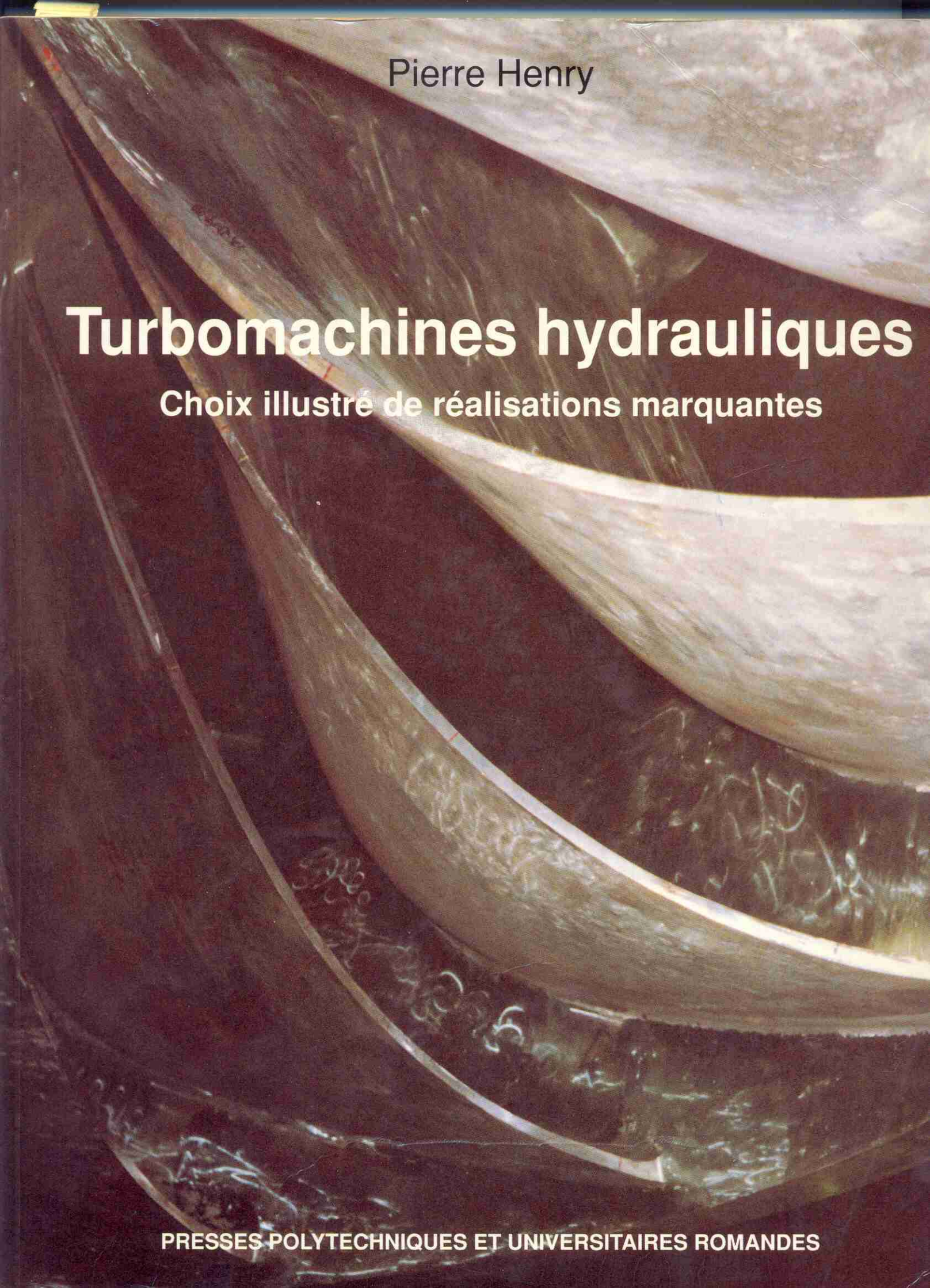




Pierre Henry

Turbomachines hydrauliques

Choix illustré de réalisations marquantes

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Turbomachines hydrauliques

Choix illustré de réalisations marquantes

Pierre Henry



Presses polytechniques et universitaires romandes

La collection de **Mécanique** est dirigée par
Michel Del Pedro, professeur à l'Ecole polytechnique
fédérale de Lausanne

Dans la même collection:

Mécanique vibratoire
Systèmes discrets linéaires
Michel Del Pedro et Pierre Pahud

Dynamique des fluides
Inge L. Ryhming

Thermodynamique et énergétique
Volume 1
Lucien Borel

Thermodynamique et énergétique
Volume 2. Problèmes résolus et exercices
Lucien Borel, Dinh Lan Nguyen et Magdi Batato

Vibrations aléatoires et analyse spectrale
André Preumont

Si vous désirez être tenu au courant des
publications de l'éditeur de cet ouvrage,
envoyez vos nom, prénom et adresse aux
Presses polytechniques et universitaires romandes,
Centre Midi, CH-1015 Lausanne, Suisse,
qui vous feront parvenir leur catalogue général.

Première édition
ISBN 2-88074-209-9
© 1992, Presses polytechniques et universitaires romandes
CH-1015 Lausanne
Tous droits réservés
Reproduction, même partielle, interdite sous quelque forme et sur
quelque support que ce soit sans l'autorisation écrite de l'éditeur.
Composition et impression par l'imprimerie Schöler SA à Bienne, Suisse

Préface

L'énergie hydraulique est exploitée depuis la plus haute antiquité et sa transformation en énergie électrique a commencé voici plus d'un siècle.

Cette longue histoire pourrait faire penser que l'ingénierie hydraulique est maintenant parvenue au terme de son développement et que toute recherche est désormais inutile. Des développements récents montrent cependant qu'il n'en est rien et que de nombreux problèmes attendent encore une solution.

Quelques exemples illustrent certains des aspects très variés que prend la recherche de nos jours.

Elle s'oriente notamment vers le développement d'unités de production toujours plus puissantes, dont les rendements sont de plus en plus élevés en même temps qu'elles sont moins sensibles aux dégâts dus à la cavitation et qu'elles produisent des kWh dont le coût de production diminue. Ainsi, l'apparition des turbines Pelton multijets à axe vertical a-t-elle permis d'accroître la puissance de ce type de machines, qui dépasse maintenant 300 MW (Sy-Sima, Norvège). Quant aux turbines Francis, elles atteignent déjà 800 MW (Itaipu, Brésil).

La recherche doit être poursuivie afin que la prédiction des dégâts engendrés par la cavitation devienne de plus en plus fiable. De même, l'effet érosif du sable reste un problème crucial que l'on cherche à résoudre au moyen du revêtement en céramique des organes exposés aux eaux chargées de sable. A ce jour, ces revêtements ne sont commercialisés que pour les injecteurs des turbines Pelton, mais cette protection doit impérativement être étendue aux distributeurs et aux roues des machines à réaction.

Du point de vue hydraulique, de nombreux travaux en cours concernent le phénomène de la cavitation ainsi que les effets d'échelle dans le cadre des essais de performances et de cavitation sur modèles réduits.

Toujours en hydraulique, une prochaine étape concerne l'analyse des écoulements instationnaires dans une roue de turbine. Elle vise une étude précise des pertes, singulièrement de la chute de rendement consécutive au sillage aval des aubes directrices, influencé par les débits de fuite.

Durant la dernière décennie, des progrès importants ont été enregistrés dans la maîtrise des phénomènes transitoires et du réglage des installations à haute chute. L'étude de l'influence du coup de bélier sur le régulateur devrait permettre de réduire l'importance des chambres d'équilibre et de diminuer ainsi le coût des aménagements.

Remerciements

Le présent ouvrage n'aurait pas vu le jour sans de nombreuses collaborations, précieuses autant qu'efficaces.

M^{lle} Maria Anitua a dessiné la plupart des diagrammes ainsi que de nombreuses coupes de machines. M. Roland Flad a effectué une grande partie de la recherche de la documentation et a participé à la rédaction de certaines descriptions.

Le professeur Ugo Mocafico et M. Jean Prénat ont relu tous les textes en suggérant d'importantes clarifications et améliorations.

M^{me} Anne Piaget a assuré l'ensemble de la dactylographie.

M. Maxime Randriamamonjy a contrôlé toutes les valeurs numériques des tableaux et relu puis corrigé les épreuves d'imprimerie.

Des remerciements sont également dus aux Compagnies dont les réalisations figurent dans l'ouvrage, et singulièrement à ceux de leurs ingénieurs qui, répondant avec une disponibilité de tous les instants à nos innombrables lettres et téléfax, ont réuni et nous ont communiqué la documentation. Ils ont en outre relu et corrigé le contenu technique des textes concernant les machines provenant de leur Compagnie.

Table des matières

Introduction	xi
--------------------	----

Naturno ($v = 0.048$)	1
L'Eau d'Olle ($v = 0.072$)	5
Jostedal ($v = 0.074$)	11
Sellrain-Silz ($v = 0.077$)	17
Guavio ($v = 0.077$)	21
La Bâtiaz ($v = 0.090$)	29
Pigai Aoos ($v = 0.091$)	35
San Carlos ($v = 0.093$)	41
Devil Canyon ($v = 0.097$)	47
Restitución ($v = 0.115$)	53
San Agaton ($v = 0.124$)	59

Centrales à Turbines Pelton

Svartisen ($v = 0.16$)	65
Alto Lindoso ($v = 0.23$)	69
Colbun ($v = 0.30$)	75
El Cajon ($v = 0.32$)	81
Atatürk ($v = 0.33$)	87
Sayano-Shushenskaya ($v = 0.33$)	95
Tarbela ($v = 0.33$)	101
La Grande 4 ($v = 0.39$)	111
Revelstoke ($v = 0.39$)	121
Cirata ($v = 0.41$)	129
Shiroro ($v = 0.41$)	135
Guri II ($v = 0.42$)	139
Itaipu ($v = 0.42$)	147
La Grande 3 ($v = 0.44$)	157
Piedra del Aguila ($v = 0.44$)	165
Tucurui ($v = 0.57$)	171
Saucelle-Huebra ($v = 0.58$)	181
Itaparica ($v = 0.63$)	189

Centrales à Turbines Francis

Jebba ($v = 0.96$)	197
Machicura ($v = 0.96$)	203
Ligga III ($v = 0.99$)	209
Manavgat ($v = 1.05$)	215
Limestone ($v = 1.06$)	221

Centrales à Turbines Kaplan

Taquaruçu ($v = 1.21$)	229
Verbois ($v = 1.22$)	233
Gezhouba 129 MW ($v = 1.27$)	243
Gezhouba 176 MW ($v = 1.29$)	243
Wells Dam ($v = 1.33$)	253
Porto-Primavera ($v = 1.34$)	259

Centrales à Turbines Bulbes

Tadami ($v = 1.29$)	267
Laufenburg ($v = 1.43$)	275
West End Dam ($v = 1.53$)	285
Murray Lock and Dam ($v = 1.76$)	289
Greifenstein ($v = 1.85$)	295
Crestuma ($v = 1.90$)	303
St-Mary ($v = 2.07$)	311
Greenup ($v = 2.10$)	317
Racine ($v = 2.10$)	323
Sydney A. Murray ($v = 2.15$)	327

Centrales à Pompes-Turbines

Grand-Maison ($v = 0.09$)	333
Häusling ($v = 0.13$)	343
Truel ($v = 0.13$)	357
Bajina Basta ($v = 0.14$)	367
Chaira ($v = 0.15$)	373
Palmiet ($v = 0.23$)	379
Pan Jia Kou ($v = 0.29$)	387
Torrão ($v = 0.47$)	395
Russel Dam ($v = 0.61$)	401

Introduction

Une turbomachine hydraulique - turbine ou pompe-turbine - doit toujours être conçue spécialement pour l'aménagement hydroélectrique auquel elle est destinée. Chaque site présente, en effet, des caractéristiques propres en ce qui concerne l'énergie disponible, ou chute, et le débit exploitable. D'autres paramètres - à première vue moins importants - comme la qualité de l'eau, qui peut transporter du sable, et la topographie des lieux, qui impose par exemple les possibilités d'accès à la centrale, ont souvent une importance déterminante dans le choix du type et dans la conception de la machine. Enfin, le mode d'exploitation de la centrale, qui résulte d'une politique de gestion de l'énergie, ainsi que les particularités d'implantation de la centrale, conditionnent le choix du nombre de groupes à installer.

Il nous a donc paru intéressant de présenter un choix de machines, de tous les types modernes, provenant de divers constructeurs, pour illustrer et tenter d'expliquer les choix opérés par les maîtres d'oeuvre et les solutions apportées par divers constructeurs.

Les machines sélectionnées pour figurer dans cet ouvrage appartiennent aux types Pelton, Francis, Kaplan et bulbes, ainsi que pompes-turbines. Elles sont, en général, de grandes dimensions et ont toutes été mises en service après 1980. Les principaux constructeurs présents sur le marché mondial sont représentés.

La documentation utilisée a été prélevée dans les publications techniques des constructeurs et dans les périodiques spécialisés, selon la bibliographie citée pour chaque machine présentée. En plus, de nombreux compléments ont été obtenus directement des constructeurs. L'information disponible étant ainsi différente d'une machine à une autre, toutes les descriptions ne sont pas homogènes sous cet aspect.

Tous les textes ont été approuvés par les constructeurs qui, dans plusieurs cas, les ont soumis à leurs sous-traitants et à leurs clients.

Le livre est subdivisé en quatre parties, consacrée chacune à un des types de machines retenu: turbines Pelton, turbines Francis, turbines Kaplan et bulbes, pompes-turbines. Dans chaque partie, les machines apparaissent dans l'ordre croissant de leur vitesse spécifique (N_{QE} , n_q ou v).

Chaque machine est présentée selon un même schéma, qui comporte, dans l'ordre:

- le nom de la centrale, ainsi que celui du pays et de la région (département, canton, district, province, état, etc.) où elle est installée;

Avant-propos

Plan de l'ouvrage

- le nombre, le type et la puissance nominale unitaire des machines;
- le nom du ou des constructeurs, avec leur contribution: conception hydraulique, conception mécanique et fabrication; en effet, l'exécution des machines est assez fréquemment répartie entre plusieurs entreprises, surtout pour les grands aménagements, où une partie des travaux doit en général être exécutée par des industries locales; la raison sociale d'un constructeur est donnée dans sa version 1991, même si elle a changé depuis le moment où le travail a été effectué;
- le nom du maître d'œuvre, c'est-à-dire de la société qui a passé commande des machines; il s'agit, en général, du propriétaire des installations mais, dans certains cas, ce propriétaire confie la direction des études et des travaux à une autre société et ne prend possession de la centrale qu'après la mise en service définitive;
- les caractéristiques des machines, sous la forme d'un tableau (voir 3, page 3) qui indique les grandeurs de base, les dimensions principales et les paramètres des machines;
- un dessin en coupe qui montre, dans toute la mesure du possible, les détails de construction; ces dessins sont en général des documents originaux des constructeurs, à l'exception de certaines coupes, redessinées par souci de clarté;
- une description succincte de la machine, avec de nombreuses illustrations, divisée en trois parties:

Généralités. On indique la localisation géographique de l'aménagement, dont les ouvrages principaux sont décrits. Des données précises concernant le barrage, l'évacuateur de crues ainsi que les ouvrages d'adduction et de restitution sont citées lorsqu'elles étaient disponibles. La production moyenne annuelle est également souvent indiquée.

Conception hydraulique. Le profil hydraulique des divers éléments de la machine est décrit le plus précisément possible, compte tenu des données disponibles. Les différentes parties sont citées dans l'ordre correspondant, en principe, au sens de l'écoulement.

Dans le domaine des machines hydrauliques, des essais de réception sur modèle réduit sont pratiquement toujours prévus par le contrat. Il est dès lors intéressant de donner les dimensions et les paramètres du modèle, ainsi que le programme d'essai et les résultats disponibles.

Conception mécanique. En principe, pour chaque organe, on donne les dimensions principales, la masse, la matière utilisée ainsi qu'une description sommaire du mode de fabrication, c'est-à-dire le plus grand nombre possible de caractéristiques mécaniques qui intéressent l'ingénieur. Les divers éléments sont également cités en respectant la direction de l'écoulement.

- Les caractéristiques des matériaux sont indiquées sous la désignation communiquée par les constructeurs. Les pays d'origine des machines étant différents, il en résulte une certaine diversité dans les appellations et dans les normes.

Tableau des caractéristiques

Le tableau est divisé en 2 parties: la première donne les grandeurs de base E, Q, P, et la seconde les dimensions et les paramètres de la machine.

La première partie est divisée en 3 colonnes: minimum, nominal, maximum, par référence, en premier lieu, à l'énergie. Très souvent, le débit et la puissance suivent le même ordre, sans toutefois que cela soit une règle générale.

E (J/kg) énergie hydraulique massique mise à la disposition de la turbine ou fournie par la pompe

E est la différence d'énergie entre les sections de référence contractuelles haute pression (amont) (I) et basse pression (aval) ($\bar{I}$) de la machine.

H (m) chute nette

$$H = \frac{E}{g}$$

L'énergie hydraulique massique E a remplacé, dans la Norme No 41, 3^e édition, de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), l'ancienne notion de chute nette H. Toutefois, la chute est encore très utilisée dans le langage courant.

Q (m³/s) débit traversant la section d'entrée de référence de la machine

P (MW) puissance mécanique au plateau d'accouplement de la machine

Dans la seconde partie, on trouve les dimensions et les paramètres suivants:

D_{1e} (m) diamètre de l'intersection de l'arête côté basse pression (aval) avec la ceinture de la roue (Francis, pompes-turbines) (fig. 1)

D_e (m) diamètre de la roue (Kaplan, bulbes, hélices) (fig. 2)

D_{1i} (m) diamètre de l'intersection de l'arête côté haute pression (amont) avec le plafond de la roue (Francis, pompes-turbines) (fig. 1)

D_i (m) diamètre du moyeu (Kaplan, bulbes, hélices) (fig. 2)

D_1 (m) diamètre du cercle tangent au jet (Pelton) (fig. 3)

D_2 (m) diamètre du jet Pelton aux conditions nominales (fig. 3)

D_o (m) diamètre au droit du cercle des tourillons des aubes directrices; diamètre de la tuyère de l'injecteur Pelton (fig. 1)

B_o (m) hauteur du distributeur ou du redresseur (fig. 1)

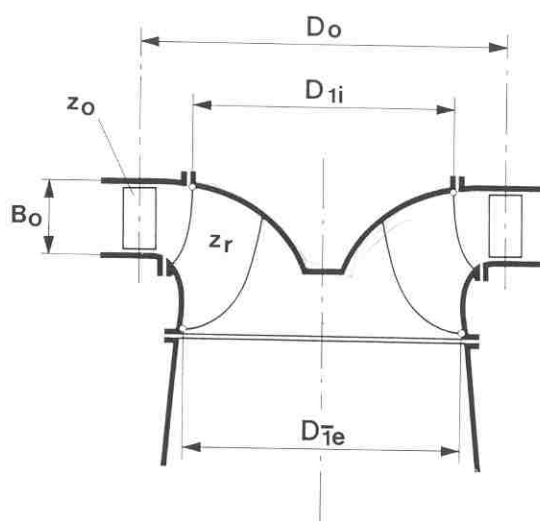
B (m)	largeur de l'auget Pelton	(fig. 3)
z_r (-)	nombre d'aubes de la roue; nombre d'augets Pelton	
z_o (-)	nombre d'aubes directrices; nombre de jets Pelton	
z_{avd} (-)	nombre d'avant-directrices en turbine et d'aubes du diffuseur-redresseur en pompe	
f (Hz)	fréquence du réseau	
n (t/s; t/min)	vitesse de rotation de la machine La Norme CEI No 41, 3 ^e édition, prescrit la vitesse de rotation en t/s. Nous avons toutefois également donné la valeur en t/min pour tenir compte d'un usage fortement établi.	
N_{QE} (-)	vitesse spécifique suivant la Norme CEI concer- nant les essais de réception sur modèle réduit des machines hydrauliques (en pré- paration) $N_{QE} = \frac{n(Q)^{1/2}}{E^{3/4}} \text{ avec } n \text{ (t/s)}$	
n_q	vitesse spécifique «classique» $n_q = \frac{n(Q)^{1/2}}{H^{3/4}} \text{ avec } n \text{ (t/min)}$ La dimension de n_q n'est pas mentionnée dans les tableaux car elle est hybride: $n_q \left(\frac{m^{3/4}}{\text{min} \cdot s^{1/2}} \right)$ elle correspond toutefois à une longue tradi- tion.	
v (-)	vitesse spécifique «scientifique» $v = \frac{\omega (Q/\pi)^{1/2}}{(2E)^{3/4}} \text{ avec } \omega \text{ (rad/s): vitesse angu-}$ laire de rotation Les vitesses spécifiques N_{QE} , n_q et v , citées sont des valeurs relatives à la machine. Pour les Pelton à plusieurs jets, la vitesse spécifique par jet s'obtient en divisant ces valeurs par $\sqrt{z_o}$. Pour les machines multiétages, la vitesse spécifique par étage se calcule en introduisant dans l'expression de N_{QE} , de n_q ou de v la va- leur de E ou de H divisée par le nombre d'étages.	

σ (-)	nombre de Thoma correspondant à l'implantation de la machine $\sigma = \frac{NPSE}{E}$ avec $NPSE = \frac{p_{\bar{I}} - p_v}{\rho} + \frac{C_{\bar{I}}^2}{2} - g(Z_{\bar{I}e} - Z_{\bar{I}})$
$p_{\bar{I}}$ (Pa)	pression absolue dans la section de référence basse pression $\bar{I}$
p_v (Pa)	pression de dégagement de vapeur
ρ (kg/m ³)	masse volumique
$C_{\bar{I}}$ (m/s)	vitesse moyenne dans la section de référence basse pression $\bar{I}$
$Z_{\bar{I}}$ (m)	niveau de la section de référence basse pression $\bar{I}$
$Z_{\bar{I}e}$ (m)	niveau de référence situé à l'intersection de l'arête côté basse pression et de la ceinture pour les Francis, pompes-turbines et pompes, l'axe des tourillons de pales pour les Kaplan et l'axe de la machine pour les groupes horizontaux Il faut remarquer que ce niveau de référence correspond, en général, à l'emplacement du début de cavitation et qu'il est différent de celui de la Norme CEI No 41, 3ème édition, pour les machines radiales (axe de la bête).

