

Centrale de Tadami

Préfecture de Fukushima, Japon

1 turbine bulbe de 65 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Hitachi Ltd, Hitachi, Japon

Maître d'œuvre: Electrical Power Development Company, Tokyo, Japon

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	166,7	194,2	203,0
H (m)	17,0	19,8	20,7
Q (m ³ /s)	338	366	350
P (MW)	52,0	65,8	65,8
D _e (m)	6,700	f (Hz)	50
D _i (m)	2,750	n (t/s; t/min)	1,667; 100,0
Z _r (-)	5	N _{QE} (-)	0,61
Z _o (-)	20	n _q	204
Z _{avd} (-)	6	v (-)	1,29
		σ _{min} (-)	0,650
		σ _{max} (-)	0,901

Caractéristiques

La centrale se trouve sur la rivière Tadami, au nord-est du Japon. Le barrage en terre, d'une hauteur de 29 m et d'une longueur de 582,5 m, créant une retenue de 2·10⁶ m³, est situé 3 km en aval de la centrale de Tagokura (380 MW). Il est équipé d'un évacuateur de crues à 3 vannes, ainsi que d'une turbine en S de 1,7 MW pour permettre en tout temps le passage d'un débit minimum de 8 m³/s. La centrale est partiellement enterrée, et une excavation du canal de fuite sur une longueur de 2,2 km a été nécessaire pour obtenir 20,7 m de chute.

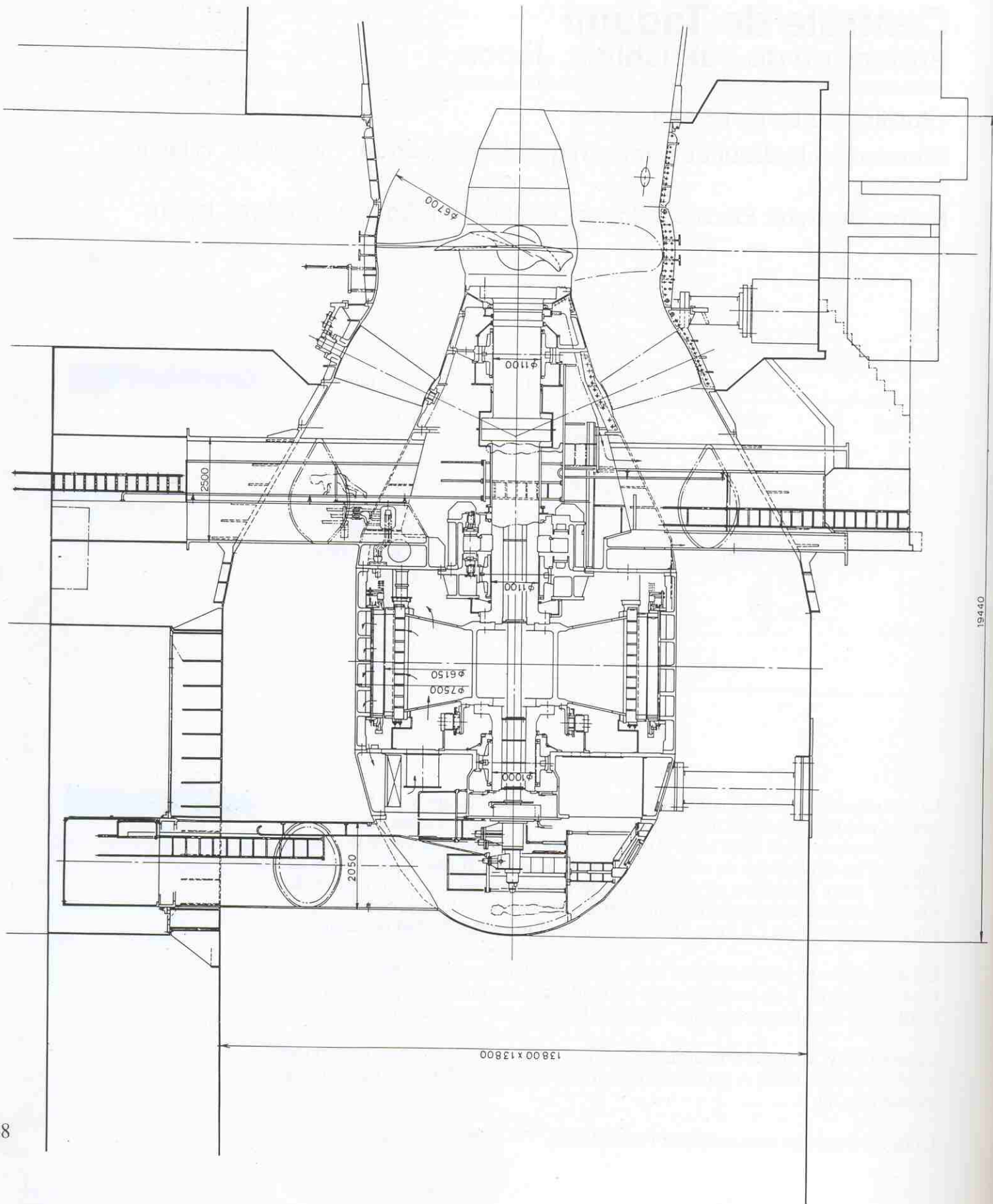
Généralités

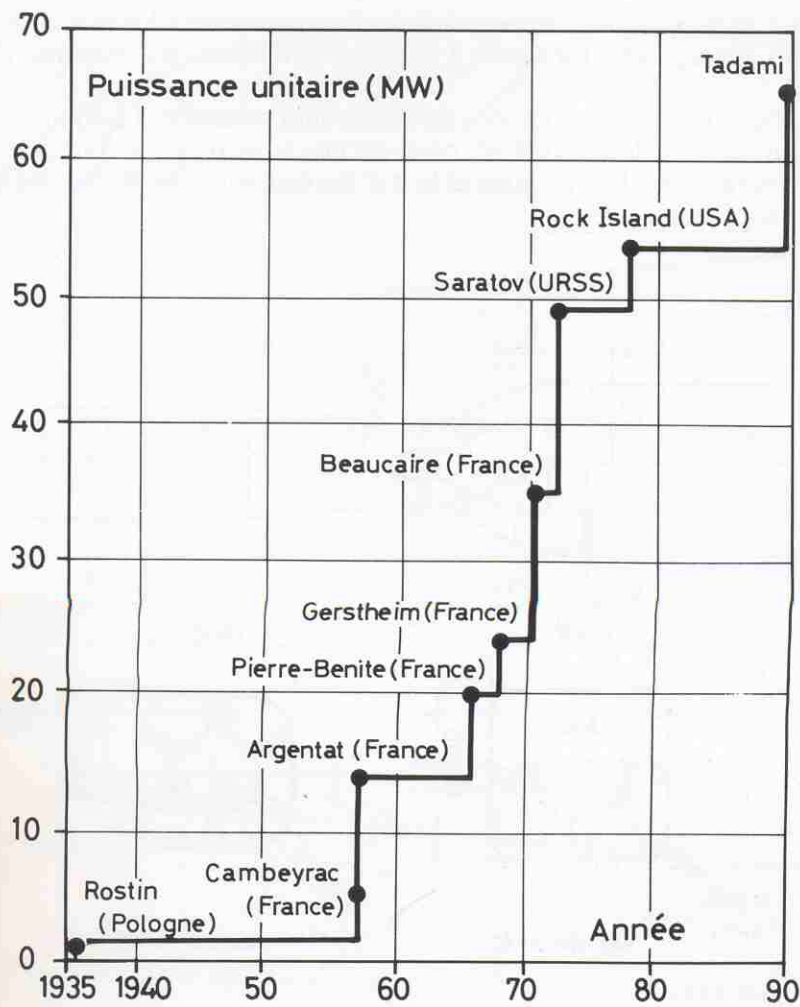
L'élaboration du projet définitif s'est faite simultanément avec des essais sur modèles réduits. Les performances hydrauliques ont été mesurées, ainsi que l'influence des charges statiques et des vibrations sur la structure.

La production annuelle d'énergie est estimée à 127 GWh, et la mise en service a eu lieu en août 1989. A cette date, le bulbe de Tadami était le plus puissant du monde (fig. 1).

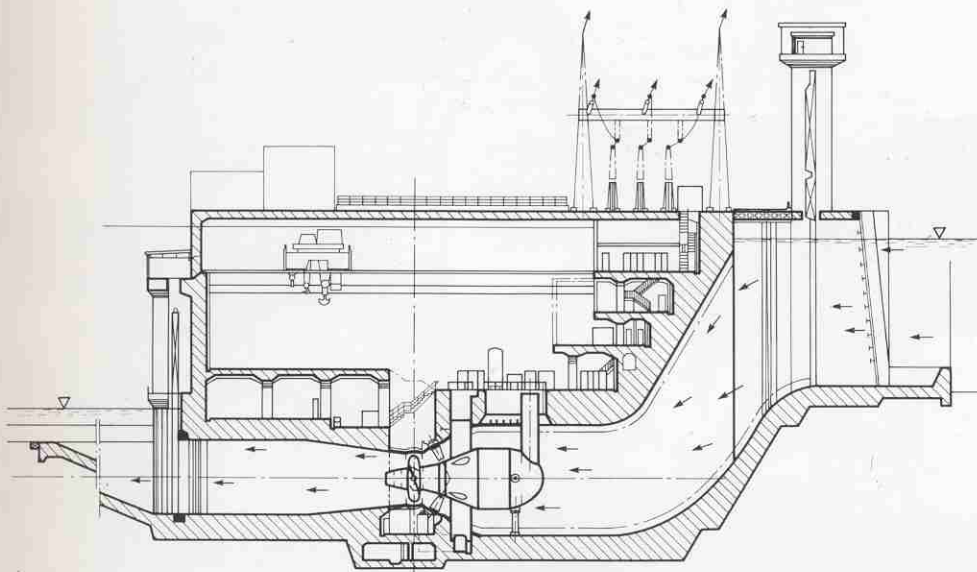
La figure 2 montre une coupe de l'installation.

Centrale de Tadami, Japon

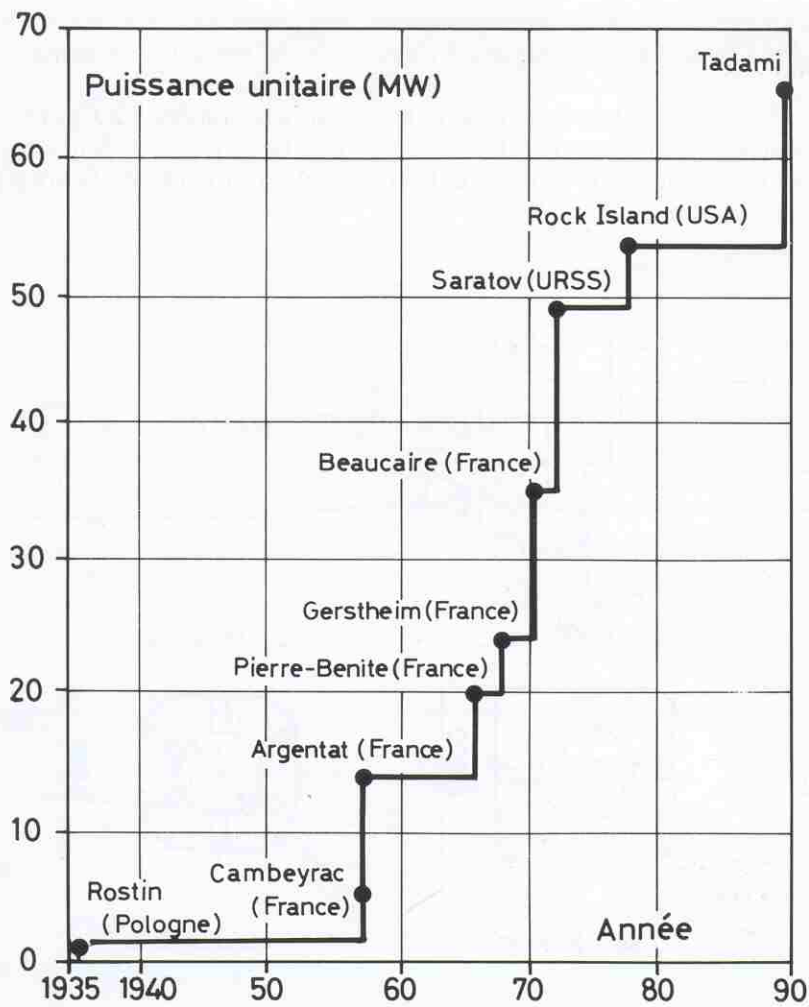




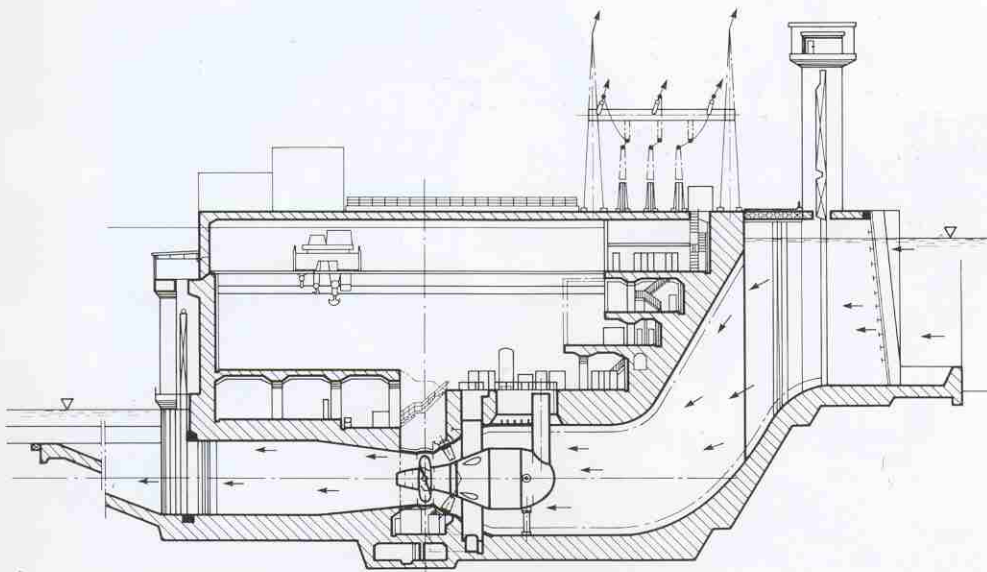
1. Evolution de la puissance maximale des bulbes dans le monde (d'après un document Hitachi).



2. Coupe schématique de l'installation (d'après un document Hitachi).



1. Evolution de la puissance maximale des bulbes dans le monde (d'après un document Hitachi).



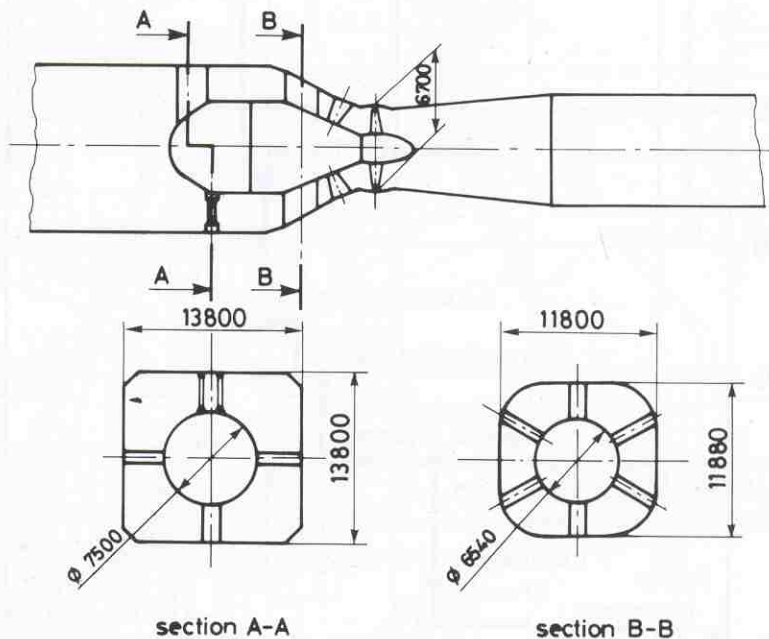
2. Coupe schématique de l'installation (d'après un document Hitachi).

Conception hydraulique

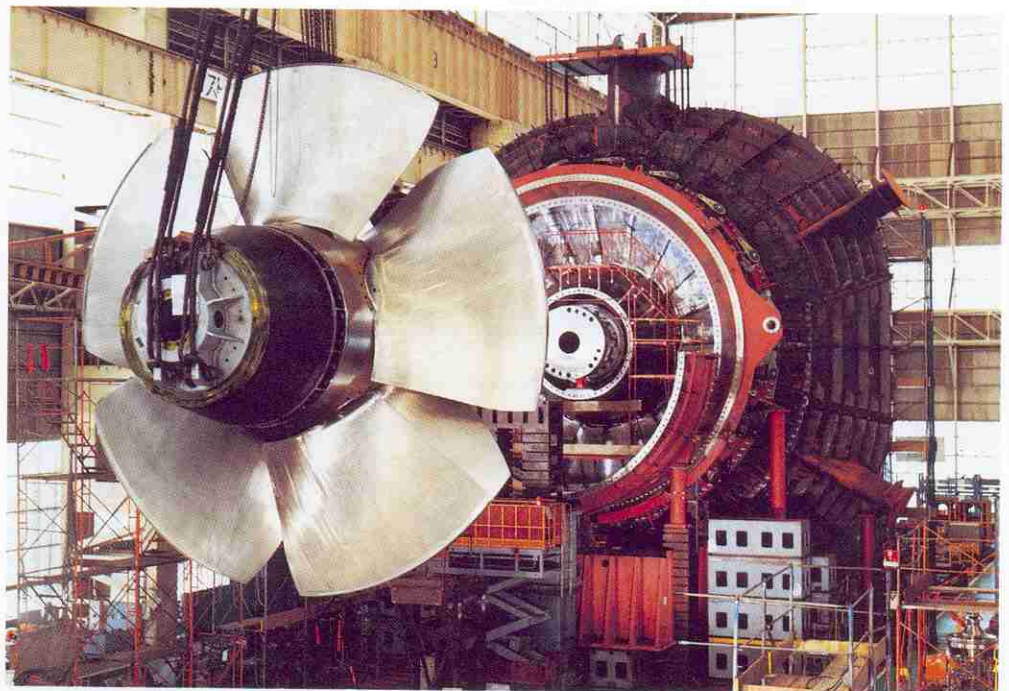
Le canal d'entrée de la machine est de section carrée de 13,8 m x 13,8 m avec des angles chanfreinés. La figure 3 montre l'évolution des sections.

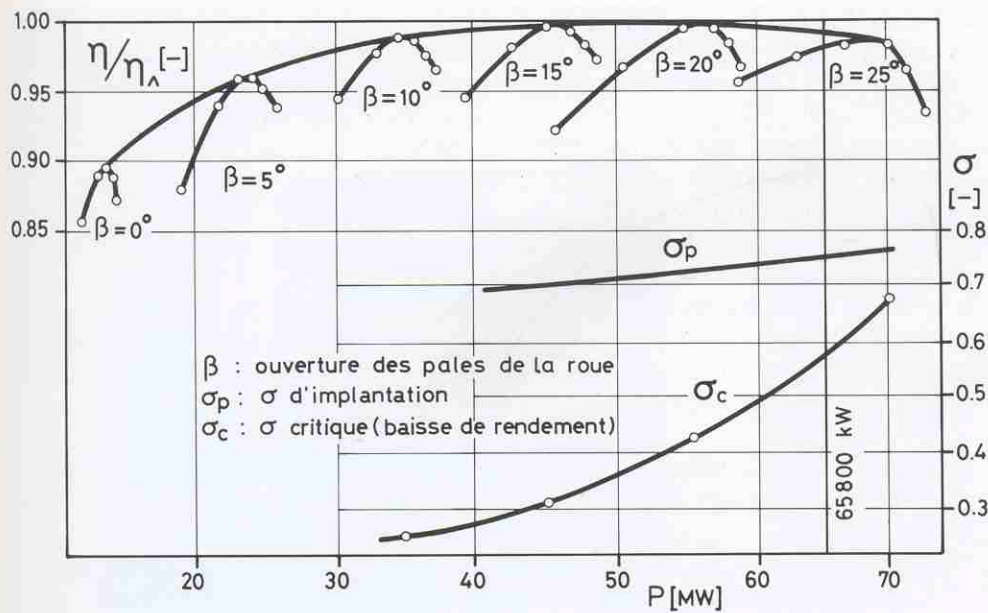
La roue (fig. 4) a 5 aubes équipées de lèvres anticavitation. La figure 5 montre que la courbe de rendement est très plate sur une large plage de fonctionnement, et que la marge entre le σ critique et le σ d'implantation est de l'ordre de 30%, à la puissance nominale.

3. Sections du profil hydraulique (d'après un document Hitachi).

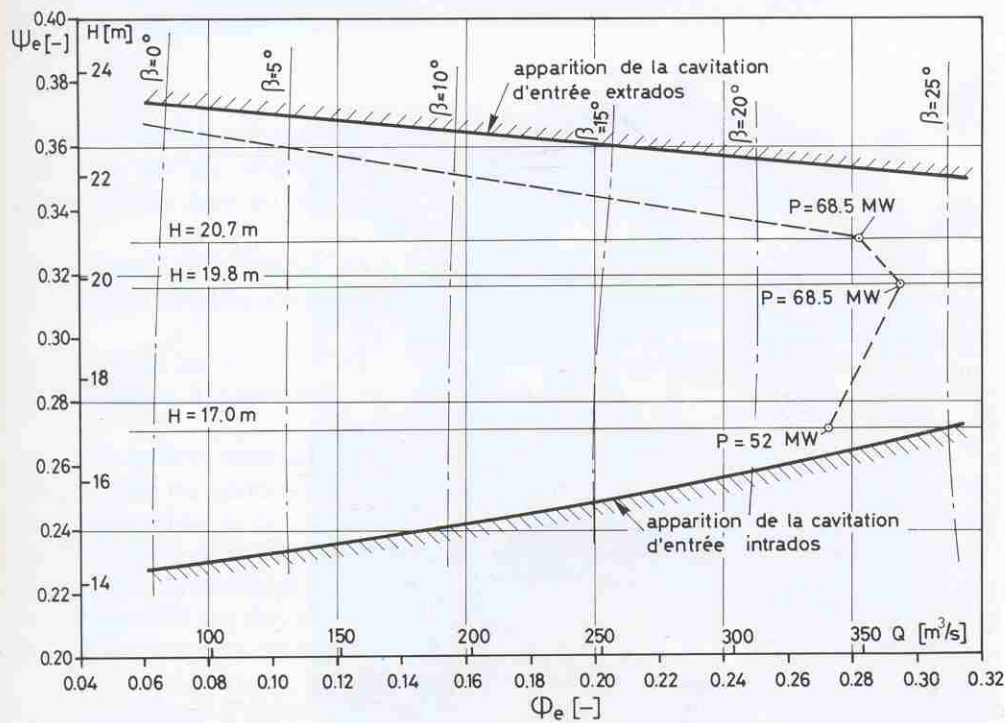


4. Roue et corps de bulbe en cours de montage. On distingue les lèvres anticavitation sur presque toute la longueur du profil (photo Hitachi).





5. Courbe de rendement relatif et chiffre de cavitation en fonction de la puissance (d'après un document Hitachi).



6. Limite d'apparition de la cavitation d'entrée et domaine de fonctionnement de la machine (d'après un document Hitachi).

Un effort tout particulier a été apporté au tracé des pales pour éviter la présence de bulles de cavitation, sur modèle réduit, dans toute la zone de fonctionnement.

La figure 6 montre les limites d'apparition de la cavitation d'entrée sur l'extrados et l'intrados des pales. On remarque que la zone de fonctionnement est située entièrement à l'intérieur de ces 2 limites.

Le diffuseur a 33,5 m de longueur, ce qui représente 5 diamètres de roue.

Conception mécanique

Le bulbe est maintenu par un système de supports composé de 6 avant-directrices, 2 bras horizontaux et un support vertical à l'amont, qui reprennent l'ensemble des forces dont les principales ont les valeurs maximales suivantes:

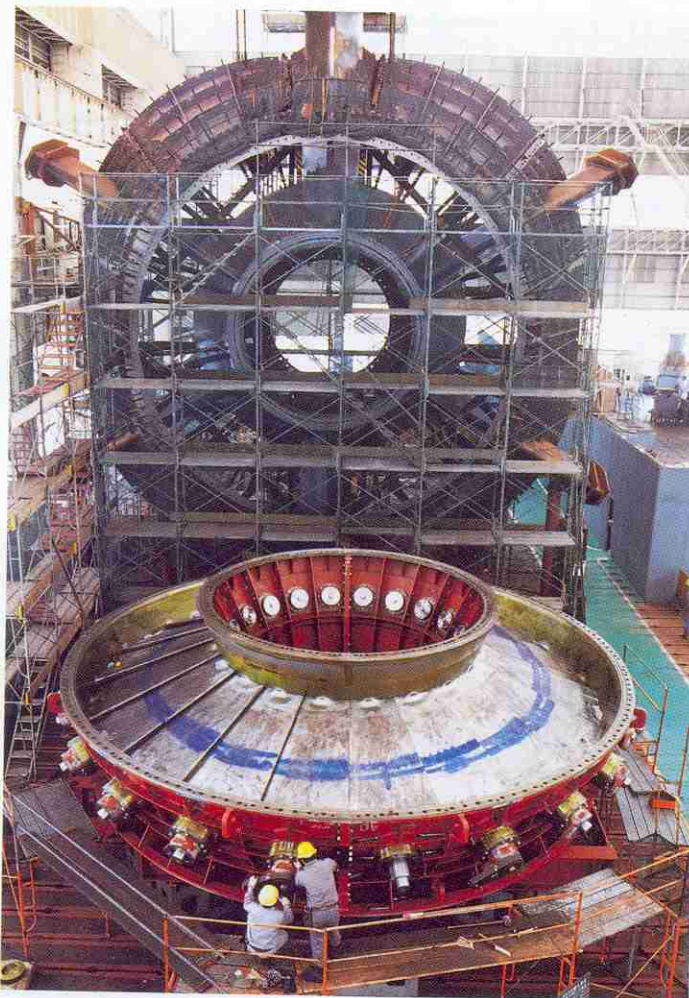
- poussée hydraulique horizontale 14,2 MN;
- couple 28,4 MN·m;
- poids total du bulbe 9,7 MN;
- poussée d'Archimède totale 4,7 MN.

