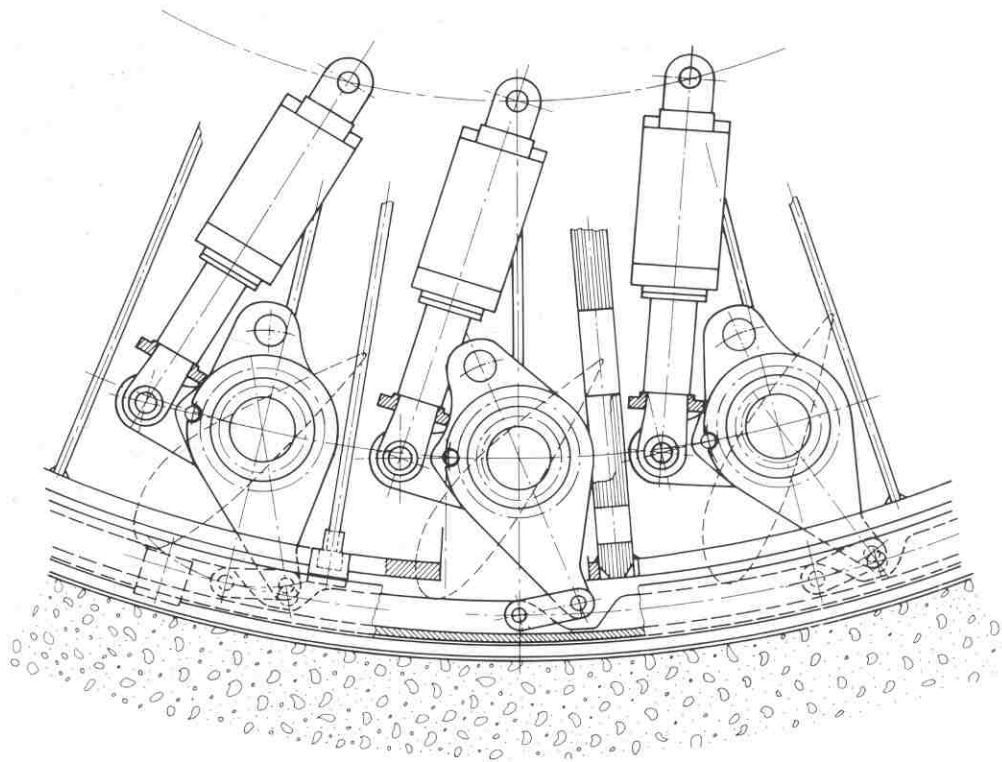
5. Bâche spirale d'un diamètre d'entrée de 9,85 m prête pour le bétonnage (photo Mecânica Pesada).



6. Avant-distributeur en cours d'assemblage sur le chantier (photo Mecânica Pesada).

La bâche spirale, d'une masse de 256 t, est réalisée en tôle d'acier E 36-4 dont l'épaisseur maximale est de 34 mm (fig. 5). L'avant-distributeur est constitué de deux caissons circulaires reliés entre eux par les avant-directrices formant entretoises. Les avant-directrices pénètrent dans les caissons afin de les rigidifier (fig. 6). L'avant-distributeur, d'une masse de 165 t, est divisé en 4 parties qui ont été soudées et usinées sur le chantier.

7. Vue en plan du mécanisme de commande et de synchronisation du distributeur (d'après un document Neyrpic).



8. Plafond de la roue en acier coulé avec amorces d'aubes (photo Neyrpic).





9. Fixation des aubes (photo Neyrpic).

Les aubes du distributeur sont creuses: elles sont supportées par 2 paliers autolubrifiés. Les aubes directrices sont commandées par des servomoteurs individuels, solution moderne mais peu répandue. Le mouvement des aubes est synchronisé par des bielles reliées par un anneau extérieur (fig. 7). Un doigt de cisaillement placé entre le système de synchronisation et le levier de l'aube directrice limite le couple appliqué sur la directrice. Celle-ci reste toutefois solidaire de son servomoteur en cas de rupture de ce doigt provoquée par un corps étranger dans le distributeur.

10. Soudure des aubes à l'aide de positionneurs en position de l'axe horizontal (photo Neyrpic).



Pour la réalisation de la roue, on a mis en oeuvre une technique originale, comportant la fabrication:

- du plafond avec des amorces d'aubes en acier coulé ASTM A 643 grade A (fig. 8);
- des 12 aubes en acier E 36-3 matricé;
- de la couronne en acier coulé ASTM A 643 grade A.