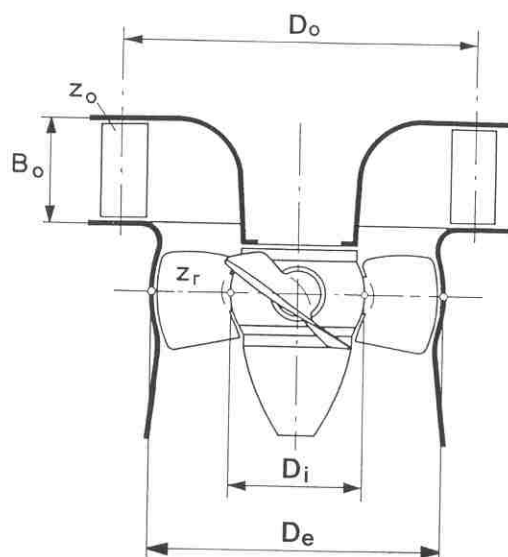
D'autres grandeurs apparaissent dans certains textes et figures:

$\varphi_{\bar{I}e}$ (-)	coefficient de débit $\varphi_{\bar{I}e} = \frac{Q}{\pi \omega R_{\bar{I}e}^3}$ avec $R_{\bar{I}e} = \frac{D_{\bar{I}e}}{2}$
$\psi_{\bar{I}e}$ (-)	coefficient d'énergie $\psi_{\bar{I}e} = \frac{2E}{\omega^2 R_{\bar{I}e}^2}$
ΔZ_d (m)	différence de niveau entre la cote du plan médian horizontal de la bête et le fond du diffuseur.

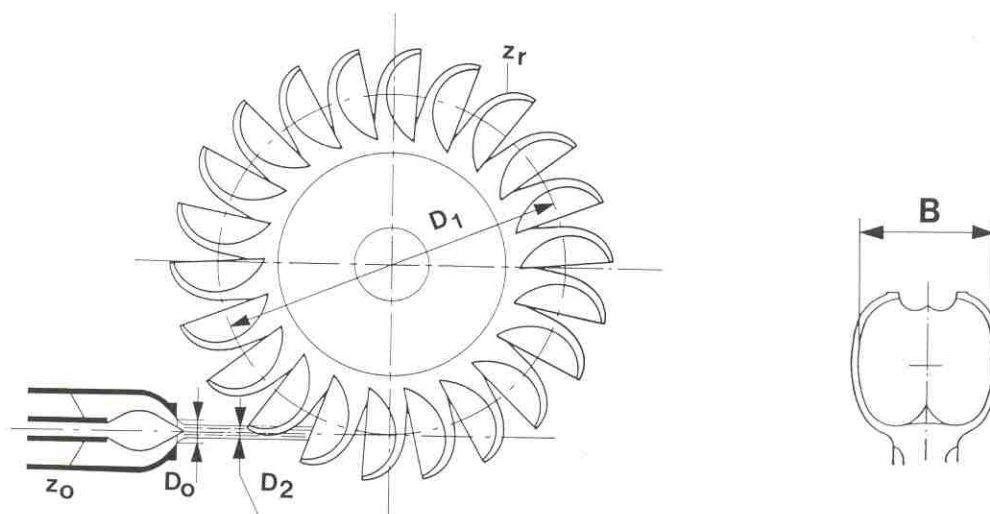
1. Dimensions principales du distributeur et de la roue Francis.



2. Dimensions principales du distributeur et de la roue Kaplan.



3. Dimensions principales de l'injecteur et de la roue Pelton.



Centrale de Naturno

Trentin, Haute-Adige, Italie

1 groupe Pelton à 2 roues de 55 MW chacune

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

Fabrication: Ansaldo, Gênes et Riva Calzoni, Milan, Italie

Maître d'œuvre: Azienda Elettrica Consorziale delle Città di Bolzano e Merano (AEC), Italie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	10013	10670	11189
H (m)	1021	1088	1141
Q (m ³ /s)	5,60	5,77	5,90
P (MW)	50,0	55,0	58,6
D ₁ (m)	2,260	f (Hz)	50
D ₀ (m)	0,210	n (t/s; t/min)	10,0; 600
D ₂ (m)	0,220	N _{QE} (-)	0,023
B (m)	0,530	n _q	7,6
z _r (-)	21	v (-)	0,048
z ₀ (-)	2		

Caractéristiques d'une roue

La centrale utilise l'eau accumulée dans le lac de Vernago d'un volume de 42·10⁶ m³, retenu par une digue en terre. Une galerie de 15 km amène l'eau dans la conduite forcée unique. La centrale à ciel ouvert est équipée de 3 groupes comprenant 2 roues Pelton et un alternateur. L'eau est ensuite restituée à l'Adige près de Naturno à 40 km de Bolzano.

Généralités

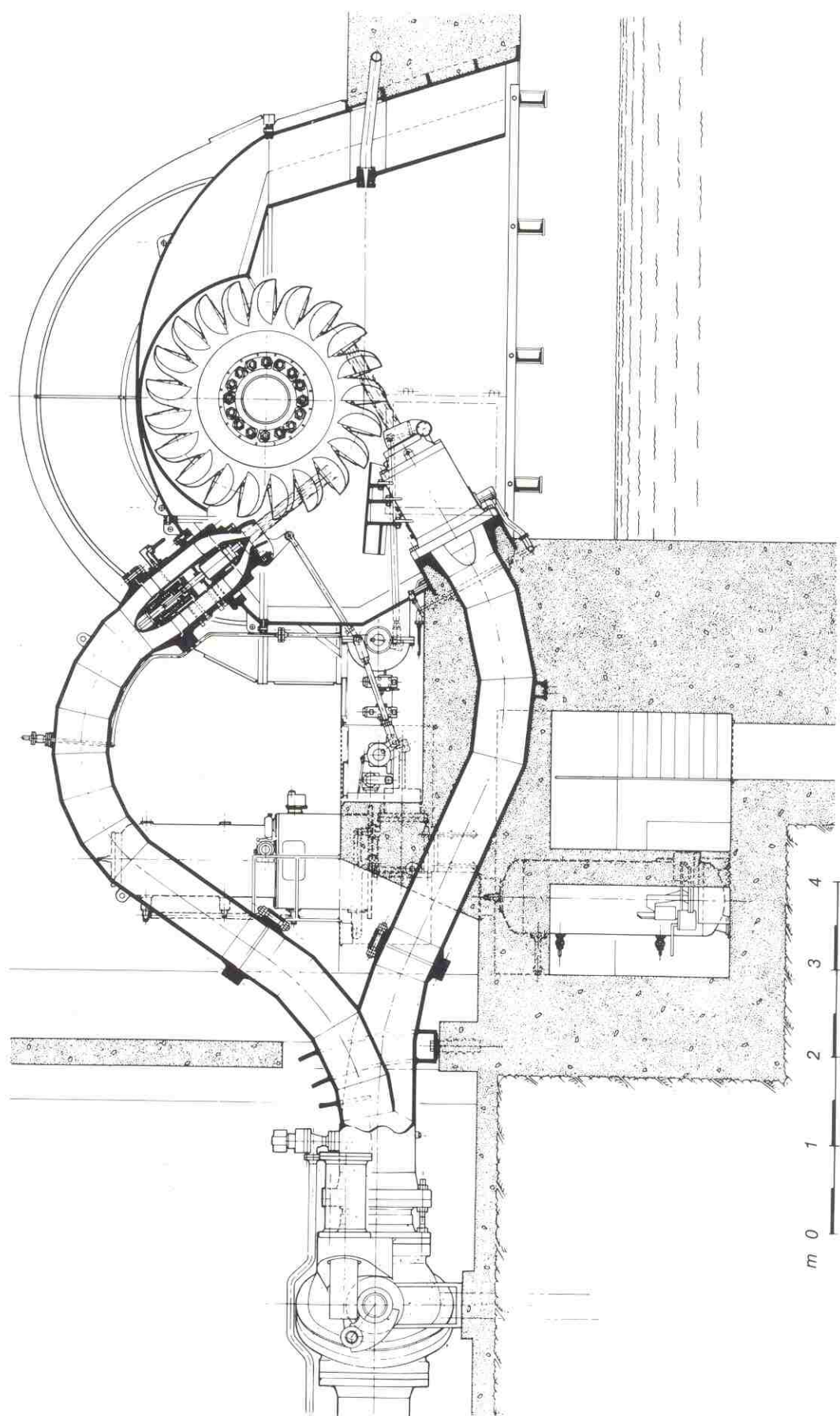
Les 2 premiers groupes de 66 MW ont été mis en service en 1983. Le troisième groupe, d'une puissance de 110 MW, est en service depuis 1986 (fig. 1). La production moyenne annuelle de l'aménagement est de 105 GWh.

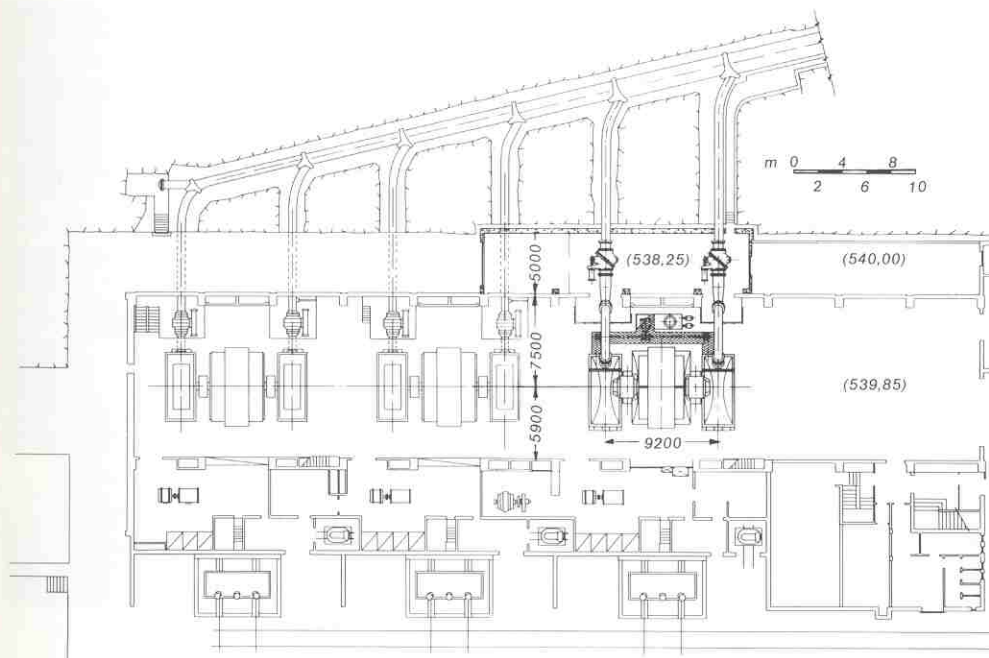
La turbine est à 2 jets, à axe horizontal. Le répartiteur, à 2 branches, a une bifurcation avec nervure extérieure (fig. 2). Son diamètre d'entrée est de 0,755 m et sa masse totale de 14 t. Les 2 injecteurs sont du type rectiligne avec servomoteur intérieur (fig. 3).

Conception hydraulique et mécanique

Les 2 roues, d'une masse de 7,8 t et d'un diamètre extérieur de 2,810 m sont en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni. Elles sont meulées à la main (fig. 4).

Chaque paire de jets possède une vanne de garde sphérique de 700 mm de diamètre.



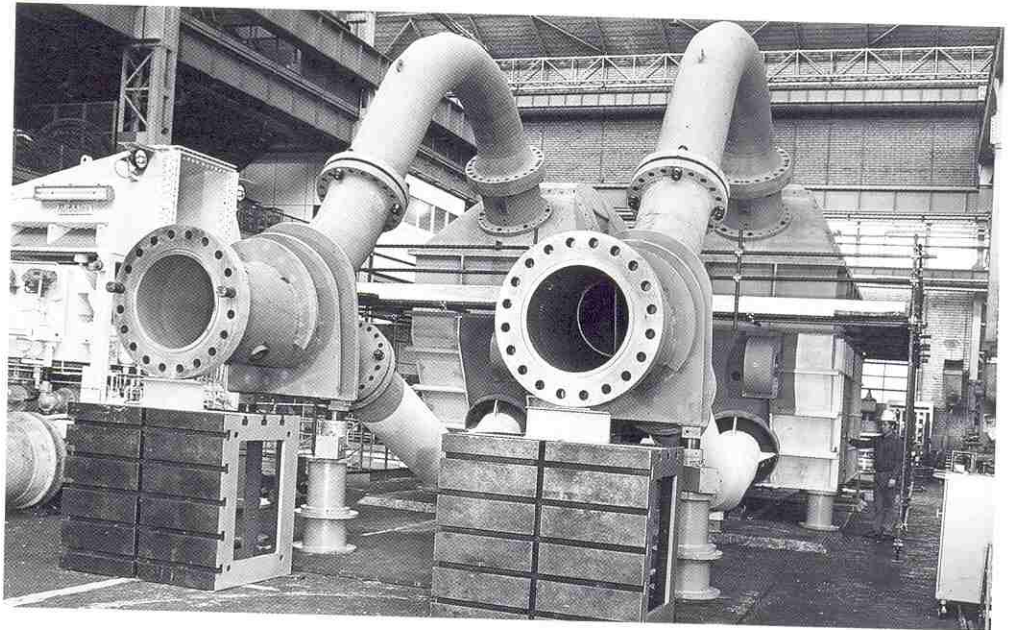


1. Vue en plan de la centrale avec les 2 groupes de 66 MW et le nouveau groupe de 110 MW (document Hydroart).

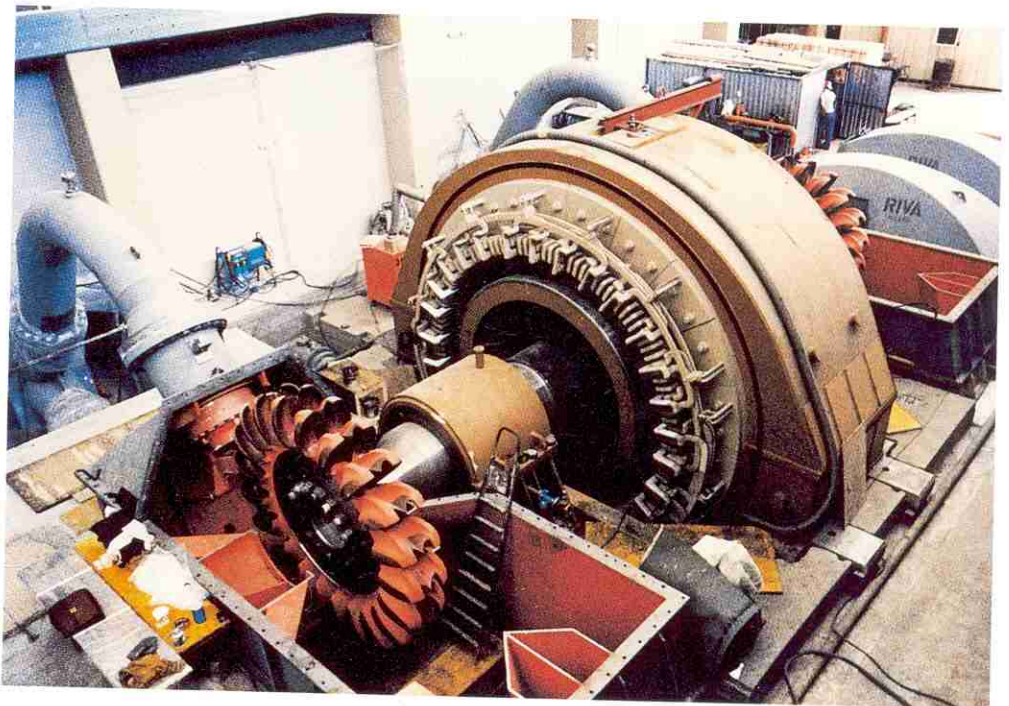


2. Répartiteur et bâti de turbine préassemblés en ateliers (photo Hydroart).

3. Intérieur du bâti. On remarque le capot de roue destiné à diminuer les pertes par ventilation ainsi que l'injecteur et son déflecteur (photo Hydroart).



4. Vue du groupe en cours de montage en centrale (photo Hydroart).



Les roues sont fixées au plateau d'accouplement de l'arbre par des boulons ajustés. L'arbre comporte 2 paliers.

Les essais de développement ont été effectués dans le laboratoire de Hydroart à Milan. Le modèle avait une largeur d'auget $B = 150$ mm; la chute d'essai était $H = 60$ m.

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

Département de l'Isère, France

4 turbines Pelton de 156,3 MW

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

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

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	7600	8973	9003
H (m)	775,0	915,0	918,1
Q (m ³ /s)	18,1	19,5	19,5
P (MW)	122,6	156,3	157,1
D ₁ (m)	2,700	f (Hz)	50
D ₀ (m)	0,264	n (t/s; t/min)	7,14; 428,6
D ₂ (m)	0,216	N _{QE} (-)	0,034
B (m)	0,720	n _q	11,4
z _r (-)	20	v (-)	0,072
z ₀ (-)	5		

Caractéristiques

La centrale Pelton 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 (fig. 1). L'aménagement est situé à 50 km de Grenoble sur la rivière l'Eau d'Olle.

Généralités

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 $140 \cdot 10^6$ m³. Le barrage comporte un évacuateur de crues dimensionné pour 50 m³/s.

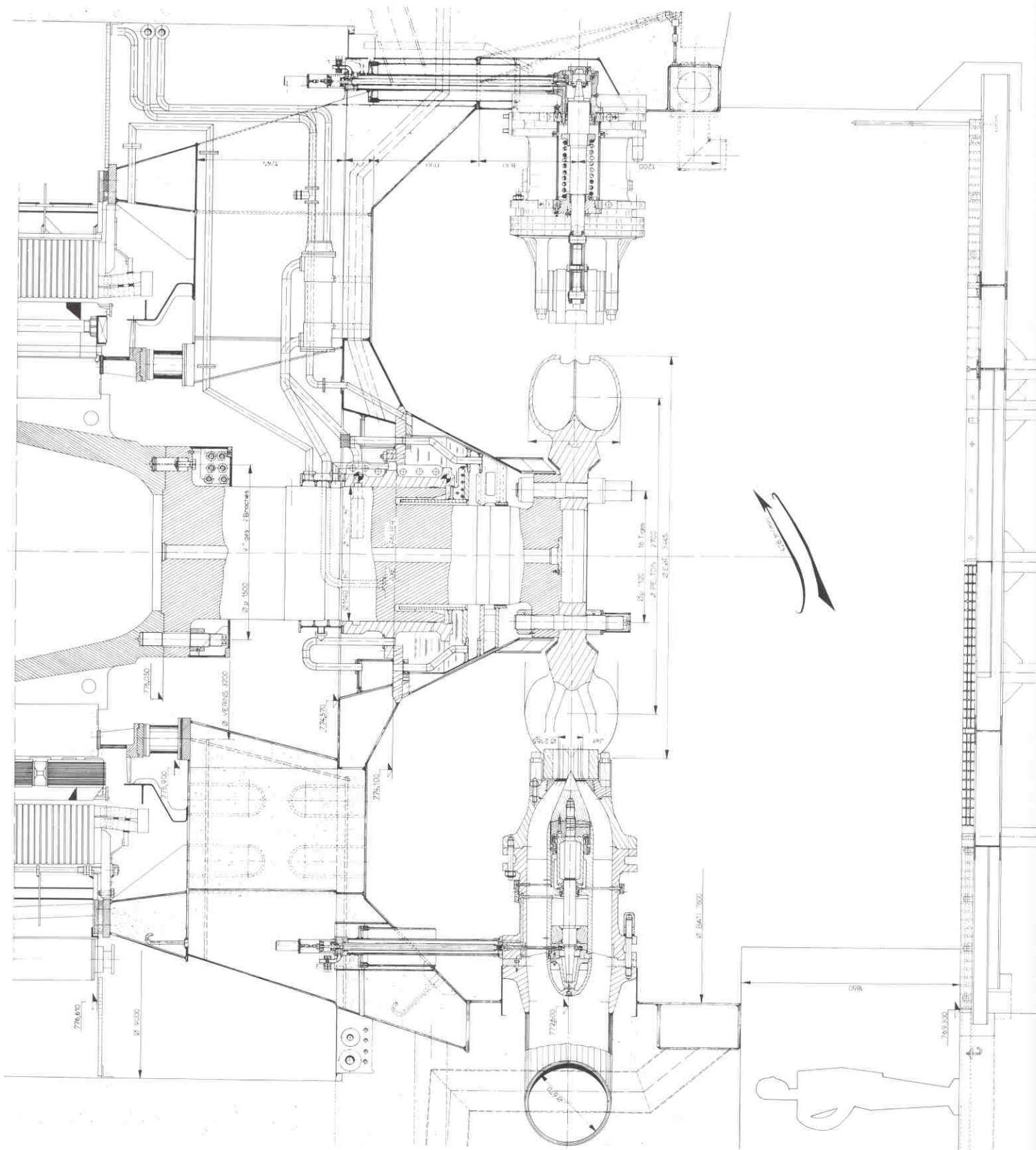
La galerie d'amenée, d'une longueur de 7105 m, est en partie en béton avec un diamètre de 7,1 m et en partie blindée avec un diamètre de 5,4 m. Les 3 conduites forcées ont un diamètre de 3 m pour une longueur de 1800 m. L'épaisseur maximale du blindage est de 46 mm. Les vitesses maximales de l'eau sont de 7,5 m/s dans la galerie blindée et de 10,3 m/s dans les conduites forcées.

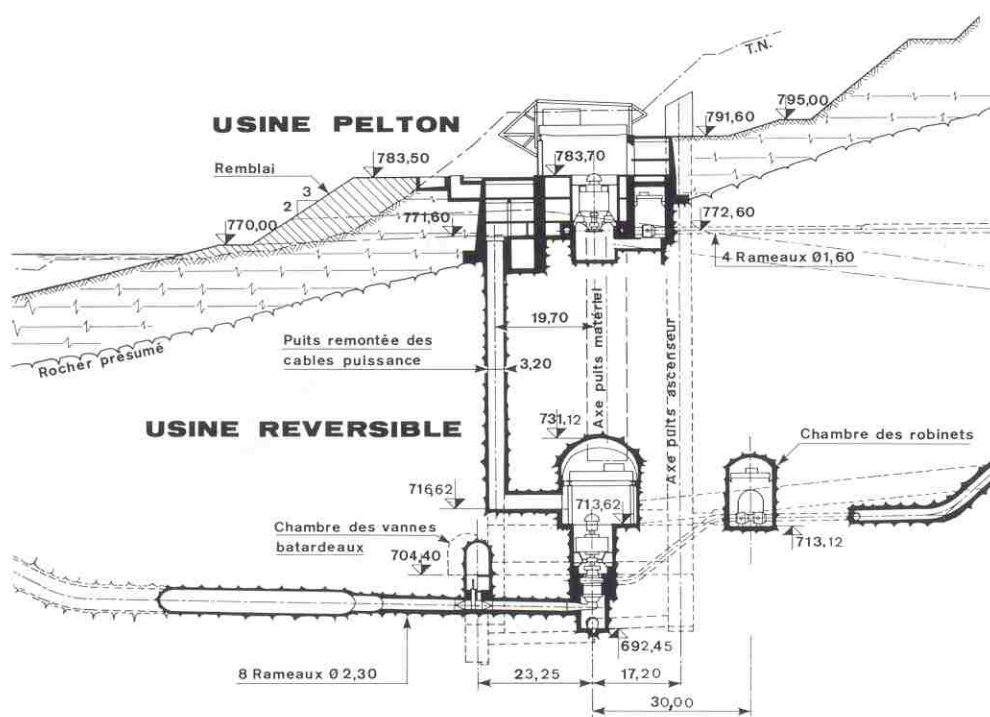
La centrale est en surface; l'eau rejoint la retenue du Verney par 4 tunnels à niveau libre.