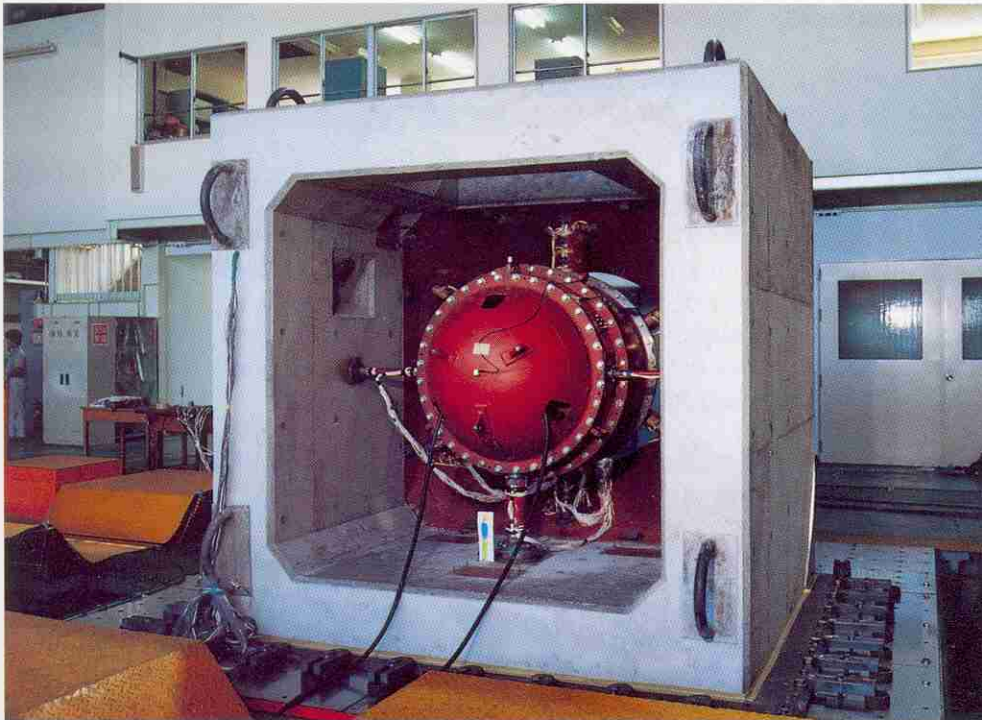
Le système de supports doit en outre reprendre les efforts thermiques de la machine électrique, ceux dus à la variation annuelle de la température de l'eau ainsi que les forces vibratoires dues aux fluctuations de pression engendrées par la roue et celles dues aux effets sismiques.

Les calculs des structures ont été conduits de manière à limiter les déformations à une valeur maximale de 2 mm.

Les deux avant-directrices verticales ainsi que le puits amont sont creux pour permettre l'accès au bulbe et le passage de toutes les conduites de fluides et les câbles électriques.

7. Distributeur en cours de montage. On distingue à l'arrière plan l'avant-distributeur et son ancrage dans le béton (photo Hitachi).





8. Modèle complet de la turbine, à l'échelle 1/8, utilisé pour des essais statiques et dynamiques (photo Hitachi).

L'avant-distributeur est fabriqué en 12 parties qui sont boulonnées sur le site avec des petites soudures d'étanchéité, ce qui permet de minimiser les déformations dues au soudage. Celles-ci sont comprises entre 0,3 et 0,8 mm.

Les aubes du distributeur, en acier inoxydable coulé à 13% de Cr, sont munies de paliers cylindriques auto-lubrifiés.

Les aubes de la roue, en acier inoxydable à 13% de Cr, sont usinées et polies par des machines à commande numérique.

Les trois paliers sont situés, l'un juste à l'amont de la roue et les 2 autres de chaque côté du générateur. La charge radiale maximale totale est de 3,9 MN. La lubrification se fait par gravité depuis un réservoir supérieur. La butée est située au droit de l'avant-distributeur; la poussée maximale est de 6,3 MN dans le sens de l'écoulement, et de 5,3 MN dans le sens contraire. Les patins du pivot sont supportés par des appuis à ressort pour assurer une bonne répartition de la charge sur tous les patins.

Un programme d'essai très complet a été entrepris à l'aide de 2 modèles à l'échelle 1/8, un modèle partiel comprenant l'avant-distributeur et le canal en béton et un modèle complet (fig.8).

Le modèle partiel a été utilisé pour mesurer les contraintes dans le béton au voisinage des ancrages des avant-directrices, ainsi que pour un essai de fatigue qui a démontré que la structure supportait 10^4 cycles sans problème. Un essai de rupture a finalement montré que l'avant-distributeur commençait à se fissurer avec une force axiale égale à 6 fois la force axiale maximale au déclenchement, alors que la rupture est intervenue pour une force pratiquement double.

Les mesures suivantes ont été exécutées sur le modèle complet:

- contraintes et déformations dues aux forces axiales, au couple et aux forces d'origine thermique, statiques et vibratoires;
- fréquences propres des vibrations dans les directions horizontales, verticales, axiales et en torsion.

La fréquence minimum mesurée dans l'air et corrigée pour l'eau est de environ 13,3 Hz dans la direction horizontale, perpendiculaire à l'arbre. La fréquence d'excitation hydraulique engendrée par la machine est $F = 8,3 \text{ Hz}$ ($F = z_r \cdot n$) et la fréquence sismique est inférieure à 10 Hz. Dans ces conditions, la marge de sécurité a été admise comme suffisante.

Pour accélérer les travaux sur le site, la machine a été complètement montée en ateliers, comme le montrent les figures 4 et 7.

Bibliographie

- T. Motoki, H. Inone and H. Toshima. 65 MW Bulb Turbine for Japan's Tadami project. Water Power and Dam Construction, August 1986.
- H. Nishizawa, H. Inone, I. Yanagida, H. Toshima. World's largest capacity 65 MW bulb generating unit for Tadami project. Hitachi Review, Volume 37, 1988, No 2.

Centrale de Laufenburg

Canton d'Argovie, Suisse

10 turbines Straflo de 11 MW

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

Maître d'œuvre: Kraftwerk Laufenburg AG, Laufenburg, Suisse

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	70,6	93,2	97,8
H (m)	7,20	9,50	9,97
Q (m ³ /s)	132,0	129,0	131,0
P (MW)	8,2	11,0	11,6
D _e (m)	4,250	f (Hz)	50
D _i (m)	1,700	n (t/s; t/min)	1,79; 107,14
D _o (m)	5,658	N _{QE} (-)	0,68
z _r (-)	4	n _q	225
z _o (-)	18	v (-)	1,43
z _{avd} (-)	4	σ _{min} (-)	1,375
		σ _{max} (-)	2,282

Caractéristiques

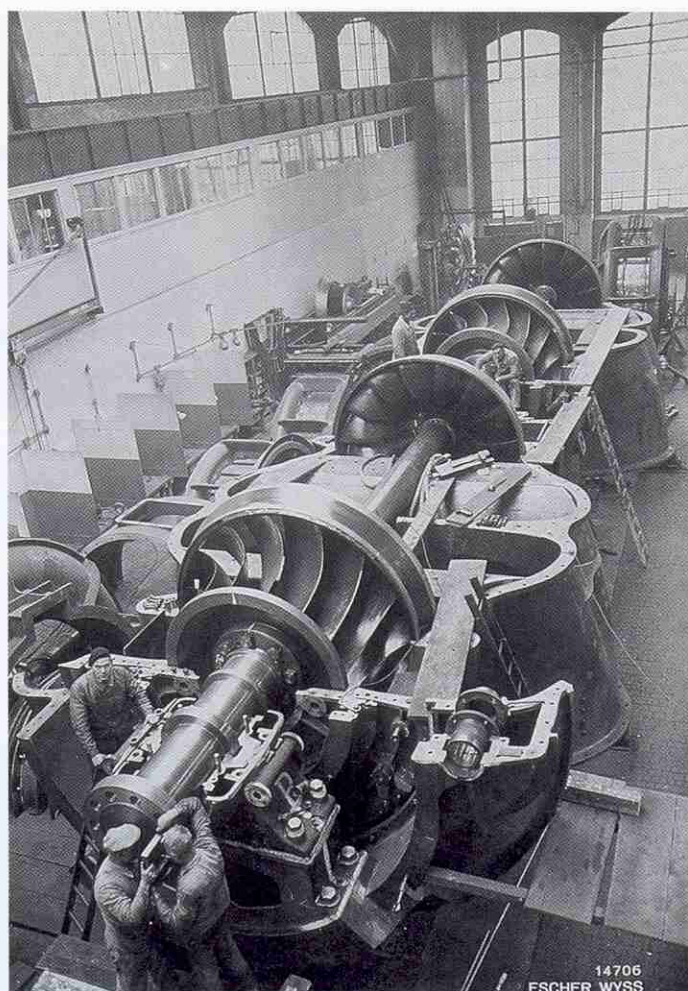
L'aménagement hydroélectrique de Laufenburg est situé sur le Rhin, entre Bâle et Schaffhouse, dans une région où le fleuve marque la frontière entre la Suisse et l'Allemagne. La centrale est en Suisse et l'évacuateur de crues en Allemagne (fig. 1).

Généralités



1. Centrale, évacuateur de crues à 4 passes et écluse (document Kraftwerk Laufenburg).

La centrale a été mise en service en 1914 avec un débit installé de 660 m³/s (P = 40 MW). Entre 1929 et 1960, le débit installé a été progressivement augmenté pour atteindre 1080 m³/s (P = 81 MW) en conservant la conception d'origine de 10 groupes équipés de 4 turbines Francis chacun (fig. 2). Dès 1983, des études détaillées ont été entreprises pour le renouvellement de l'équipement électromécanique avec une augmentation du débit de 330 m³/s au moins. Cette condition était imposée pour la prolongation de la concession. En outre, il a été décidé de conserver autant que possible le bâtiment, à caractère historique. L'espacement des groupes et la largeur des canaux étaient donc fixés.



2. Turbines Francis de l'ancienne centrale équipée de 10 groupes comprenant 4 turbines chacun, en cours de montage chez Escher Wyss à Zürich en 1937 (photo Sulzer-Escher Wyss).

Plusieurs variantes ont été prises en considération:

- 7 Straflo et un gros bulbe ($D_e = 6,400$ m);
- 7 petits bulbes et un gros bulbe;
- 10 petits bulbes;
- 10 Straflo.

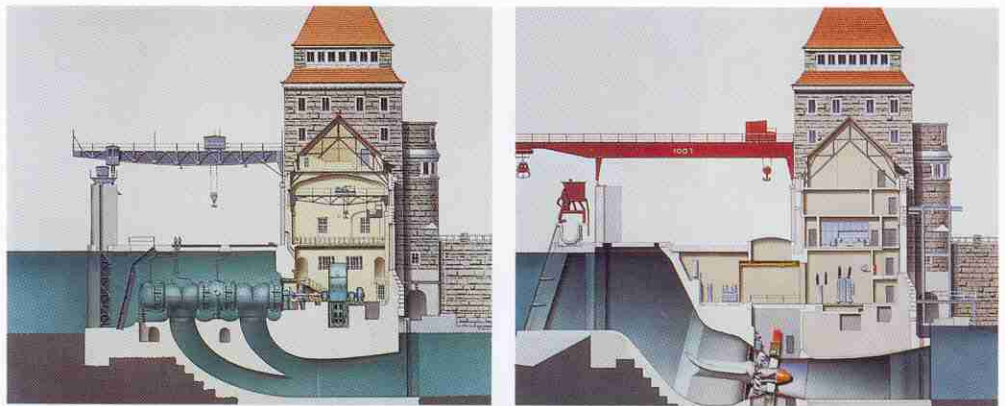
Une étude économique prenant en compte le coût d'installation des machines, les gains de production et les pertes dues à l'arrêt des anciens groupes durant les travaux, a montré que la variante 10 Straflo était nettement la plus favorable (fig. 3 et 4). Les travaux ont commencé en avril 1988. La première machine a été mise en service au début de 1990. La production moyenne annuelle prévue est de 630 GWh alors que la production des anciennes machines était de 580 GWh.

Les turbines de Laufenburg sont issues d'une longue série d'études et de développements qui ont permis d'améliorer le dessin des Straflo.

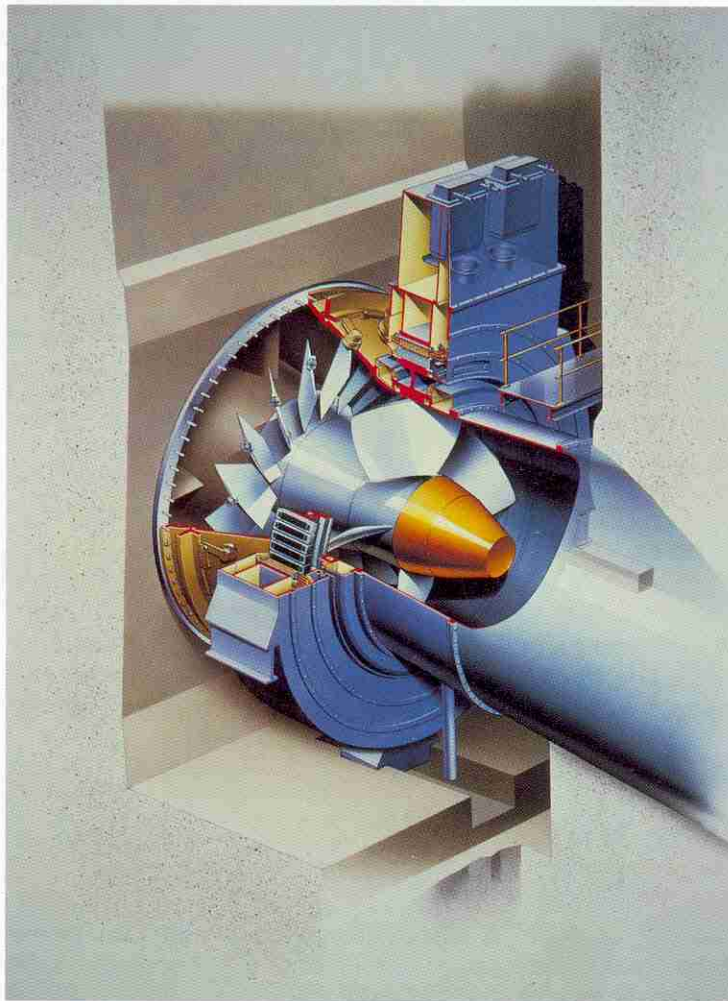
Les premières machines de ce type installées dès 1938 avaient un profil hydraulique complètement axial avec des roues hélices à pales fixes et un support de palier à l'aval de la roue, à l'entrée du distributeur.

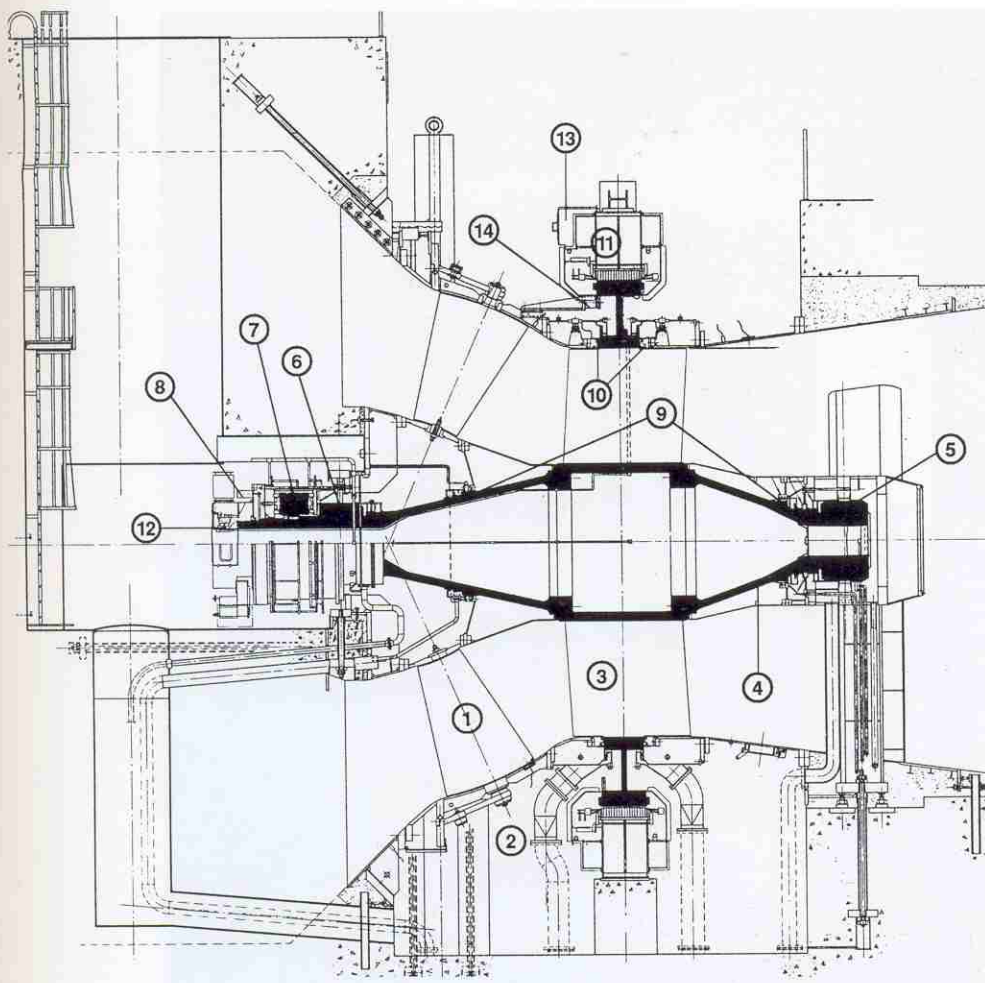
**Conception
hydraulique**

3. Coupe de la centrale avec à gauche les anciens groupes à 4 turbines Francis et à droite les groupes Straflo (document Sulzer-Escher Wyss).



4. Vue en perspective éclatée de la turbine. On distingue le distributeur et la roue faisant office de moyeu pour le rotor de l'alternateur (document Sulzer-Escher Wyss).





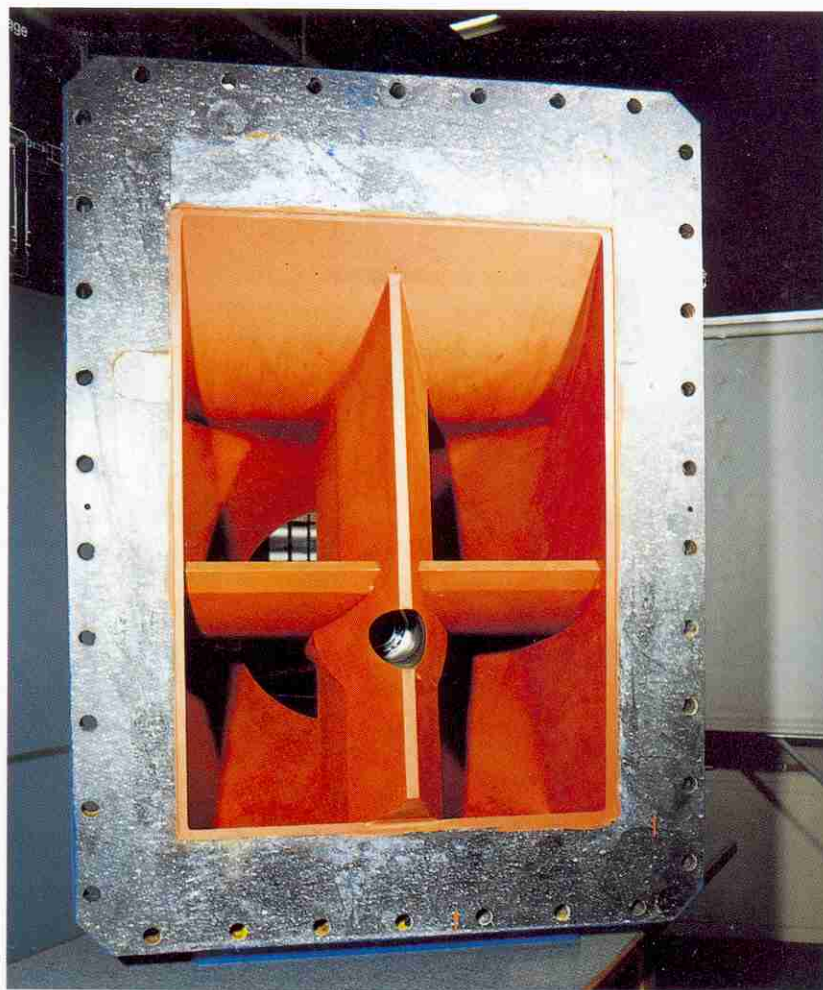
5. Coupe de la turbine de Annapolis Royal (Canada) avec un palier situé à l'aval de la roue (document Sulzer-Escher Wyss).
- 1 aubes directrices
 - 2 commande du distributeur
 - 3 roue
 - 4 arbre
 - 5 palier aval
 - 6 palier amont
 - 7 butée axiale
 - 8 système de mesure de la vitesse
 - 9 joint du moyeu
 - 10 joint de l'anneau tournant
 - 11 stator
 - 12 collecteur
 - 13 refroidissement de la génératrice
 - 14 frein pneumatique

En 1974, le tracé a été amélioré pour se rapprocher d'un profil hydraulique de bulbe classique mais toujours avec des roues hélices et un palier aval. La turbine de Annapolis, centrale marémotrice au Canada ($D_e = 7,600$ m, $P = 20$ MW), est basée sur le même principe (fig. 5). Des turbines Straflo à double réglage ont également été étudiées. Deux machines de ce type ($D_e = 3,700$ m, $P = 8$ MW), avec un palier à l'aval, sont en service en Autriche depuis 1982 et fonctionnent d'une manière très satisfaisante. Une machine pilote expérimentale sans palier aval a été développée et mise en service à Zurich. Cette expérience avait pour but l'étude de machines de haute puissance pour des chutes élevées.

Pour la centrale de Laufenburg, un nouveau concept a été mis au point. Le palier aval, dont le support dans le diffuseur provoque des pertes importantes, a été supprimé. Les aubes de la roue sont fixes, ce qui n'est toutefois pas un handicap sérieux étant donné le nombre élevé de groupes (10). L'entrée de la turbine a la forme d'un croisillon composé d'un pilier vertical et d'une nervure horizontale (fig. 6).

Le distributeur et la roue hélice ont un profil classique; l'axe du groupe est incliné de $6,5^\circ$.

6. Vue de l'entrée du modèle d'essai de la turbine ($D_e = 303,6$ mm, échelle 1:14) (photo Sulzer-Escher Wyss).



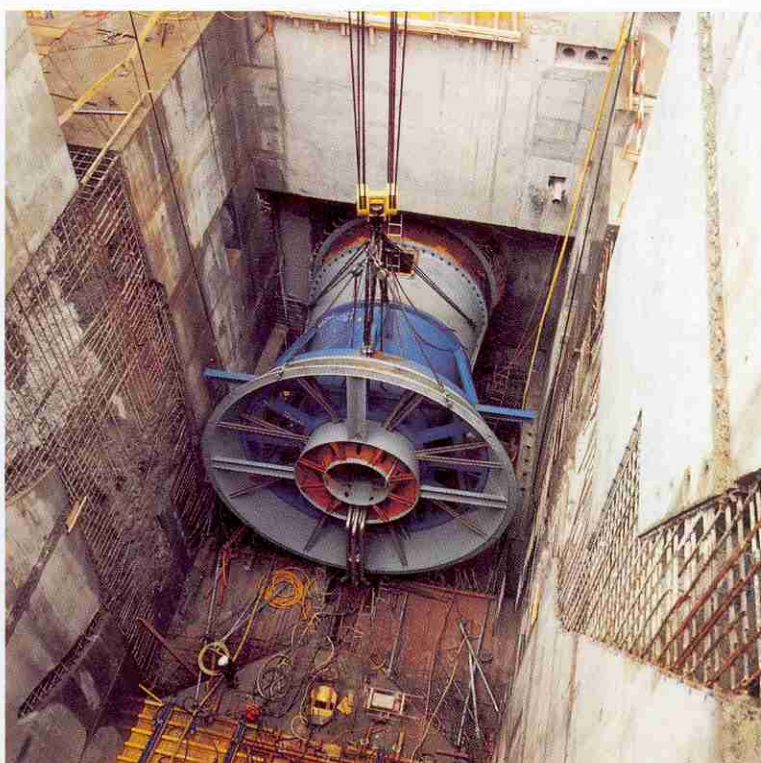
Des essais sur modèle, de l'aménagement complet, ont été entrepris au Laboratoire d'Hydraulique de l'EPF de Zurich. Un modèle à l'échelle 1:60 a été utilisé pour étudier l'écoulement à l'amont et à l'aval, alors qu'un modèle à l'échelle 1:20 a servi à optimiser la forme du canal d'entrée des machines pour éviter des décollements et des vortex dans tout le domaine de fonctionnement.