Les aubes ont été embouties à chaud puis recouvertes d'acier inoxydable aux endroits sensibles à la cavitation et enfin matricées pour leur donner la forme finale. Elles ont été mises en place (fig. 9) et soudées au plafond sur un positionneur à axe horizontal (fig. 10). Enfin, la couronne extérieure a été soudée aux aubes par un procédé de soudage également automatique. Cette procédure de construction en éléments séparés présente, entre autre avantage, une bonne qualité de la similitude hydraulique.

L'arbre, d'une masse de 80 t, a un diamètre de 1,8 m.

Le groupe a la particularité de ne comporter que 2 paliers, un palier turbine situé sur le couvercle et un palier au-dessus de l'alternateur.

La butée axiale, dimensionnée pour une charge de 2400 t, a un grain mobile de 4,2 m de diamètre. Les patins sont supportés par des membranes souples, remplies d'huile, reliées entre elles pour obtenir avec certitude une équirépartition automatique des charges.

Bibliographie

- J.A.A. Casagrande, A.C. Bettarello, A. Sauron, G. Caillot. Conception et construction des turbomachines de grandes dimensions. Les turbines de la centrale de Tucurui. Revue technique Neyrpic No 2, 1983.
- A. Sauron. Francis turbines for the Tucurui power plant. Water Power and Dam Construction, july 1987.
- J.A.A. Casagrande, J. Bosc, J.C. Diana. Tucurui, Synchronisation des directrices commandées par servo-moteurs individuels. Revue technique Neyrpic No 7, 1988.
- J.A.A. Casagrande, M. Couston, J.C. Diana. Operating experience of the Tucurui Francis Turbine. Article Water Power and Dam Construction, february 1991.

Centrale de Saucelle-Huebra

Province de Salamanque, Espagne

2 turbines Francis de 127 MW

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

Fabrication: Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey SA, Mecánica de la Peña, Bilbao, Espagne

Maître d'œuvre: Iberduero, Bilbao

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	426,6	578,6	611,9
H (m)	43,5	59,0	62,4
Q (m ³ /s)	212	243	250
P (MW)	81,85	127,25	138,5
D _{ie} (m)	5,226	f (Hz)	50
D _{li} (m)	3,606	n (t/s; t/min)	2,08; 125,0
D _o (m)	5,960	N _{QE} (-)	0,28
B _o (m)	1,594	n _q	92
z _r (-)	15	v (-)	0,58
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,33
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,45

Caractéristiques

La centrale de Saucelle-Huebra est située au confluent des rivières Douro et Huebra, à la frontière avec le Portugal. Elle est alimentée par un lac artificiel créé par le barrage-voûte de Saucelle, construit en 1956. Les vannes secteur de l'évacuateur de crues, placées sur la crête du barrage, ont été modifiées en 1985 pour surélever de 2 m le niveau du lac.

La centrale, souterraine, est reliée aux prises d'eau par une galerie de 1350 m de longueur comportant une cheminée d'équilibre à son extrémité. La production moyenne annuelle prévue est de 321 GWh. Le 2^e groupe a été mis en service en 1989.