Les turbines, d'une masse totale de 230 t, sont à axe vertical.

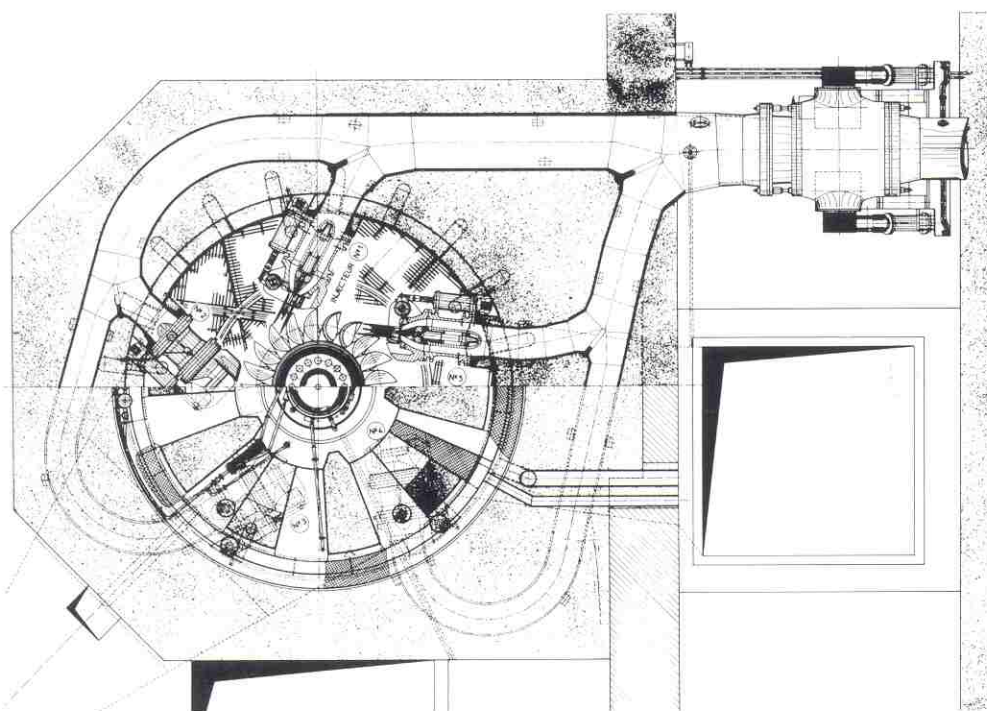
Le répartiteur, d'un diamètre d'entrée de 1,350 m, est divisé en 2 branches, l'une alimentant 3 injecteurs et l'autre 2 injecteurs (fig. 2 et 3).

Conception hydraulique et mécanique





1. Coupe montrant les 2 centrales de l'Eau d'Olle d'une puissance totale installée de 1800 MW (document EDF).

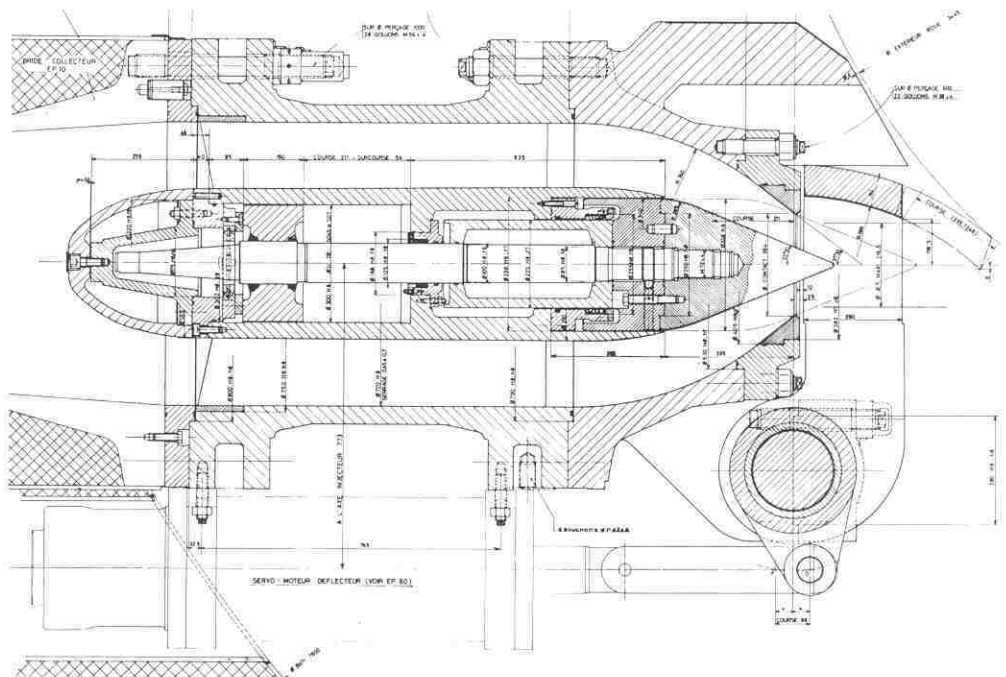


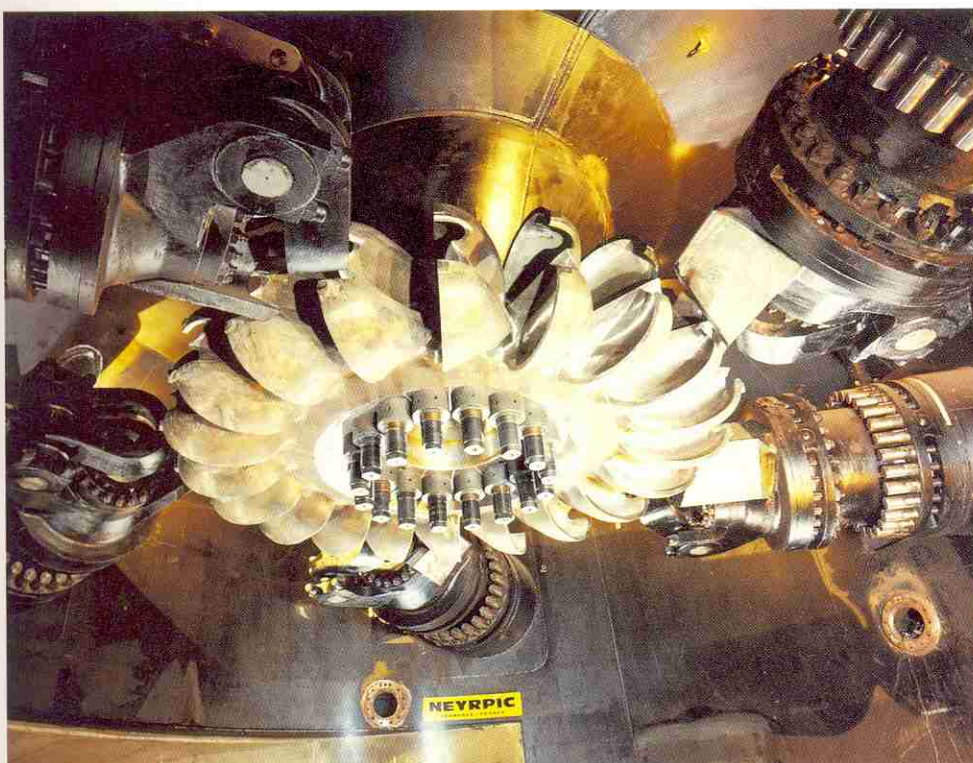
2. Vue en plan de la machine. On distingue l'alimentation des injecteurs par 2 branches (photo Neyrpic).

3. Bâti de turbine avec la tuyauterie d'alimentation des injecteurs en cours de montage (photo Neyrpic).



4. Coupe d'un injecteur rectiligne (document Neyrpic).





5. Roue avec les 5 injecteurs. On remarque les «toits» qui ont pour fonction de protéger le jet contre les projections provenant du jet précédent (photo Neyrpic).

Les bifurcations ont des nervures internes.

Le répartiteur, en acier E 36-4, est divisé en 3 parties; sa masse totale est de 52,1 t.

Les injecteurs sont rectilignes. Le pointeau et la buse sont en acier XC 38 avec une métallisation en Ni - Cr.B (fig. 4). Les déflecteurs, du type classique à pénétration partielle dans le jet, sont actionnés par des servomoteurs individuels.

Les roues, en acier inoxydable Z5 CN 12.04 M, ont une masse de 13,8 t (fig. 5). Les augets sont usinés par meulage.

L'accouplement de la roue est à friction. La ligne d'arbre est à 2 paliers. Le palier inférieur est situé sur le cône central alors que le palier supérieur, combiné avec la butée, est placé sur le croisillon supérieur.

Le groupe est conçu également pour la marche en compensateur synchrone.

Les essais de développement ont été exécutés dans le laboratoire Neyrpic à Grenoble. Le modèle avait une largeur d'auget $B = 100$ mm; les chutes d'essai étaient de 70 et 120 m.

Les essais de réception ont été exécutés sur le prototype par la méthode thermodynamique. Le rendement mesuré est de 90,5%.

- Documentation EDF.

Centrale de Jostedal

Comté de Sogn og Fjordane, Norvège

1 turbine Pelton de 288 MW

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

Maître d'œuvre: Statkraft, Oslo, Norvège

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	10523	11081	11403
H (m)	1073	1130	1163
Q (m ³ /s)		28,5	
P (MW)	266	288	301
D ₁ (m)	3,175	f (Hz)	50
D ₀ (m)	0,283	n (t/s; t/min)	7,14; 428,6
D ₂ (m)	0,222	N _{QE} (-)	0,035
B (m)	0,726	n _q	11,7
z _r (-)	22	v (-)	0,074
z ₀ (-)	5		

Caractéristiques

L'aménagement de Jostedal est situé à 160 km à vol d'oiseau au nord-est de Bergen, à l'extrémité du fjord Sogna qui pénètre très profondément dans les terres.

L'eau est prélevée dans un lac artificiel et dans des lacs naturels situés à environ 1200 m d'altitude. Une galerie de 48 km de longueur, avec 16 prises d'eau, amène l'eau dans un tunnel à forte pente, suivi d'un puits blindé d'un diamètre de 2,60 à 2,20 m et d'une longueur de 802 m (fig. 1).

Les prises d'eau le long de la galerie font office de chambres d'équilibre. Une des prises est équipée d'un diaphragme pour éviter des résonances.

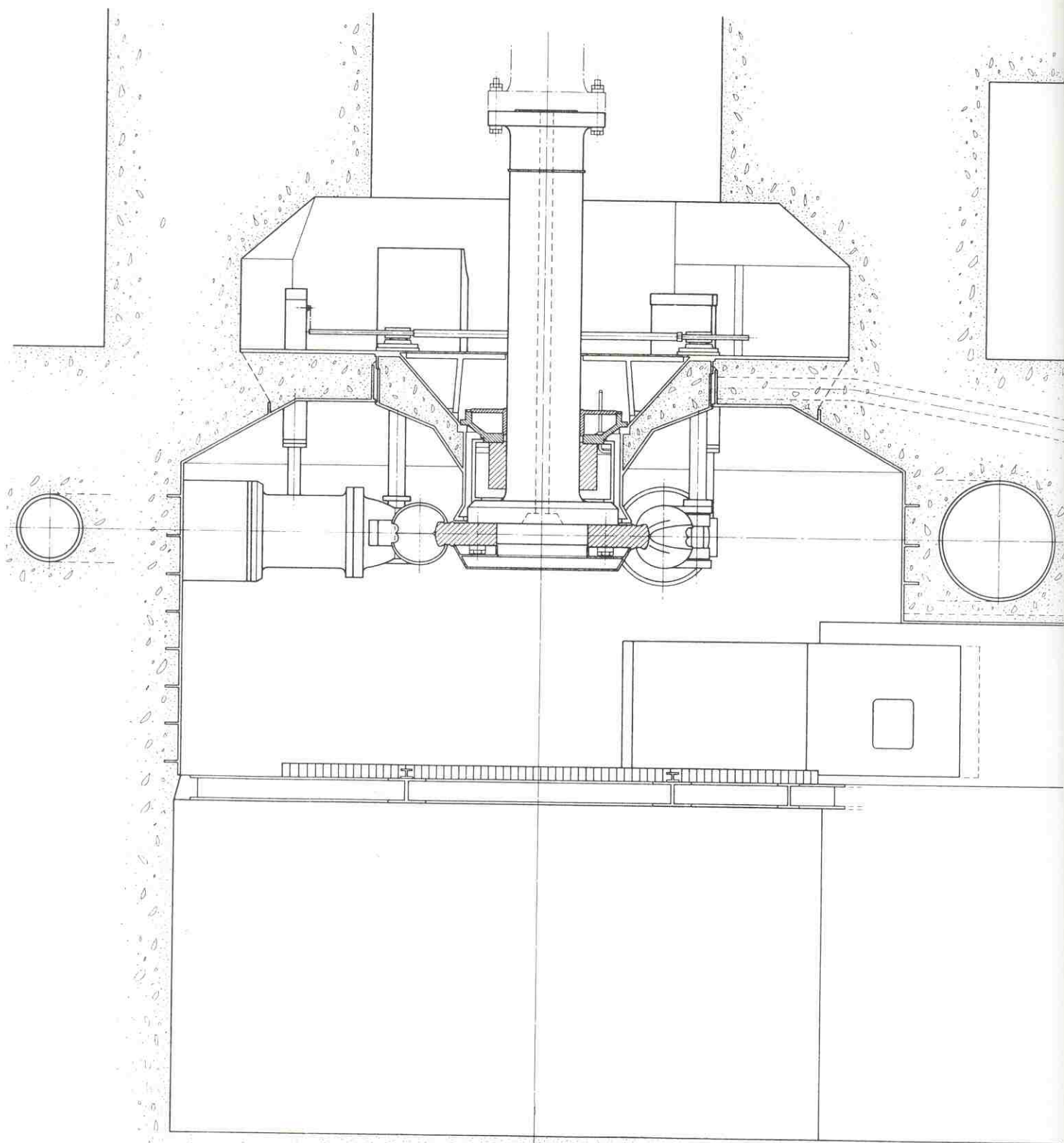
La centrale est en caverne. L'eau rejoint le fjord par une galerie de 15 km de longueur environ. L'eau est restituée à 40 m de profondeur pour permettre un bon mélange de l'eau douce et de l'eau salée et éviter ainsi que le fjord ne gèle en hiver.

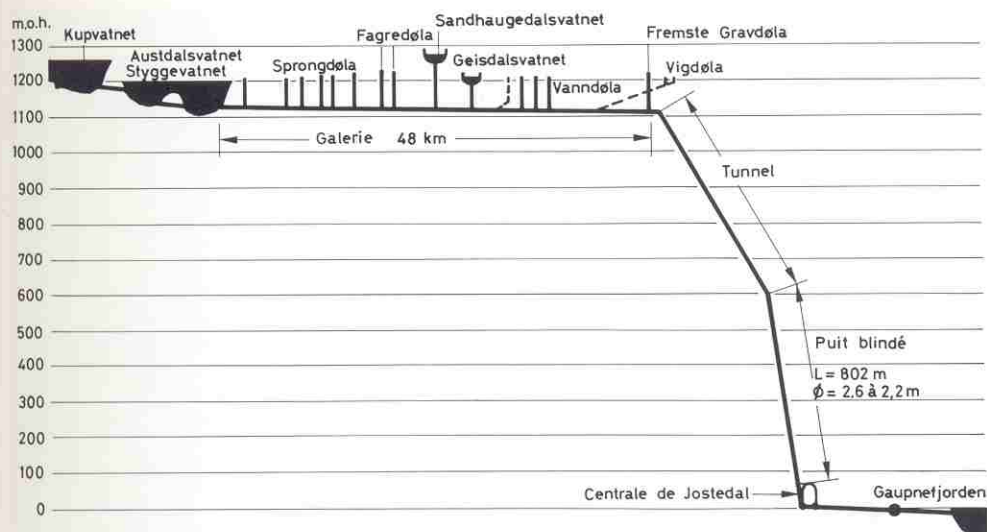
Le groupe a été mis en service en 1988 et la production annuelle moyenne est de 880 GWh.

Le répartiteur alimente tous les injecteurs en série. Il est divisé en 3 parties pour le transport. Les bifurcations possèdent une nervure de renforcement intérieure (fig. 2).

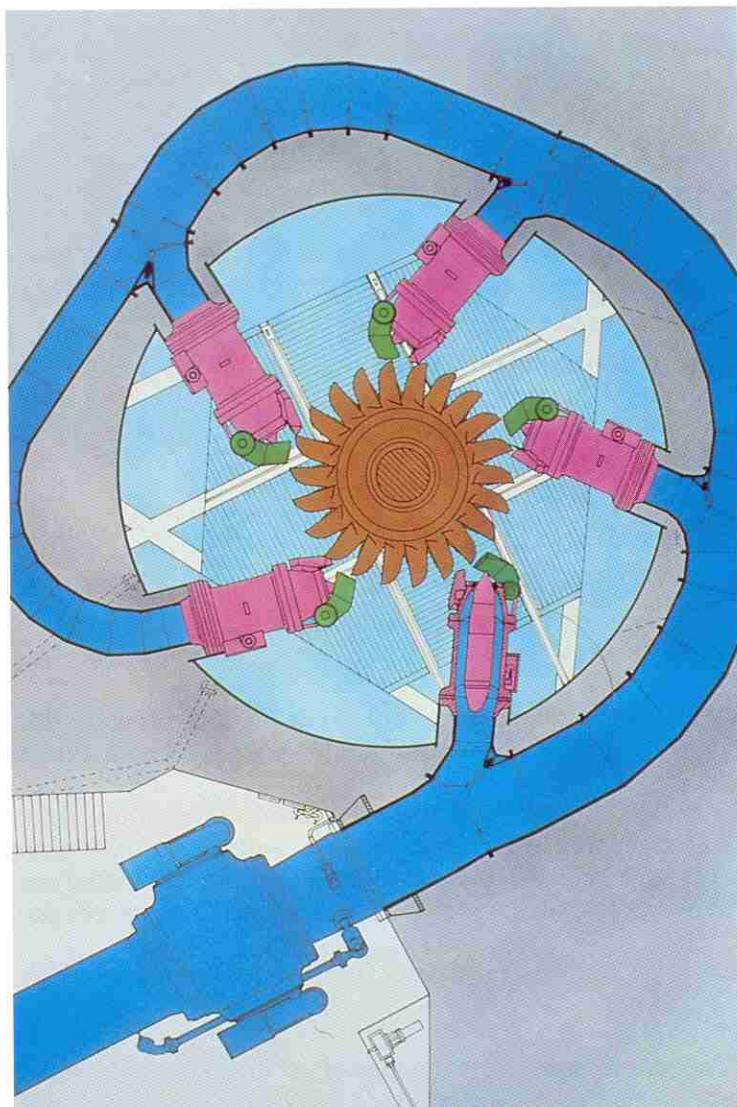
Généralités

Conception hydraulique et mécanique



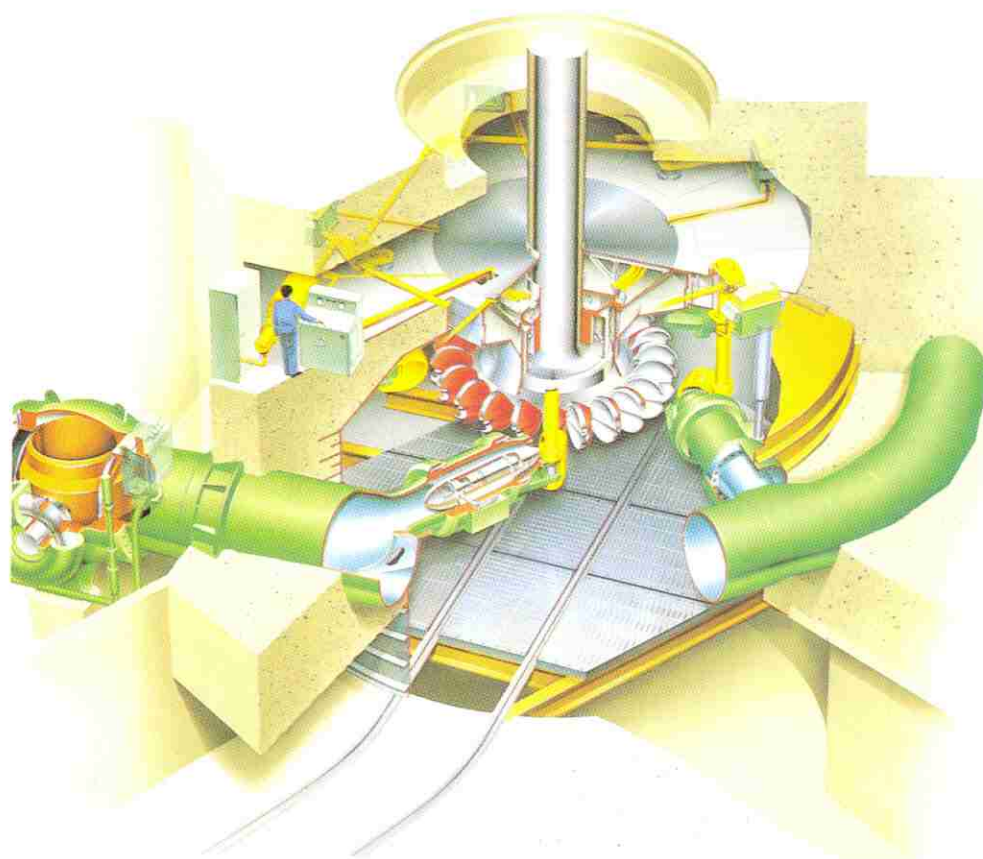


1. Schéma montrant les lacs d'accumulation, les prises d'eau, le tunnel, le puits blindé et la centrale (d'après un document Kvaerner Hydro).



2. Vue en plan de la machine avec les 5 injecteurs en série (document Kvaerner Hydro).

3. Vue de la turbine éclatée.
On remarque le système
d'interconnexion des dé-
flecteurs ainsi que la
plate-forme de démon-
tage (document Kvaerner
Hydro).



Les injecteurs rectilignes sont équipés de servomoteurs à double action équilibrés par une série de rondelles à ressorts. Les pointeaux peuvent ainsi être manœuvrés avec une pression égale à 40% de la pression nominale. Les servomoteurs ont une tendance à fermer sur toute la course en cas de perte de pression d'huile.