Les turbines ont également été essayées sur modèle réduit pour fixer le choix définitif du nombre d'aubes de la roue, du diamètre du moyeu, de la forme et de la section du diffuseur ainsi que de la forme de la nervure horizontale d'entrée de la turbine. Ces essais ont permis d'accroître la productivité de 5,5%, soit 35 GWh.

Conception mécanique

L'entrée de la turbine est constituée par un croisillon en béton très rigide dans lequel vient se fixer la partie centrale de la machine. Un anneau muni de 4 entretoises (fig. 7) assure l'ancrage et le centrage de la machine.

Les aubes du distributeur sont guidées par des paliers autolubrifiés. Une aube sur deux est munie d'un dispositif mécanique de protection.



7. Mise en place des anneaux d'ancrage amont et aval. Les 2 anneaux sont maintenus en place pendant le bétonnage par une pièce spéciale (bleu foncé) (photo Sulzer-Escher Wyss).



8. Roue montée à l'intérieur du canal. On remarque bien l'anneau extérieur tournant avec la roue (photo Sulzer-Escher Wyss).

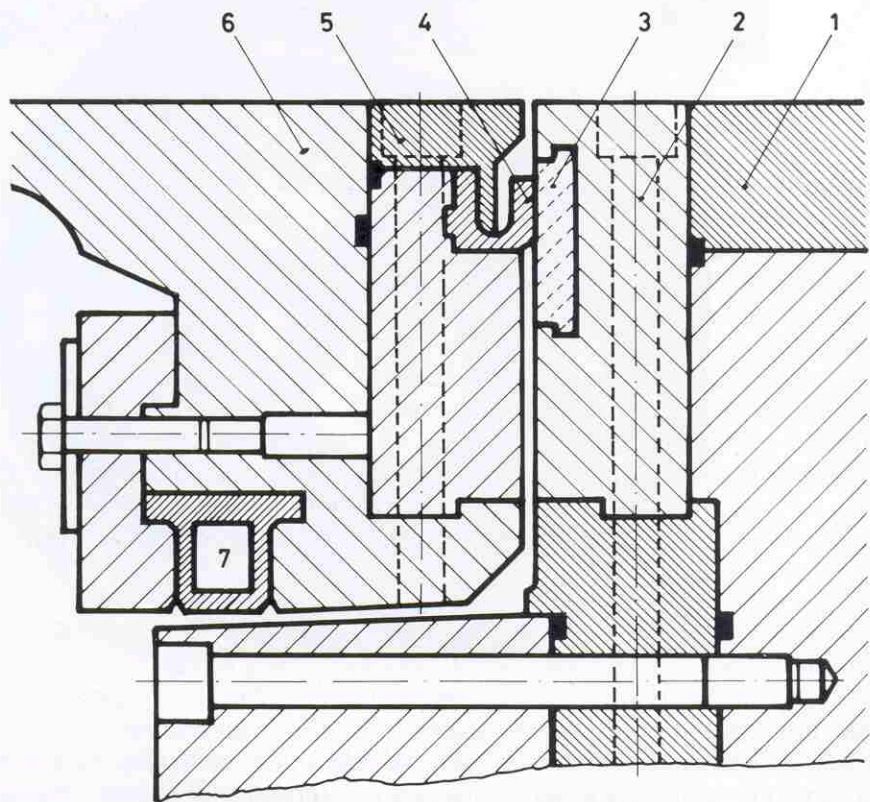
La roue, composée du moyeu, des aubes et de l'anneau extérieur, est soudée d'une pièce. Les aubes sont en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni (fig. 8). Les pôles de l'alternateur sont fixés sur un anneau extérieur, lui-même chassé sur

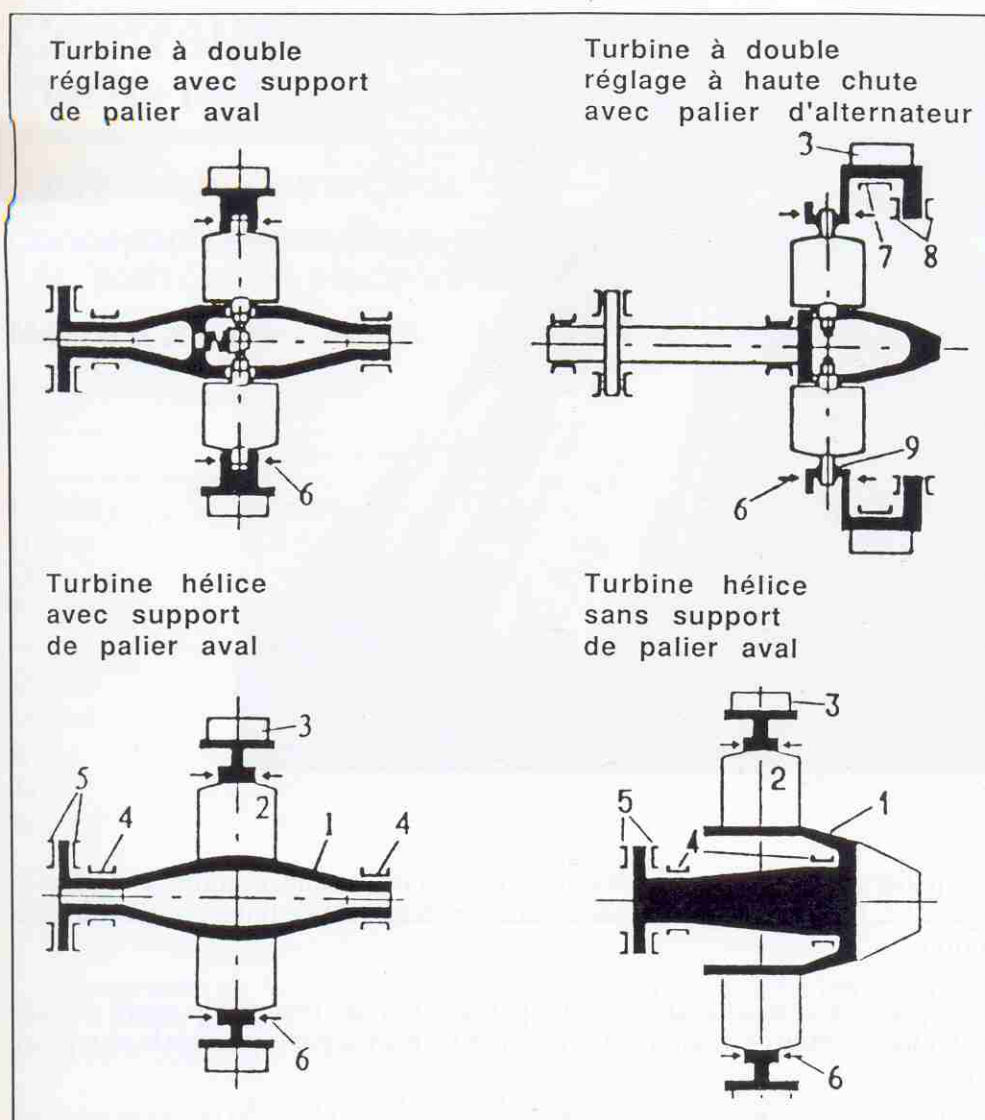
9. Roue et rotor de l'alternateur prêts à être montés dans la machine (photo Sulzer-Escher Wyss).



10. Joints assurant l'étanchéité entre l'anneau tournant de la roue et la manteau fixe (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).

- 1 partie extérieure de la roue
- 2 surface du segment de joint tournant
- 3 élément de joint tournant en céramique
- 4 joint fixe à lèvres en caoutchouc
- 5 segment de fixation du joint fixe
- 6 manteau fixe
- 7 joint gonflable lors de l'arrêt du groupe





11. Evolution de la position et de la conception des paliers des turbines Straflo (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).

- 1 moyeu de la roue
- 2 aubes de la roue
- 3 pôles de l'alternateur
- 4 paliers radiaux
- 5 butée axiale
- 6 joints de l'anneau de la roue
- 7 palier hydrostatique radial de l'alternateur
- 8 butée hydrostatique de l'alternateur
- 9 système de transmission du couple entre roue et alternateur

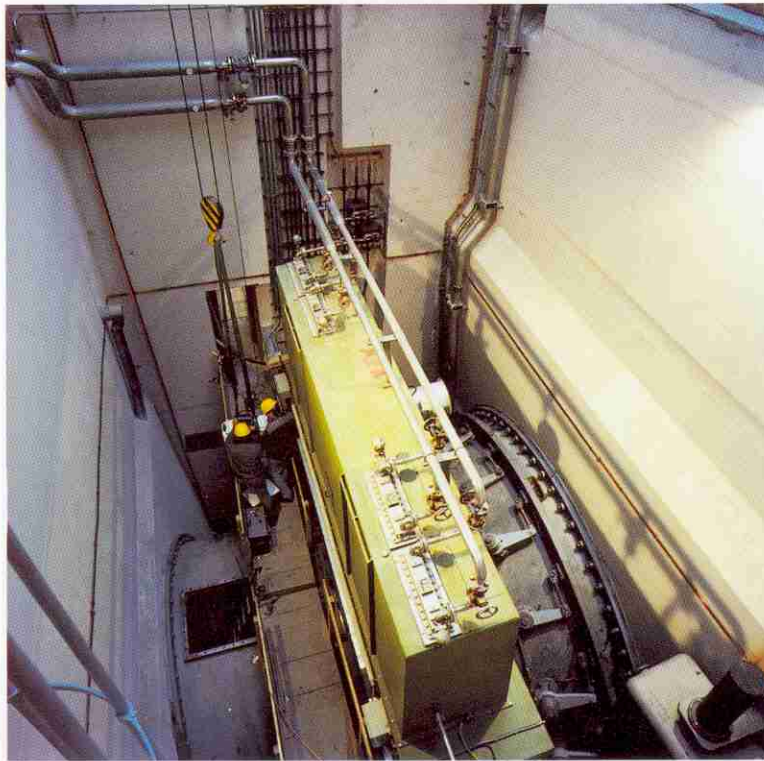
l'anneau extérieur de la roue (fig. 9). La masse totale de l'ensemble roue-rotor est de 100 t.

Un des problèmes principaux des turbines Straflo réside dans les joints. En effet, les joints doivent avoir des pertes par frottement très faibles, une durée de vie assez longue (environ 5 ans) et de plus permettre des déplacements de la roue de plusieurs millimètres.

Les joints des turbines de Laufenburg (fig. 10) sont du type à lèvres, en caoutchouc spécial, frottant sur un anneau en céramique (carbure de silicium). Un joint additionnel gonflable permet d'obtenir une étanchéité totale lorsque la machine est arrêtée.

La conception du joint unique du moyeu est identique.

12. Vue de la commande du distributeur et de la partie supérieure de l'alternateur de la turbine complètement montée (photo Sulzer-Escher Wyss).



Les paliers sont situés à l'intérieur du moyeu de la roue, comme le montre la figure 11. La roue est guidée par 2 paliers radiaux et une butée axiale à double action.

Le support des paliers est constitué par un cylindre très rigide ancré dans la structure en béton de manière à transmettre les efforts par le chemin le plus court possible.

Bibliographie

- H. Miller, J. Vontobel, K. Höller. Upgrading Swiss/German power station with ten Straflo units. *Water Power and Dam Construction*, sept. 1988.
- R. Ruoss, J. Gyenge, F. Fischer. Ausbau Rheinkraftwerk Laufenburg mit Straflo-Turbinen. *Revue technique Sulzer* N° 3, 1988.
- H. Grein, H. Annen, J. Emler. The Straflo-Propeller-Turbine. A Proven Technology for New Market Needs. Publication Sulzer-Escher Wyss, 1990.

Centrale de West End Dam

Etat de New York, USA

2 turbines bulbes en S de 3 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

J.M. Voith GmbH, Heidenheim, RFA et Voith Hydro, York, USA

Maître d'œuvre: SNC Ltd., Montréal, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	54,74	58,27	59,84
H (m)	5,58	5,94	6,10
Q (m ³ /s)	58,8	58,5	58,2
P (MW)	2,85	3,04	3,11
D _e (m)	3,210	f (Hz)	60
D _i (m)	1,374	n (t/s; t/min)	2; 120
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	0,73
z _o (-)	16	n _q	241
z _{avd} (-)	8	v (-)	1,53
		σ _{min} (-)	1,11
		σ _{max} (-)	1,88

Caractéristiques

L'aménagement de West End Dam est situé à Carthage, à 50 km de Watertown. Il utilise les eaux de la Black River qui coule en direction du nord-ouest avant de se jeter dans le lac Ontario.

Généralités

Le barrage est en béton; la centrale est équipée de deux turbines avec diffuseur en S à double réglage. Cette disposition permet de placer les paliers, le multiplicateur ainsi que le générateur à l'aval de la roue, au-dessus du diffuseur. Les problèmes d'accès et d'évacuation de la chaleur sont ainsi facilités, au détriment d'une légère diminution du rendement hydraulique.

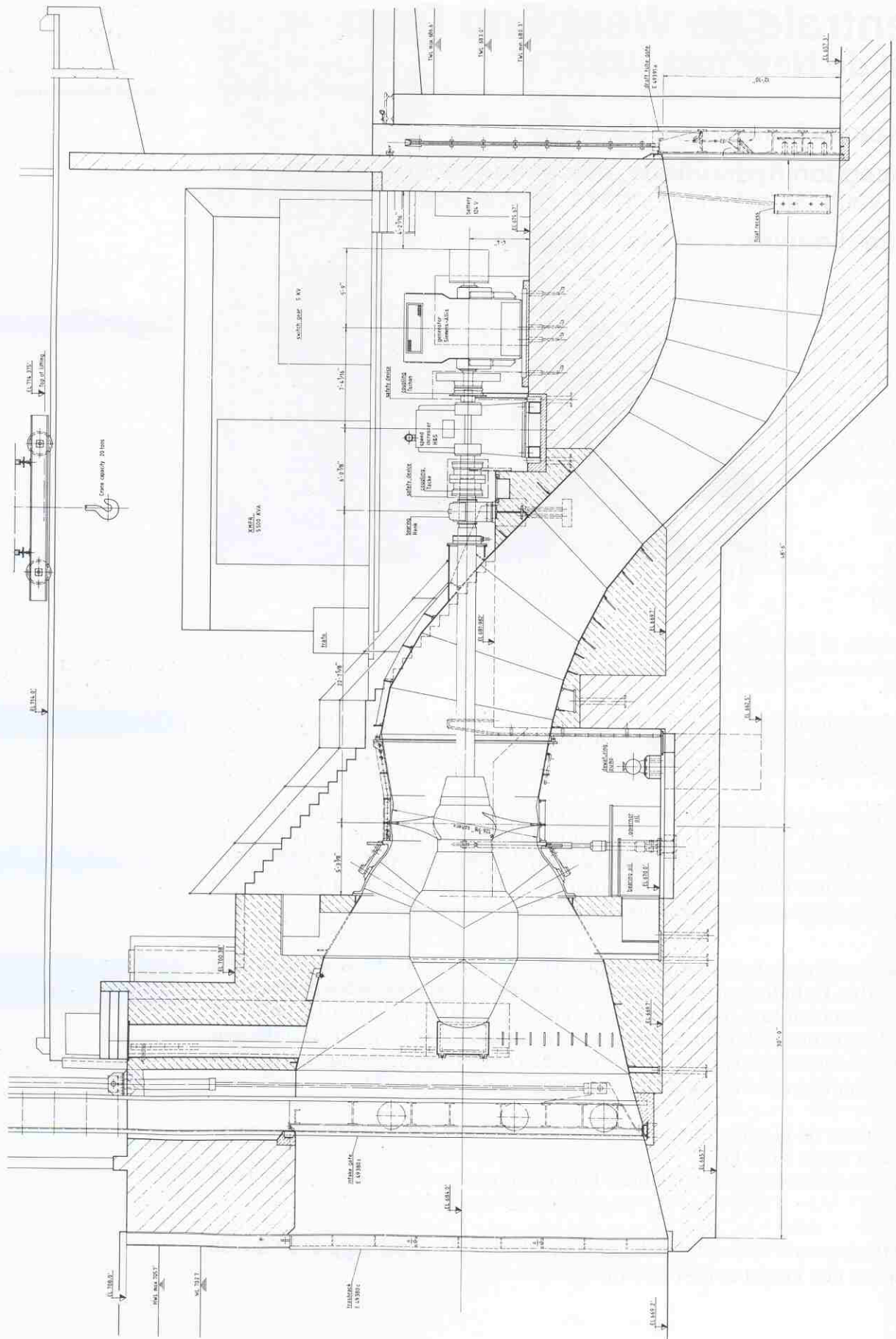
La section d'entrée est rectangulaire avec une hauteur de 8,150 m et une largeur de 6,100 m. Le bulbe qui ne renferme que le palier amont a de ce fait un diamètre relativement faible, 2,340 m, par rapport à la roue (D_e = 3,210 m). Le bulbe est fixé à la structure de la centrale par 2 puits verticaux, un supérieur et un inférieur et 6 avant-directrices (fig. 1). Le bulbe sert en outre d'appui central au 16 aubes du distributeur, qui ont un angle d'ouverture maximal de 68°.

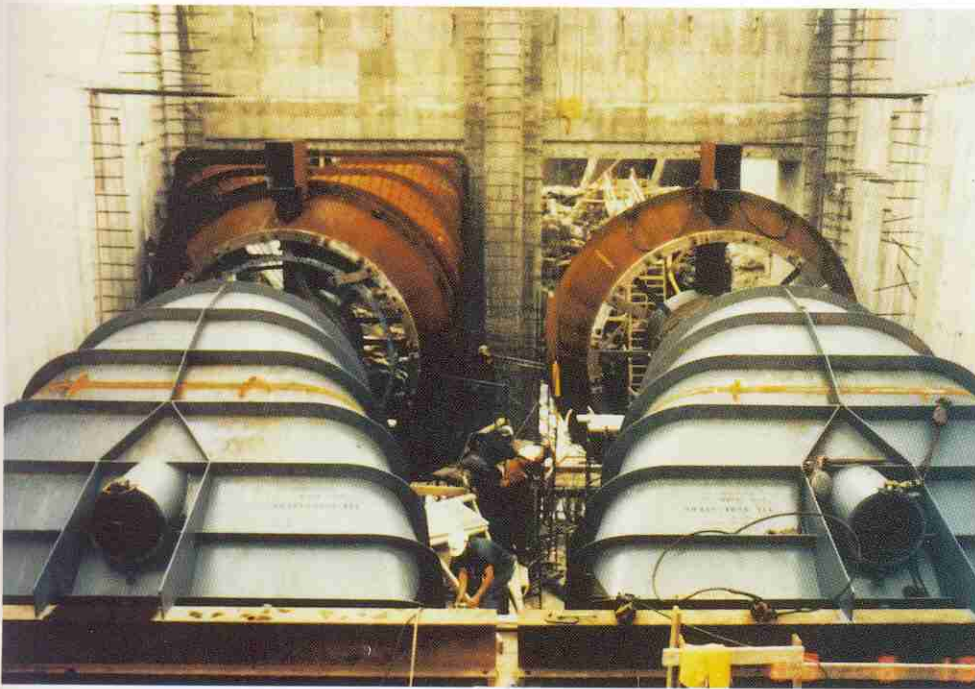
Conception hydraulique

Le manteau de la roue est sphérique; il est prolongé par un cône court d'une longueur égale à 0,5·D_e.

Les pales de la roue sont réglables; l'angle d'ouverture est compris entre 0° et 34°.

Le diffuseur en S a une profondeur maximale de 8,14 m par rapport à l'axe du groupe et une longueur de 14,80 m.





1. Diffuseurs en S en cours de montage. Les sorties des arbres sont visibles au premier plan, ainsi que les bulbes à l'arrière-plan.

Les turbines sont munies de vannes wagon à l'entrée et à la sortie pour permettre leur vidange.

Les aubes du distributeur sont en acier coulé GS 20 Mn 5. Les paliers intérieurs sont en bronze recouvert de téflon. Les paliers extérieurs, sphériques, en acier inoxydable, reprennent également les forces axiales. L'étanchéité des tourillons extérieurs est obtenue par des joints toriques. Le système de commande du distributeur (fig. 2) est constitué du cercle de vannage, des biellettes et de leviers articulés, maintenus alignés par un ressort. Si un corps étranger s'interpose entre deux aubes, les 2 parties du levier se désalignent en permettant la désynchronisation de l'aube directrice. Les 2 parties du levier sont maintenues par un ressort pour éviter le flottement de l'aube désynchronisée. Par une commande alternée d'ouverture et de fermeture, le corps étranger peut être évacué.

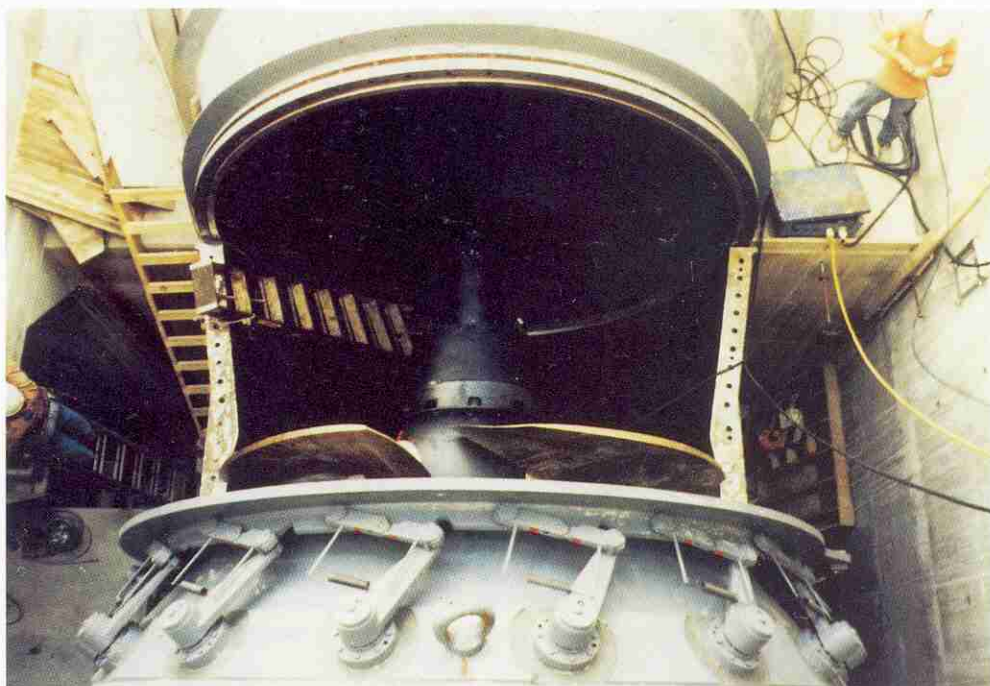
Conception mécanique

Les pales de la roue (fig. 3) et leurs tourillons sont coulés d'une pièce en bronze d'aluminium G-Cu Al 10 Ni. Les tourillons sont guidés par un double palier en bronze, le palier extérieur reprenant les forces axiales. Le manteau de la roue sphérique est constitué de deux moitiés boulonnées, afin de permettre le démontage de la roue. Le servomoteur des pales est situé dans le moyeu.

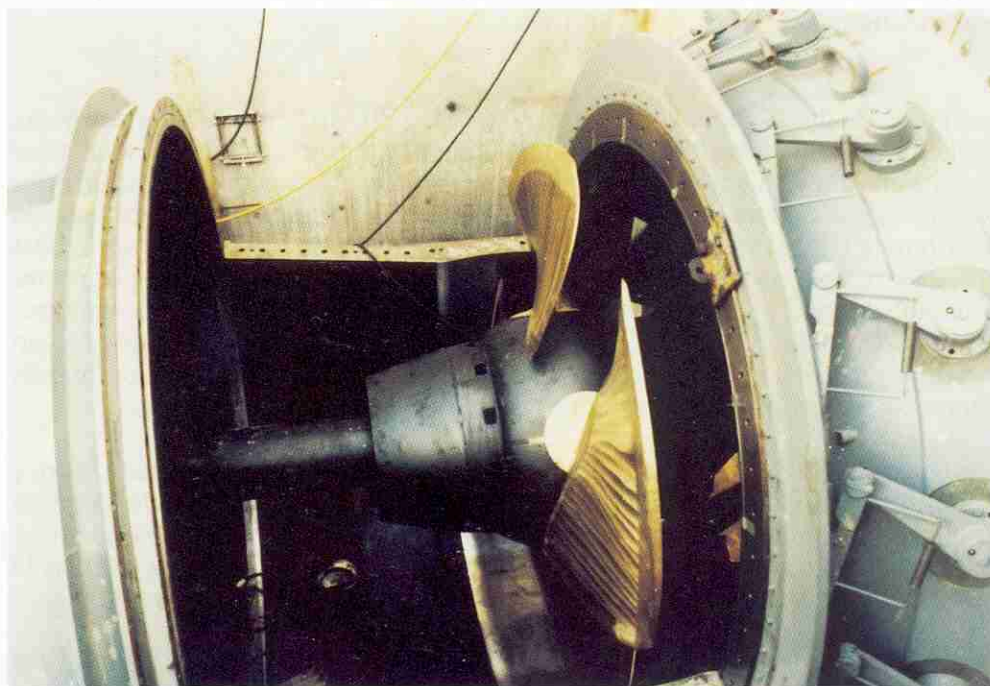
L'arbre de la turbine est supporté radialement par deux paliers: le premier est à l'intérieur du bulbe et le second directement à la sortie du diffuseur. La butée est également située à l'intérieur du bulbe; elle est dimensionnée pour une poussée axiale de 500 kN dans le sens de l'écoulement et de 700 kN dans le sens inverse.