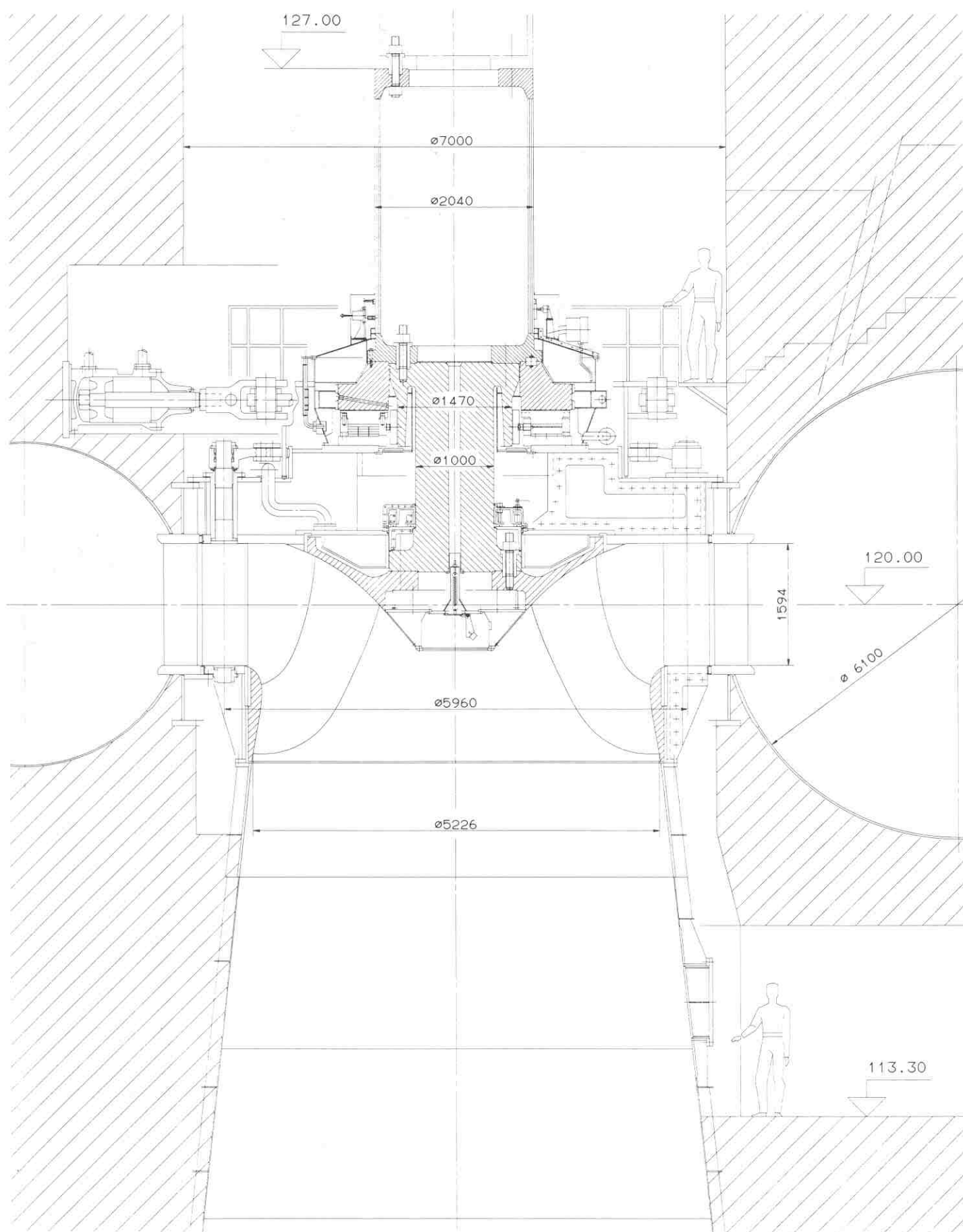
Il est prévu d'augmenter la production de la centrale dans un proche avenir par la construction d'un barrage sur la rivière Huebra.

La bêche spirale, d'un diamètre d'entrée de 6,10 m, est divisée en 23 viroles. Sa largeur hors tout est de 17,22 m (fig. 1).

L'avant-distributeur est du type Piguët, les avant-directrices ont un profil légèrement incurvé (R = 3,130 m).