Le pointeau et la buse sont réalisés en acier inoxydable forgé.

Le régulateur réduit automatiquement le nombre de jets lorsque la puissance diminue en dessous de 50% tout en maintenant une variation de puissance très graduelle.

Les déflecteurs, en acier coulé avec un couteau amovible en acier inoxydable, sont interconnectés et commandés par un servomoteur unique (fig. 3).

Le tracé d'aubage de la roue est un compromis entre un dessin hydraulique idéal et un tracé tendant à réduire les concentrations de contraintes. Le résultat final s'obtient par une combinaison résultant de l'analyse des contraintes par éléments finis et de mesures sur site avec des jauges de contraintes (fig. 4).

La roue, moyeu et augets, est intégralement coulée en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni.

L'accouplement entre l'arbre et la turbine est à friction, avec des boulons précontraints, ce qui facilite le démontage.



4. Injecteur, déflecteur et roue. Le tube gris contient les tuyaux d'huile sous pression pour la commande du pointeau (photo Kvaerner Hydro).

Le palier est très robuste avec une lubrification naturelle, sans pompe à huile. Il est situé très près de la roue pour diminuer le moment de flexion.

Pour supprimer autant que possible les rejaillissements d'eau sur les aubes, de l'air est aspiré dans le tunnel de sortie et amené par des tuyaux sur la partie supérieure du disque de la roue. Cet air assure en outre une partie du refroidissement du palier de la turbine.

Pour assurer une décélération suffisamment forte de la roue, la turbine est équipée de jets inversés agissant sur le dos des aubes.

La plate-forme de travail sous la machine est très robuste et munie de rails pour permettre à un chariot de transporter la roue et les injecteurs lors des montages et démontages.

Centrale de Sellrain-Silz

Province du Tyrol, Autriche

2 turbines Pelton de 250 MW

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

Conception mécanique et fabrication: Sulzer-Escher Wyss SA, Zurich, Hydro Vevey SA (Charmilles), Vevey, Suisse, Maschinenfabrik Andritz AG, Graz, Autriche

Maître d'œuvre: Tiroler Wasserkraftwerke AG (TIWAG), Innsbruck, Autriche

	minimum (2 turbines)	nominal (2 turbines)	nominal (1 turbine)	maximum (1 turbine)
E (J/kg)	11326	11499	11909	12093
H (m)	1154,9	1172,6	1214,4	1233,1
Q (m ³ /s)	23,70	23,90	24,31	24,50
P (MW)	244,4	250,0	263,4	269,3
D ₁ (m)	2,850	f (Hz)	50	
D ₀ (m)	0,226	n (t/s; t/min)	8,33; 500	
D ₂ (m)	0,185	N _{QE} (-)	0,037	
B (m)	0,570	n _q	12,2	
z _r (-)	23	v (-)	0,077	
z ₀ (-)	6			

Caractéristiques

La centrale de Sellrain-Silz fait partie d'un aménagement comprenant 2 centrales, l'une équipée de 2 pompes-turbines de 151 MW en turbine et 124 MW en pompe et l'autre équipée de 2 turbines Pelton de 250 MW.

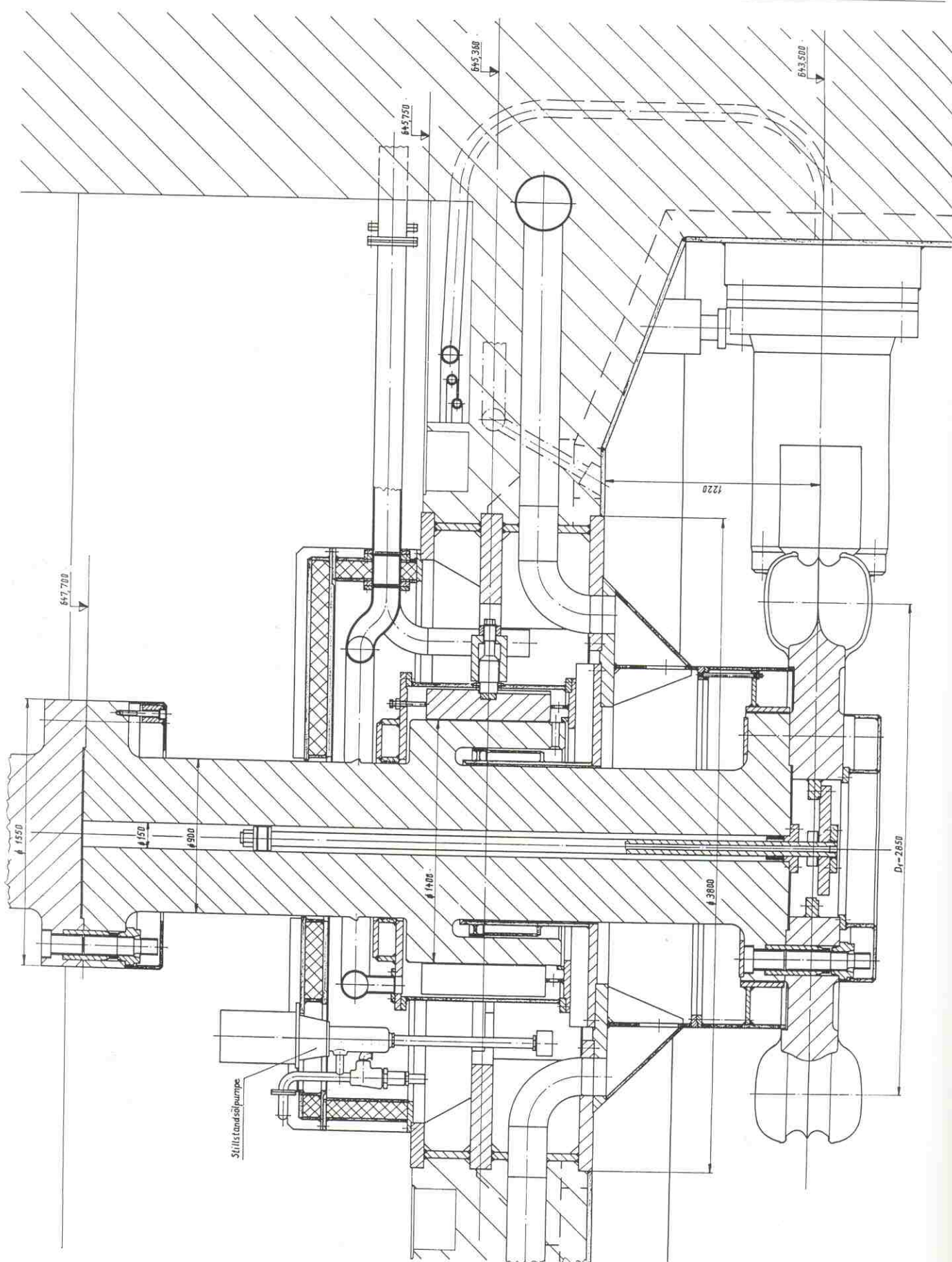
La centrale de pompage-turbinage (H = 440 à 319 m) est située entre le lac de Finstertal (altitude 2322 m, volume 60 · 10⁶ m³) et le lac de Längental (altitude 1901 m, volume 3 · 10⁶ m³).

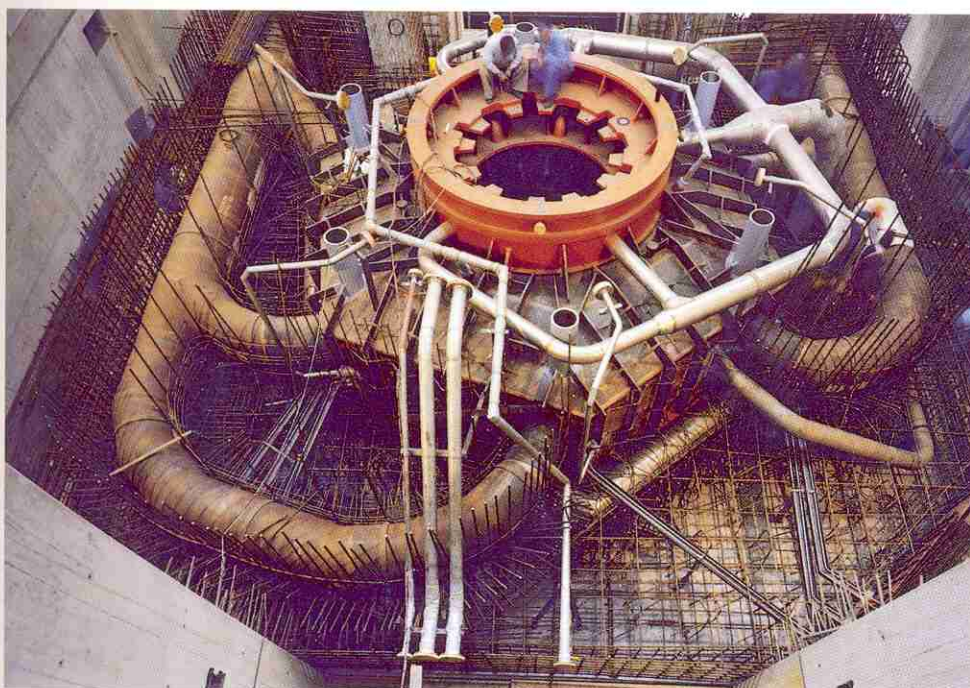
Les 2 barrages sont des digues en terre de 149 et 45 m de hauteur.

A partir du lac de Längental, l'eau s'écoule dans une galerie de 3,3 m de diamètre et 4,7 km de longueur qui se termine par une chambre d'équilibre. La conduite forcée unique a un diamètre variable de 2,7 m à 2,2 m et une longueur totale de 1,9 km. La centrale est en surface. Le canal de fuite, d'une longueur de 1150 m, conduit les eaux dans l'Inn à environ 30 km à l'amont d'Innsbruck.

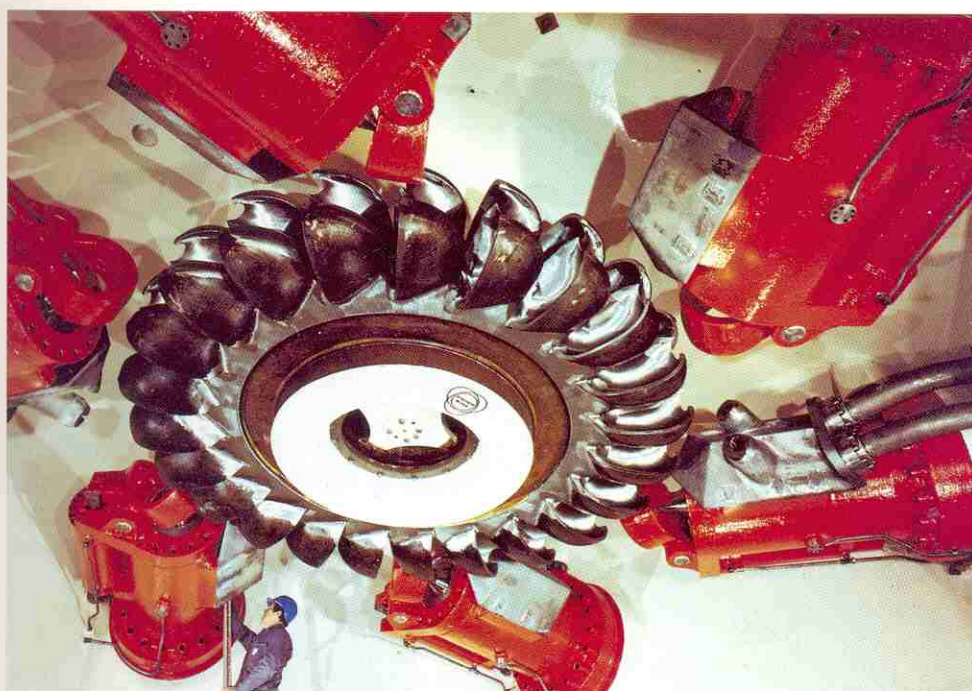
La mise en service a eu lieu en 1982. La production annuelle moyenne de l'aménagement est de 720 GWh.

Généralités





1. Montage de la chambre d'eau de la turbine. On distingue, entre autres, le répartiteur à 2 branches et les tubes d'aération de la partie supérieure de la roue (photo Sulzer-Escher Wyss).



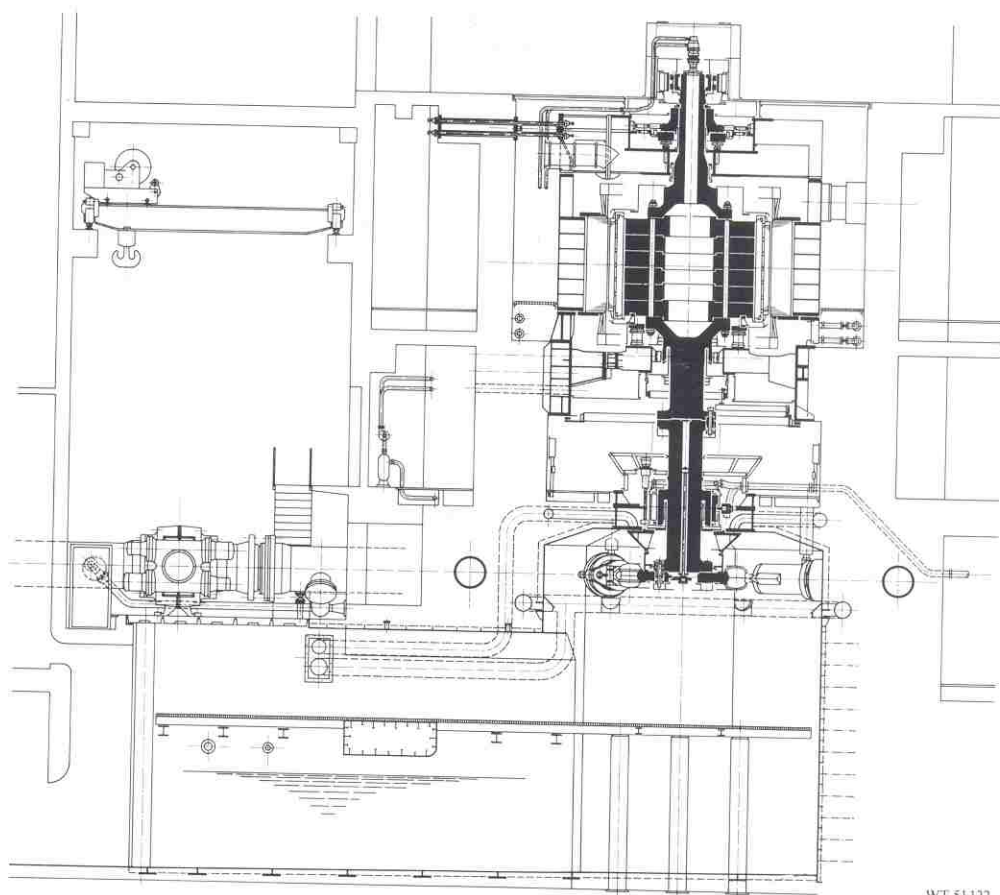
2. Roue, injecteurs et déflecteurs. On remarque les «toits» de protection des jets dont 2 sont combinés avec les jets de freinage de la roue (photo Sulzer-Escher Wyss).

Le répartiteur, en acier soudé TTSt E 44, est formé de 2 branches avec 3 injecteurs chacune (fig. 1). Les bifurcations sont à nervures intérieures. La masse du répartiteur est de 84 t et son diamètre d'entrée de 1,100 m. Les injecteurs rectilignes ont des servomoteurs intérieurs. La buse et le pointeau sont en acier inoxydable, avec un revêtement en chrome dur.

Les déflecteurs sont actionnés par un servomoteur unique et un système de transmission par tringles.

**Conception
hydraulique et
mécanique**

3. Coupe du groupe avec la ligne d'arbre à 3 paliers (document Sulzer-Escher Wyss).



La roue, d'une masse de 15,3 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4 (fig. 2). Les augets sont usinés par commande numérique et polis à la main.

L'accouplement par friction est assuré par 12 boulons M 110 x 6 précontraints.

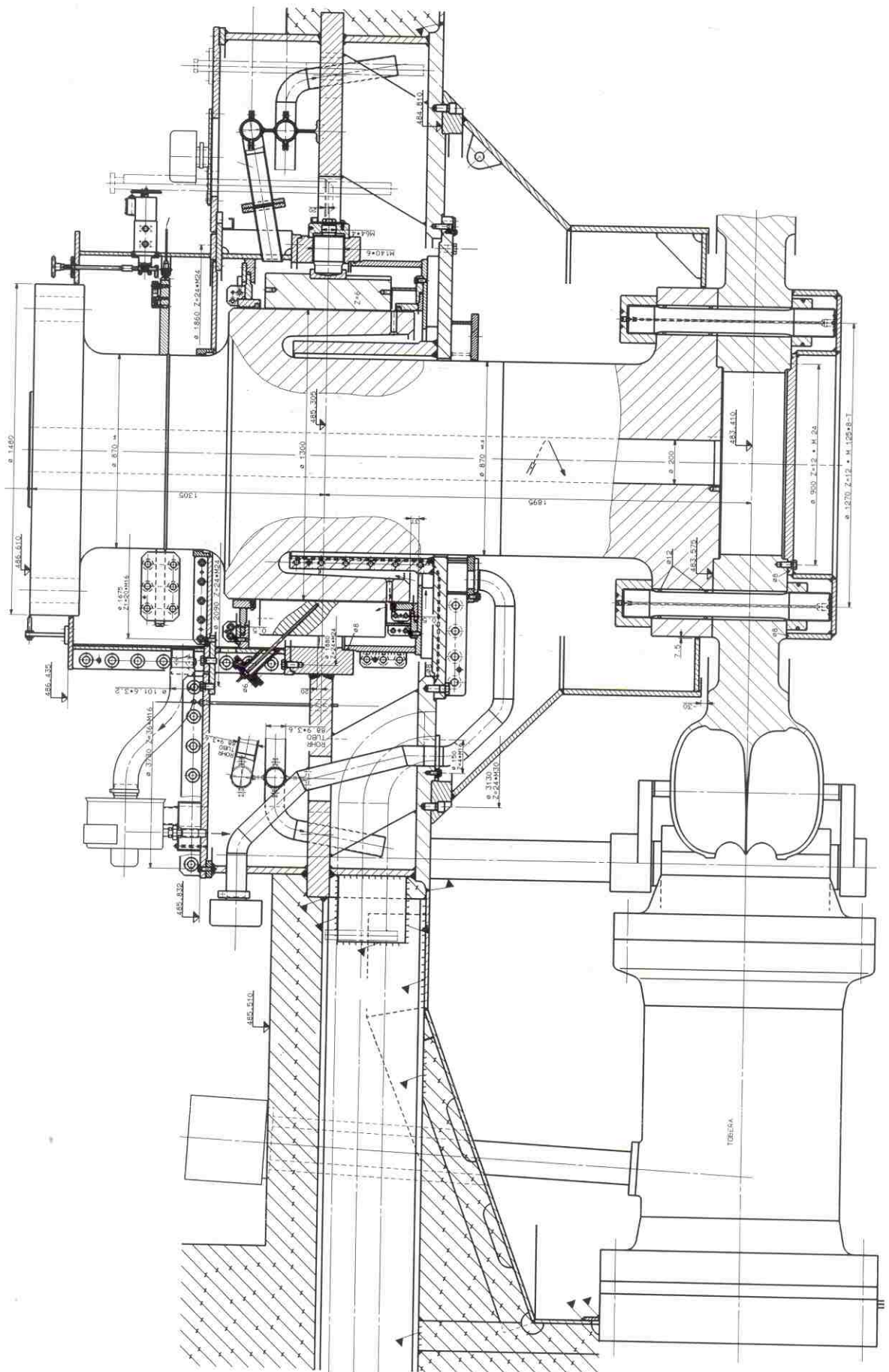
Le palier cloche, muni de 6 segments ajustables, a un diamètre de 1400 mm. La circulation d'huile est naturelle avec un système de refroidissement/chauffage extérieur à la cuve.

Le groupe comprend 3 paliers:

- le palier turbine;
- un palier sous l'alternateur;
- un palier au sommet du groupe.

La butée axiale est située au-dessus de la machine électrique (fig. 3).

Les essais sur modèle réduit ($B = 90$ mm) ont été exécutés dans le laboratoire SEW-Bell à Kriens, sous une chute $H = 195$ m.





1. Centrale en caverne en cours de construction. Longueur 210 m, largeur 18 m, hauteur 37 m (photo Sulzer-Escher Wyss).

La galerie d'amenée, d'un diamètre de 5,3 m, est blindée sur une longueur de 611 m avec des tôles de 27 mm d'épaisseur, dans une zone de plus faible couverture de rocher située sous une rivière.

Le puits vertical n'est blindé que sur une longueur de 100 m dans une zone de rocher très fracturée. Le blindage a un diamètre de 5,3 m et une épaisseur de 40 à 45 mm.

Les 2 tunnels de base, d'un diamètre de 3,6 m, sont également partiellement blindés avec de la tôle de 36 à 46 mm d'épaisseur. Les caractéristiques de la conduite étant extrêmes (produit de la chute et du diamètre: 4800 m^2), un acier de haute qualité a été utilisé par le fabricant (IMPISA, aciers japonais HT 60 et HT 80, suivant la norme ASTM A-517). Le blindage est en outre calculé pour résister à la pleine pression externe, les conduites n'étant pas blindées sur toute leur longueur.

La centrale en caverne (fig. 1) a une longueur de 210 m, une largeur de 18 m et une hauteur de 37 m. Une caverne parallèle de 200 m de longueur, 14 m de largeur et 21 m de hauteur abrite les transformateurs. La centrale est située à 560 m de profondeur au-dessous de la surface du sol.

Conception hydraulique et mécanique

Les 5 premiers groupes seront en service en 1992. Le stade final comprendra 8 groupes d'une puissance totale de 1600 MW. La production annuelle moyenne sera alors de 5,7 TWh.