La figure 1 montre les diffuseurs en cours de montage et permet de voir la sortie de l'arbre. Un accouplement souple est situé entre l'arbre de la turbine et le multiplicateur. Le générateur est muni d'un volant d'inertie pour limiter la survitesse en cas de déclenchement.

2. Commande du distributeur. On remarque les leviers en 2 parties articulées qui peuvent se désaligner en cas de présence d'un corps étranger entre 2 aubes.



3. Roue avec ses pales en bronze d'aluminium. On remarque l'arbre qui prolonge l'ogive de la roue.



Centrale de Murray Lock and Dam

Etat de l'Arkansas, USA

2 turbines bulbes en puits de 20 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Voith Hydro Inc., York, USA

Maître d'œuvre: City of North Little Rock, Arkansas, USA

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	17,94	49,3	53,7
H (m)	1,829	5,029	5,480
Q (m ³ /s)	386,0	430,0	413,9
P (MW)	5,08	19,40	20,50
D _e (m)	8,400	f (Hz)	60
D _i (m)	2,943	n (t/s; t/min)	0,75; 45
z _r (-)	3	N _{QE} (-)	0,84
z ₀ (-)	16	n _q	278
		v (-)	1,76
		σ _{min} (-)	4,51
		σ _{max} (-)	14,65

Caractéristiques

L'aménagement de Murray Lock and Dam, est situé sur la rivière Arkansas qui coule en direction du sud-est avant de se jeter dans le Mississippi. La centrale utilise un barrage existant construit pour la navigation fluviale. Les roues, de 8,4 m de diamètre, sont les plus grandes construites à ce jour pour des turbines puits.

Généralités

Le canal d'entrée est rectangulaire avec une section de 13,45 m de hauteur et 17,10 m de largeur. Le puits a une section horizontale profilée d'une largeur de 5,5 m et d'une longueur de 12,8 m (fig.1).

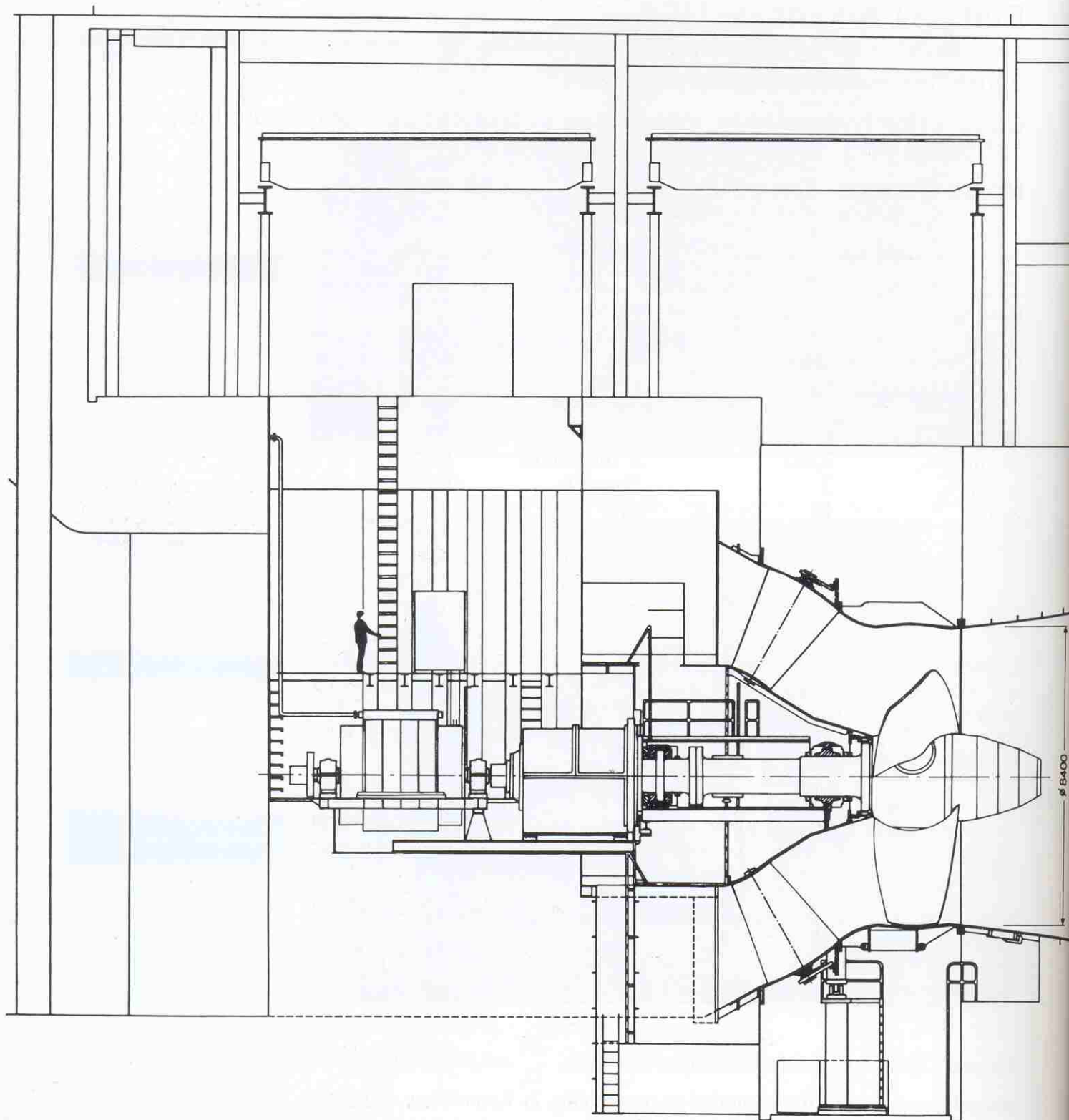
Conception hydraulique

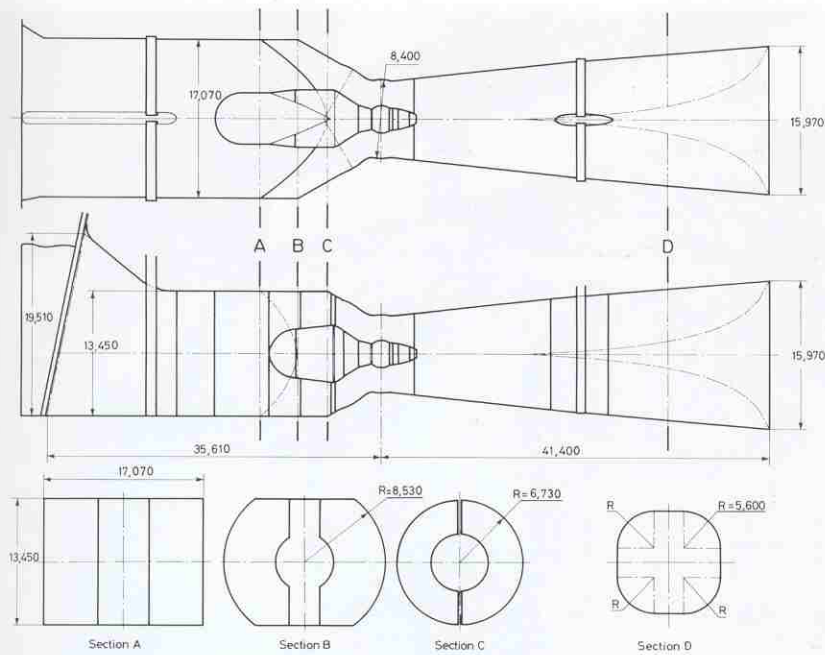
Le bulbe, d'un diamètre maximum de 6,20 m, est encastré en porte-à-faux dans le puits.

Le distributeur conique a un angle de 120°.

La roue Kaplan a un diamètre de moyeu très faible, $\frac{D_i}{D_e} = 0,35$, ce qui entraîne des pales avec un profil très cambré au moyeu (fig. 2). Le manteau de la roue est sphérique.

Le diffuseur comprend un cône d'une longueur de 2 diamètres de roue environ suivi d'une partie dont la section passe progressivement d'un cercle à un carré





1. Profil hydraulique de la turbine (d'après un document Voith).

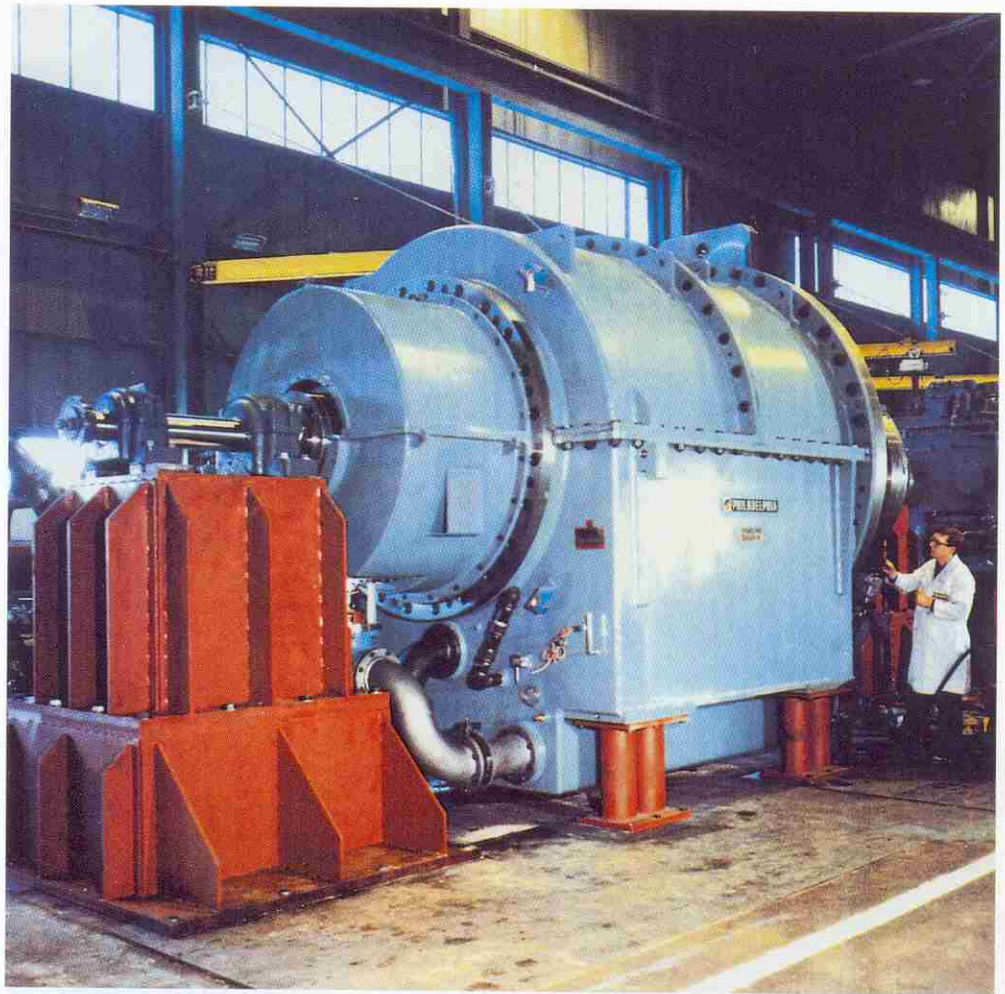


2. Roue au cours de l'essai du mécanisme de commande des pales en ateliers (photo Voith).

de 16 m de côté. Le rapport entre l'aire de la section à la sortie de la roue et celle de la sortie de la machine est ainsi de 4,62.

La trompette du diffuseur comporte un petit pilier central profilé pour limiter la largeur des batardeaux.

3. Multiplicateur planétaire à 2 étages faisant passer la vitesse de rotation de 45 à 450 t/min (photo Voith).



Conception mécanique

Les aubes directrices sont fabriquées à partir de tôles d'acier au carbone et commandées par un système de leviers et de biellettes reliées à un anneau de vannage.

Les paliers des directrices sont sphériques pour absorber les déformations dues à la flexion des longues aubes directrices.

Les pales, d'une masse de 13,3 t sont en acier inoxydable coulé ASTM A 487 CA 6 NM.

Les pales sont boulonnées sur les tourillons, ce qui permet le montage complet et l'essai de la roue en ateliers puis le démontage des pales pour le transport.

Le servomoteur de commande des pales est situé dans le cône de la roue. L'huile est amenée au servomoteur par une série de trous percés dans l'accouplement de la roue.

Le manteau sphérique de la roue est en acier inoxydable dans sa partie supérieure et en acier au carbone dans sa partie inférieure.

Un joint souple est prévu entre le manteau de la roue et le blindage du diffuseur.

Le multiplicateur planétaire a un rapport de 10. Il comporte 2 étages. Les arbres d'entrée et de sortie sont coaxiaux.

Le puits, construit en tôles d'acier, sert de support aux structures du bâtiment; il reprend les efforts mécaniques dus au couple ainsi que ceux dus à la pression de l'eau. Il constitue le cœur de la centrale; une étude par éléments finis a permis d'analyser les contraintes, en tenant compte des divers régimes de fonctionnement de la machine.

- Robert D. Steele. Pit Turbine Technology for Low Head Hydro Projects, Waterpower 87, Proceedings of the International Conference on Hydropower / ASCE Portland, août 1987.

Bibliographie

Centrale de Greifenstein

Province de Basse Autriche, Autriche

9 turbines bulbes à axe horizontal

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

Maschinenfabrik Andritz AG, Graz, Autriche, Sulzer-Escher Wyss SA, Zürich, Suisse, Voest-Alpine MCE GmbH, Linz, Autriche et Voith AG, St. Pölten, Autriche

Maître d'œuvre: Österreichische Donaukraftwerke (DoKW), Vienne, Autriche

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	68,6	106,9	147,6
H (m)	7,00	10,90	15,05
Q (m ³ /s)	350	350	335
P (MW)	20,7	34,5	46,5
D _e (m)	6,500	f (Hz)	50
D _i (m)	2,860	n (t/s; t/min)	1,56; 93,75
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	0,88
z ₀ (-)	18	n _q	292
		v (-)	1,85
		σ _{min} (-)	1,169
		σ _{max} (-)	3,521

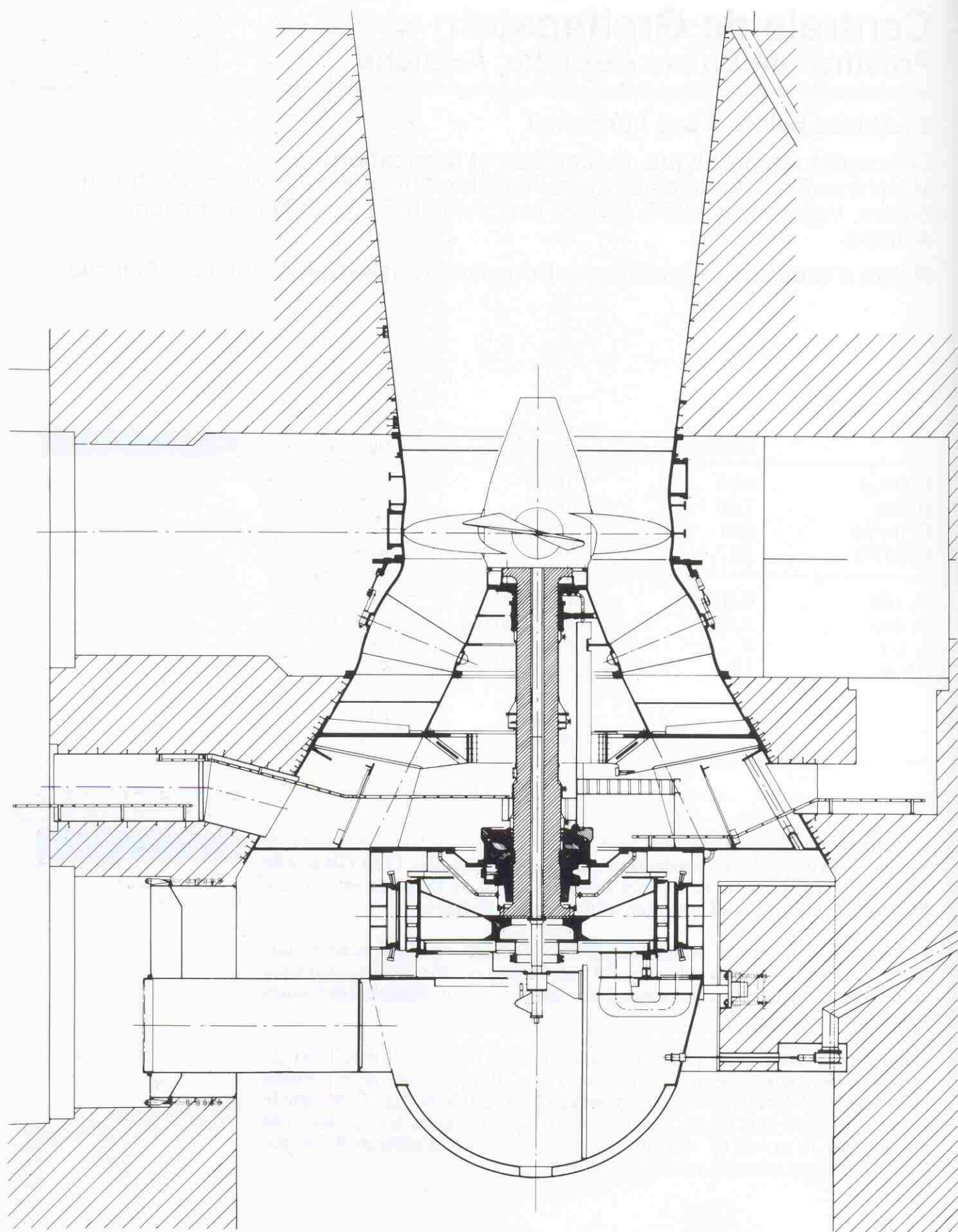
Caractéristiques

La centrale de Greifenstein se trouve sur le Danube à 25 km en amont de Vienne. Prévue pour une production annuelle moyenne de 1720 GWh, elle est la huitième d'une série de onze centrales au fil de l'eau que les Forces Motrices du Danube ont l'intention d'installer sur ce fleuve.

Généralités

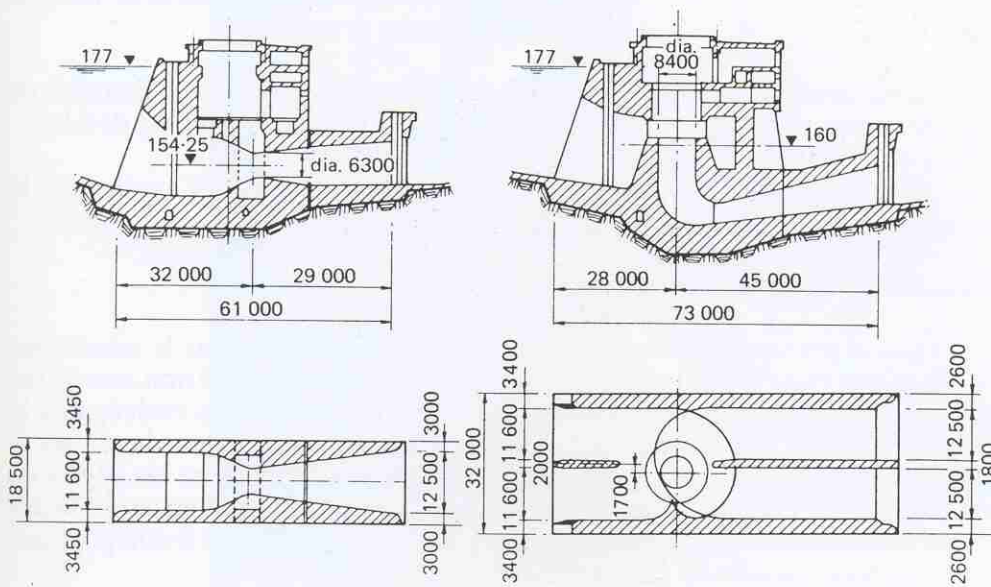
Le bâtiment de la centrale forme une partie du barrage, en rive gauche. Celui-ci comprend en outre deux écluses de 24 m de largeur et 230 m de longueur ainsi qu'un évacuateur de crues, à 6 passes d'une largeur de 24 m, équipées de vannes secteur (fig. 1).

Durant la phase de l'avant-projet, une étude poussée a été menée dans le but de *comparer* les coûts respectifs de deux centrales, l'une équipée de 9 turbines *bulbes* de 34 MW et l'autre de 6 turbines Kaplan de 50 MW (fig. 2). Malgré le nombre d'unités plus élevé, à production d'énergie égale, les résultats ont montré que la première variante permettait un gain d'environ 8,5% sur l'investissement, pour les raisons suivantes:



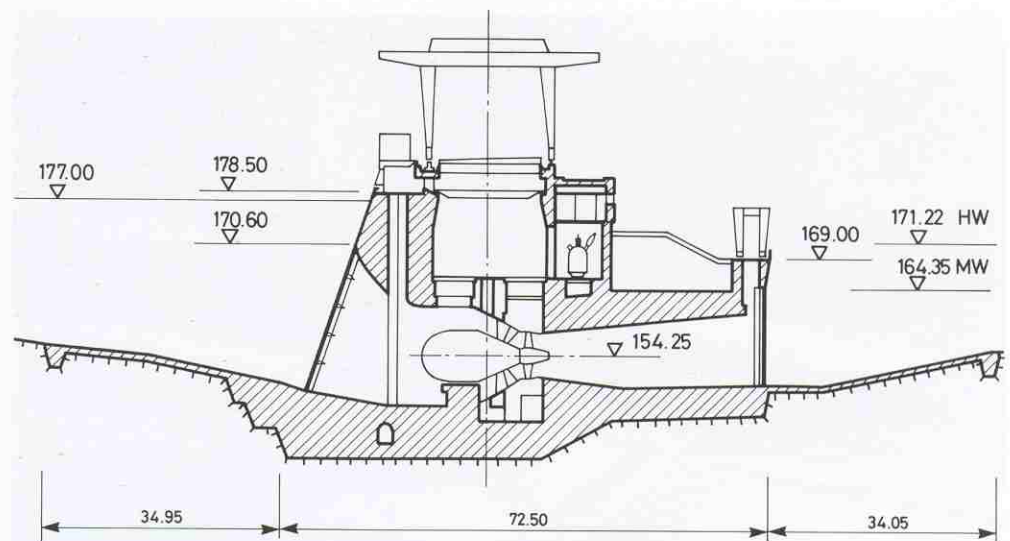


1. Vue d'ensemble du barrage avec la centrale, l'évacuateur de crues et l'écluse (photo DoKW).



2. Comparaison des dimensions de centrales équipées de turbines Kaplan ou bulbes (document Water Power and Dam Construction).

3. Coupe schématique de l'installation (d'après un document Sulzer-Escher Wyss).



- diminution des coûts de génie-civil, grâce au diffuseur droit;
- équipement électro-mécanique et structures métalliques moins coûteux;
- durée de construction réduite.

La figure 3 montre une coupe schématique de l'installation.

La centrale a été mise en service en 1984.

Conception hydraulique

Le canal d'entrée, de section sensiblement carrée, a une hauteur de 14,50 m et une largeur de 13,50 m.

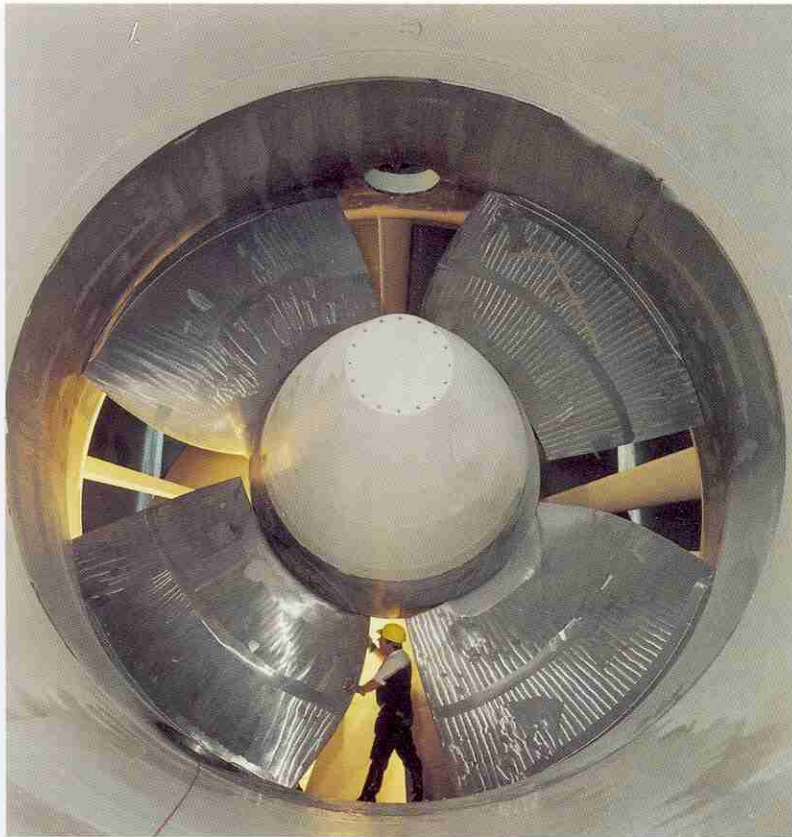
Le bulbe a un diamètre de 8,100 m. Le rapport diamètre bulbe/diamètre roue est donc de 1,25, ce qui est une valeur relativement grande.

Les aubes directrices ont une tendance à la fermeture dans tout le domaine de fonctionnement. L'angle d'ouverture maximum du distributeur est de 81°.

Les pales de la roue ont des lèvres anticavitation sur les 3/4 environ de la longueur du profil extérieur (fig. 4).

Le manteau de la roue est sphérique.