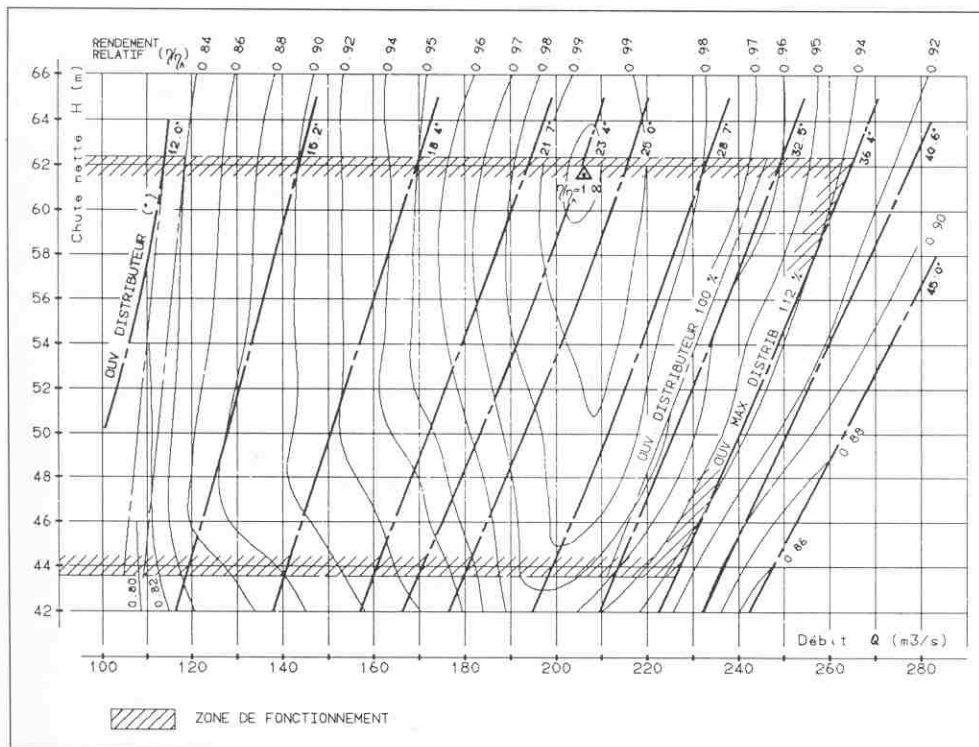
Généralités

Conception hydraulique





1. Bâche spirale en cours de préassemblage en ateliers (photo Mecánica de la Peña).



2. Colline de rendement mesurée sur modèle réduit et convertie au prototype (document Hydro Vevey).

Le profil des aubes directrices est incurvé à l'extrados et plan à l'intrados. L'épaisseur relative au pas est de 0,166 et la hauteur du distributeur 1594 mm.

Les aubes ont une tendance à fermer dans la plus grande partie de la zone de fonctionnement.

Le profil méridien de la roue est classique avec une hauteur de ceinture

$\frac{L_{1e}}{R_{1e}} = 0,44$ confortable pour une roue à 15 aubes.

Le diffuseur est très profond, $\frac{\Delta Z_d}{D_{1e}} = 3,6$; sa section de sortie, relativement étroite, est prolongée par une galerie de 110 m de longueur environ, de section identique à celle de la sortie du diffuseur.

Les essais contractuels sur modèle réduit ont été effectués dans le laboratoire de Hydro Vevey. Le modèle avait un diamètre $D_{1e} = 280$ mm pour une chute d'essai H comprise entre 9,4 et 12,7 m.

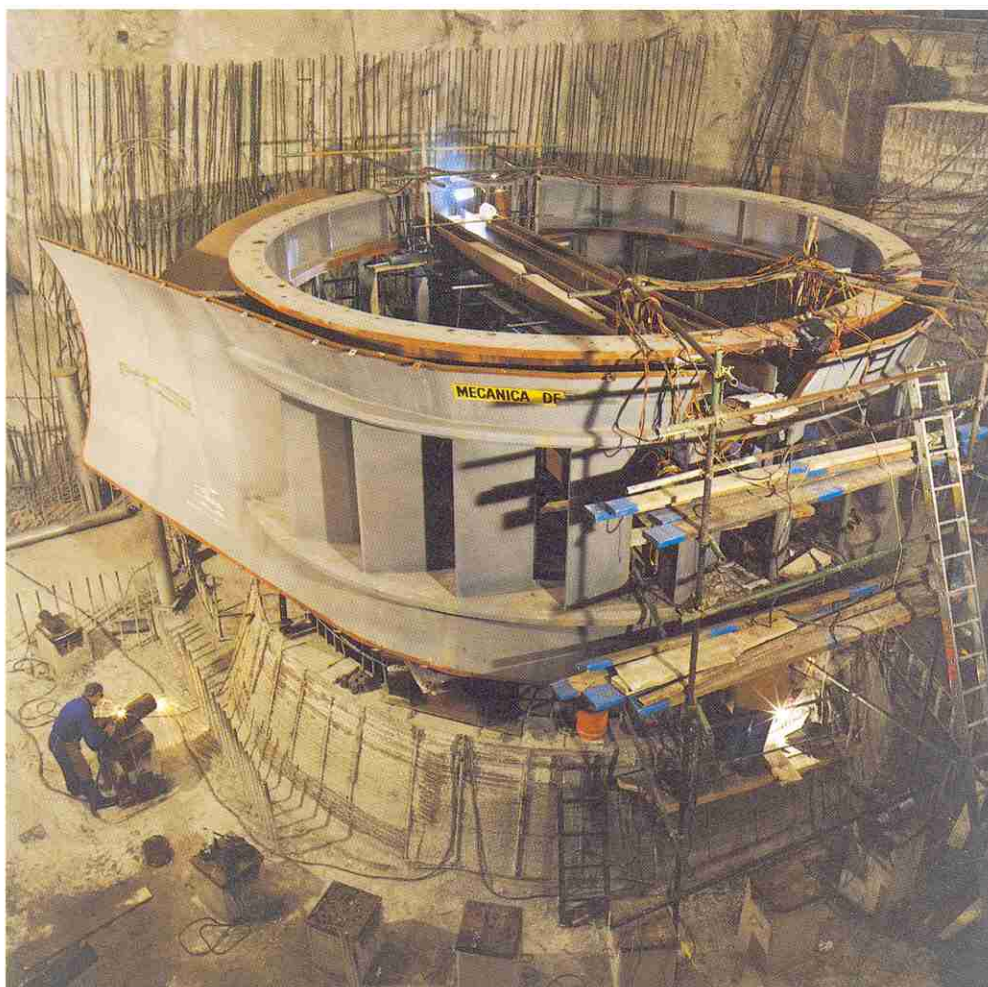
La figure 2 montre la colline de rendement.