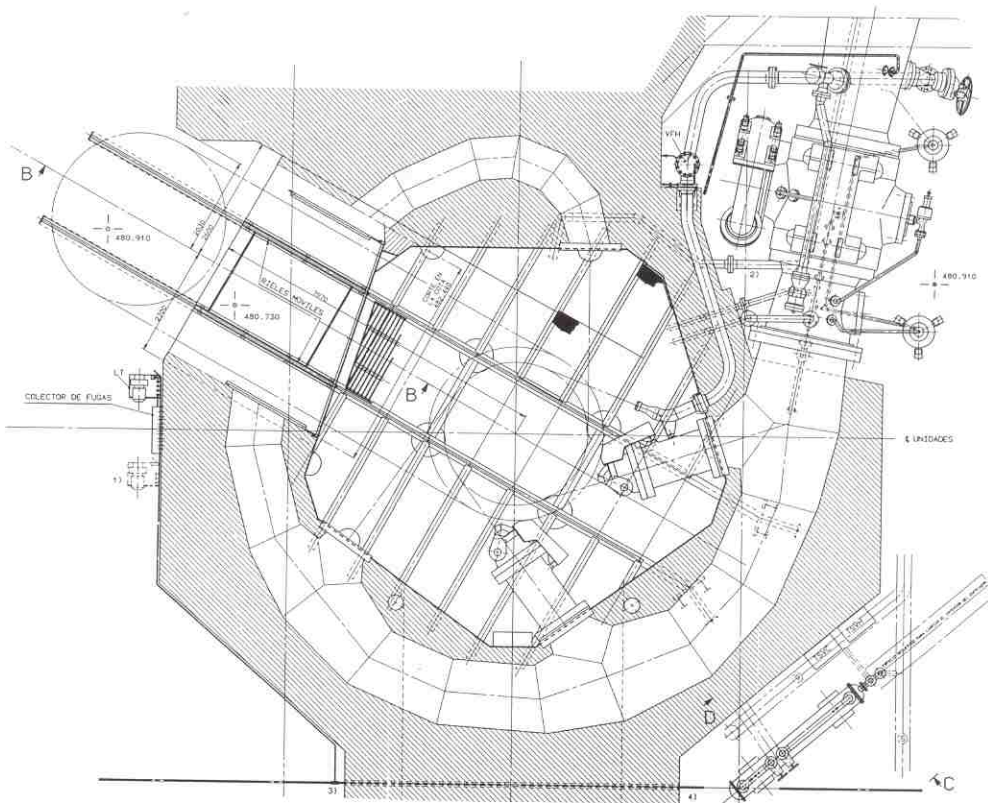
Les turbines sont à axe vertical à 5 jets et tournent à 450 t/min. Une solution à 6 jets et 514 t/min avait été envisagée puis abandonnée car la vitesse d'emballlement ($1,85 \cdot n$) a été estimée trop élevée pour un alternateur de 270 MW refroidi à l'air. En outre, le rendement de la turbine à 5 jets est meilleur que celui d'une machine à 6 jets dans le domaine des fortes charges.

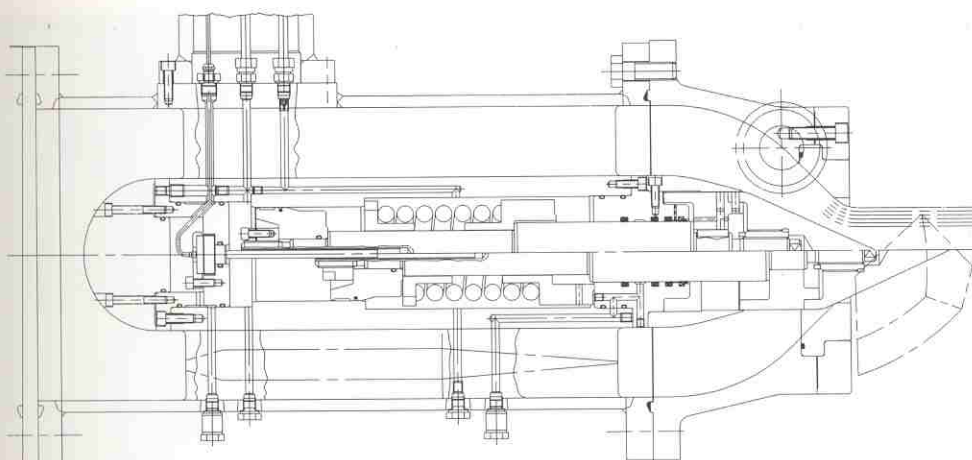
Le répartiteur (fig. 2) est circulaire, son diamètre d'entrée est de 1,669 m et sa masse de 55 t. Il est divisé en 8 parties soudées sur le chantier. L'acier à haute résistance utilisé (700 N/mm^2) est conforme à la norme ASTM A-517; les contraintes maximales prévues ne devant pas dépasser 30% de la limite élastique. Les nervures sont placées à l'intérieur des embranchements.

Les corps des injecteurs sont en acier inoxydable coulé G - X5 Cr Ni 13.4, le pointeau et la buse sont en acier inoxydable X5 Cr Ni 13.4. Les servomoteurs (fig. 3) sont commandés par pression d'huile.

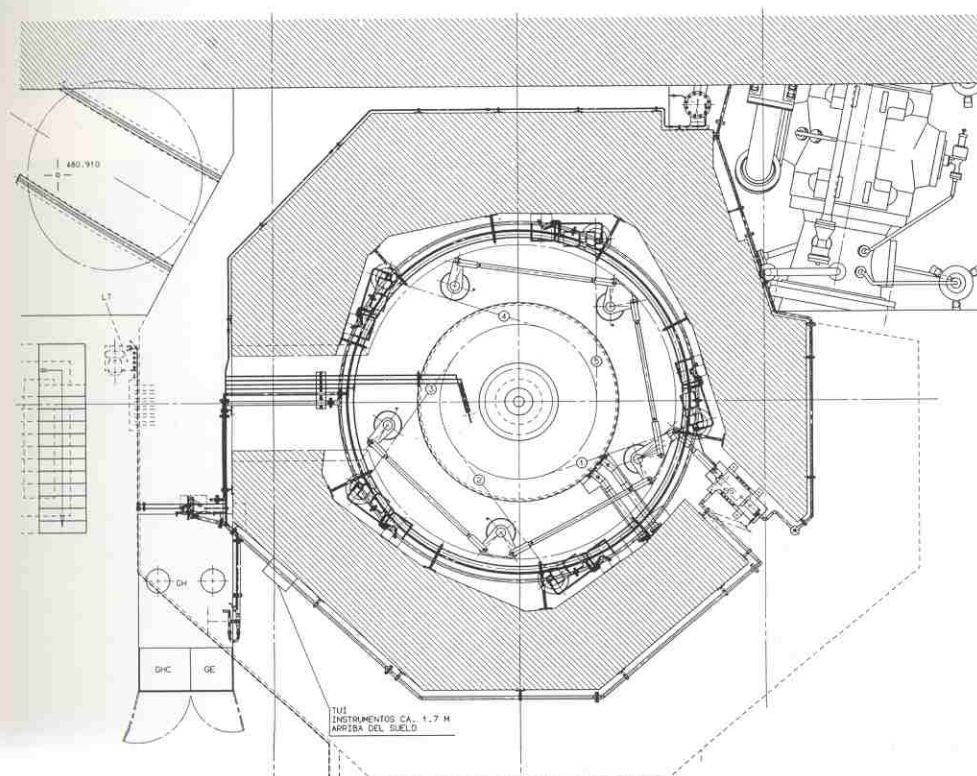
Les déflecteurs, du type à pénétration partielle dans le jet, sont coulés en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4. Ils sont commandés par un système de leviers et de tringles (fig. 4), actionné par un servomoteur unique à pression d'eau.

2. Vue en plan montrant la position des injecteurs et la forme du répartiteur (document Sulzer-Escher Wyss).





3. Coupe typique d'un injecteur rectiligne Sulzer-Escher Wyss (document Sulzer-Escher Wyss).

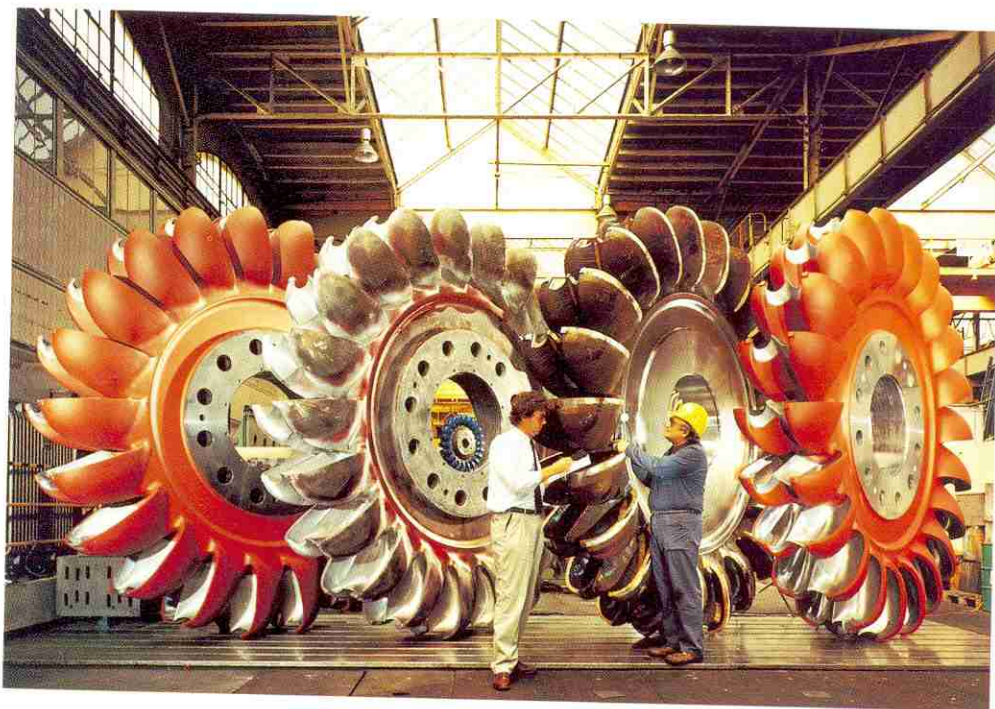


4. Système de commande des déflecteurs composé d'un servomoteur unique à pression d'eau et d'une transmission à leviers et tringles (document Sulzer-Escher Wyss).

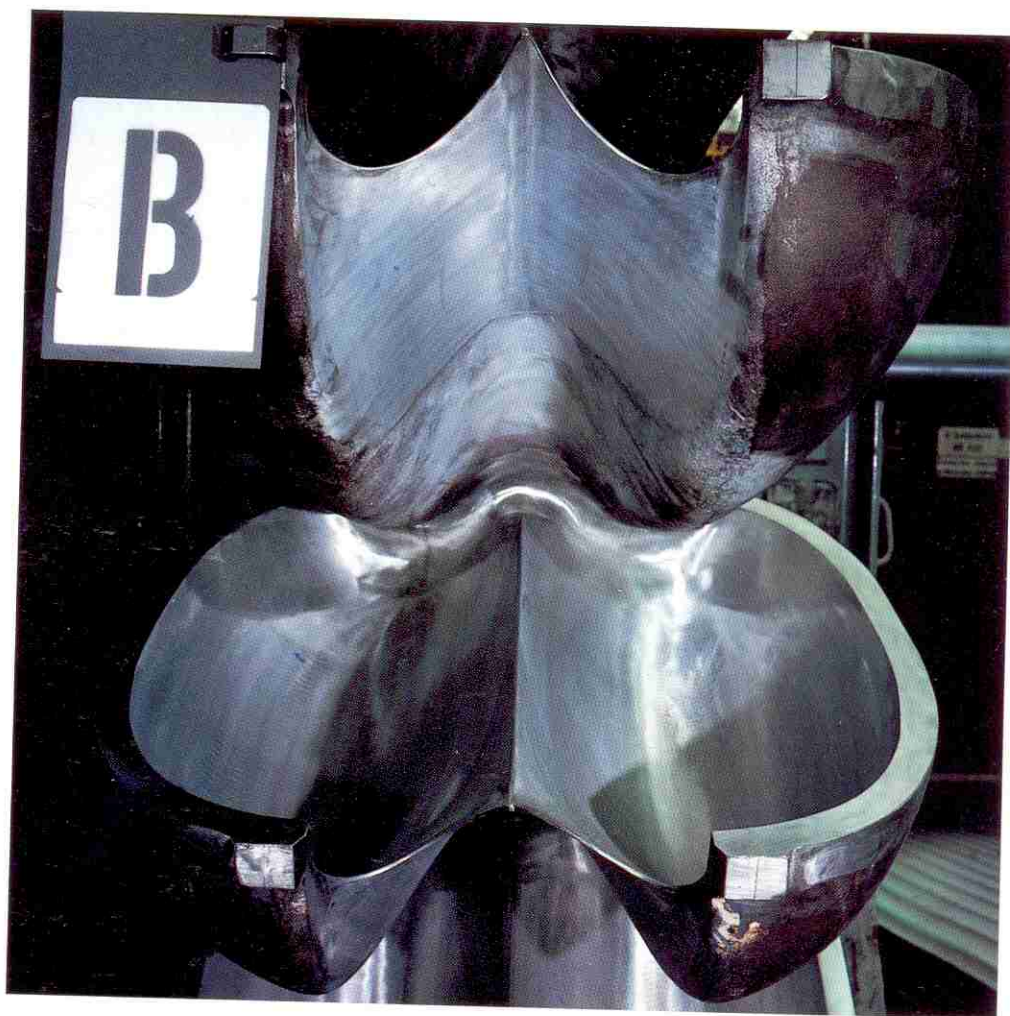
La roue (fig. 5) est coulée d'une pièce en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni suivant la norme ASTM A-243. Les augets (fig. 6) sont usinés par commande numérique puis terminés et polis à la main.

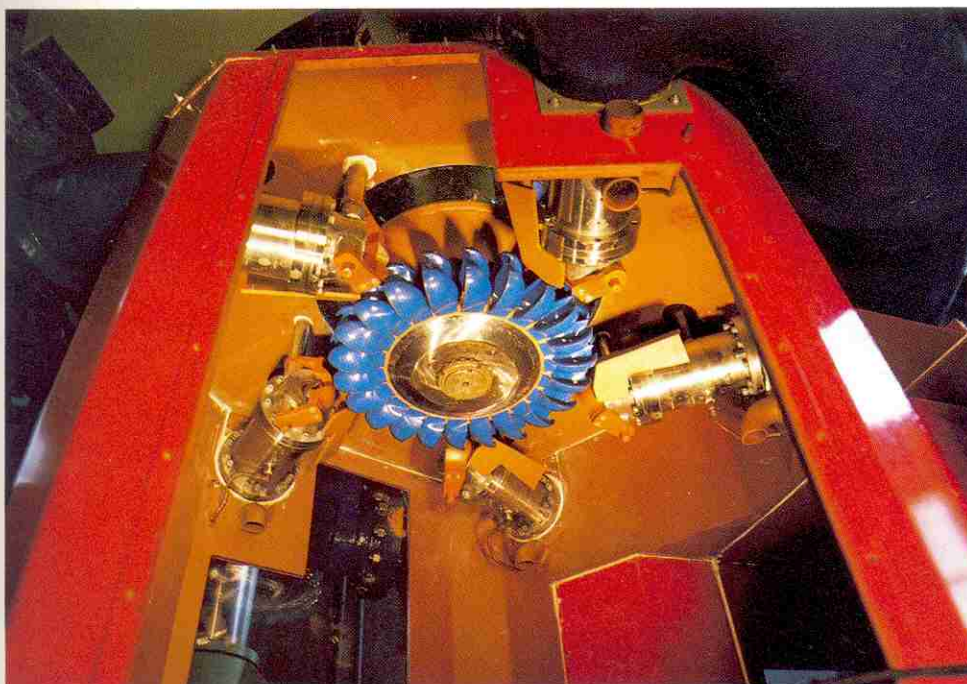
L'accouplement de la roue est à friction. Une ligne d'arbre à 3 paliers a été préférée à une solution à 2 paliers de manière à obtenir une plus grande rigidité, de l'ordre de $1 \mu\text{m}$ pour une force radiale de $10 \cdot 10^3 \text{ N}$.

5. Roues d'un diamètre extérieur de 3,587 m à divers stades de fabrication. On remarque la roue du modèle réduit à l'intérieur d'une des roues (photo Sulzer-Escher Wyss).



6. Vue rapprochée d'une paire d'augets usinés par commande numérique et polis à la main (photo Sulzer-Escher Wyss).





7. Modèle réduit installé dans la laboratoire de SEW-Bell à Kriens (Suisse); largeur d'auget $B = 87,6$ mm (photo Sulzer-Escher Wyss).

La butée axiale est placée au sommet du groupe. Elle est séparée du palier supérieur de manière à rapprocher celui-ci du rotor, afin d'obtenir une valeur de la première vitesse critique de 30% supérieure à la vitesse d'emballement.

Les essais sur modèle réduit (fig. 7) ont été exécutés dans le laboratoire de SEW-Bell à Kriens (Suisse). La largeur de l'auget était de 87,6 mm et la chute d'essai était comprise entre 50 et 200 m.

Le rendement prototype prévu est de 92% pour une ouverture de pointe de 80%.

- A. Marulanda et F. Amaya. The design and construction of Colombia's Guavio dam. Water Power and Dam Construction, déc. 1989.
- C.S. Ospina. Mechanical and electrical equipment for Colombia's Guavio project. Water Power and Dam Construction, déc. 1990.

Bibliographie

Centrale de La Bâtiaz

Canton du Valais, Suisse

2 turbines Pelton de 102,8 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

Hydro Vevey SA, Vevey, Suisse

Maître d'œuvre: Electricité d'Emosson SA, Martigny, Suisse

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	6090	6355	6394
H (m)	621,0	648,0	652,0
Q (m ³ /s)	17,60 (14,46)	18,00 (14,75)	18,15 (14,81)
P (MW)	98,0 (79,5)	102,8 (84,5)	103,5 (85,3)
D ₁ (m)	2,360	f (Hz)	50
D ₀ (m)	0,250 (0,230)	n (t/s; t/min)	7,14; 428,6
D ₂ (m)	0,205	N _{QE} (-)	0,043
B (m)	0,650 (0,600)	n _q	14,2
z _r (-)	21 (22)	v (-)	0,090
z ₀ (-)	5		

() valeurs avant transformation

Caractéristiques

La centrale de La Bâtiaz constitue le palier inférieur du complexe d'Emosson situé à cheval sur la frontière entre la Suisse et la France.

Le barrage-voûte d'Emosson a une hauteur de 180 m et une longueur au couronnement de 554 m. Le volume utile du lac est de 225·10⁶ m³. Son remplissage est assuré par 2 collecteurs reliés à 9 prises d'eau.

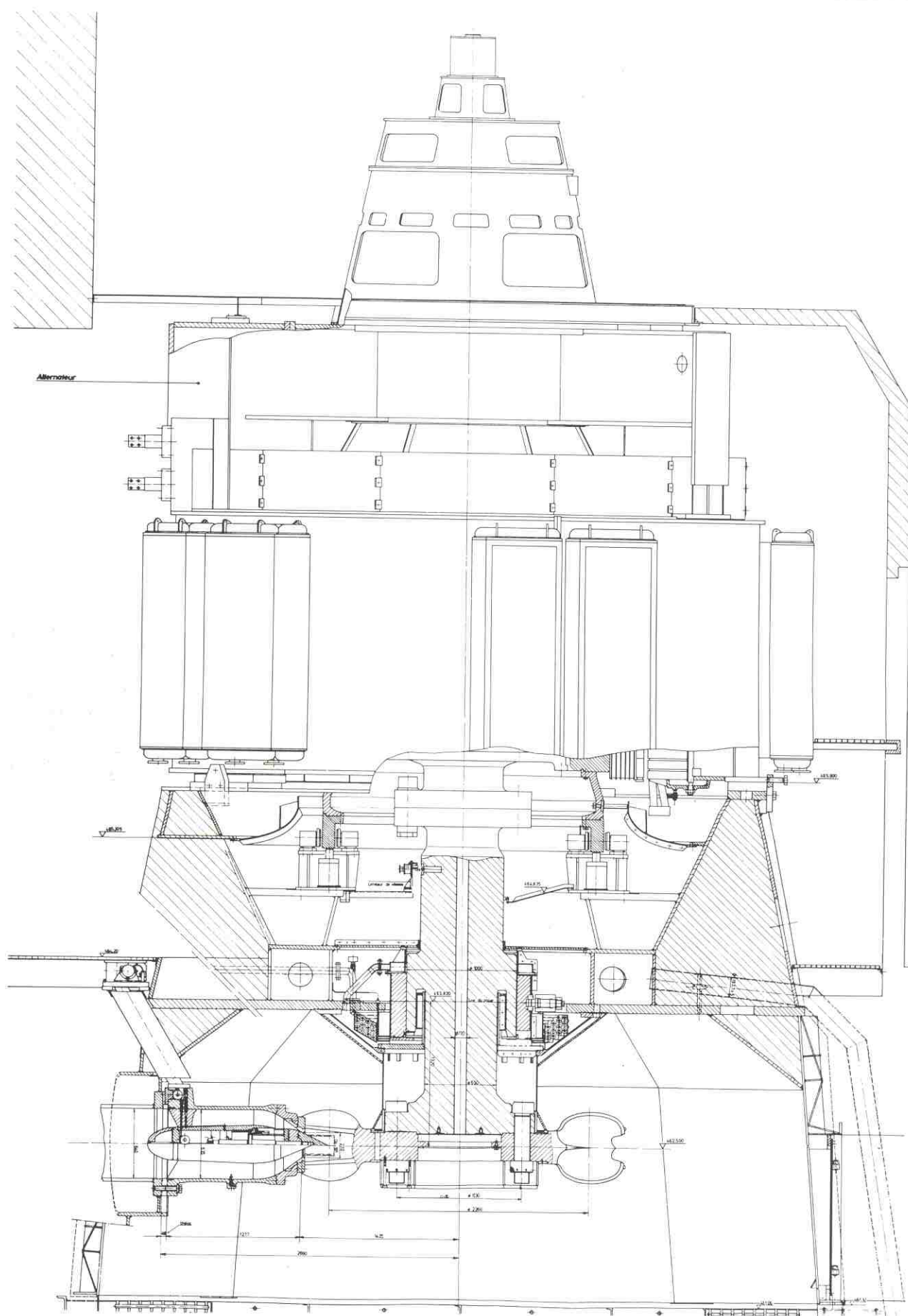
Les eaux sont turbinées dans une première centrale, Châtelard Vallorcine, équipée de 1 groupe comprenant sur le même arbre une turbine Pelton de 64 MW sous une chute de 750 m et une turbine Francis de 50,5 MW sous une chute de 382 m et 2 groupes équipés d'une turbine Pelton de 64 MW (H = 750 m) et d'une pompe d'accumulation à 3 étages de 38,2 MW (H = 390 m), les 2 machines étant également sur le même arbre.

L'eau est ensuite restituée dans un bassin de compensation de 90·10³ m³.

Une galerie de 3,5 m de diamètre et de 10 km de longueur amène l'eau dans une chambre d'équilibre à 2 épanouissements puis dans le puits blindé d'un diamètre de 2,7 à 2,5 m et de 1264 m de longueur.

La conduite se sépare ensuite en 2 branches alimentant chacune une des turbines de la centrale de La Bâtiaz. L'eau est ensuite restituée au Rhône par un canal de fuite de 1277 m de longueur à écoulement libre ou en charge suivant le niveau du Rhône. Ce canal est précédé d'un petit bassin d'expansion de 2000 m³ qui joue le rôle de chambre d'équilibre aval. La production annuelle moyenne de l'aménagement d'Emosson est de 634 GWh.