Des essais comparatifs sur modèle réduit ont été exécutés dans le laboratoire Aströ à Graz (fig. 5) à l'aide de 3 modèles d'un diamètre de 340 mm dans le but de choisir le concepteur parmi les 3 pressentis. La chute d'essai était égale à la chute prototype. La cavitation a été examinée soigneusement dans tout le domaine de fonctionnement. En effet, les garanties concernant les dégâts de cavitation étaient très serrées: la surface érodée ne devait pas dépasser 5% des surfaces concernées et la profondeur maximale tolérée était de 3 mm pour une durée de fonctionnement de 10 000 h.



4. Roue vue depuis le diffuseur. On distingue les lèvres anticavitation ainsi que les deux trous d'homme (photo Sulzer-Escher Wyss).



5. Essai d'un bulbe sur la plate-forme d'essai du laboratoire Aströ (photo Aströ).

6. Distributeur. On distingue les paliers intérieurs, sphériques et autolubrifiés (photo Andritz).



Conception mécanique

Les efforts du bulbe sont transmis au bâtiment par deux piliers centraux, l'un inférieur et l'autre supérieur, situé légèrement en avant du palier-butée du générateur.

Les 18 aubes directrices, d'une hauteur de 2237 mm, sont exécutées en construction mécano-soudées. Leurs paliers intérieurs et extérieurs sont autolubrifiés. L'ouverture est commandée par deux servomoteurs qui agissent par l'intermédiaire d'un cercle de vannage, de biellettes et de leviers. Afin d'éviter des dommages sur une aube directrice dus à un corps étranger coincé et de permettre, malgré tout, la fermeture du distributeur dans ce cas, une aube sur deux est protégée par un cylindre hydraulique. La fermeture se fait par l'action du couple hydraulique sur les aubes.

Le manteau de la roue est en 4 parties matricées, boulonnées et recouvertes d'une tôle en acier inoxydable. Il est équipé de deux trous d'homme de 800 mm de diamètre, l'un supérieur, l'autre inférieur.

Les pales ainsi que leurs tourillons rapportés sont en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4. Les joints d'étanchéité sont interchangeables sans démontage des aubes. La masse totale de la roue est de 71 t (sans huile).

L'arbre, en acier forgé CK 35, a un diamètre de 1150 mm. Il est creux pour permettre l'alimentation en huile du servomoteur de commande des aubes, qui se trouve dans le moyeu. Il est supporté par un palier lisse côté roue, et un palier combiné avec la butée juste en avant du générateur, tous lubrifiés à l'huile sous pression. L'huile est pompée du réservoir principal à un réservoir supérieur qui alimente directement les paliers. Sa dimension est suffisante pour assurer la lubrification durant le temps d'un arrêt d'urgence provoqué par une panne de la pompe. En phase de démarrage et d'arrêt, une lubrification additionnelle se fait par une pompe à haute pression. En cas d'arrêt de la turbine, la poussée inverse qui peut se produire est également reprise par la butée.

Le montage du générateur se fait par un puits situé à l'amont du bulbe.

La turbine est équipée d'un double système d'arrêt d'urgence, l'un déclenchant pour une survitesse de 158% et l'autre pour une survitesse de 163%.

- G. Wedam and P. Gruss. Low head hydro on the austrian Danube. Water Power and Dam Construction, november 1986.

Bibliographie

Centrale de Crestuma

District de Porto, Portugal

3 turbines bulbes de 43 MW

Conception hydraulique et mécanique: Neyrpic, Grenoble, France

Fabrication: Neyrpic, Grenoble, Sorefame, Amadora, Portugal

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

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	63,74	100,52	120,62
H (m)	6,50	10,25	12,30
Q (m ³ /s)	393,0	423,0	378,8
P (MW)	21,4	39,0	43,0
D _e (m)	6,800	f (Hz)	50
D _i (m)	2,830	n (t/s; t/min)	1,39; 83,3
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	0,90
z _o (-)	24	n _q	299
z _{avd} (-)	6	v (-)	1,90
		σ _{min} (-)	1,74
		σ _{max} (-)	3,72

Caractéristiques

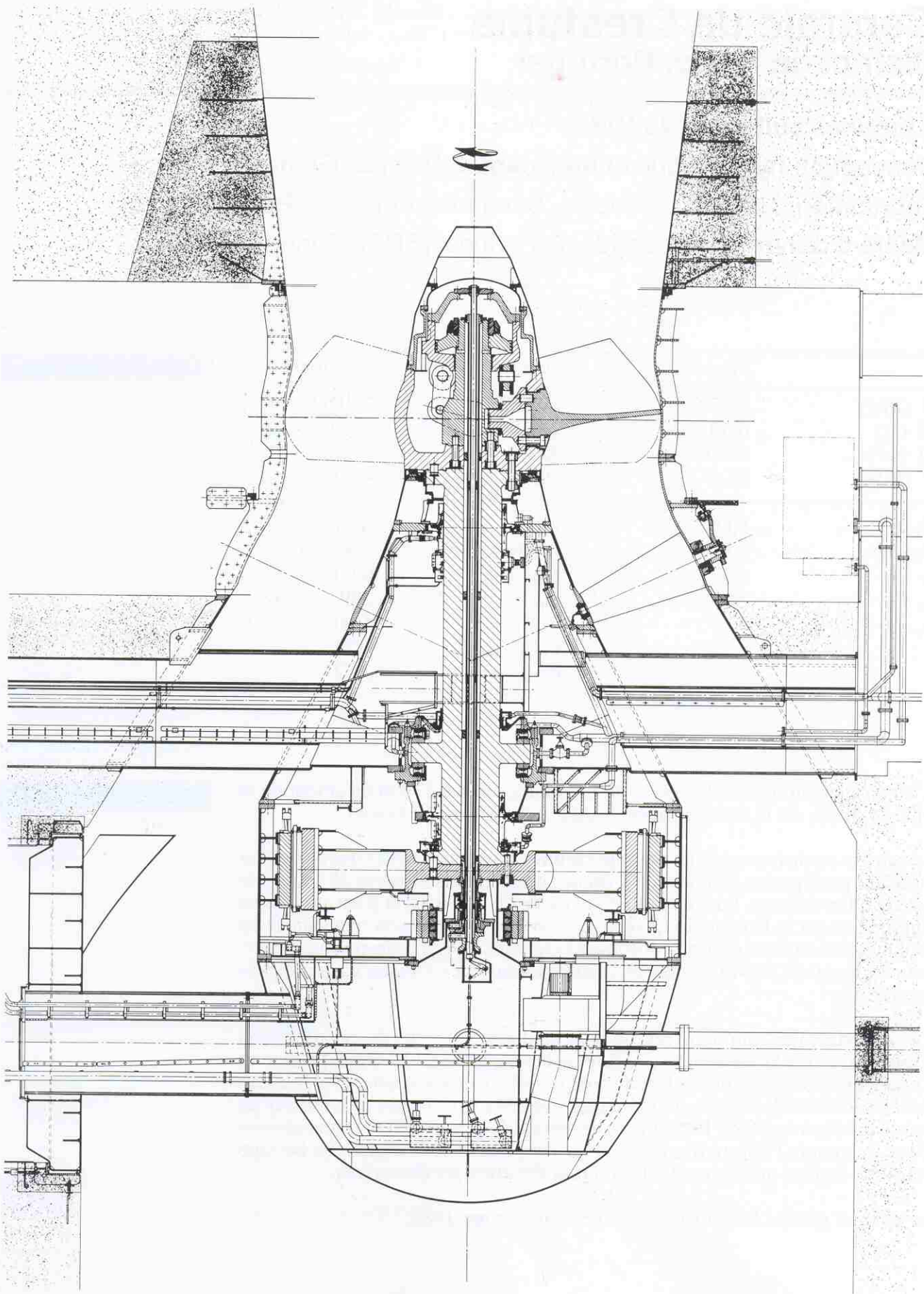
L'aménagement hydro-électrique de Crestuma, situé à 13 km en amont de la ville de Porto, est le dernier palier avant l'embouchure du Douro.

Généralités

Le barrage est du type mobile; il comporte un évacuateur de crues très important constitué par 8 passes équipées de 8 vannes wagon à double corps de 13,5 m de haut et 28 m de large. La crue millénaire est de 26 000 m³/s et n'est atteinte en Europe que par le Dniepr et la Volga. La centrale est située en rive gauche en prolongation du barrage. Deux portiques extérieurs de 125 t chacun sont prévus pour le montage des machines et la manutention des vannes wagon et des batardeaux.

Cet aménagement, qui a été réalisé avec le double objectif de la production d'énergie et de la navigation, assure une voie navigable entre la mer et l'intérieur du pays, jusqu'à la frontière espagnole. Il crée en outre un plan d'eau pour les loisirs et les sports, d'autant plus intéressant qu'il est à proximité d'un centre urbain important. Par ailleurs, la retenue a permis de créer une réserve d'eau qui assure l'approvisionnement en eau potable de la région. Le barrage constitue en plus une nouvelle liaison routière entre les deux rives.

Le premier groupe a été mis en service en décembre 1985.



Conception hydraulique

Le canal d'entrée a une section rectangulaire de 21,8 m de hauteur et de 14,0 m de largeur, divisé en 2 parties par une paroi munie de rainures pour les batardeaux.

Le bulbe a un diamètre de 7,600 m. On obtient ainsi un rapport diamètre bulbe/diamètre roue de 1,12, ce qui est une valeur assez faible.

Le bulbe est fixé aux structures de la centrale par des liaisons relativement fines et favorables du point de vue hydraulique:

- 6 avant-directrices (fig. 1) assez minces, dont 2 verticales plus épaisses permettent l'accès au bulbe et le passage des tuyauteries;
- 3 tubes de faible section et un puits d'accès à l'amont.

Le manteau de la roue est sphérique.

Le diffuseur a une partie conique d'une longueur de 4,7 diamètres de roue puis une partie passant d'une section circulaire à une section carrée d'une longueur de 1,1 diamètre de roue. Les dimensions de la section de sortie sont de 12,9 m par 12,9 m.

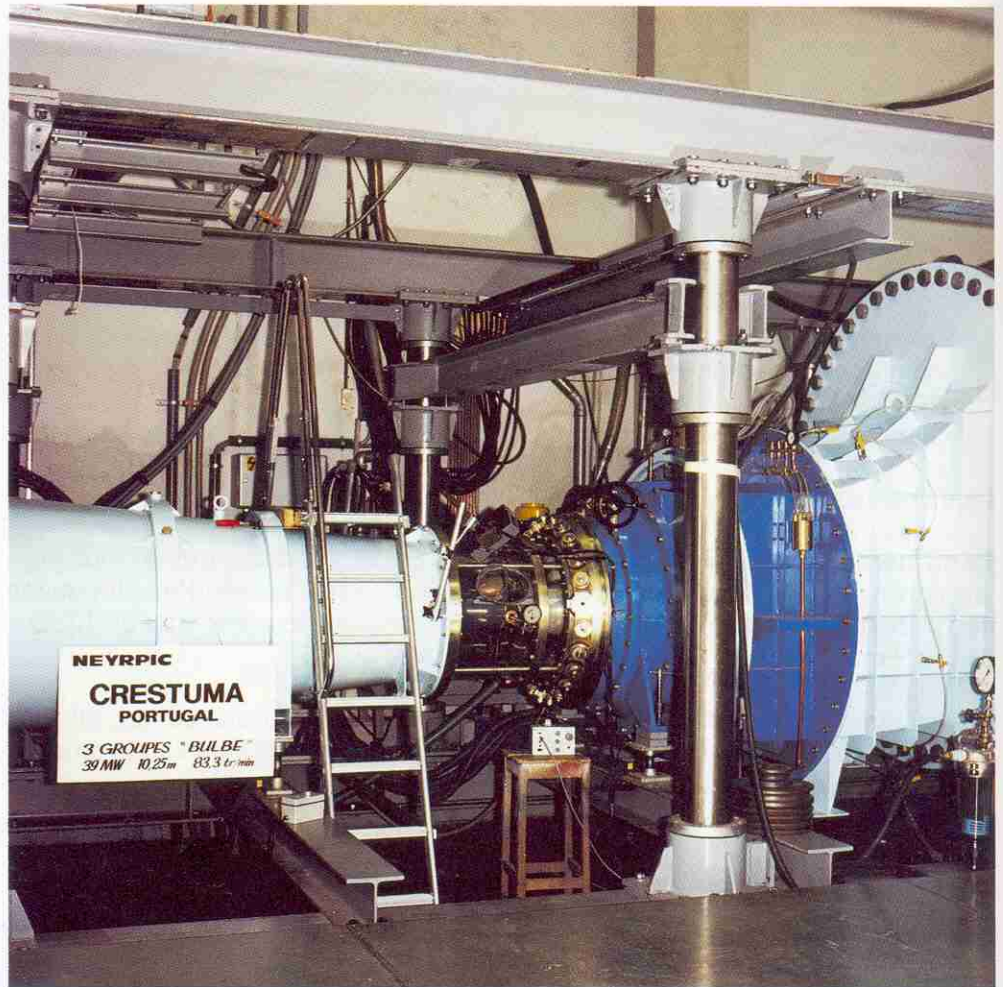
La machine est prévue pour fonctionner en déchargeur. Dans ce but, elle est équipée d'une vanne aval située à 20 m de l'axe de la roue. Cette vanne protège, en outre la turbine contre l'emballement.

Les essais de réception officiels sur modèle réduit ont été effectués dans le laboratoire de l'IMHEF, avec un modèle (fig. 2) d'un diamètre $D_e = 517,6$ mm et sous une chute d'environ 2 m.



1. Avant-distributeur en deux parties comprenant 2 avant-directrices et un puits vertical (photo Neyrpic).

2. Modèle d'essai sur la plate-forme de l'IMHEF ($D_e = 517,6 \text{ mm}$) (photo IMHEF).

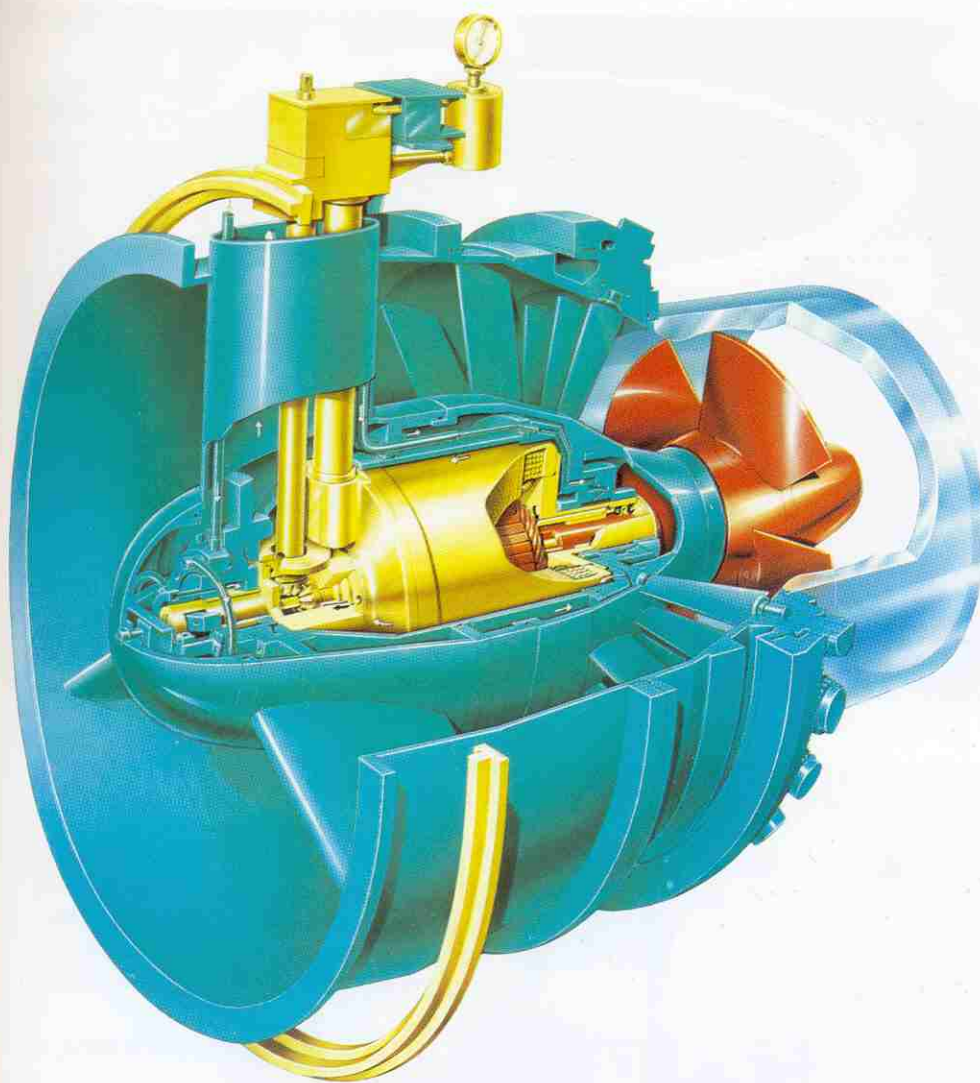


La puissance fournie par la roue est transmise à une génératrice asynchrone montée en pendule à l'intérieur du bulbe (fig. 3). Le couple est mesuré par un capteur de force monté à l'extrémité d'un bras oscillant. Ce système présente l'avantage de respecter le profil hydraulique de la turbine, contrairement au système à renvoi d'angle qui nécessite un surdimensionnement notable des puits d'accès verticaux du bulbe pour permettre le passage des arbres de transmission de la puissance. Il faut toutefois remarquer que la puissance de la génératrice intérieure est limitée à 30 kW.

Le programme d'essai comportait les mesures complètes de puissance, de rendement, de cavitation et d'emballement.

Conception mécanique

L'ensemble turbo-alternateur est supporté par un appui unique constitué par l'avant-distributeur (fig. 1). Il soutient, à l'aval, le distributeur mobile et le cône support du palier turbine. A l'amont, il supporte le stator de l'alternateur, le croisillon support des alvéoles, la cloison de fermeture de l'enceinte alternateur et l'ogive. Dans sa partie centrale, l'avant-distributeur comporte un anneau de grande rigidité dans lequel est logé l'ensemble butée-contrebutée et le palier de l'alternateur.



3. Vue éclatée du système de mesure du couple; on distingue, en jaune, le générateur à stator oscillant et le bras de transmission du couple (document Neyrpic).

Les appuis secondaires sont constitués par le puits vertical d'accès à l'intérieur de l'ogive amont, deux stabilisateurs latéraux et un pilier inférieur; ils ont pour seul but d'augmenter les fréquences propres des vibrations latérales de la structure porteuse. La rigidité axiale de cet appui est déterminée de manière à diminuer les contraintes thermiques engendrées par les variations de température du stator de l'alternateur, réduisant ainsi les efforts appliqués au béton aux seuls forces d'origine hydraulique. On évite ainsi les joints de dilatation, d'une réalisation toujours délicate.

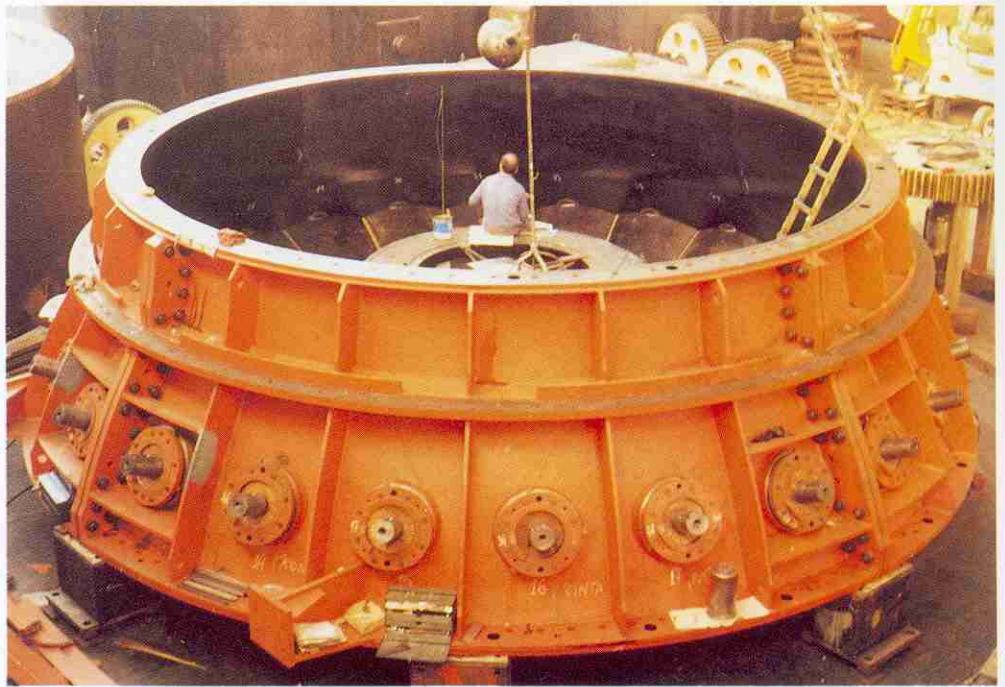
L'avant-distributeur assure également la fermeture aval de l'enceinte de l'alternateur.

Le distributeur (fig. 4) a une commande classique avec des tiges de rupture en traction.

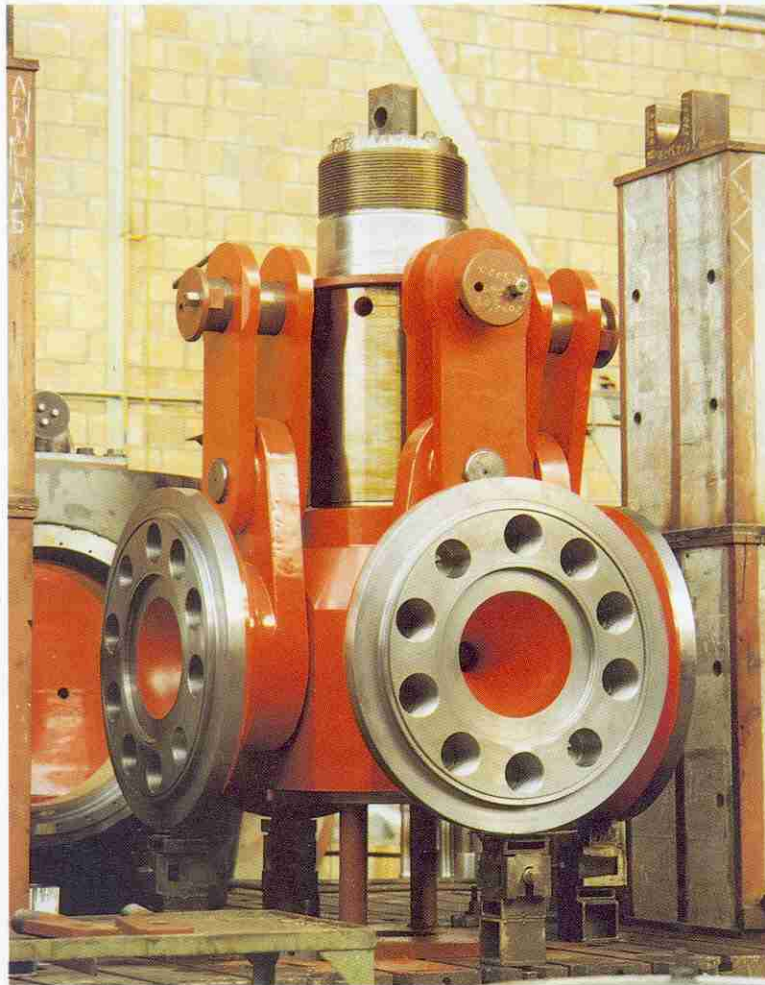
Les pales de la roue sont en acier coulé inoxydable 17 Cr - 1 Ni.

Le servomoteur des pales est situé à l'intérieur du cône de la roue. Le cylindre mobile entraîne des biellettes qui agissent sur les leviers des pales (fig. 5).

4. Distributeur avec ses 24 aubes directrices en position fermée (photo Neyrpic).



5. Plateau de fixation des pales avec les leviers et les biellettes de commande des aubes. On distingue au sommet le filetage sur lequel vient se visser l'écrou de fixation du piston du servomoteur (photo Neyrpic).



Le manteau de la roue est en acier inoxydable 18 Cr - 10 Ni.

Un arbre unique reposant sur deux paliers relie les rotors de l'alternateur et de la turbine, qui sont ainsi tous deux en porte-à-faux. Cette conception de structure porteuse centrale combinée avec l'arbre unique permet:

- au constructeur de la turbine d'assumer à lui seul la responsabilité de la conception de la ligne d'arbre;
- de localiser la reprise des efforts par la structure en béton dans une tranche unique de la centrale;
- de réduire sensiblement les délais de montage puisque, après scellement de l'avant-distributeur et mise en place de l'ensemble arbre-butées - paliers, on monte simultanément, à l'amont l'alternateur et l'ogive, et à l'aval le distributeur, la roue et le manteau;
- d'assurer une meilleure répartition des charges entre les deux paliers, qui sont identiques.

L'accès aux organes vitaux de la machine est facile et rend la maintenance aisée:

- deux aubes avant-directrices creuses permettent d'accéder aux paliers, à la butée et aux joints huile-air d'isolation des enceintes pressurisées;
- le puits d'accès amont, traversant le couvercle de démontage de l'alternateur permet d'accéder aux alvéoles d'alimentation d'huile du servomoteur de commande des pales, à l'excitatrice, au système de freinage, et de démonter les pôles du rotor alternateur et les enroulements statoriques; la sortie des barres s'effectue dans un compartiment du puits réservé à cet effet;
- le joint d'arbre est accessible de l'intérieur du conduit hydraulique;
- la disposition du servomoteur de commande des pales dans la roue permet le démontage des tubes d'alimentation en huile sans toucher à la ligne d'arbre; le système de commande est visible sur la figure 5.