Conception mécanique

La bête, d'une masse de 102 t, est entièrement préassemblée en ateliers et soudée sur le chantier sans traitement thermique. Le bétonnage a été exécuté avec une pression de 3,2 bar dans la bête (fig. 3).

3. Ferrailage de la bête spirale en vue du bétonnage (photo Iberduero).





4. Soudure sur le chantier des 2 parties de l'avant-distributeur (photo Iberduero).

L'avant-distributeur est assemblé par soudure à partir de 2 anneaux de 120 mm d'épaisseur et de 24 entretoises de 65 mm d'épaisseur, le tout en acier St 355. Il est divisé en 2 parties soudées sur le chantier (fig. 4).

Les directrices sont en acier inoxydable coulé G - X5 Cr Ni 13.4. Elles sont guidées par 3 paliers autolubrifiants.

L'anneau de vannage intérieur est actionné par 2 servomoteurs.

Les aubes directrices sont protégées par un système à friction sans organe de rupture.

La roue, d'une masse de 60 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4 (fig. 5 et 6).

Le couvercle de la turbine, en acier St E 255, est divisé en 2 parties assemblées par boulonnage sur le chantier. Sa masse totale est de 49 t.

Le fond inférieur, d'une masse de 14 t, est également exécuté en construction soudée avec le même acier. Il est divisé en 2 parties boulonnées sur le chantier.

5. Roue en cours de tournage final (masse 60 t)
(photo Hydro Vevey).



6. Perçage des trous du plateau d'accouplement de la roue (photo Hydro Vevey).





7. Prémontage du coude du diffuseur en ateliers (photo Mecánica de la Peña).

Le couvercle et le fond inférieur sont protégés par un blindage inoxydable vissé au droit des aubes directrices.

L'arbre est en 2 parties:

- un arbre inférieur d'un diamètre de 1000 mm en acier forgé CK 35;
- un arbre intermédiaire tubulaire en acier St E 355 avec des brides d'accouplement intérieures en acier Ac 52.3 soudées.

Le groupe ne comporte que 2 paliers: un palier turbine, combiné avec le pivot, directement sur le fond de la turbine, et un palier alternateur situé au-dessus du rotor de l'alternateur.

La figure 7 montre le blindage en tôle d'acier de l'aspirateur, conçu sous forme de surfaces développables.

- H. Buttica. Aménagement hydroélectrique de Saucelle-Huebra. Bulletin technique Vevey, 1990.
- Iberduero SA. Salto de Saucelle-Huebra.

Bibliographie

Centrale de Itaparica

Etats de Pernambuco et Bahia, Brésil

3 turbines Francis de 264 MW (Stade final 10 unités)

Conception hydraulique et mécanique: Riva Hydroart S.p.A., Milan, Italie

Fabrication: Ansaldo, Gênes, Riva Calzoni, Milan, Franco Tosi, Legnano, Italie
– CO.EM.S.A.Canoas R.S., Brésil

Maître d'œuvre: Companhia Hidroelectrica do São Francisco Recife, Brésil

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	454,0	498,2	521,7
H (m)	46,3	50,8	53,2
Q (m ³ /s)	510,0	539,0	542,5
P (MW)	216,0	250,0	264,0
D _{ie} (m)	7,790	f (Hz)	60
D _{li} (m)	7,400	n (t/s; t/min)	1,36; 81,8
D _o (m)	8,760	N _{QE} (-)	0,30
B _o (m)	2,400	n _q	100
z _r (-)	13	v (-)	0,63
z _o (-)	24	σ _{min} (-)	0,33
z _{avd} (-)	24	σ _{max} (-)	0,44

Caractéristiques

La centrale de Itaparica est située à environ 50 km au nord-ouest de Paulo Alfonso, sur le fleuve São Francisco qui forme la frontière entre les Etats de Pernambuco et Bahia et se jette dans l'Atlantique.