Généralités



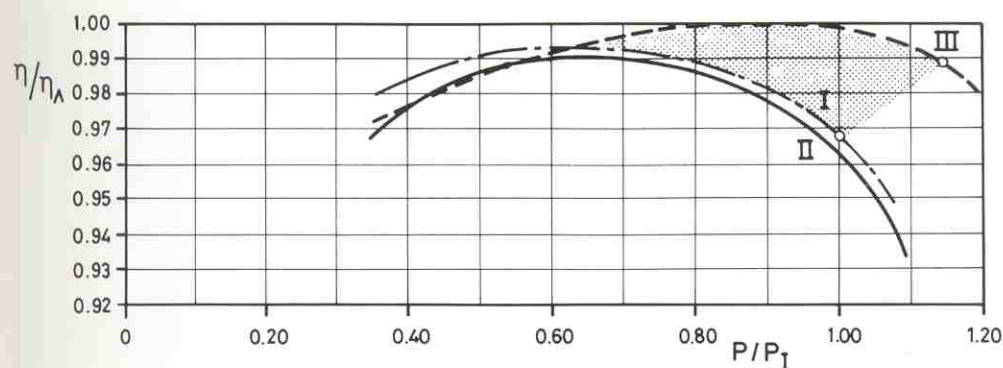
Conception hydraulique et mécanique

Les machines originales ont été mises en service en 1974 avec une puissance nominale de 84,5 MW sous une chute de 648 m. Quelques années plus tard, les conditions d'exploitation ayant changé, Emosson SA a décidé d'augmenter la puissance des machines, mais en conservant les bâtis de turbines et les répartiteurs. Le diamètre tangent D_1 devait être également conservé. Des essais sur modèle très étendus ont été exécutés dans le laboratoire de Hydro Vevey. Une analyse soignée des pertes, de l'influence de la vitesse spécifique et des effets d'échelle a en outre été réalisée. En conclusion de ces études, une augmentation de 18% par rapport à la puissance maximale des turbines d'origine a été obtenue par les modifications suivantes:

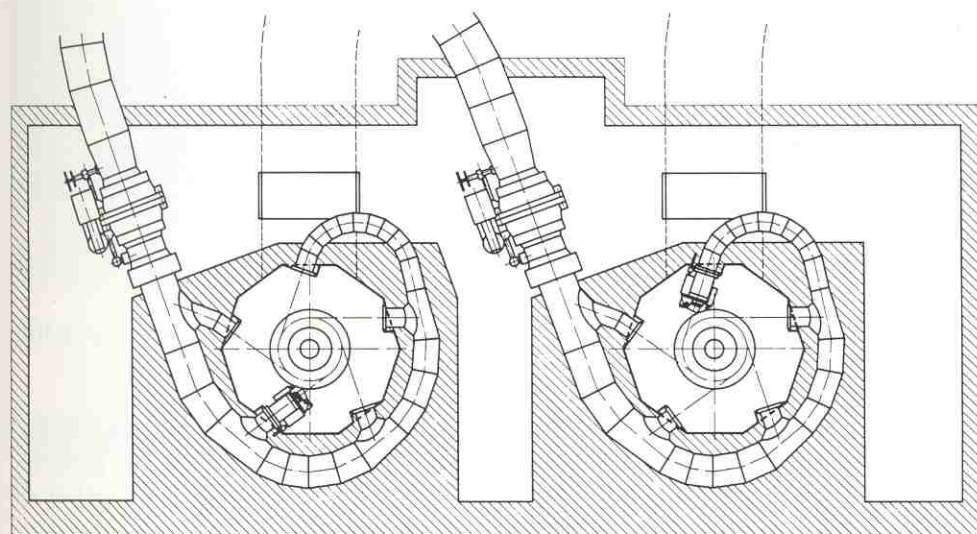
- augmentation du diamètre de l'embouchure des injecteurs de 8,7%;
- augmentation de la course des pointeaux de 5,5% (pour assurer la fermeture);
- tracé d'une nouvelle roue avec un diamètre D_1 identique, une largeur d'augets B augmenté de 8%, et un nombre d'augets z_r réduit de 22 à 21.

La figure 1 montre l'augmentation de puissance et de rendement obtenue. Les essais en centrale effectués par la méthode thermodynamique en 1984 ont montré que les performances prévues ont été effectivement atteintes.

Les turbines ont un répartiteur circulaire classique (fig. 2) d'un diamètre d'entrée de 1,350 m. Il est composé de 24 viroles en tôle d'acier à grain fin A 36/52 - 50 FK-S. Les bifurcations ont des nervures externes.

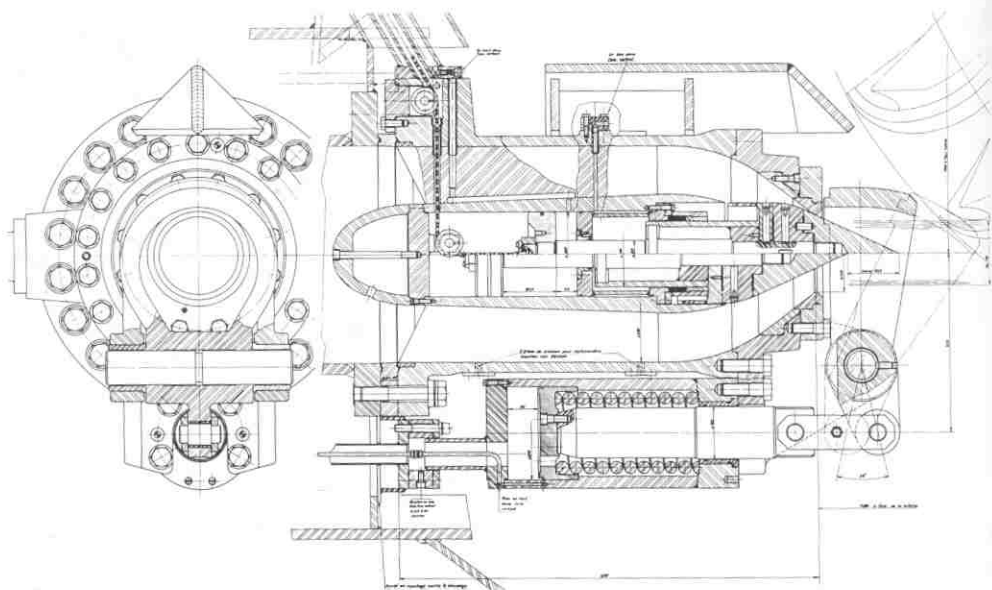


1. Augmentation du rendement obtenue par les modifications des turbines.
 - I Roue originale, injecteurs originaux
 - II Roue originale, injecteurs modifiés
 - III Nouvelle roue, injecteurs modifiés (d'après un document Hydro Vevey).

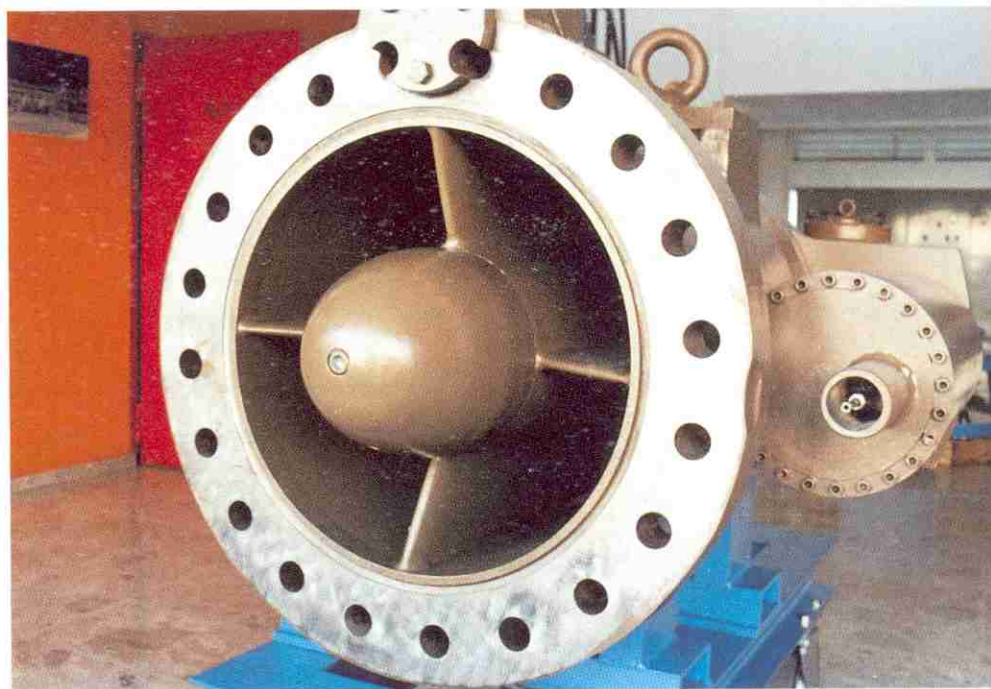


2. Vue en plan des 2 turbines (document Hydro Vevey).

3. Coupe d'un injecteur rectiligne (document Hydro Vevey).

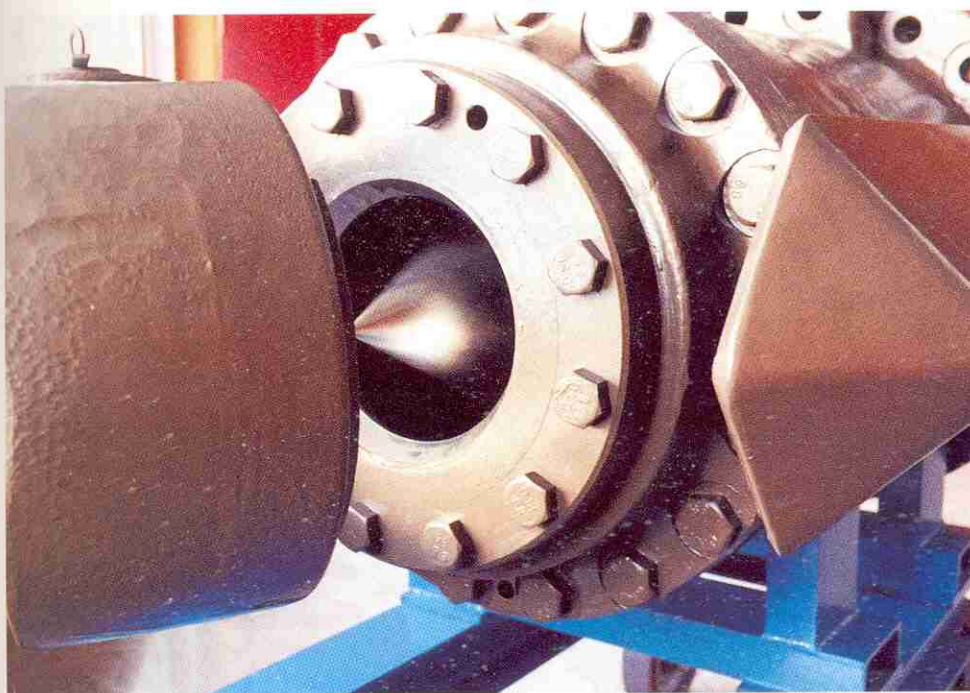


4. Vue de l'entrée d'un injecteur rectiligne (photo Electricité d'Émosson).



Les injecteurs sont rectilignes avec des pointeaux et des buses en stellite (fig. 3, 4 et 5).

La roue, d'une masse de 9000 kg est en acier inoxydable G - X 5 Cr Ni 13.4. Les augets sont partiellement usinés puis meulés sur la base de gabarits. L'accouplement est à friction. Le groupe comporte 2 paliers, un palier de turbine et un palier butée situé au-dessus de l'alternateur.



5. Vue du pointeau, du déflecteur et du toit de protection du jet (photo Electricité d'Emosson).



6. Vue du dos des augets. On remarque les échancrures ainsi que les nervures (photo Electricité d'Emosson).

Bibliographie

- G. Vullioud. Développements récents dans le cadre d'études pour l'augmentation de puissance de turbines Pelton verticales multijets. Bulletin Technique Vevey 1983.
- J.-L. Mottier. L'aménagement hydro-électrique Franco-Suisse d'Emosson. Bulletin technique de la Suisse romande N° 18, 1970.

Centrale de Pigai-Aoos

Circonscription d'Épire, Grèce

2 turbines Pelton de 106,6 MW

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

Fabrication: Hydro Vevey SA, Vevey et Metal Constructions of Greece (METKA), Athènes, Grèce

Maître d'œuvre: Public Power Corporation (PPC), Athènes, Grèce

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	6208	6386	6639
H (m)	633,0	652	677,0
Q (m ³ /s)	18,55	18,83	19,10
P (MW)	105,0	110	115,2
D ₁ (m)	2,415	f (Hz)	50
D ₀ (m)	0,246	n (t/s; t/min)	7,14; 428,6
D ₂ (m)	0,195	N _{QE} (-)	0,043
B (m)	0,612	n _q	14,4
z _r (-)	22	v (-)	0,091
z ₀ (-)	6		

Caractéristiques

La centrale utilise les eaux de la rivière Aoos, située à l'ouest de la Grèce, dans le massif du Pinde, à la hauteur de l'île de Corfou.

Généralités

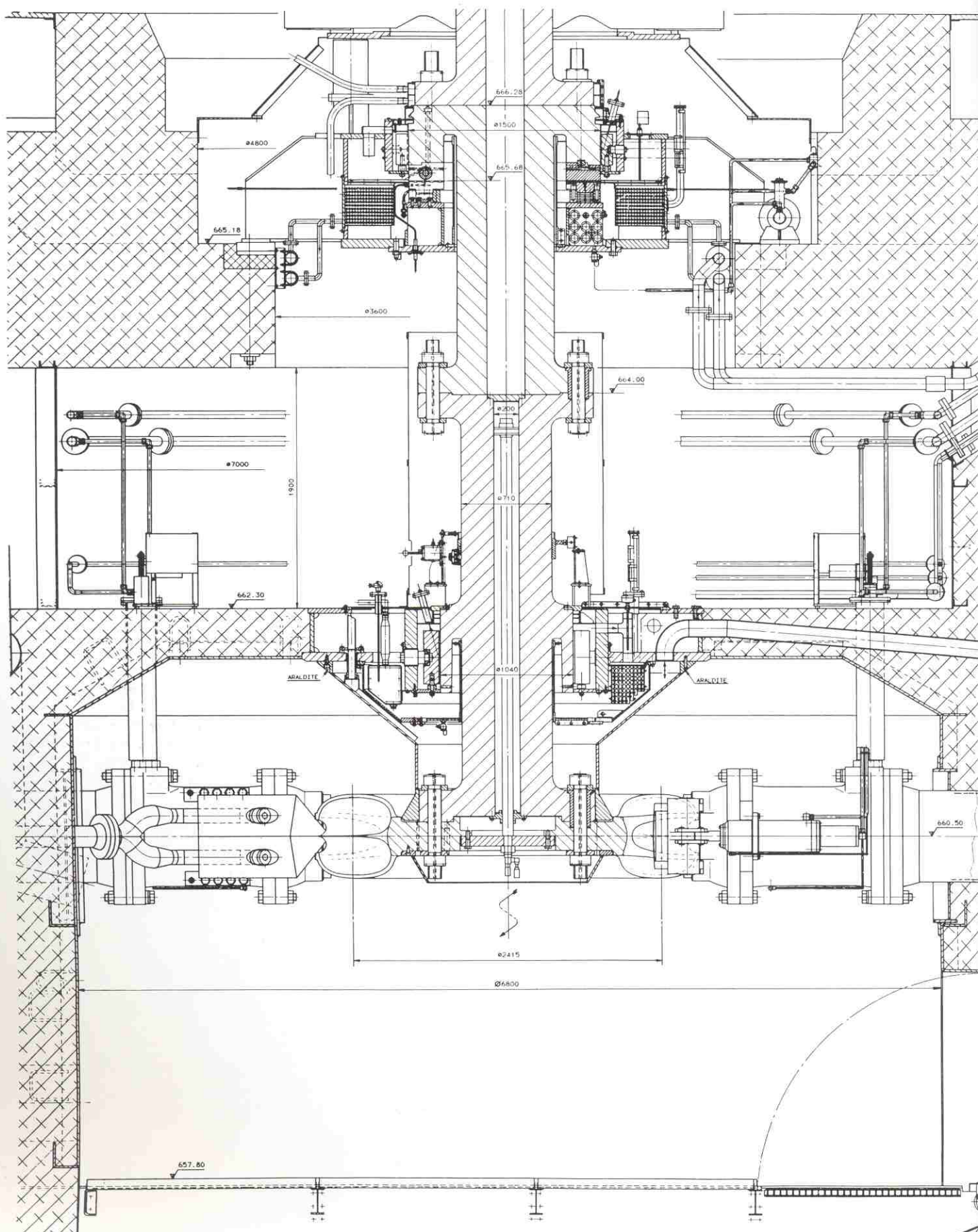
Le barrage est une digue en terre de 74 m de hauteur et 300 m de longueur. Une galerie de 2991 m de longueur et 3,5 m de diamètre conduit l'eau à la chambre d'équilibre puis à une conduite forcée de 1110 m de longueur et d'un diamètre variable de 3,00 m à 2,80 m. La conduite se sépare ensuite en 2 parties de 70 m de longueur et 1,55 m de diamètre avant d'atteindre les turbines installées dans une centrale en caverne (fig. 1). L'eau rejoint la rivière par un tunnel de 300 m de longueur.

Les groupes ont été mis en service en 1990.

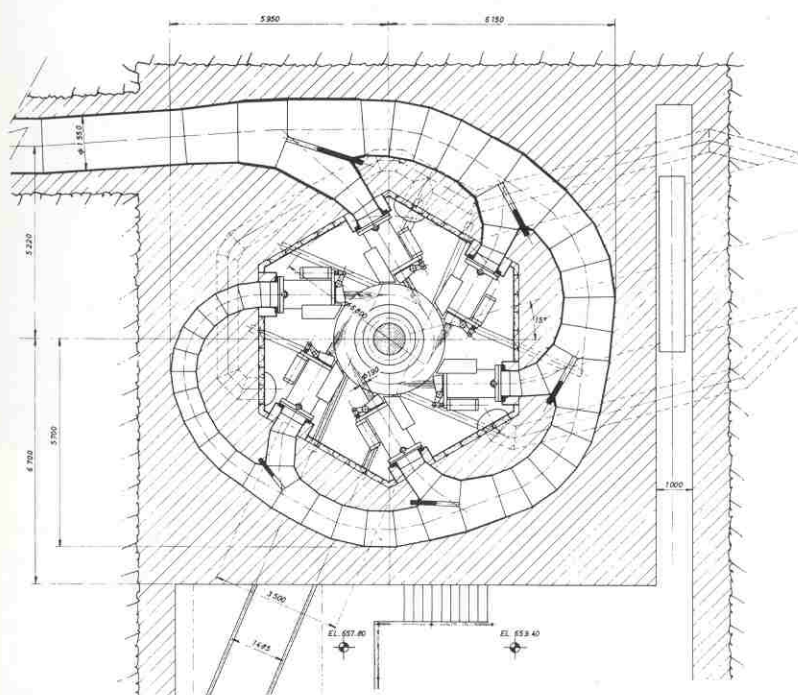
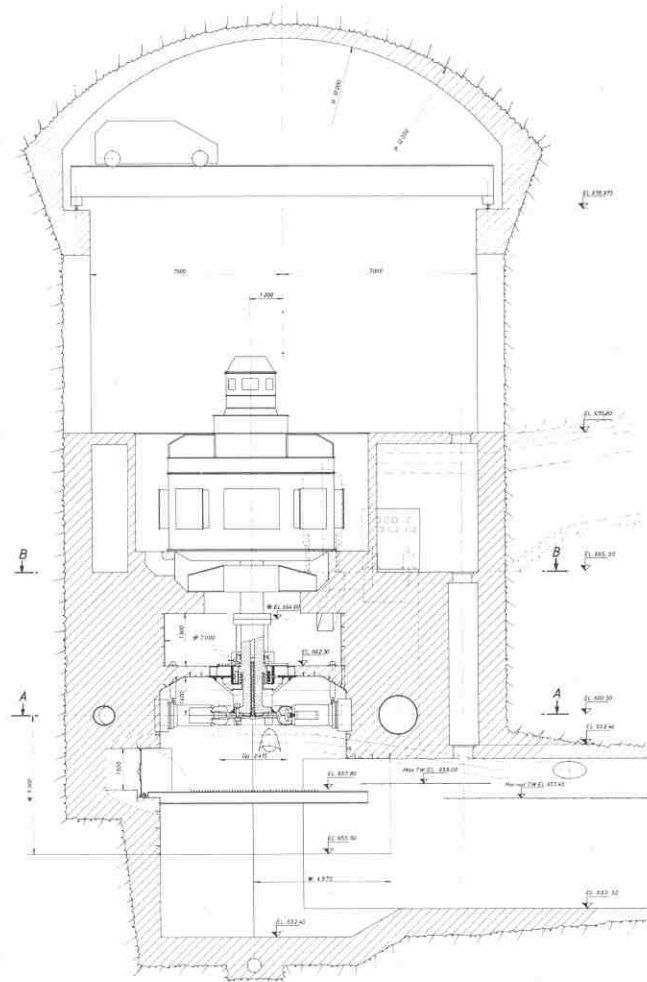
Le répartiteur a un diamètre d'entrée de 1,550 m, il est composé de 62 viroles en tôle d'acier StE 690 Z 35, sa masse totale est de 68,8 t (fig. 2 et 3). Pour permettre son transport, le répartiteur est divisé en 4 pièces. Les bifurcations ont des nervures internes. Les injecteurs sont du type rectiligne (fig. 4). Les corps sont en acier coulé GS 20 Mn 5 V, les pointeaux en acier inoxydable chromé et les buses en acier inoxydable métallisé.