L'accès aux pales est obtenu par démontage du demi-manteau supérieur.

Un couvercle autoclave de 8,9 m x 6,2 m permet le montage de l'alternateur, le couvercle étant stocké à l'intérieur du conduit hydraulique.

- Albert Sauron. Les grandes installations hydro-électriques récentes au Portugal. Revue technique Neyrpic N° 5, 1986, p. 103-109.

Bibliographie

Centrale de St-Mary

Province de l'Ontario, Canada

3 turbines bulbes de 18 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Voith Hydro Inc., York, USA

Maître d'œuvre: Great Lakes Power Ltd., Sault Ste-Marie, Canada

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	52,0	55,9	60,8
H (m)	5,30	5,70	6,20
Q (m ³ /s)	360	352	325
P (MW)	17,0	18,0	18,5
D _e (m)	7,100	f (Hz)	60
D _i (m)	3,039	n (t/s; t/min)	1,07; 64,3
D _o (m)	6,680	N _{QE} (-)	0,98
z _r (-)	3	n _q	327
z _o (-)	16	v (-)	2,07
		σ _{min} (-)	2,80
		σ _{max} (-)	3,28

Caractéristiques

La centrale de St-Mary, située entre les lacs Supérieur et Huron, est équipée de 3 turbines bulbes. Mise en service en août 1982, elle est l'une des premières centrales bulbes de grande puissance installée en Amérique du Nord, après que l'augmentation des prix de l'énergie ait rendu les sites basses chutes compétitifs.

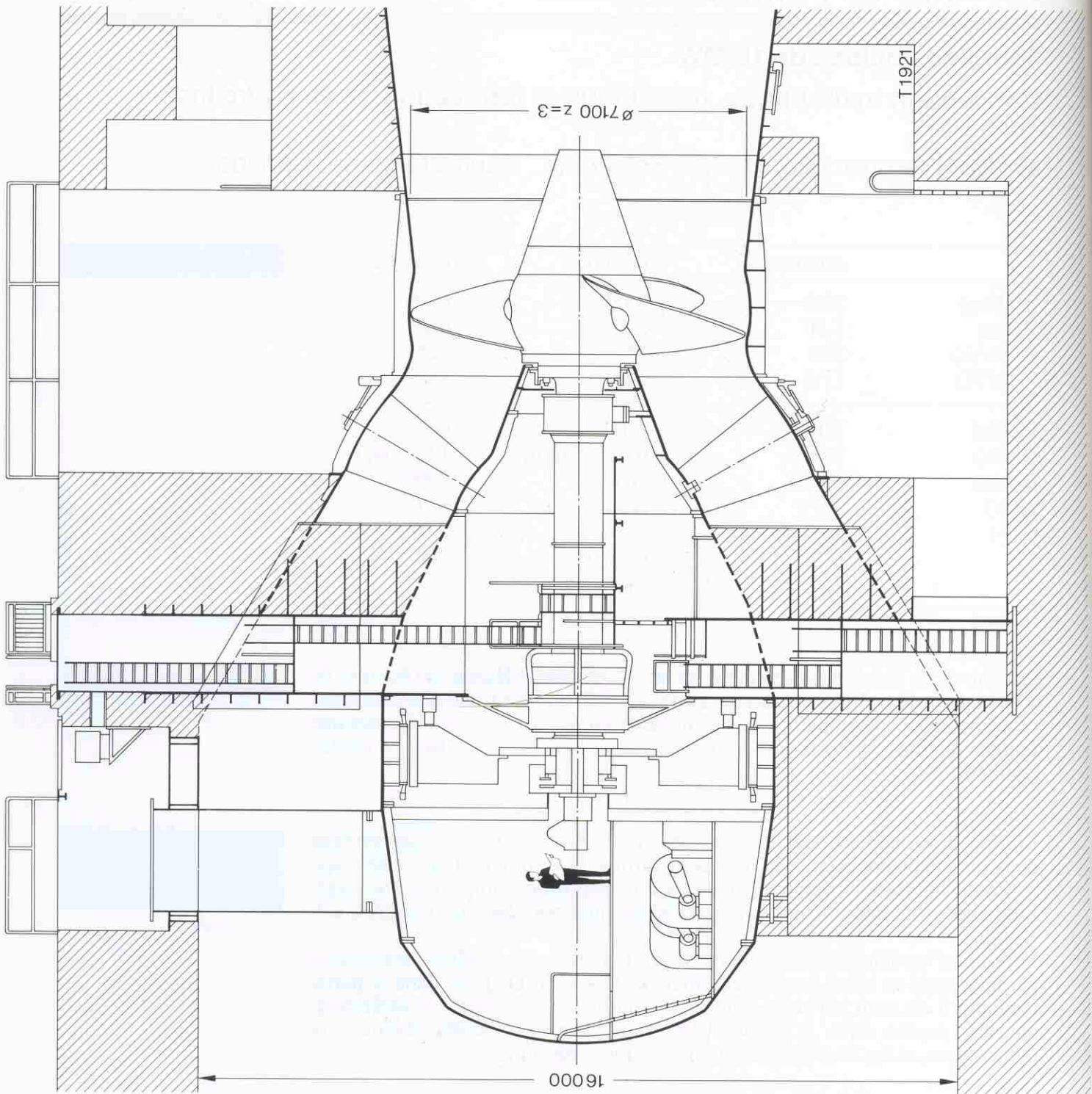
Généralités

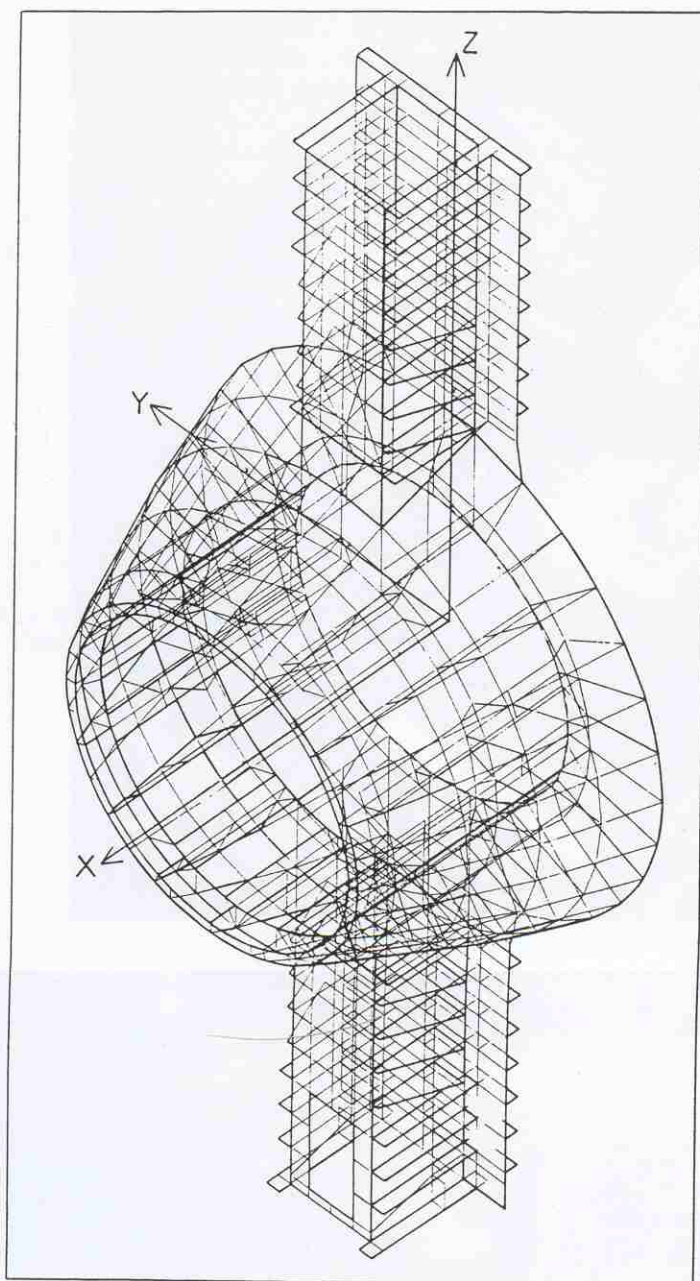
L'arbre, d'un diamètre de 900 mm en acier forgé ASTM A 668, est supporté par deux paliers disposés entre la roue de la turbine et le rotor de l'alternateur qui sont ainsi tous les deux en porte à faux. Cette disposition simplifie le montage. Les paliers sont montés sur des portées sphériques pour faciliter l'alignement.

Conception hydraulique et mécanique

Le bulbe, d'un diamètre de 8,250 m et d'une longueur de 16,780 m, est supporté par un massif en béton sur presque toute sa longueur. De plus, dans sa partie conique, il est tenu par deux colonnes métalliques, supérieure et inférieure, creuses, noyées dans le béton. Elles reprennent les efforts statiques et dynamiques, et les transmettent aux fondations (fig. 1).

Les aubes directrices sont rechargées avec de l'acier inoxydable sur les lignes de contact en position fermée. Les tourillons tournent dans des paliers auto-lubrifiés sphériques, et non pas cylindriques, afin de rattraper les inégalités d'usinage et d'améliorer l'étanchéité en position fermée. Ils sont protégés des attaques de l'eau par des joints spéciaux. L'ouverture et la fermeture sont





1. Modèle pour le calcul du cône aval du bulbe avec ses 2 colonnes d'ancrage (d'après J.A. O'Hara).

commandées par un cercle de vannage, lui-même actionné par deux servomoteurs à double action, fixés contre la paroi. Une aube sur deux est reliée à cet anneau par un vérin hydraulique (fig. 2). Si un obstacle vient empêcher la fermeture d'une des aubes directrices, ce vérin agit comme organe de sécurité évitant ainsi la déformation ou la rupture d'une aube.

Le moyeu de la roue est en acier coulé, les 3 aubes en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni sont munies de lèvres anticavitation (fig. 3). Les aubes ont la particularité d'être boulonnées sur leurs tourillons de manière à être facilement démontables. En effet, durant la période de mise en service et par la suite lors des ré-

2. Mise en place du moyeu de la roue et système de commande des aubes avant-directrices (photo Voith).



3. La roue à trois pales, équipée de lèvres anti-cavitation (photo Voith).



visions, les machines doivent assurer le passage de très grands débits. En démontant les aubes et en surouvrant le distributeur, on arrive à évacuer $600 \text{ m}^3/\text{s}$ par groupe, alors que le débit nominal est de $350 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le servomoteur est logé dans le moyeu de la roue. Le cylindre a un diamètre de 1200 mm. La rotation des pales est possible sur une grande amplitude, de $+ 34^\circ$ à $- 10^\circ$. On arrive ainsi à éviter que la roue ne tourne sous l'effet des fuites du distributeur.

Le manteau, rechargé avec de l'acier inoxydable au droit de la roue, est sphérique et divisé horizontalement en deux parties. Le jeu est de 3 à 6 mm, ce qui nécessite que cette pièce résiste aux déplacements dus aux contraintes thermiques et hydrauliques. Un joint torique de 25 mm de diamètre sépare le manteau du blindage du diffuseur.

- C. Baldwin, R. Seifarth. The bulb turbines for the St.Mary's redevelopment project highlights of design, manufacture and installation.
- J.A. O'Hara. Bulb units for St-Mary's redevelopment project. Great lakes power, Sault St.Marie, Ontario, Canada.

Bibliographie

Centrale de Greenup Lock and Dam

Etat de l'Ohio, USA

3 turbines bulbes de 25 MW

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

Construction du bâti de la centrale: GEC Alsthom, St-Nazaire, France

Maître d'œuvre: Utilities Commission, Vanceburg, USA

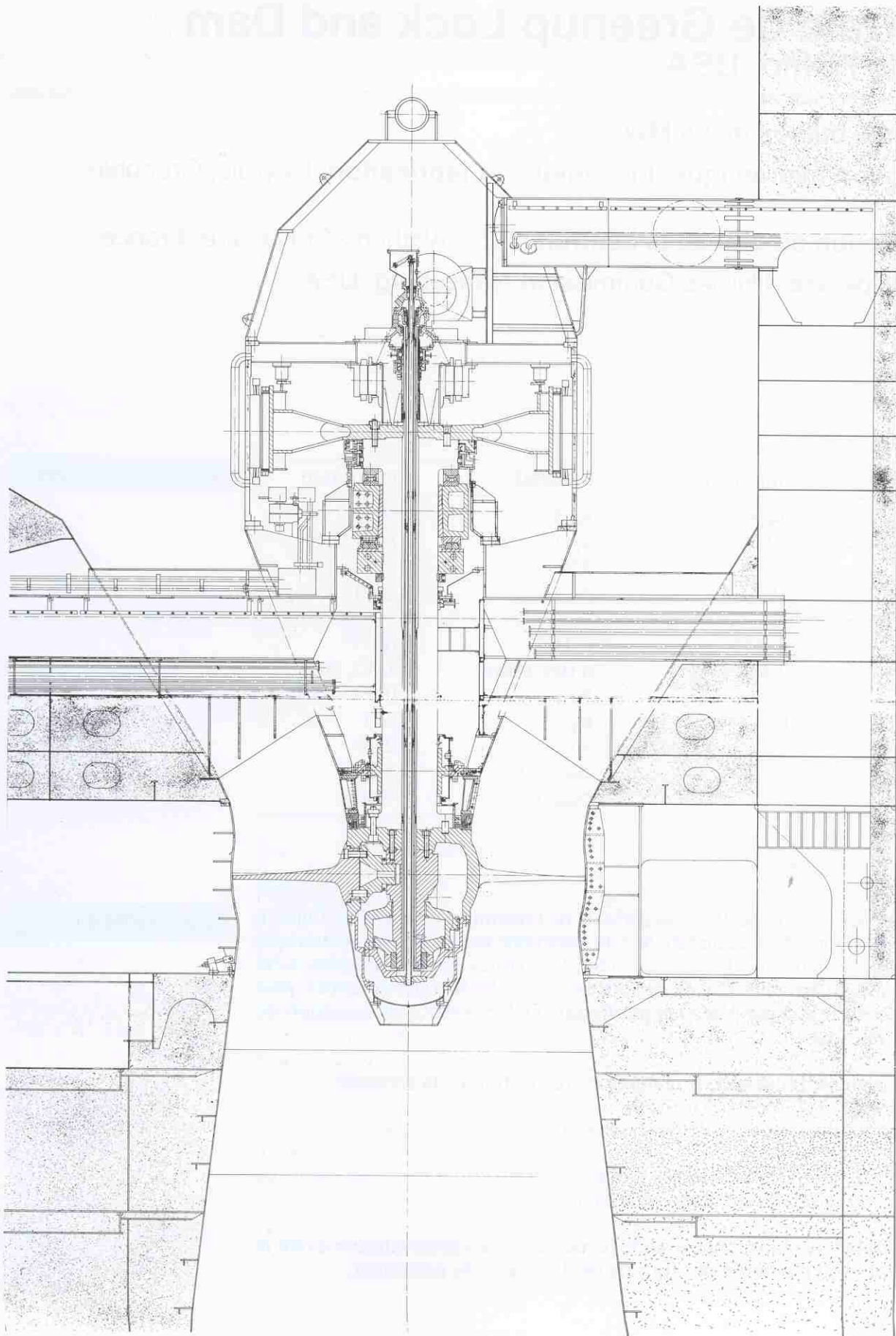
	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	44,8	82,5	88,2
H (m)	4,57	8,41	8,99
Q (m ³ /s)	295	329	315
P (MW)	10,6	24,3	25,0
D _e (m)	6,100	f (Hz)	60
D _i (m)	2,440	n (t/s; t/min)	1,50; 90,0
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	0,99
z _o (-)	6	n _q	331
		v (-)	2,10
		σ _{min} (-)	1,68
		σ _{max} (-)	4,40

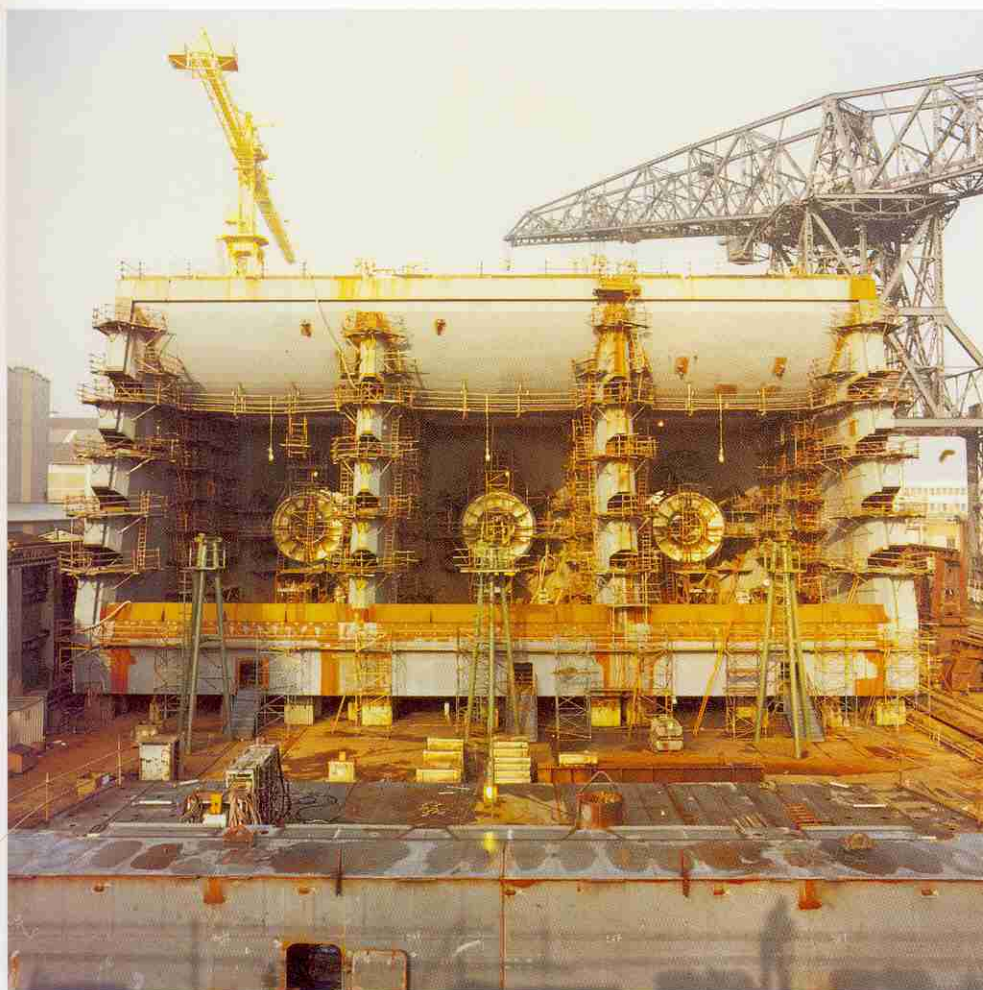
Caractéristiques

Mise en service à la fin de 1982, la centrale de Greenup, sur la rivière Ohio, à 200 km en amont de Cincinnati, est la première centrale hydroélectrique «préfabriquée» du monde. La structure (fig. 1), en tôles épaisses soudées, a été réalisée par les Chantiers navals de l'Atlantique, à St-Nazaire (France), puis transportée sur le site par bateau et par flottaison. Les avantages essentiels de cette solution sont:

Généralités

- une importante réduction de la durée de réalisation de la centrale;
- une diminution du risque de dépassement des coûts du génie civil;
- la simplification des problèmes de coordination entre les divers corps de métiers, en raison du montage en ateliers;
- la possibilité de réaliser une grande partie des essais préliminaires avant le transport, d'où réduction des frais de déplacement du personnel.





1. Vue de la centrale depuis l'amont en montage à St-Nazaire (photo Neyrpic)

La structure métallique d'une longueur de 54,5 m, d'une largeur de 44 m et d'une hauteur de 23,2 m a une masse de 4000 tonnes. Incorporée dans le barrage existant, elle doit satisfaire aux mêmes conditions de stabilité, de renversement et de glissement que ce barrage. Ces conditions sont obtenues par coulage de béton à l'intérieur de la structure, dans des volumes prévus à cet effet (fig. 2).

Un voyage océanique de 8000 km et fluvial de 2600 km a été nécessaire pour atteindre, depuis St-Nazaire, le site de Greenup. Pour le voyage océanique, la centrale a été transportée sur un navire semi-submersible. Pour le voyage fluvial, la centrale a été remorquée, en tenant compte des contraintes rencontrées sur le Mississippi et l'Ohio:

- tirant d'eau limité imposant la réalisation de volumes temporaires de flottabilité;
- limitation à 23,2 m de la hauteur de la structure, pour permettre le passage sous les ponts les plus bas; la tour d'accès a dû être fixée sur le côté de la centrale pour satisfaire à cette condition;

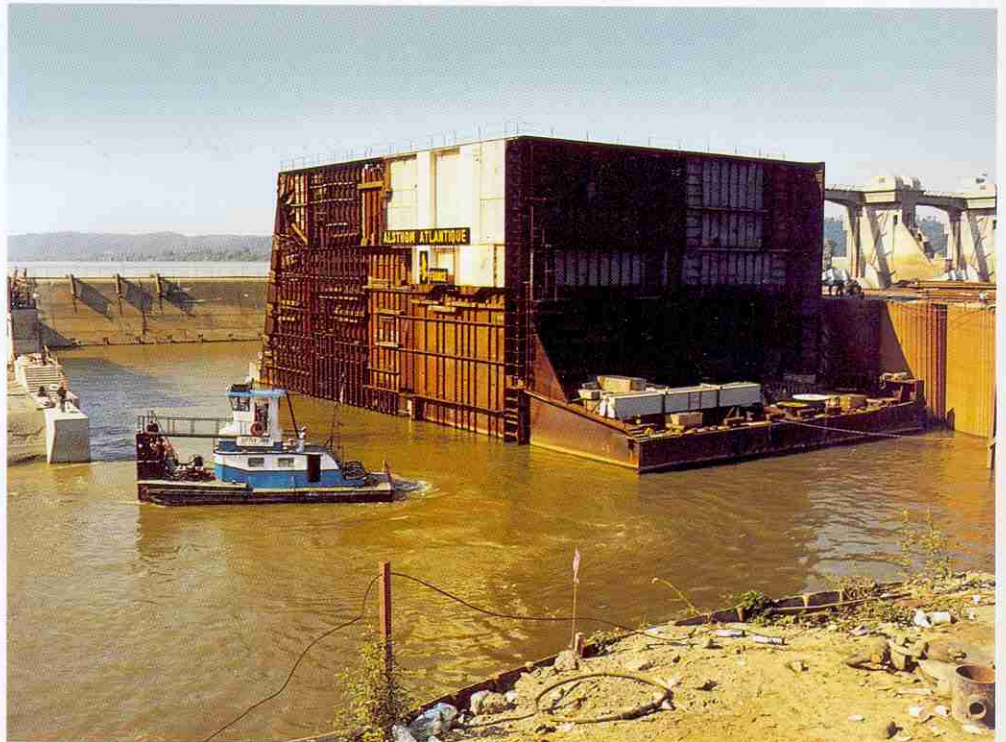
Transport

Centrale de Greenup Lock and Dam, USA

2. Centrale en cours de bétonnage sur le chantier (photo Neyrpic)



3. L'élément de bâti préfabriqué pour deux groupes, sur le site (photo Neyrpic)



- séparation de la centrale en deux éléments afin de permettre le franchissement sur l'Ohio de 10 écluses d'une largeur de 33 m.



4. La roue vue depuis le diffuseur (photo Neyrpic)

Les trois groupes disposés en chambre d'eau comportent un distributeur fixe et une roue réglable. Le choix de cette disposition, rendu possible par les conditions d'exploitation, a permis de réduire sensiblement le coût de l'équipement électro-mécanique.

Les parties tournantes reposent sur deux paliers situés entre le rotor de l'alternateur et la roue qui se trouvent donc tous les deux en porte-à-faux sur un arbre unique. La butée et la contre-butée, qui supportent les efforts axiaux, sont situées de part et d'autre du palier alternateur.

Le concept d'appui unique passant par l'avant-distributeur est indispensable pour la liaison entre le groupe et la centrale. En effet, l'avant-distributeur constitue un point d'articulation autour duquel il est prévu que la centrale se déforme, soit pendant la flottaison, soit pendant l'immersion ou le bétonnage, sans que soient affectées les capacités de bon fonctionnement des groupes. Les appuis secondaires sont constitués par deux bras horizontaux et un pilier inférieur au droit de l'ogive amont. Ils n'ont d'autre but que d'assurer une meilleure tenue aux sollicitations vibratoires en augmentant les fréquences propres des modes de vibration autour de l'avant-distributeur.

La vanne aval, d'un diamètre de 8,5 m, constitue l'organe de sécurité principal. Elle est directement contrôlée par le système de régulation et assure principalement les fonctions suivantes:

- participation au couplage sur le réseau;
- protection contre les survitesses élevées;
- marche en déchargeur.

La figure 4 montre la roue vue depuis le diffuseur.

Groupes bulbes

Bibliographie

- J. Le Tutour. Une centrale hydroélectrique construite dans un chantier naval. Nouveautés Techniques Maritimes, 1980.
- J. Le Tutour et J. Bosc. Une centrale hydro-électrique construite dans un chantier naval. Revue technique Neyrpic No 2, 1983, p. 103 - 113.