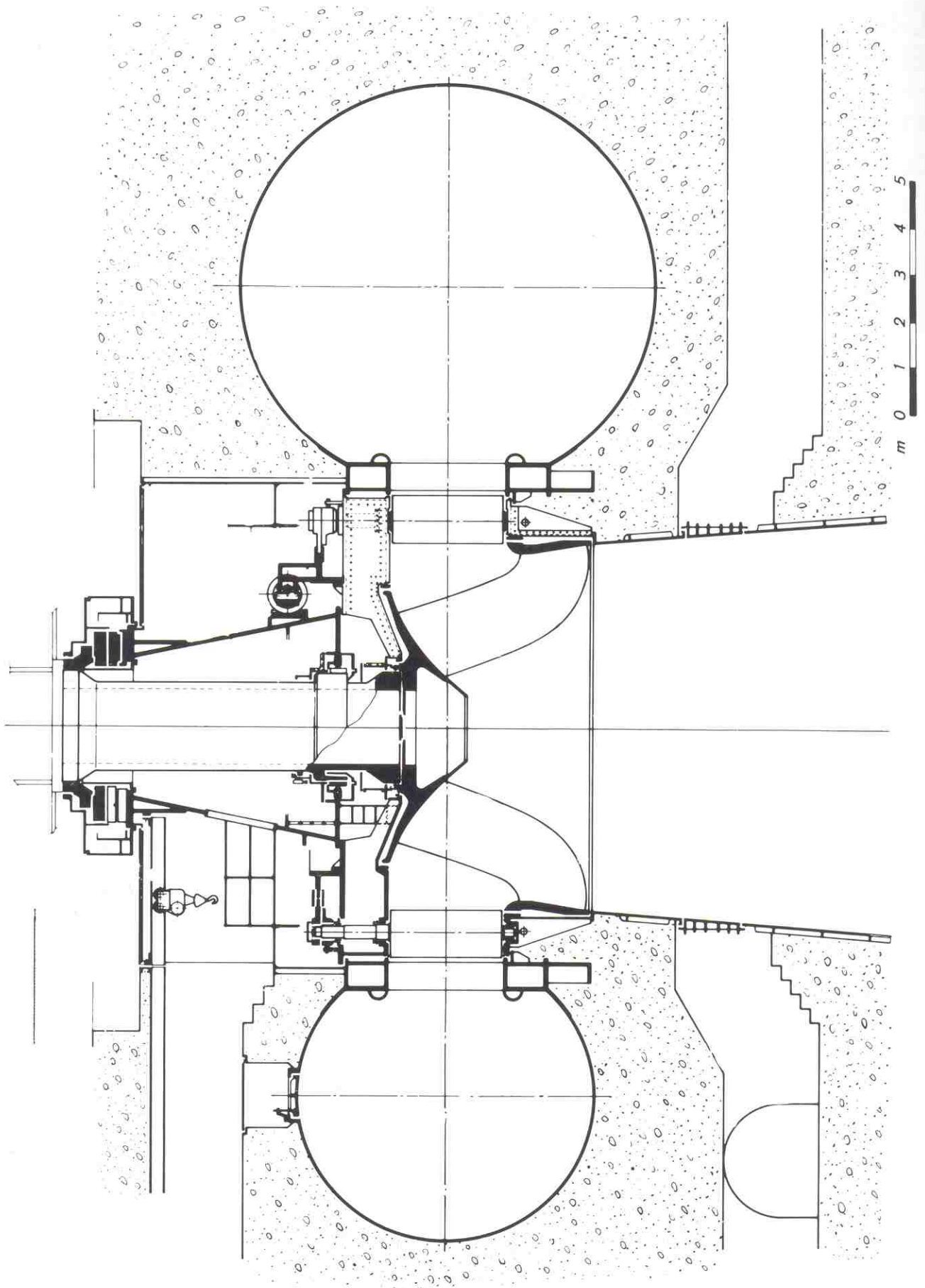
Le barrage est une digue en terre d'une longueur totale de 4700 m avec, en son centre, la centrale et l'évacuateur de crues. Celui-ci, conçu pour un débit de 28 850 m³/s, comprend 9 passes de 15 m de largeur équipées de vannes secteur.

La centrale (fig. 1), qui est située au pied d'un barrage auxiliaire, est à ciel ouvert, sans bâtiment. Deux portiques de 350 t sont prévus pour le montage et l'entretien des machines.