Conception hydraulique et mécanique

Centrale de Pigai-Aoos, Grèce



1. Coupe de la centrale en caverne (document Hydro Vevey).

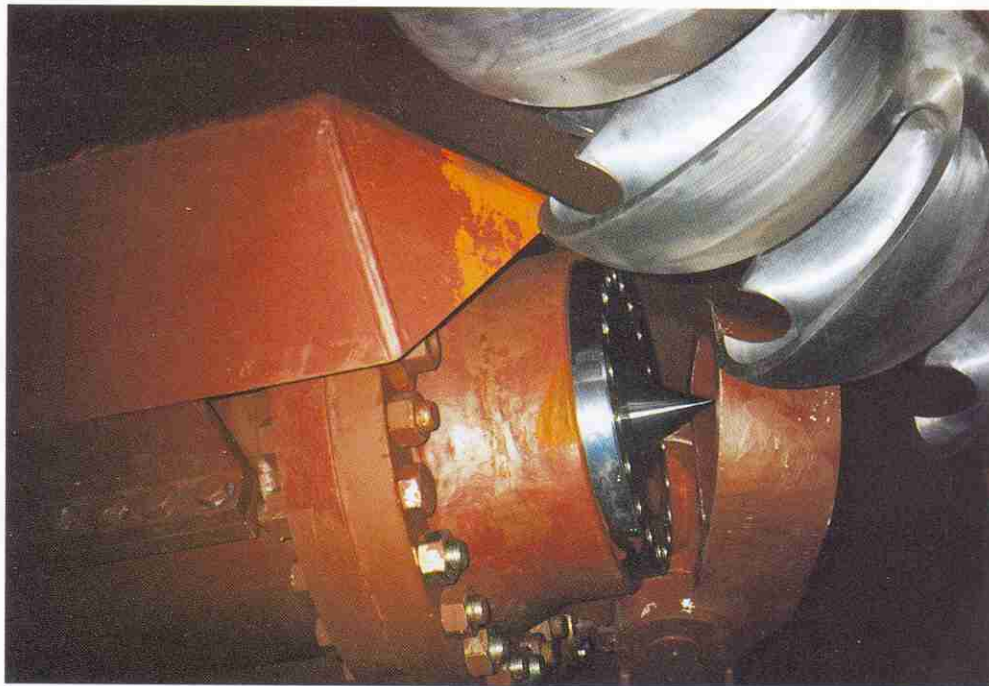


2. Vue en plan de la turbine avec le répartiteur à 6 injecteurs (document Hydro Vevey).

3. Répartiteur en cours de fabrication dans les ateliers METKA en Grèce (photo Hydro Vevey).



4. Injecteur rectiligne avec son déflecteur et son toit de protection du jet (photo Hydro Vevey).



Les déflecteurs sont classiques avec pénétration partielle dans le jet.

La roue, en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4, a une masse totale de 9,8 t. Les augets sont en partie usinés et en partie meulés (fig. 5).

L'accouplement est réalisé par 8 boulons et 4 douilles de cisaillement.



5. Roue en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni d'une masse de 9,8 t (photo Hydro Vevey).



6. Modèle d'essai installé sur le stand Hydro Vevey durant les essais de réception ($B = 90$ mm, $H = 100$ m) (photo Hydro Vevey).

Le groupe comprend 3 paliers. La butée axiale est placée sous l'alternateur.

Les essais sur modèle ont été exécutés dans le laboratoire de Hydro Vevey à Vevey. La largeur d'auget du modèle était $B = 90$ mm et la chute d'essai était en similitude de Froude ($H \cong 100$ m).

Centrale de San Carlos

District d'Antioquia, Colombie

8 turbines Pelton de 170,4 MW

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

Maître d'œuvre: Interconexion Electrica SA, Medellín, Colombie

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	5315	5668	5757
H (m)	542,0	578,0	587,0
Q (m ³ /s)	32,31	33,37	33,63
P (MW)	154,7	170,4	174,4
D ₁ (m)	3,250	f (Hz)	60
D ₀ (m)	0,335	n (t/s; t/min)	5,00; 300
D ₂ (m)	0,2637	N _{QE} (-)	0,044
B (m)	0,800	n _q	14,7
z _r (-)	22	v (-)	0,093
z ₀ (-)	6		

Caractéristiques

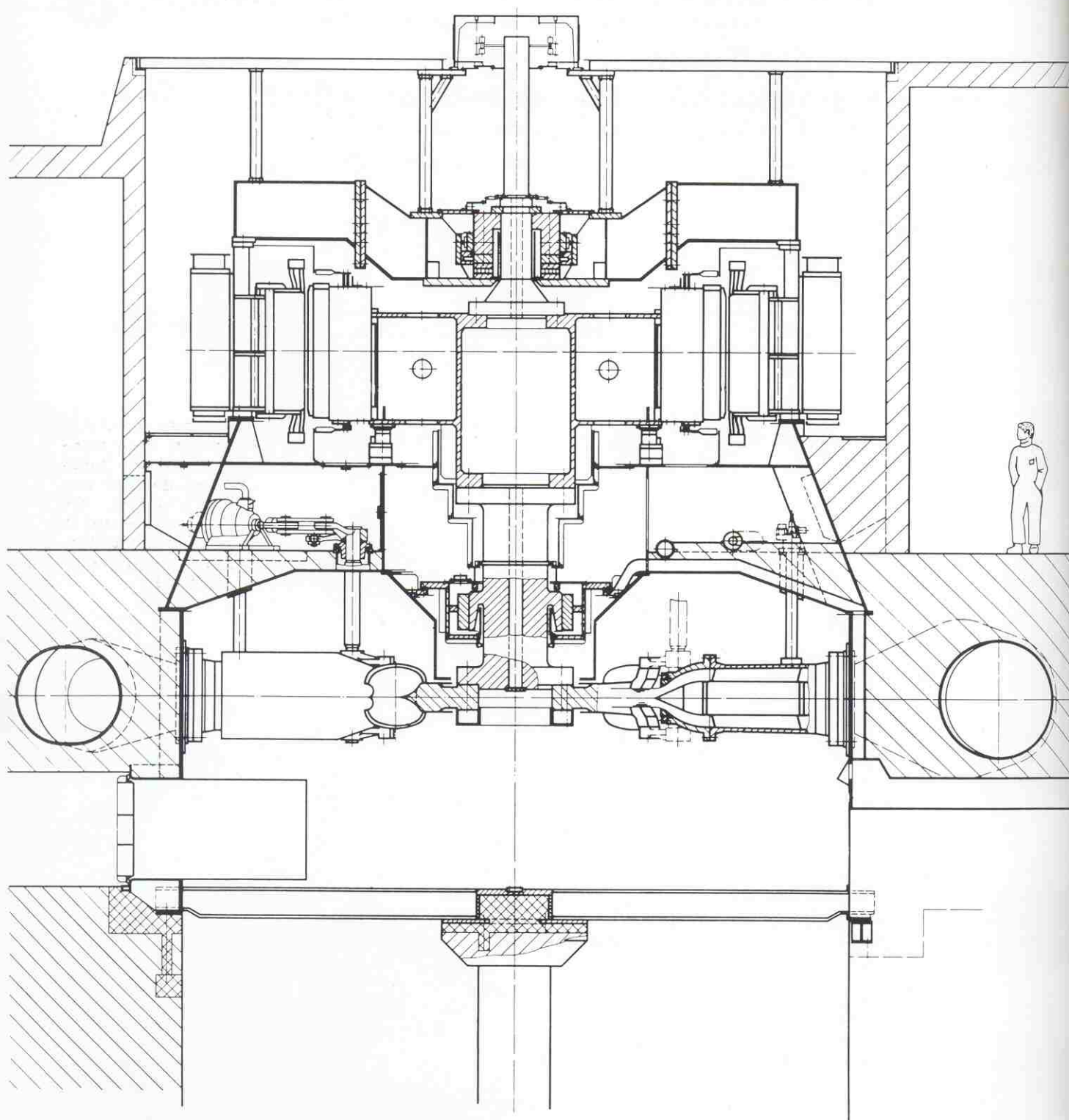
L'aménagement de San Carlos est situé dans la Cordillère centrale de Colombie à 50 km de Medellín. Il utilise les eaux des rivières Nare et Guatapé qui se jettent dans le Rio Magdalena. Celui-ci se dirige au nord et rejoint la mer des Caraïbes. Une digue en terre de 800 m de longueur crée un lac d'un volume de $72 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dont la partie utile est de $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Les ouvrages d'adduction sont divisés en 2 branches qui alimentent 4 et 6 turbines. Les 2 galeries ont une longueur de 4,5 km et un diamètre de 6,1 et 7,5 m. Deux chambres d'équilibre de 190 m de hauteur précèdent les conduites forcées dont les diamètres sont de 5,50 et 6,75 m dans leur partie supérieure non blindée et de 3 et 4 m dans la partie inférieure blindée.

La centrale en caverne, qui sera équipée de 10 groupes dans le stade final, a une longueur de 203 m, une largeur de 19,6 m et une hauteur de 35 m. Une caverne parallèle de 195 m de longueur abrite les transformateurs.

Les 2 canaux de fuite, d'une longueur de 1,6 km, dirigent ensuite l'eau vers la rivière Samana.

Les machines ont été mises en service entre le printemps 1984 et l'automne 1987.

Généralités

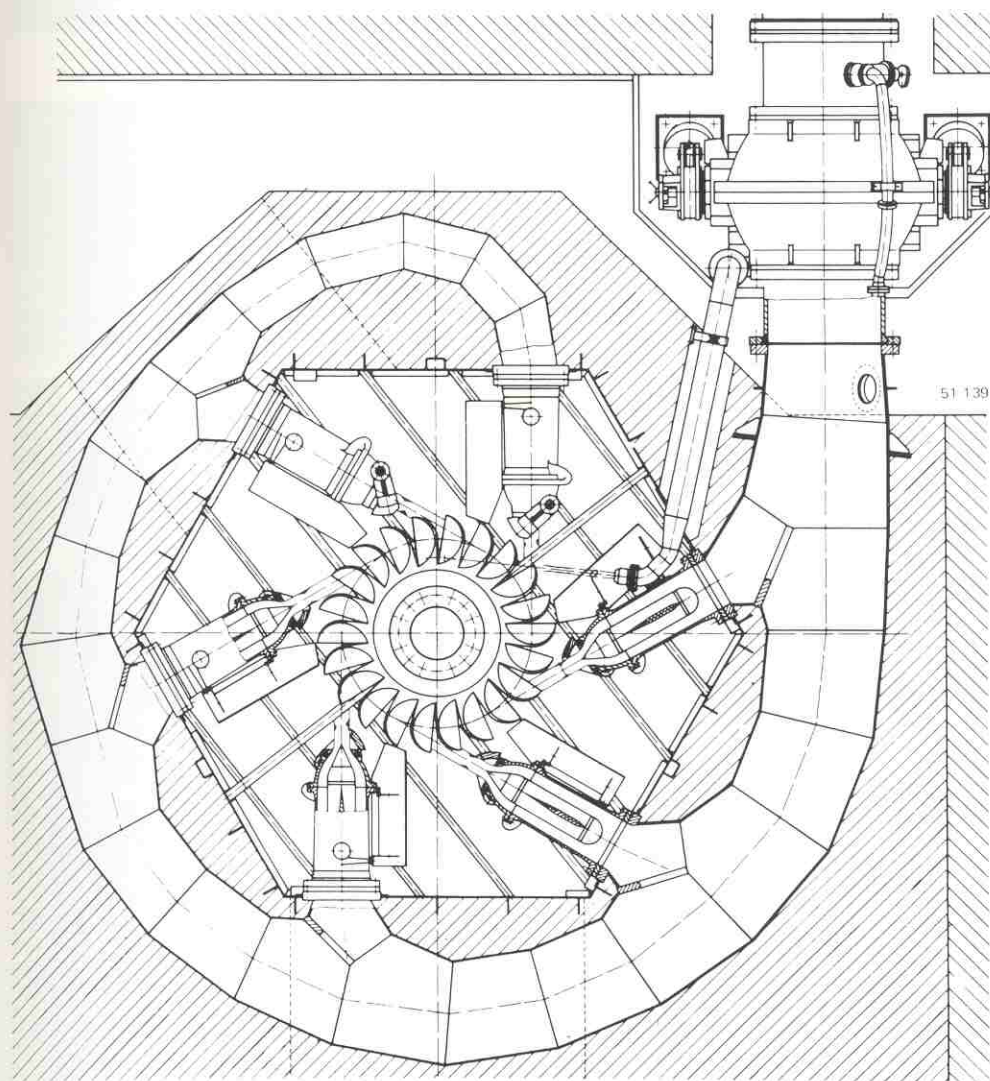


**Conception
hydraulique et
mécanique**

Le répartiteur, d'un diamètre d'entrée de 1,900 m, est circulaire avec 6 embranchements à nervure intérieure (fig. 1). Il est fabriqué en tôle d'acier St E 43 en 6 pièces soudées et contrôlées aux ultrasons sur le chantier. L'essai sous pression a été exécuté à 105 bar. La pression a été maintenue à 50 bar durant la coulée et la prise du béton extérieur.

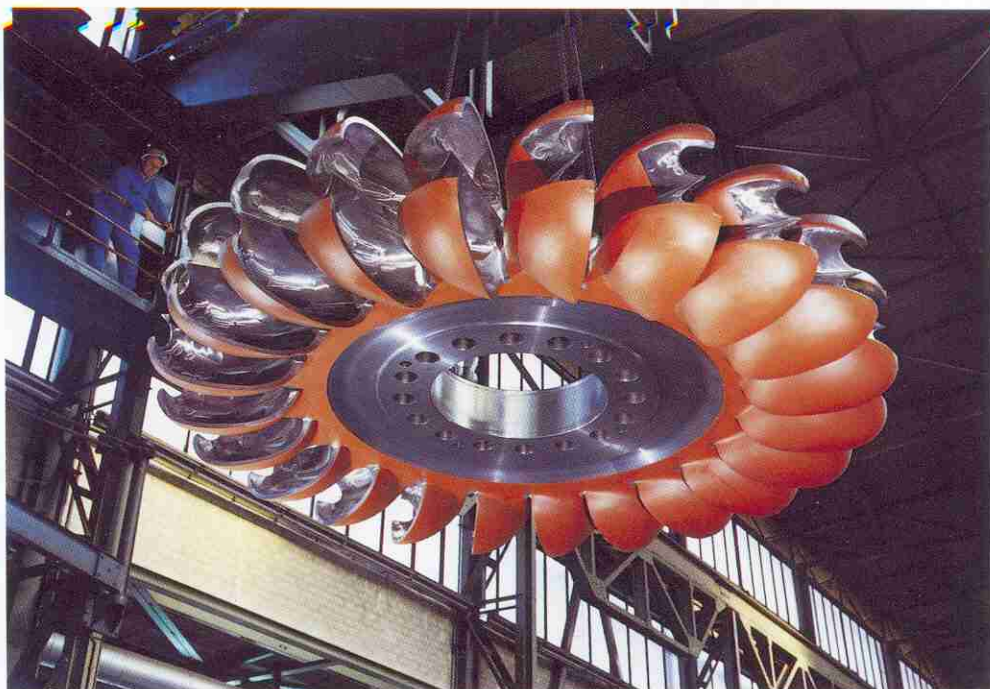
Les injecteurs rectilignes ont un corps en acier X 20 Cr 13, un pointeau et une buse en acier inoxydable durci. Chaque injecteur peut être commandé séparément par un système manuel pour vidanger la galerie et la conduite ou pour assurer la fermeture du pointeau en cas de mauvais fonctionnement du servomoteur.

Les déflecteurs sont du type à pénétration partielle dans le jet. Ils sont commandés par l'intermédiaire d'un système de leviers et de tringles par un servomoteur à pression d'huile pour l'ouverture et à pression d'eau venant de la conduite pour la fermeture.



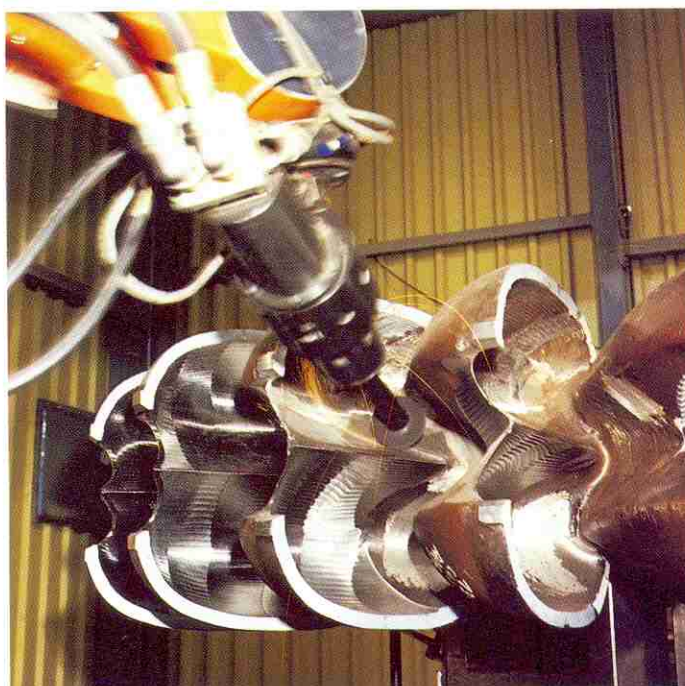
1. Vue en plan montrant le répartiteur, les 6 injecteurs rectilignes munis de larges «toits» de protection des jets. On distingue également le jet auxiliaire de freinage (document Sulzer-Escher Wyss).

2. Roue en acier inoxydable
G - X5 Cr Ni 13.4 d'une
masse de 23,5 t et d'un
diamètre de 4,100 m
(photo Sulzer-Escher
Wyss).



3. Usinage des augets par
une fraiseuse à com-
mande numérique (photo
Sulzer-Escher Wyss).





4. Meulage des augets à l'aide d'un robot automatique (photo Sulzer-Escher Wyss).

Un injecteur-frein est prévu pour arrêter rapidement le groupe en cas de déclenchement. Il entre en action lorsque la vitesse du groupe atteint 90% de la vitesse nominale et reste ouvert jusqu'à une vitesse de 15%. Les freins mécaniques de la génératrice sont appliqués entre 25% de la vitesse et l'arrêt du groupe.

La roue, d'une masse de 23,5 t, est coulée d'une pièce en acier inoxydable G-X5 Cr Ni 13.4 (fig. 2). Les augets sont usinés par une fraiseuse à commande numérique (fig. 3); ils sont ensuite terminés par un meulage exécuté partiellement par un robot (fig. 4) et partiellement à la main.

La roue est fixée à l'arbre par un accouplement à friction muni de 16 boulons précontraints. L'arbre est guidé par 2 paliers; la butée axiale est combinée avec le palier situé au-dessus de la génératrice. Le groupe est ainsi extrêmement compact. Le stator de l'alternateur est supporté par un cône s'appuyant directement sur le manteau hexagonal de la turbine.

L'entretien de la turbine a fait l'objet d'une attention particulière. La roue et les injecteurs, c'est-à-dire toutes les parties soumises à usure sont très facilement et rapidement démontables et interchangeables par le bas, sans intervention sur le groupe lui-même. Cette caractéristique des turbines Pelton est très favorable lorsque l'eau est chargée en sable. Dans ces conditions, lorsque le choix est possible, on préfère la Pelton à la Francis.

- H.K. Höller, H. Grein et al. Wasserkraftnutzung mit hydraulischen Maschinen. Publication Sulzer-Escher Wyss 1984.
- J. Podlesasak. San Carlos hydro-electric power station. International Power Generation, avril 1982.

Bibliographie

Centrale de Devil Canyon

Etat de Californie, USA

2 turbines Pelton de 76 MW

Conception hydraulique, mécanique et fabrication:

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

Maître d'œuvre: State of California, Department of Water Resources, Sacramento, USA

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	3551	3736	4155
H (m)	362,1	381,0	423,7
Q (m ³ /s)	22,08	22,65	23,89
P (MW)	70,96	76,06	89,77
D _I (m)	2,836	f (Hz)	60
D _O (m)	0,312	n (t/s; t/min)	4,62; 276,9
B (m)	0,790	N _{QE} (-)	0,046
z _r (-)	20	n _q	15,3
z _o (-)	6	v (-)	0,097

Caractéristiques

La centrale est située à environ 8 km au nord de la ville de San Bernardino qui est elle-même à 100 km à l'est de Los Angeles.

Généralités

Le barrage est une digue en terre sur la rivière Santa Ana; il alimente une centrale en surface. L'eau rejoint ensuite le Santa Ana Pipeline. La mise en service des machines est prévue en 1992.

Le répartiteur (fig. 1) a un diamètre d'entrée de 1,676 m, une largeur maximale de 14,610 m et une masse de 167 t. Il est divisé en 7 parties boulonnées (fig. 2).