Centrale de Racine

Etat de l'Ohio, USA

2 turbines bulbes de 25 MW

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

Maître d'œuvre: Ohio Power Company, USA

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	17,95	61,10	68,65
H (m)	1,83	6,23	7,01
Q (m ³ /s)	291,5	443,5	386,1
P (MW)	3,0	24,6	24,6
D _e (m)	7,700	f (Hz)	60
D _i (m)	3,388	n (t/s; t/min)	1,04; 62,1
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	1,00
z _o (-)	18	n _q	332
		v (-)	2,10
		σ _{min} (-)	2,25
		σ _{max} (-)	13,13

Caractéristiques

La centrale de Racine se trouve sur le fleuve Ohio, à 65 km au nord de Charleston. Au moment de leur mise en service, en 1982, ses turbines bulbes étaient les plus grandes du monde. La conception de la centrale a été fortement influencée par celle de certaines centrales installées sur le Danube.

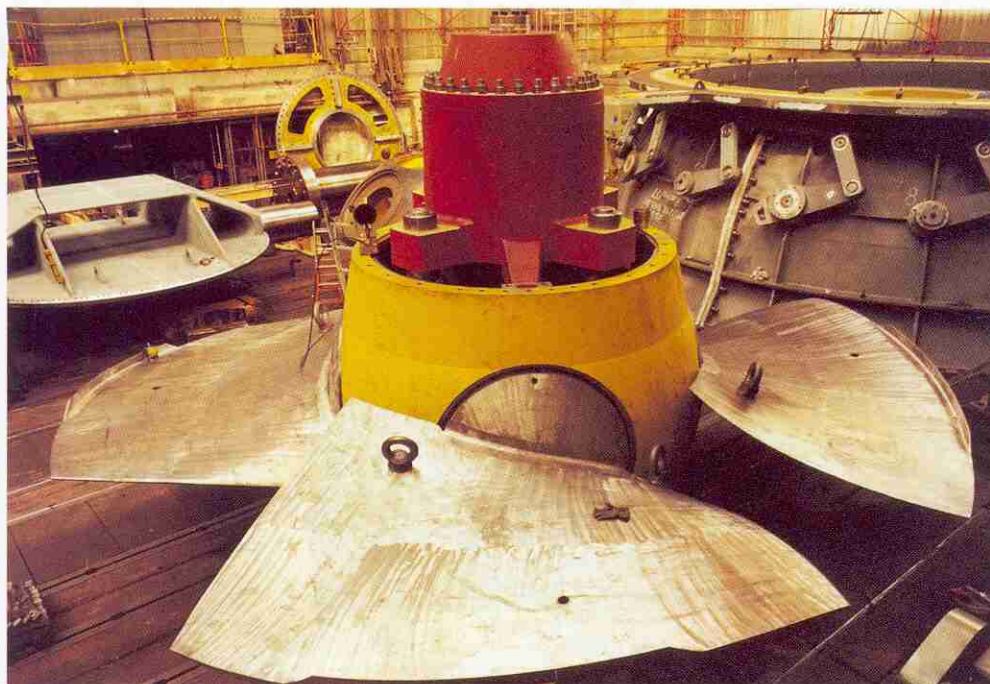
Généralités

Les turbines bulbes de la centrale de Racine ont été projetées pour utiliser une chute variant entre 1,8 et 7,01 m. Elles développent leur puissance maximale limitée à 24,6 MW sous des chutes de 6,2 à 7,01 m, tandis que le débit maximal par turbine, fixé à 474,4 m³/s, est absorbé sous 4,36 m de chute. Le diamètre du bulbe contenant l'alternateur est de 8,640 m, alors que la longueur projetée depuis la grille d'entrée jusqu'à la sortie de l'aspirateur est de 63 m. Le manteau de la roue est sphérique et les aubes sont munies de lèvres anticavitation.

Conception hydraulique

Le distributeur comprend 18 aubes directrices en tôles d'acier soudées pivotant entre les surfaces sphériques de deux anneaux coniques tous deux en construction soudée. Les aubes sont manoeuvrées par un cercle de vannage mû lui-même par deux servomoteurs ancrés dans le sol de la fosse. Tous les paliers sont autolubrifiants. Une aube sur deux est munie d'une bielle de rupture,

Conception mécanique



1. La roue équipée de lèvres anticavitation (photo EWZ)

avec un système de surveillance à air comprimé qui déclenche une alarme le cas échéant. Un levier limite le débattement de l'aube folle dans ce cas.

La roue (fig. 1) a 4 pales en acier inoxydable, coulées d'une pièce avec leurs tourillons. Elles sont manoeuvrées par un dispositif placé dans la pointe du moyeu.

L'arbre a deux paliers porteurs, dont l'un est situé tout près de la roue motrice et l'autre, combiné avec le pivot, est placé au centre de l'alternateur. Avec ses deux brides, il est forgé d'un bloc.

Le manteau de la roue est en construction soudée, fortement nervurée à l'extérieur. Il est en deux moitiés assemblées par des brides boulonnées. La zone balayée par la roue a été protégée par une couche d'acier inoxydable contre les dégâts dus à la cavitation.

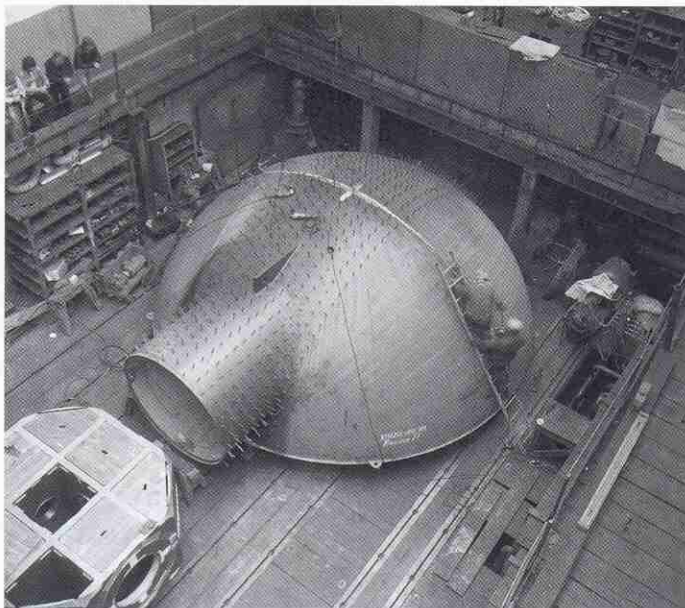
Le diffuseur est blindé jusqu'à une section où la vitesse axiale de l'eau atteint 6,7 m/s.

La turbine peut être asséchée à l'aide de batardeaux amont.

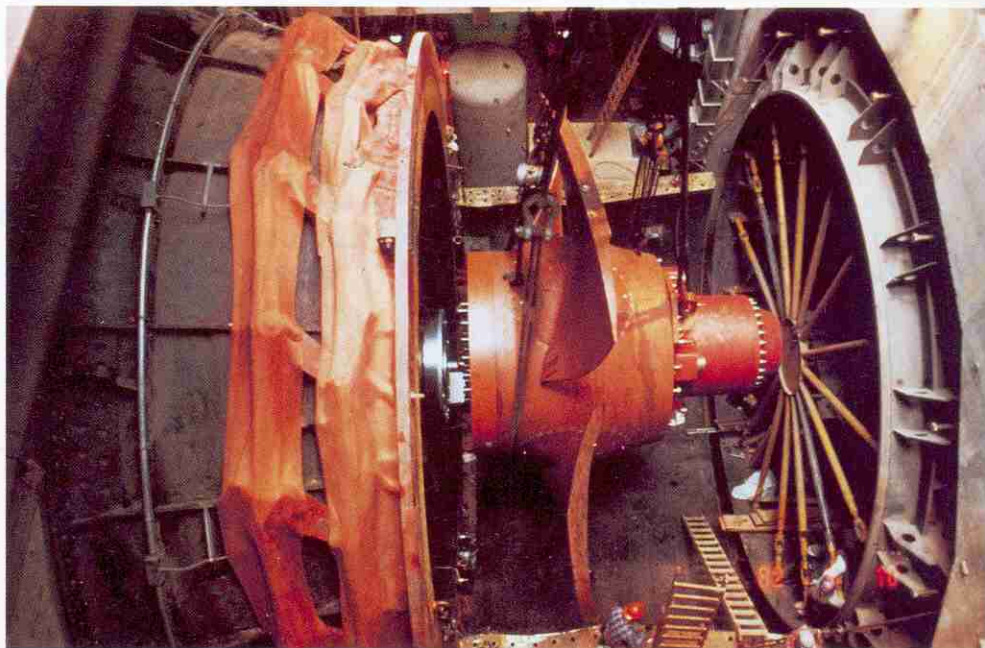
Le bâti de la turbine se compose essentiellement d'un anneau central et d'un anneau extérieur, d'ancrage dans le béton. Ces deux pièces sont reliées par deux piliers rigides qui centrent le bulbe. Toutes les forces statiques et dynamiques radiales et axiales ainsi que les couples sont transmis au bâtiment.

La calotte amont avec l'anneau supportant le radiateur de l'alternateur a été partiellement bétonnée et ancrée au pilier central de l'entrée de la turbine (fig. 2).

2. La calotte avec ses fers d'ancrage dans le béton (goujons Nelson) pour transmettre les efforts tranchants (photo EWZ)



3. La roue en cours de montage (photo EWZ)



Le problème des dilatations thermiques et des déformations élastiques dues aux efforts axiaux a été résolu par deux joints d'expansion. L'un de ceux-ci est inséré entre le bâti de l'alternateur et la bride de raccordement de la calotte amont. L'autre se trouve entre le manteau de la roue et le blindage de l'aspirateur.

La figure 3 montre une phase du montage.

Centrale de Sidney A. Murray Jr.

Etat de la Louisiane, USA

8 turbines bulbes en puits de 25 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication: Kvaerner Boving Ltd, Londres, GB, Kvaerner Turbin AB, Kristinehamn, Suède

Construction du bâti de la centrale: Avondale Shipyard, New Orleans, USA

Maître d'œuvre: Town of Vidalia. Catalyst Energy Development Corp., New York, USA

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	23,9	52,3	59,8
H (m)	2,44	5,33	6,10
Q (m ³ /s)	176	521	456
P (MW)	3,1	25,0	25,0
D _e (m)	8,200	f (Hz)	60
D _i (m)	2,700	n (t/s; t/min)	0,87; 52,2
z _r (-)	4	N _{QE} (-)	1,02
z ₀ (-)	12	n _q	340
		v (-)	2,15
		σ _{min} (-)	3,0
		σ _{max} (-)	6,0

Caractéristiques

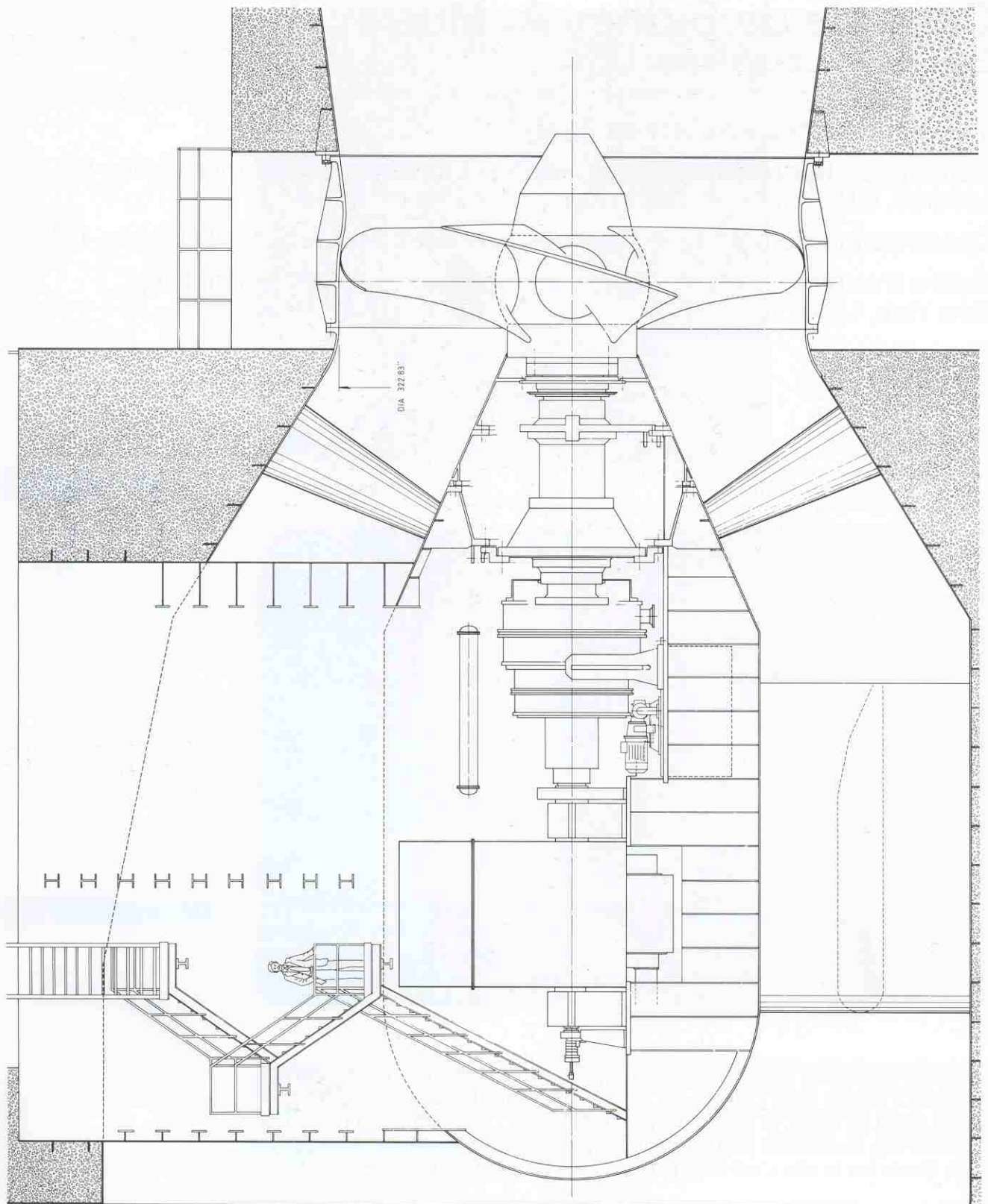
La centrale utilise les eaux du Mississippi, à environ 350 km en amont de New Orleans. Elle se trouve sur un canal qui relie cette rivière à la Red River, dont les eaux se jettent également dans le golfe du Mexique. Le débit du passage d'une rivière à l'autre se situe entre 1400 et 14 000 m³/s, avec une chute variant entre 2,5 et 5,5 m.

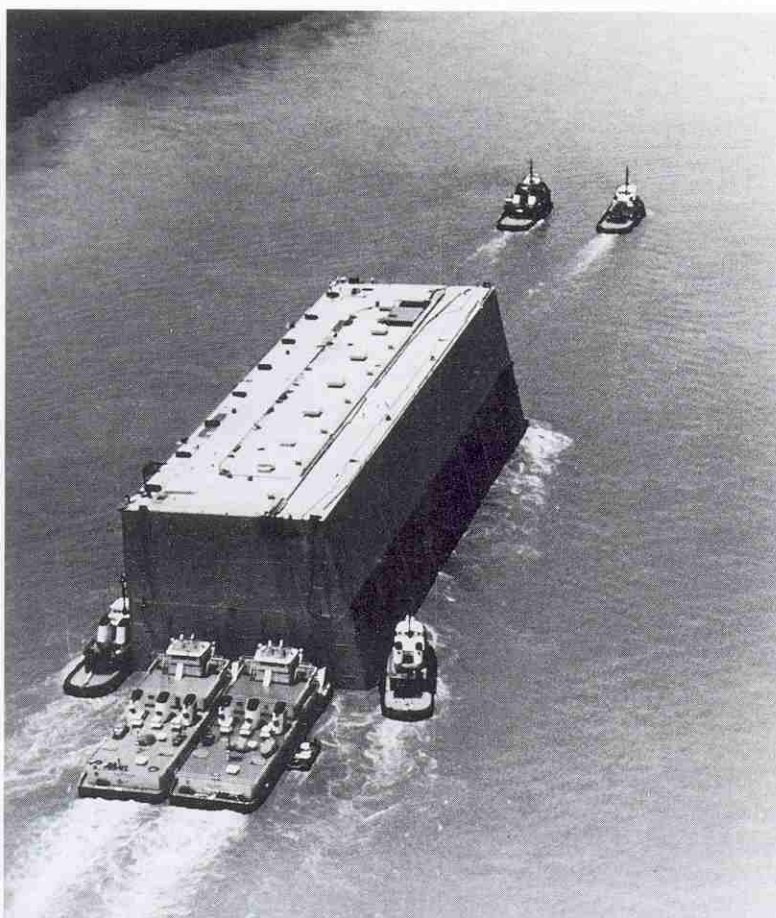
Généralités

Le bâti de la centrale a été transporté sur le site par flottage (fig. 1), en couvrant la distance depuis New Orleans en 5 jours. Il mesure 139 m de long, 35 m de haut et 44 m de large; sa masse est de 25 000 t. De l'eau pompée à l'intérieur a permis son immersion partielle pour le passage sous les ponts. La mise en place finale sur le site s'est faite par la coulée de 225 000 t de béton.

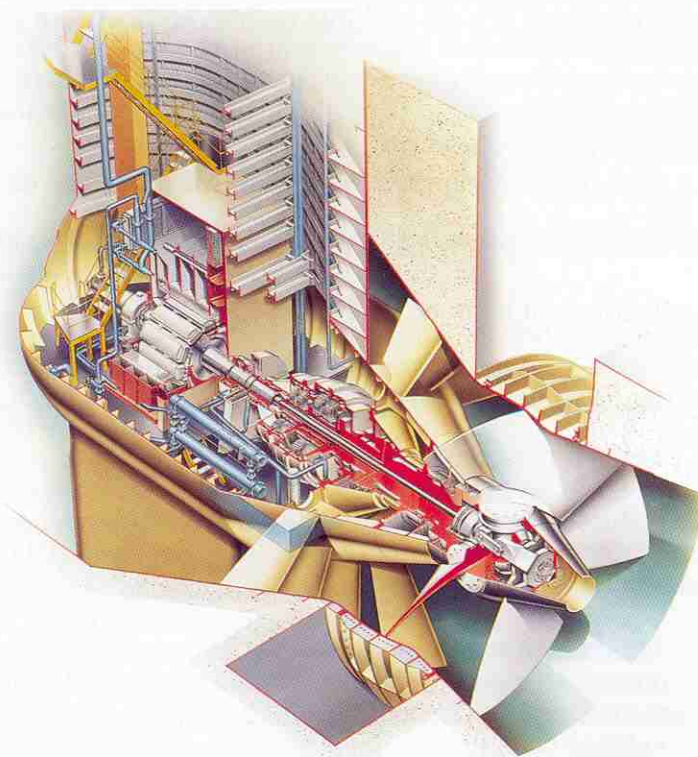
Les turbines bulbes (fig. 2) sont du type puits, équipées d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur rapide tournant à 600 t/min.

Les 8 groupes (fig. 3) ont été mis en service entre la mi-juin et la mi-juillet 1990.



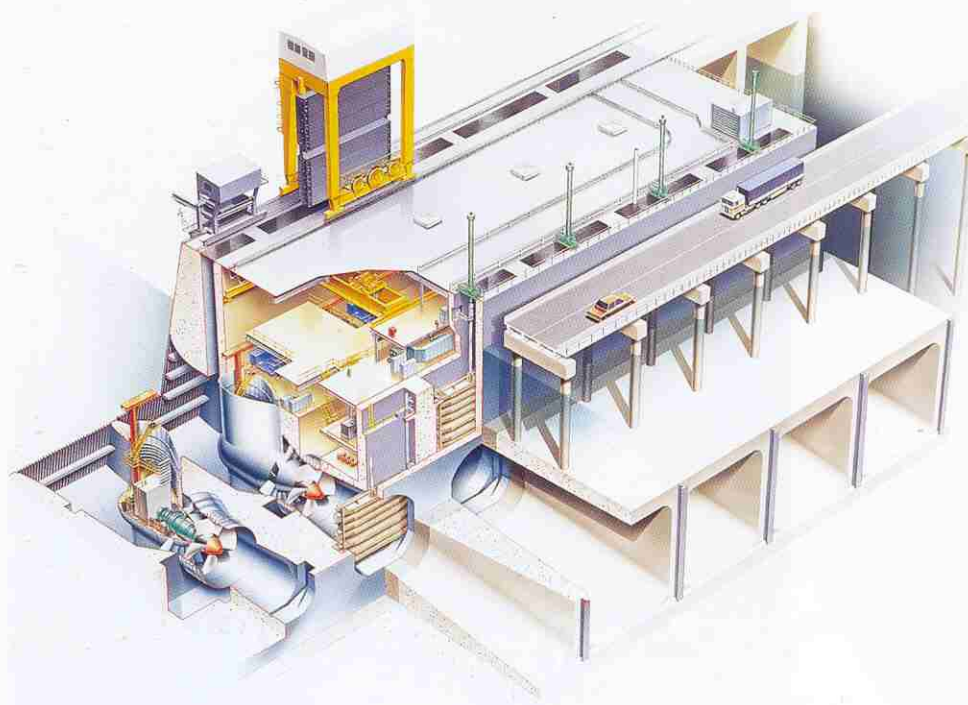


1. Bâti de la centrale transporté sur le site par flottage (photo Kvaerner Turbin).



2. Vue éclatée d'un groupe (document Kvaerner Boeing).

3. Vue partiellement éclatée de la centrale (document Kvaerner Boving).



Conception hydraulique

Le choix de turbines équipées d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur rapide a permis de réduire le diamètre du bulbe de 9,4 à 6,6 m (fig. 4). Avec une roue de 8,2 m de diamètre, la section au droit du bulbe est 25% plus faible que celle de la roue. D'autre part, la vitesse de rotation d'une turbine bulbe conventionnelle est un compromis entre l'optimum pour la roue et le minimum imposable au générateur. Pour ce projet, elle aurait été de 62 t/min. Avec le multiplicateur, il a été possible de réduire la vitesse de rotation de la roue à 52 t/min.

Le canal d'entrée, sans pilier central, a une largeur d'environ 14 m pour une hauteur d'environ 15 m.

Le puits de section profilée a une largeur maximale de 5,4 m.

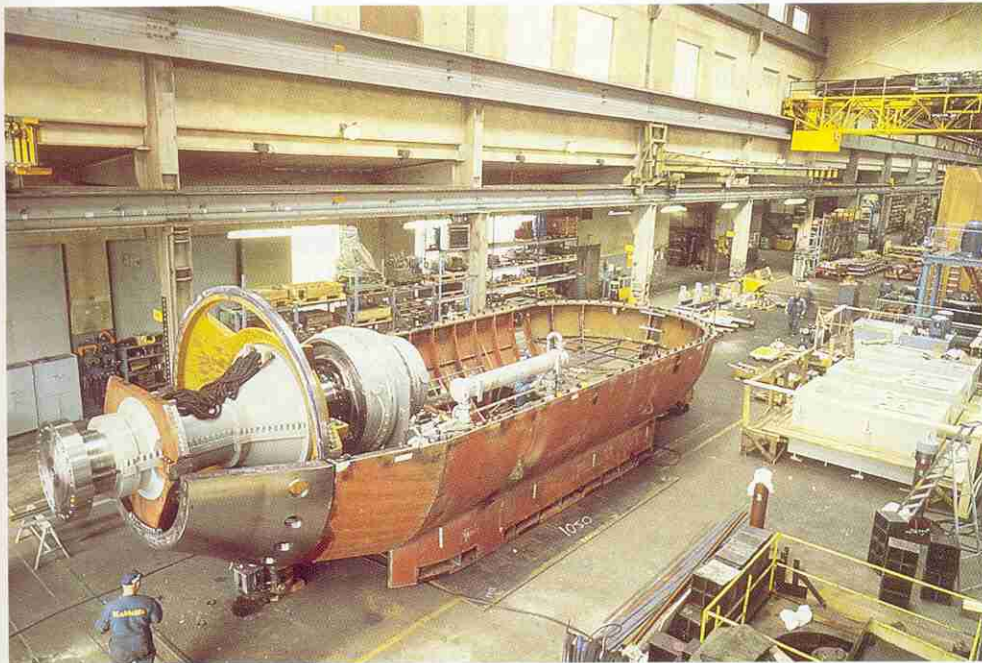
Le bulbe est supporté par 2 piliers profilés d'une épaisseur de 0,8 m.

Le distributeur conique est fixe.

La roue a un rapport $\frac{D_i}{D_e} = 0,33$, ce qui est très faible pour une roue Kaplan à 4 pales. Le manteau est cylindro-sphérique.

Le diffuseur a une longueur totale d'environ 72 m. Une vanne aval relativement proche de la roue (environ 14 m), d'une section de 10,00 m par 10,00 m, permet les opérations suivantes:

- démarrage ou arrêt normal
- protection contre l'emballement en cas de déclenchement du réseau
- marche en déchargeur
- vidange de la turbine.



4. Bulbe en cours de montage. On distingue le cône de la butée axiale ainsi que le multiplicateur (photo Kvaerner Turbin).

Des essais très complets ont été effectués dans le laboratoire de Kvaerner Turbin à Kristinehamn à l'aide d'un modèle réduit de diamètre $D_e = 500$ mm. En plus des essais de rendement, de puissance et de cavitation, des mesures de pression et de force sur les pales ont été effectuées avec diverses ouvertures de la vanne aval. La marche en déchargeur a été également étudiée sur le modèle réduit.

Le puits est fabriqué en tôles d'acier rigidifiées par une série de poutres en T. Il est en outre renforcé par une série de poutres métalliques disposées en travers. Le puits est soudé sur le bulbe à sa partie inférieure et à la structure de la centrale à sa partie supérieure. Les dimensions du puits sont suffisantes pour permettre le passage de la machine électrique et du multiplicateur planétaire.