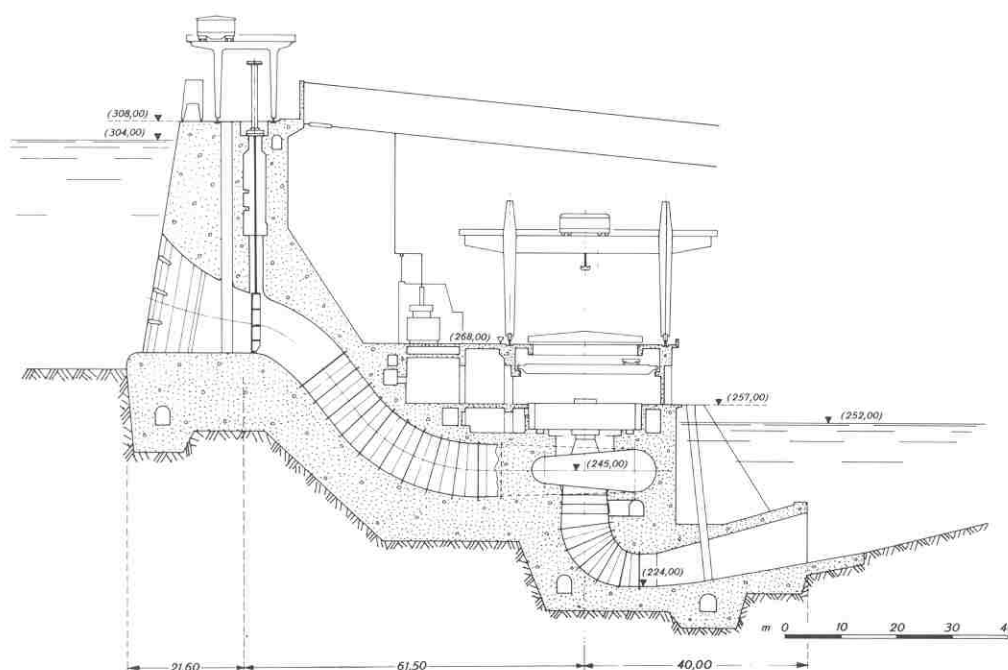
Les conduites forcées ont un diamètre de 9,5 m. Des vannes wagon de sécurité de 10,6 x 10,4 m permettent de couper le débit.

Les 3 premières machines ont été mises en service en 1988, 1989 et 1990.

Généralités



1. Coupe du barrage et de la centrale. On remarque les portiques de 350 t (document Riva Hydroart).



La bêche spirale est du type Piguet. Elle est divisée en 22 viroles avec un diamètre d'entrée de 9,20 m. L'avant-distributeur a un diamètre d'entrée de 11,630 m et un diamètre de sortie de 9,500 m.

Conception hydraulique

La roue a un profil hydraulique classique, compte tenu de sa très grande vitesse spécifique ($v_s = 0,57$).

Le diffuseur possède un pilier central et des rainures de batardeau. Sa profondeur relative est $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}} = 2,83$.

La bêche spirale, d'une masse de 343 t, est entièrement soudée sur le site. La pression d'essai est de 11,5 bar.

Conception mécanique

L'avant-distributeur comprend 2 caissons, munis de bourrelets à l'entrée. Les avant-directrices traversent les flasques et sont soudées dans les caissons. Les tôles, d'une épaisseur maximale de 120 mm, sont en acier Fe 44 UNI.

L'avant-distributeur, d'une masse totale de 237 t, est divisé en 4 parties soudées sur le chantier.

Les aubes directrices, en construction soudée, sont en acier 19 Mn 5 Fe 44 B UNI et recouvertes d'acier inoxydable à l'extrémité et sur l'arête de contact.