Les aubes directrices fixes sont en tôles d'acier soudées sur les cônes intérieur et extérieur du distributeur.

Les pales de la roue sont en acier inoxydable coulé. Elles sont boulonnées sur des tourillons en acier coulé. Le piston du servomoteur est situé à l'amont des pales. Il est relié à un croisillon, placé dans le cône de la roue, qui actionne les pales par des bielles et des leviers (fig. 2).

Le multiplicateur à 2 étages a un rapport de 11,5 et fait passer la vitesse à 600 t/min; il a un rendement pondéré de 98,64 % (fig. 4).

Le concept de centrale préfabriquée a permis de gagner 12 mois sur la durée totale de construction. Le bâti est une structure en tôles d'acier soudées. A sa livraison sur le site, les générateurs, les multiplicateurs de vitesse, les transformateurs, le câblage, les salles de commande et les ponts roulants étaient déjà installés. Seules les roues ont été acheminées par voie terrestre sur le site, où elles ont finalement été installées avec leur manteau.

**Conception
mécanique**

Le bulbe avec ses deux supports, le puits d'accès, le distributeur, le support de la butée et le manteau du diffuseur font partie intégrante de la structure du bâti. La partie terminale du diffuseur, d'une longueur de 28 m environ, a été coulée en béton après la mise en place de la centrale.

La turbine ayant un distributeur fixe, l'arrêt et le démarrage se font en utilisant la vanne aval. La machine démarre à vide par une ouverture partielle de la vanne. Lorsque la vitesse approche de la vitesse synchrone, l'angle des pales est ajusté par le régulateur pour permettre la synchronisation. Ensuite, les pales sont fermées jusqu'à ouverture complète de la vanne aval, pour maintenir une puissance faible durant la manœuvre de la vanne. Lorsque la vanne est complètement ouverte, l'angle des pales est réglé pour obtenir la puissance désirée.

En cas de déclenchement, la machine part en survitesse. Le système de régulation commande alors une fermeture rapide de la vanne aval jusqu'à 60%. Durant cette période, l'angle des pales reste constant. La vanne poursuit ensuite sa fermeture à une vitesse plus faible, tandis que le régulateur ferme les pales de la roue jusqu'à obtenir une vitesse proche de la vitesse synchrone. Le groupe est ensuite resynchronisé et la vanne aval se rouvre. La vitesse maximale atteinte par le groupe est de l'ordre de $1,5 \cdot n$ pour un déclenchement à pleine puissance.

La procédure, pour un arrêt d'urgence, est identique à celle du déclenchement; la vanne aval se ferme alors complètement, et des freins entrent en action dès que la vitesse de rotation de la roue est inférieure de 20% à la vitesse nominale.

La turbine peut fonctionner en déchargeur. Ce mode d'opération suit normalement un déclenchement lorsqu'une resynchronisation n'est pas demandée mais qu'un certain débit doit tout de même passer. La vanne aval se trouve alors entre 40 et 60% d'ouverture pour maintenir une vitesse de rotation égale à environ $0,85 \cdot n$.

Le fonctionnement en compensateur synchrone est également possible.

Bibliographie

- B. Hadley and L. E. Lindstrom. The Sidney A. Murray Jr. Hydro Power Plant. Seminar on Hydropower Activities. New Projects And Rehabilitations. IMechE Westminster 1990.

Centrale réversible de l'Eau d'Olle (Grand-Maison)

Département de l'Isère, France

8 pompes-turbines de 139,8 MW

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

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

Pompe	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	8105	8826	9527
H (m)	826,5	900,0	971,5
Q (m ³ /s)	17,30	15,70	13,60
P (MW)	156,9	153,6	146,2
N_{QE} (-)	0,044	σ_{min} (-)	0,200
n_q	14	σ_{max} (-)	0,374
v (-)	0,09		

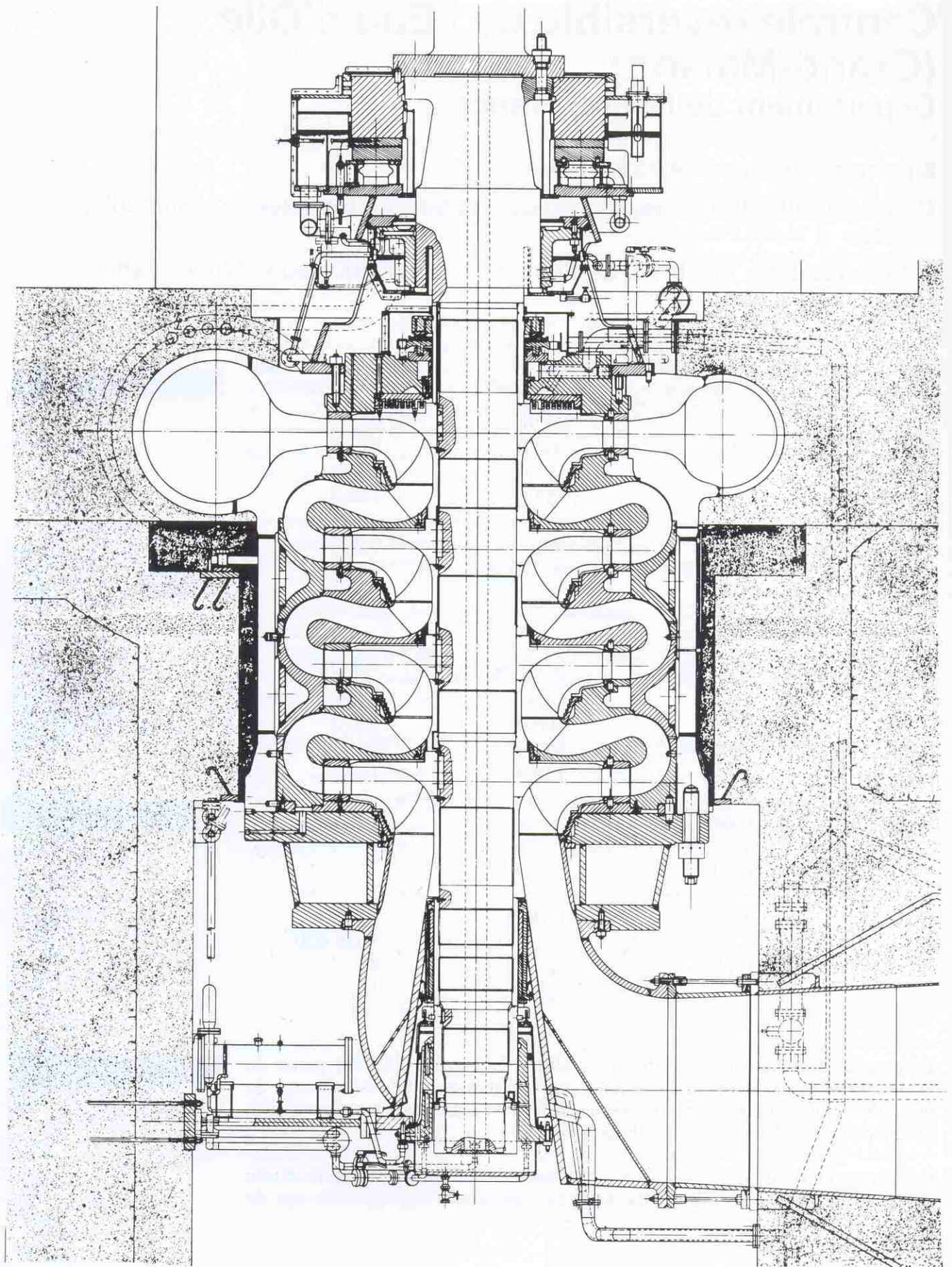
Caractéristiques

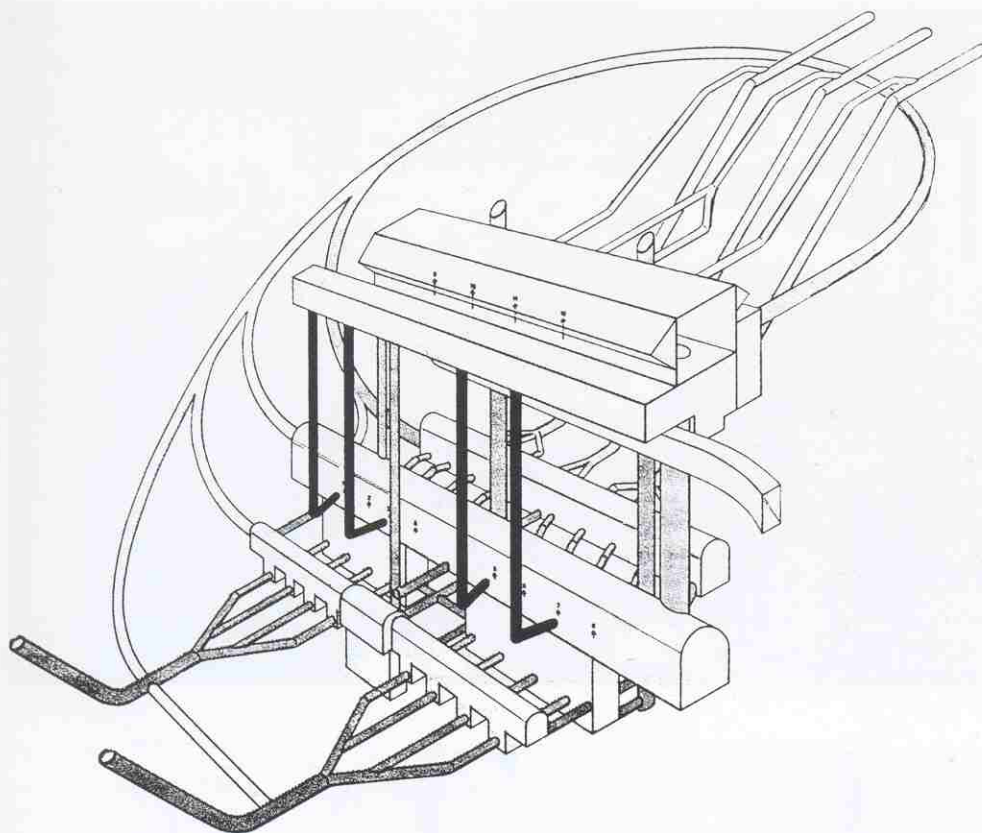
Turbine	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	7590	8826	9308
H (m)	774,0	900,0	949,2
Q (m ³ /s)	16,08	17,54	18,09
P (MW)	108,8	139,8	152,5
N_{QE} (-)	0,046		
n_q	15		
v (-)	0,10		
D_{1e} (m)	1,443	f (Hz)	50
D_{1i} (m)	2,215	n (t/s; t/min)	10,0; 600
B_o (m)	0,251	z_r (-)	8
		z_{avd} (-)	15

Généralités

La centrale contenant les groupes réversibles de l'Eau d'Olle fait partie de l'aménagement de Grand-Maison qui comprend une centrale de turbinage de 600 MW et une centrale de pompage de 1200 MW. L'aménagement est situé à 50 km de Grenoble sur la rivière Eau d'Olle.

La digue en terre de Grand-Maison a une hauteur maximale de 160 m et une longueur de crête de 550 m. La capacité maximale du réservoir est de





1. Vue en perspective des centrales réversibles, en bas, et Pelton, en haut (document EDF).

$140 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Le barrage comporte un évacuateur de crues dimensionné pour $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

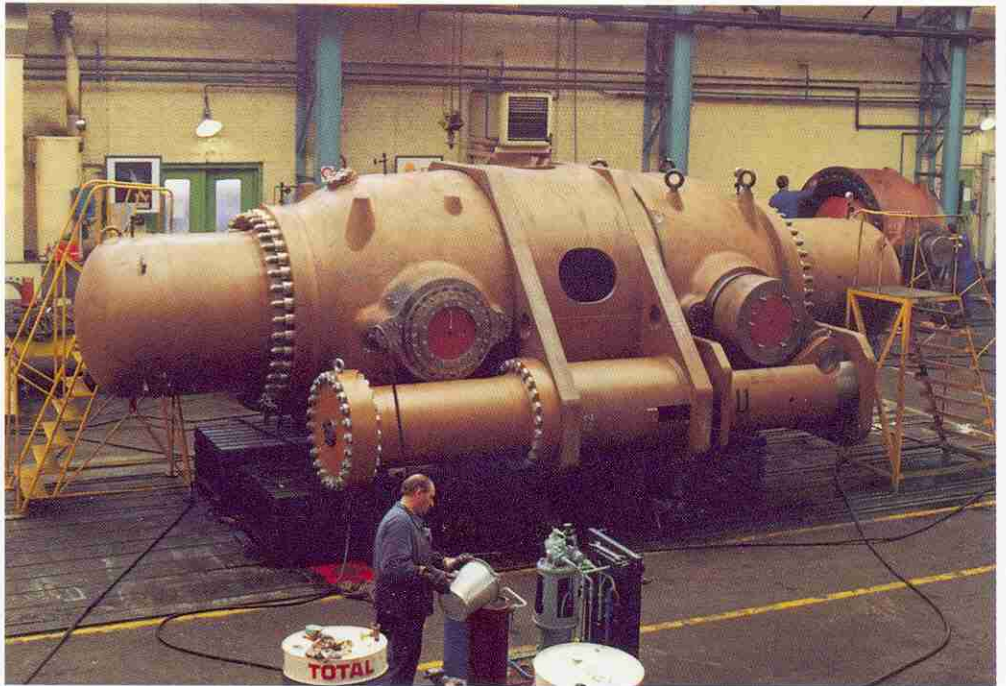
La galerie d'amenée, d'une longueur de 7105 m, est en partie en béton avec un diamètre de 7,1 m et en partie blindée avec un diamètre de 5,4 m. La galerie se termine par une cheminée d'équilibre d'une hauteur de 200 m.

Les 3 conduites forcées ont un diamètre de 3,0 m pour une longueur de 1800 m. L'épaisseur maximale du blindage est de 46 mm. A plein débit, les vitesses de l'eau sont de 7,5 m/s dans la galerie et de 10,3 m/s dans les conduites forcées.

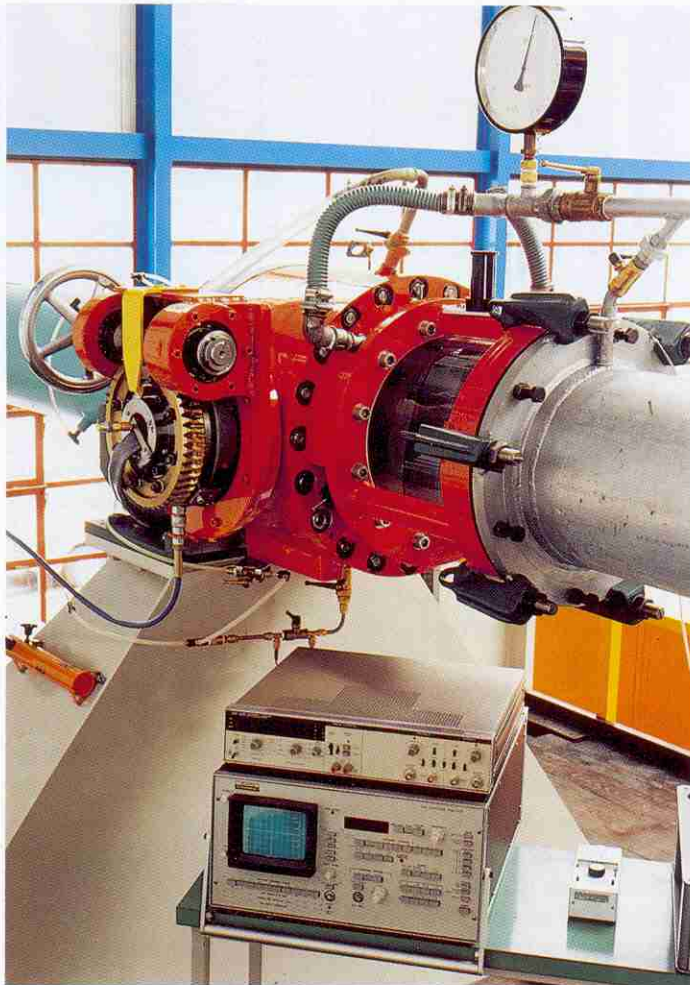
La centrale réversible est souterraine; elle est située à environ 70 m en dessous de la centrale Pelton. La caverne a 160 m de longueur, 16 m de largeur et 40 m de hauteur totale (voir fig. 1 Centrale de l'Eau d'Olle Pelton).

Une caverne parallèle, implantée 30 m à l'amont (fig. 1), abrite 8 vannes sphériques doubles (fig. 2 et 3) composées d'une vanne de garde à l'amont et d'une vanne de service à l'aval, chacune ayant un diamètre de 1,300 m. La vanne de garde est conçue pour couper le débit de gueule bée de $140 \text{ m}^3/\text{s}$. La vanne de service comporte un anneau mobile d'étanchéité avec une course de 35 mm qui, une fois ouvert, fait passer un débit permettant à la machine d'atteindre environ le 90% de sa vitesse synchrone. L'obturateur principal s'ouvre ensuite légèrement pour régler exactement la vitesse synchrone. Ces vannes très particulières sont de conception Hydro Vevey.

2. Vanne sphérique double comprenant la vanne de garde à gauche et la vanne de service à droite (photo Hydro Vevey).



3. Modèle d'essai, d'un diamètre de 300 mm, de la vanne sphérique en cours d'essai dans le laboratoire de Hydro Vevey (photo Hydro Vevey).



Une 3^e caverne, située à 23 m à l'aval de la salle des machines, renferme les batardaes.

La première machine a été mise en service en 1987.

La production annuelle moyenne de l'aménagement est de 1400 GWh, en tenant compte de l'énergie fournie par les apports d'eau naturels, 200 GWh.

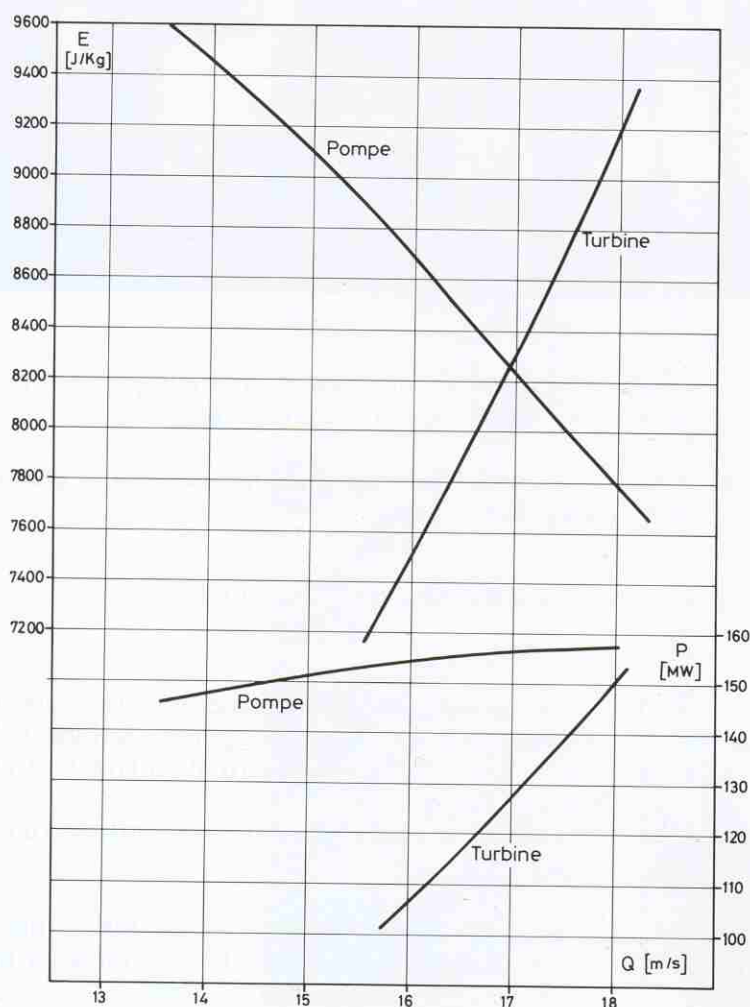
La consommation annuelle moyenne des pompes est de 1700 GWh.

Les caractéristiques énergie-débit ainsi que puissance-débit sont données par la figure 4 en fonctionnement pompe et turbine. Les machines sont à 4 étages, ce qui permet d'obtenir des roues ayant une vitesse spécifique acceptable et une implantation plus favorable de la machine.

La bache spirale, à double courbure, a un diamètre d'entrée de 1,280 m.

Les roues ont un profil hydraulique caractérisé par le diamètre important de l'arbre ($0,55 \cdot D_{1e}$) (fig. 5).

Conception hydraulique



4. Caractéristiques énergie-débit et puissance-débit en pompe et en turbine (d'après un document EDF).

5. Montage d'une roue en centrale. On distingue, au-dessous de la roue, la bague qui fixe la position axiale de la roue (photo Neyrpic).



Les canaux de retour, à 11 aubes, ont un profil hydraulique en S pour limiter autant que possible la longueur totale de la machine.

Le diffuseur-aspirateur a une forme rendue compliquée par le grand diamètre de l'arbre, du joint et du palier.

La profondeur relative du diffuseur est $\frac{\Delta Z_d}{D_{ie}} = 2,62$.

Conception mécanique

Les viroles de la bêche spirale sont soudées en usine sur l'avant-distributeur en acier coulé ASTM A 643 grade A. Le corps de la pompe-turbine, cylindrique, en 2 pièces, est également soudé sur l'avant-distributeur (fig. 6 et 7).

L'ensemble bêche, avant-distributeur et corps de pompe-turbine a une masse de 115 t.

Les canaux de retour sont également en acier coulé tandis que la partie distributeur fixe-diffuseur est une pièce séparée (fig. 8) en acier inoxydable mécano-soudé.

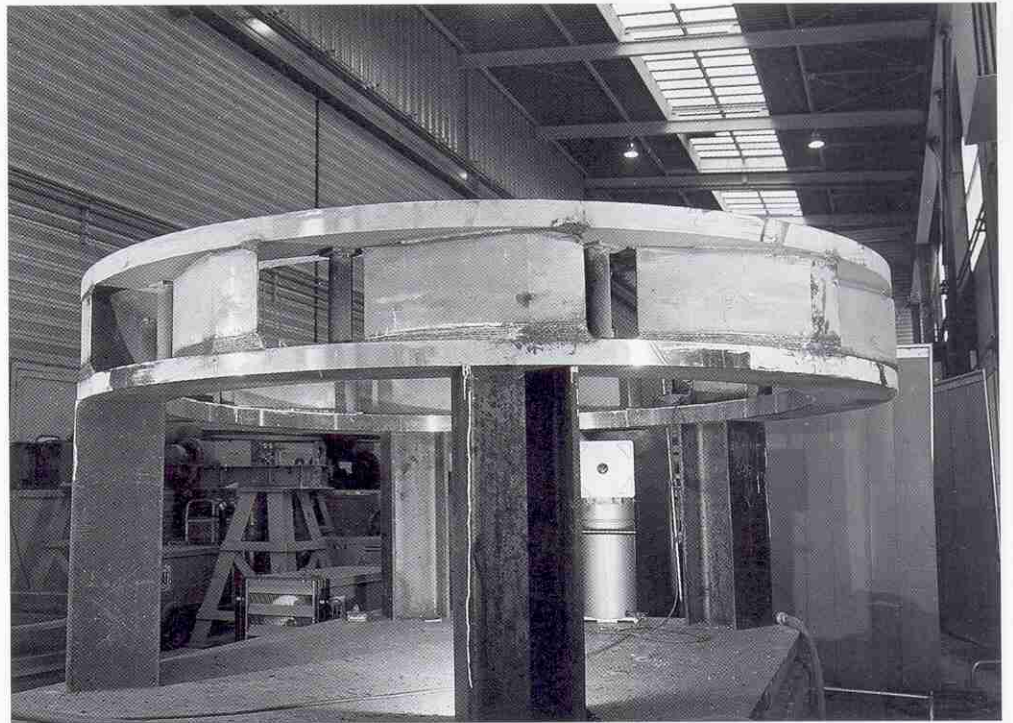


6. Bâche spirale, avant-distributeur et corps de pompe en cours d'usinage (masse totale 115 t) (photo Neyrpic).



7. Ensemble, bâche spirale avant-distributeur, corps de pompe, prêt pour le transport sur le chantier (photo Neyrpic).

8. Anneau de distributeur-redresseur fixe, en acier inoxydable (photo Neyrpic).



9. Roue en acier inoxydable 16 Cr - 4 Ni d'une masse de 5,2 t en cours de meulage (photo Neyrpic).



Les roues (fig. 9), d'une masse de 5,2 t, sont en acier inoxydable coulé Z 05 CN 16.04 M. Elles sont meulées à la main, opération rendue très difficile par l'étroitesse des canaux. La précision d'exécution doit, néanmoins, être excellente pour garantir une bonne similitude géométrique entre le modèle et le prototype afin d'obtenir les caractéristiques hydrauliques, spécifiées et mesurées sur modèle, malgré l'absence de réglage.

Le couvercle supérieur, en acier coulé E 30-57 M, a une masse de 12,8 t pour un diamètre extérieur de 2,660 m. Il est monté par le bas et boulonné dans l'avant-distributeur.

L'arbre, d'une longueur de 9,665 m et d'un diamètre de 0,680 m est fabriqué en acier forgé ASTM A 668-72 grade E. Il est guidé par 2 paliers à huile, l'un étant situé dans le coude du diffuseur-aspirateur et l'autre sur le couvercle. La butée est placée sur un cône très court, fixé sur l'avant-distributeur. La ligne d'arbre comporte, en plus, deux paliers situés de part et d'autre du rotor de la machine électrique.

- Documentation EDF. Grand-Maison, usines de l'Eau d'Olle.

Bibliographie