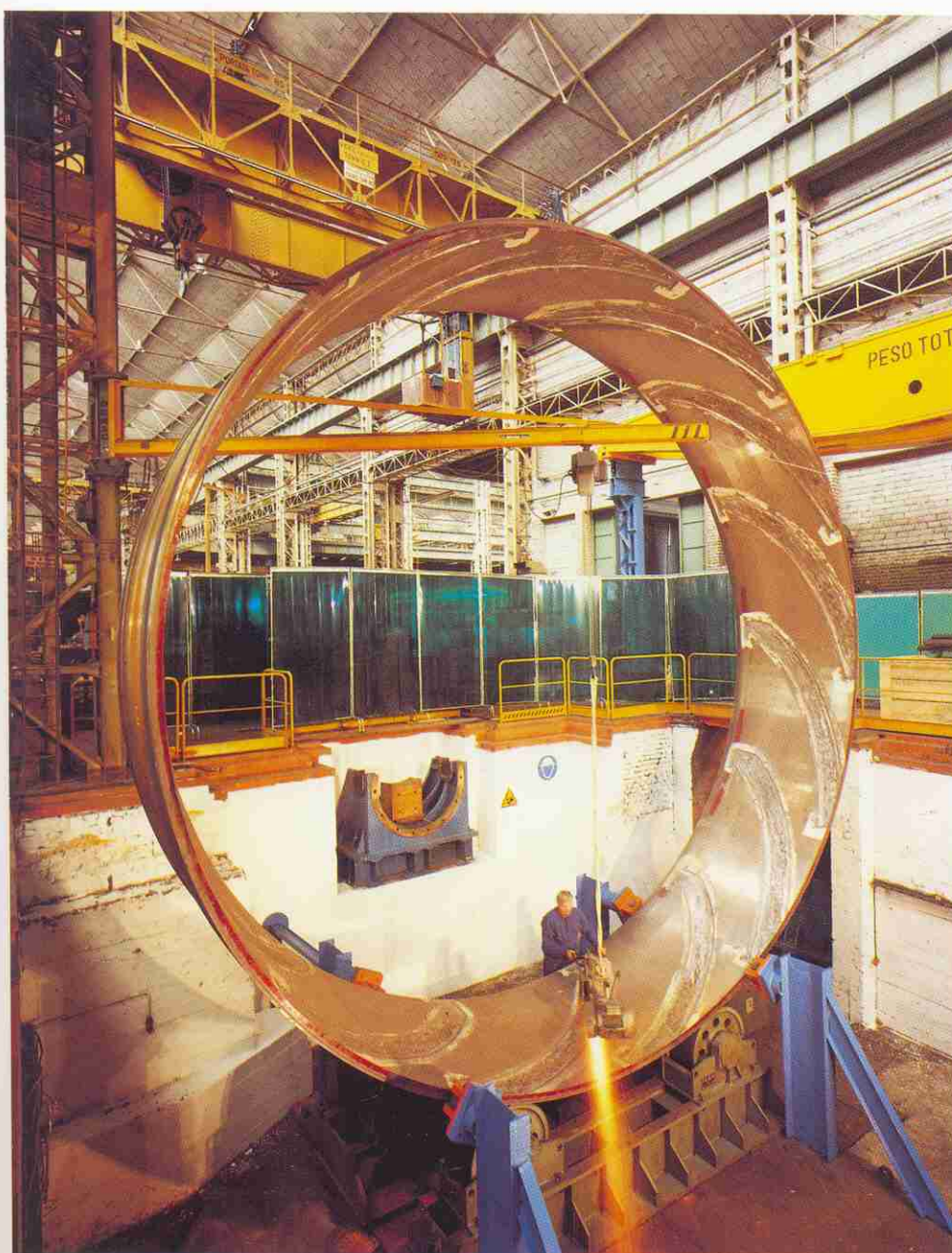
Le système de commande du distributeur comprend 4 servomoteurs qui agissent sur un cercle de vannage intérieur relié aux aubes par le système classique biellettes-leviers.

2. Moyeu de la roue en acier coulé (photo Riva Hydroart).



La protection est assurée par des tiges de rupture et un système à friction pour éviter une destruction en cascade du distributeur.

La roue, en acier G 19 Mn 4 UNI, d'une masse totale de 203 t, est fabriquée à partir d'un moyeu avec des amorces d'aubes, des aubes proprement dites et d'une ceinture (fig. 2,3,4,5). Les aubes ont été matricées. L'assemblage a été exécuté en partie par soudure classique et en partie par «electroslag».



3. Préparation de la ceinture de la roue, en acier coulé, pour la soudure des aubes (photo Riva Hydroart).

Les aubes sont recouvertes d'une couche d'acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni de 6 mm d'épaisseur aux endroits exposés à la cavitation.

Le couvercle de turbine est exécuté en construction mécano-soudée à partir de tôle d'acier Fe 44 B UNI. Sa masse est de 116 t; il est divisé en 2 parties boulonnées au montage sur le chantier.

L'anneau inférieur du distributeur est fabriqué avec le même acier, également en 2 parties boulonnées sur le site.

4. Moyeu et aubes de la roue préassemblés en cours de descente dans la ceinture (photo Riva Hydroart).



Le couvercle et l'anneau inférieur ont une protection en acier inoxydable exécutée par soudure de 12 segments.

La ligne d'arbre comprend 2 paliers, un palier turbine et un palier alternateur au sommet du groupe.

La butée axiale est supportée par un cône transférant la poussée sur le couvercle de la turbine.

L'arbre, d'une masse de 63 t, est en acier forgé Fe 510 B UNI. Il est divisé en 3 parties soudées.



5. Roue complète en cours de soudure dans son positionneur (photo Riva Hydroart).

Le diffuseur est blindé en acier Fe 44 B UNI sur une distance de 22,5 m en dessous de la roue jusqu'à la section où la vitesse de l'eau atteint 6 m/s.

- O. Beda, O. Ceravola, L. Magri. Le turbine Francis di grandi dimensioni: la ricerca in Italia. L'Energia Elettrica, No 4, 1980.
- Revue Hydroart 1984.

Bibliographie