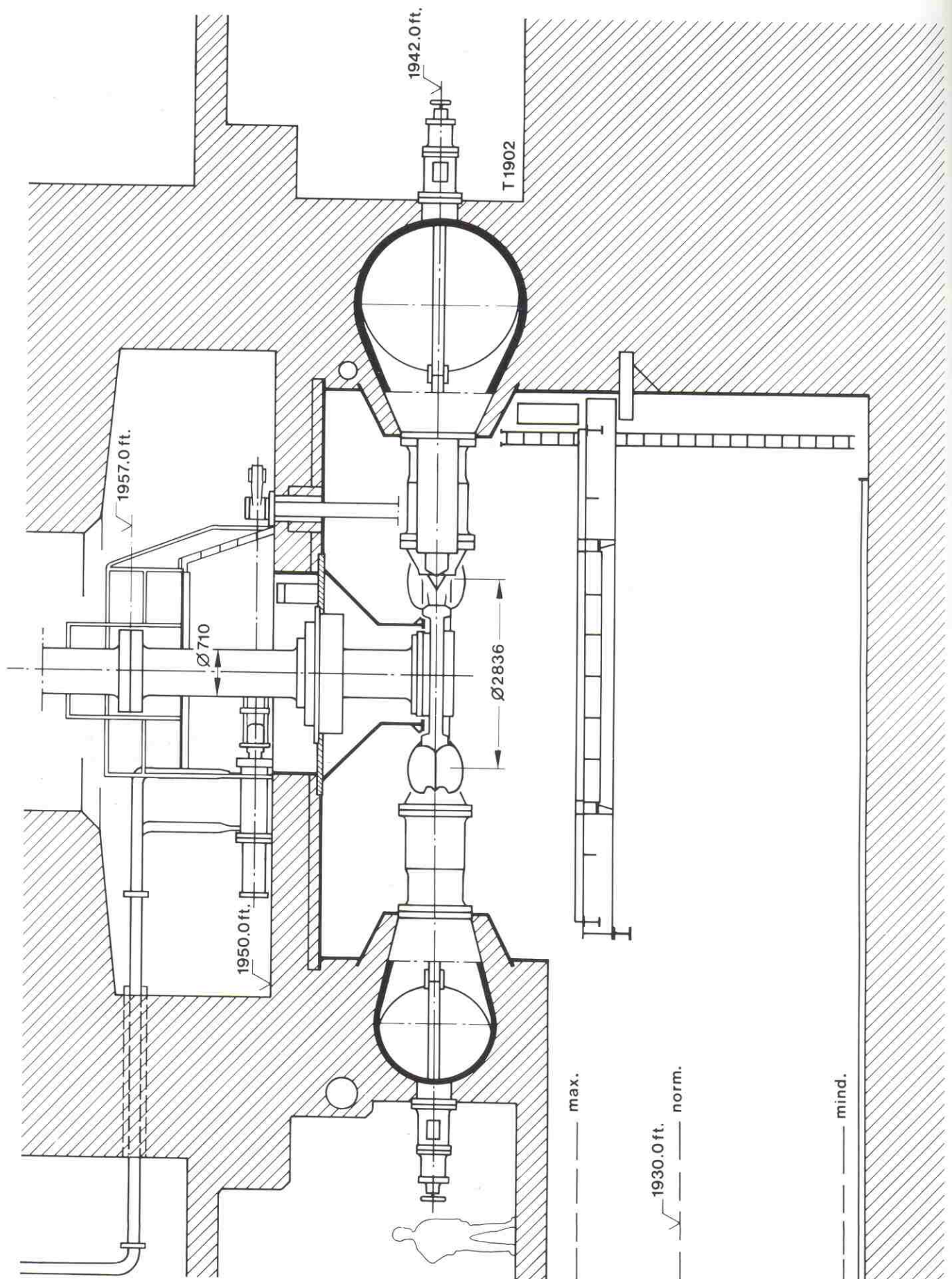
Conception hydraulique et mécanique

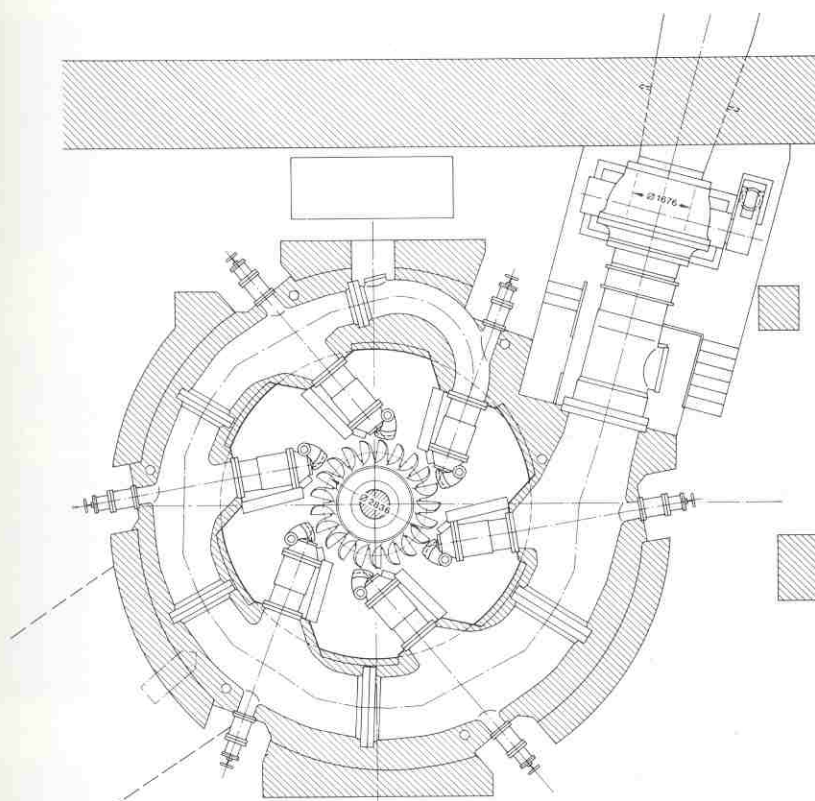
Les 6 injecteurs, à commande extérieure (fig. 3 et 4), ont un diamètre de 760 mm.

Les déflecteurs attaquent le jet en le découpant, au lieu de le dévier comme les déflecteurs classiques.

La roue, d'une masse de 14,2 t et d'un diamètre extérieur de 3,600 m, est en acier inoxydable coulé G -X 5 Cr Ni 13.4.

Le blindage du bâti de turbine est en acier R St 37-2 soudé. Sa masse est de 40 t pour un diamètre de 8,890 m.



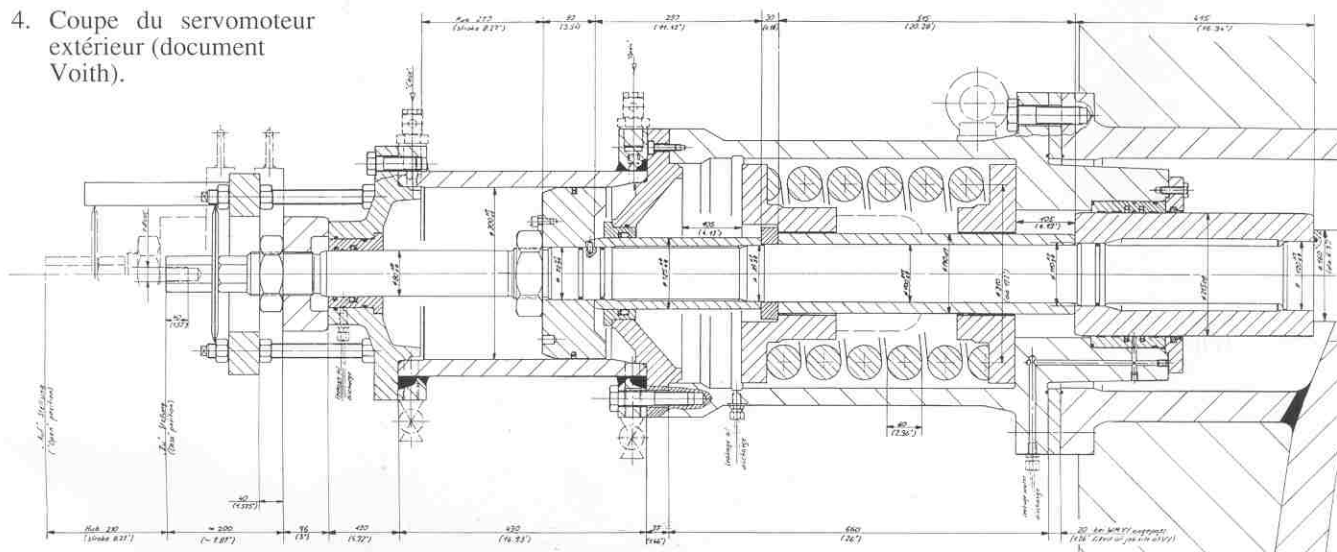


1. Vue en plan de la turbine. On remarquera les grandes dimensions du répartiteur par rapport à la roue, étant donné la très haute vitesse spécifique de la machine (document Voith).



2. Répartiteur en 7 parties avec la commande des injecteurs traversante (photo Voith).

4. Coupe du servomoteur extérieur (document Voith).





5. Roue en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni d'une masse de 14,2 t et d'un diamètre de 3,600 m (photo Voith).



6. Equilibrage dynamique d'une roue (photo Voith).

Centrale de Restitución

Département de Huancavelica, Pérou

3 turbines Pelton de 74,5 MW

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

Fabrication: Ansaldo, Gênes, Riva Calzoni, Milan et Franco Tosi, Legnano, Italie

Maître d'œuvre: Electro-Peru, Lima, Pérou

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	2422	2501	2520
H (m)	247,0	255,0	257,0
Q (m ³ /s)	32,73	33,27	33,39
P (MW)	70,94	74,50	75,30
D ₁ (m)	3,210	f (Hz)	60
D ₀ (m)	0,415	n (t/s; t/min)	3,33; 200
D ₂ (m)	0,318	N _{QE} (-)	0,054
B (m)	1,000	n _q	18,1
z _r (-)	19	v (-)	0,115
z ₀ (-)	6		

Caractéristiques

L'aménagement de Restitución exploite la différence de niveau entre la sortie de la centrale de S. Antunez de Mayolo et le Rio Mantaro qui descend sur le versant est de la Cordillère occidentale et rejoint ensuite la vallée située entre les 2 cordillères du Pérou. La centrale est située à 250 km environ à vol d'oiseau au sud-est de Lima.

Généralités

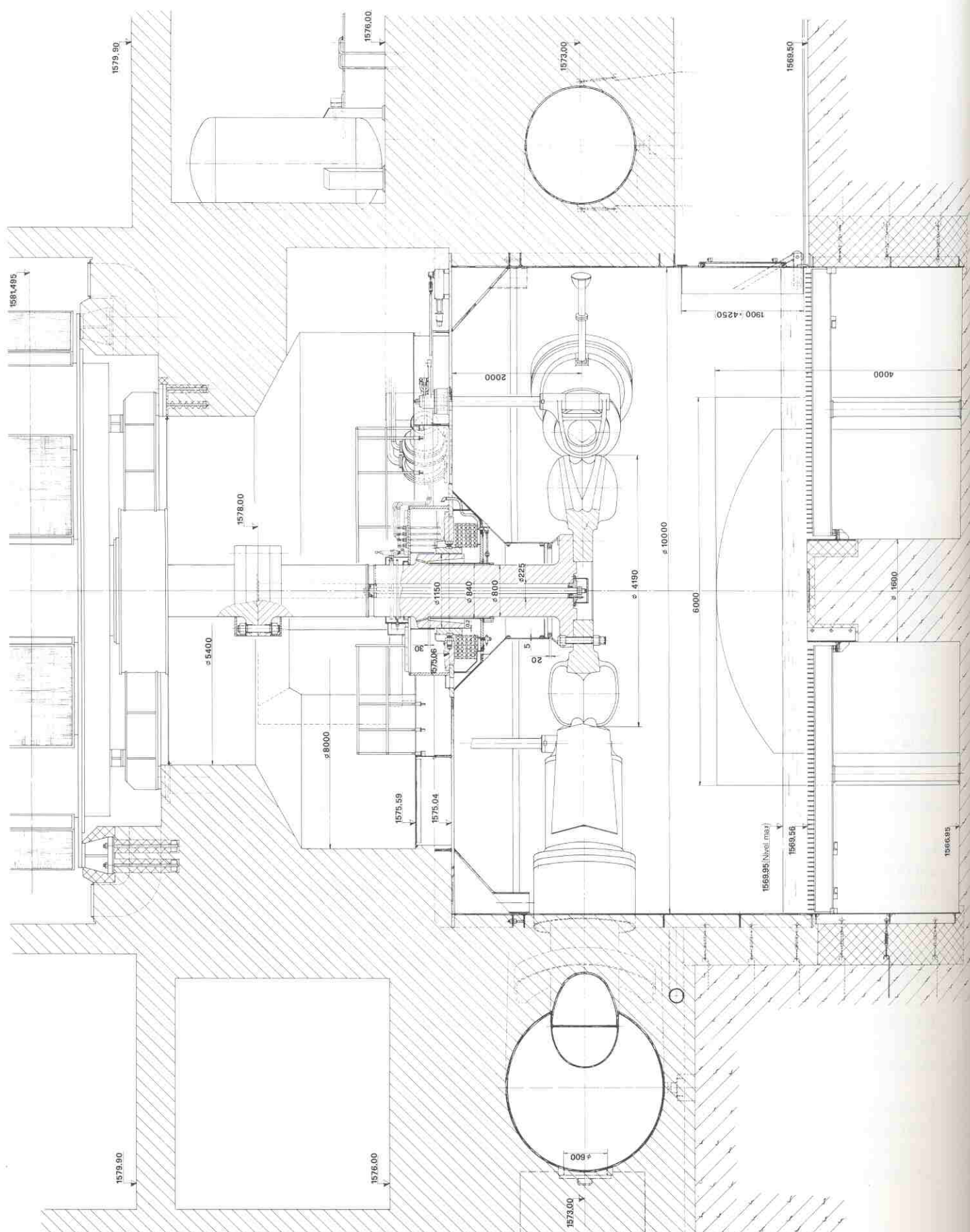
La galerie à niveau libre, d'une longueur de 790 m et de 5,4 m de diamètre, conduit l'eau de la sortie de la centrale S. Antunez de Mayolo jusqu'au puits blindé. La chambre d'équilibre, d'un volume de 25 300 m³, se présente sous la forme d'un épanouissement de la galerie sur une longueur de 270 m.

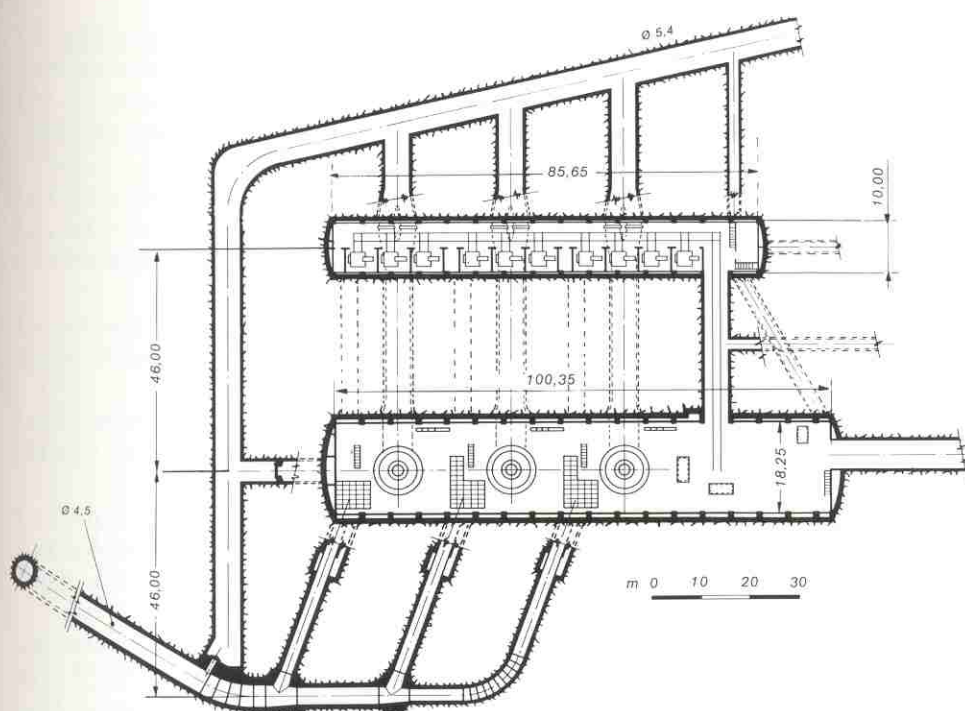
Le puits blindé vertical a une longueur de 253 m pour un diamètre de 4,5 m. Trois embranchements amènent l'eau aux 3 turbines.

La centrale en caverne (fig. 1) a une longueur de 100 m pour une largeur de 18,25 m. Les transformateurs sont situés dans une caverne parallèle dont l'axe est situé à 46 m de l'axe de la centrale.

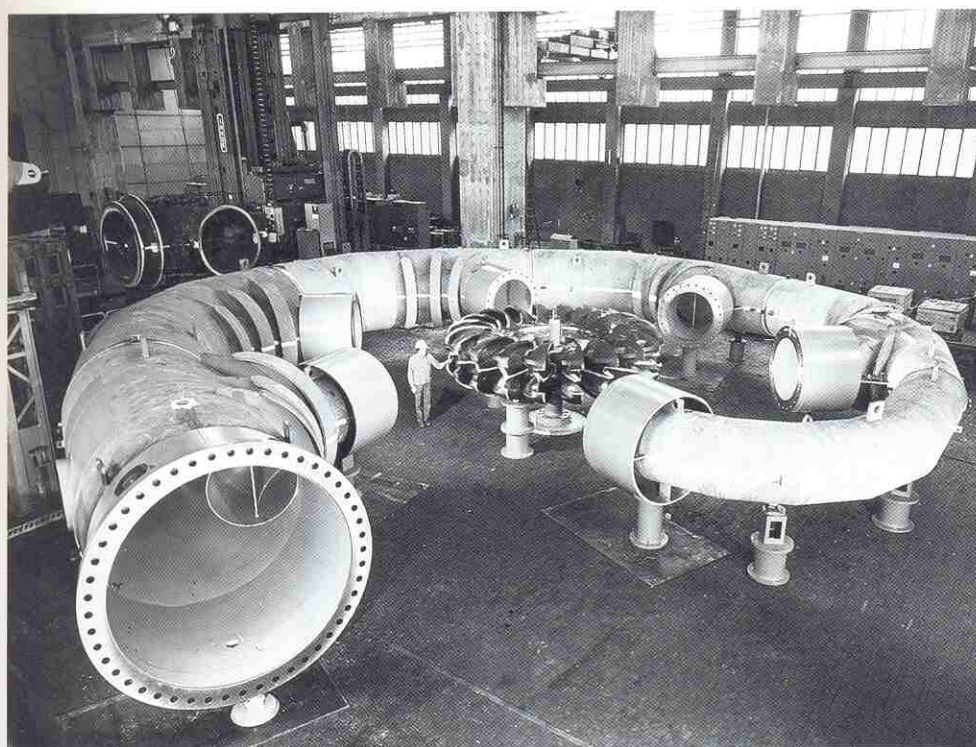
Le canal de fuite, d'un diamètre de 5,4 m et d'une longueur de 340 m, conduit l'eau au Rio Mantaro.

Les groupes ont été mis en service entre décembre 1984 et juillet 1985.





1. Plan de la centrale en caverne (document Riva Hydroart).

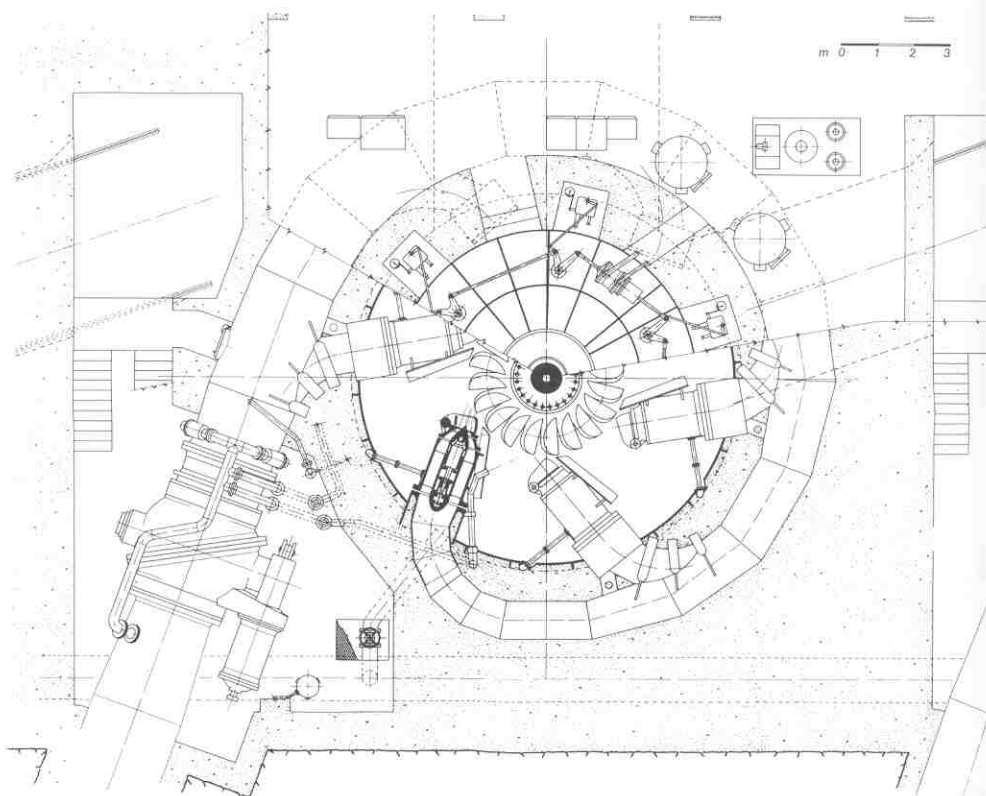


2. Roue et répartiteur. Le répartiteur, divisé en 6 parties soudées sur le chantier, comporte des bifurcations avec nervures extérieures (photo Riva Hydroart).

Des turbines Pelton ont été préférées à des Francis, malgré la chute relativement basse ($H_{\max} = 257$ m), à cause de la très haute teneur de l'eau en sable agressif. L'entretien et les réparations des Pelton sont en effet plus faciles que ceux des Francis.

**Conception
hydraulique et
mécanique**

3. Plan de la turbine. On distingue les 6 injecteurs rectilignes et la commande des déflecteurs par un système de tringles et leviers reliés à un servomoteur unique (document Riva Hydroart).



4. Modèle d'essai durant les essais de réception dans le laboratoire Riva Hydroart à Milan (B = 100 mm, H = 60 m) (photo Riva Hydroart).



Le répartiteur est circulaire avec un diamètre d'entrée de 2,400 m. Les 6 embranchements ont des nervures extérieures et intérieures. Le répartiteur (fig. 2), en acier Fr 56-2, est divisé en 6 parties soudées en centrale. La masse totale des 6 éléments est de 63 t.

Les injecteurs rectilignes (fig. 3) sont commandés par des servomoteurs à huile. Les déflecteurs, du type à pénétration partielle dans le jet, sont actionnés par un servomoteur unique.

La roue, en acier inoxydable 13 Cr - 4 Ni, a un diamètre extérieur de 4,200 m et une masse de 32 t. Les augets sont usinés par meulage manuel.

La chambre de turbine est cylindrique avec un diamètre de 10 m. Elle est réalisée en plaques de tôle soudées sur le site.

Le couple fourni par la roue est transmis à l'arbre par l'intermédiaire d'un accouplement à boulons ajustés. Le palier turbine, combiné avec la butée axiale, est situé sur le croisillon inférieur de la génératrice.

Les essais de réception sur modèle réduit ont été effectués dans le laboratoire Riva Hydroart à Milan (fig. 4). Le modèle, d'une largeur d'auget $B = 100$ mm, a été essayé sous une chute de $H = 60$ m.

- Revue Hydroart 1984.

Bibliographie

Centrale de San Agaton

Etat de Táchira, Venezuela

2 turbines Pelton de 153 MW

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

Maître d'œuvre: Compañía Anonima de Administración y Fomento Electrico (CADAFE), Caracas, Venezuela

	minimum	nominal	maximum
E (J/kg)	3266	3432	3815
H (m)	333,0	350,0	389,0
Q (m ³ /s)	48,54	49,76	52,46
P (MW)	141,7	153,0	178,7
D ₁ (m)	3,330	f (Hz)	60
D ₀ (m)	0,464	n (t/s; t/min)	3,75; 225,0
D ₂ (m)	0,3654	N _{QE} (-)	0,059
B (m)	1,110	n _q	19,6
z _r (-)	20	v (-)	0,124
z ₀ (-)	6		

Caractéristiques

La centrale de San Agaton, proche de San Cristóbal, fait partie du complexe Leonardo Ruiz Pineda, qui utilise les eaux des rivières Uribande, Doradas, Cambruito et Caparo. Ces rivières se jettent dans l'Apure qui elle-même se jette dans l'Orénoque.

Cet aménagement comprendra, au stade final, 4 centrales d'une puissance totale de 2060 MW et produira 5 TWh. La centrale de San Agaton est alimentée à partir d'un lac de $775 \cdot 10^6$ m³ de capacité et de 20 km² de surface. Ce lac est formé par une digue en terre de 140 m de hauteur sur la rivière Uribande. Une galerie de 8,1 km, suivie de 2 conduites forcées, amène l'eau à la centrale qui est à ciel ouvert (fig. 1).

Les turbines ont été mises en service en 1987.

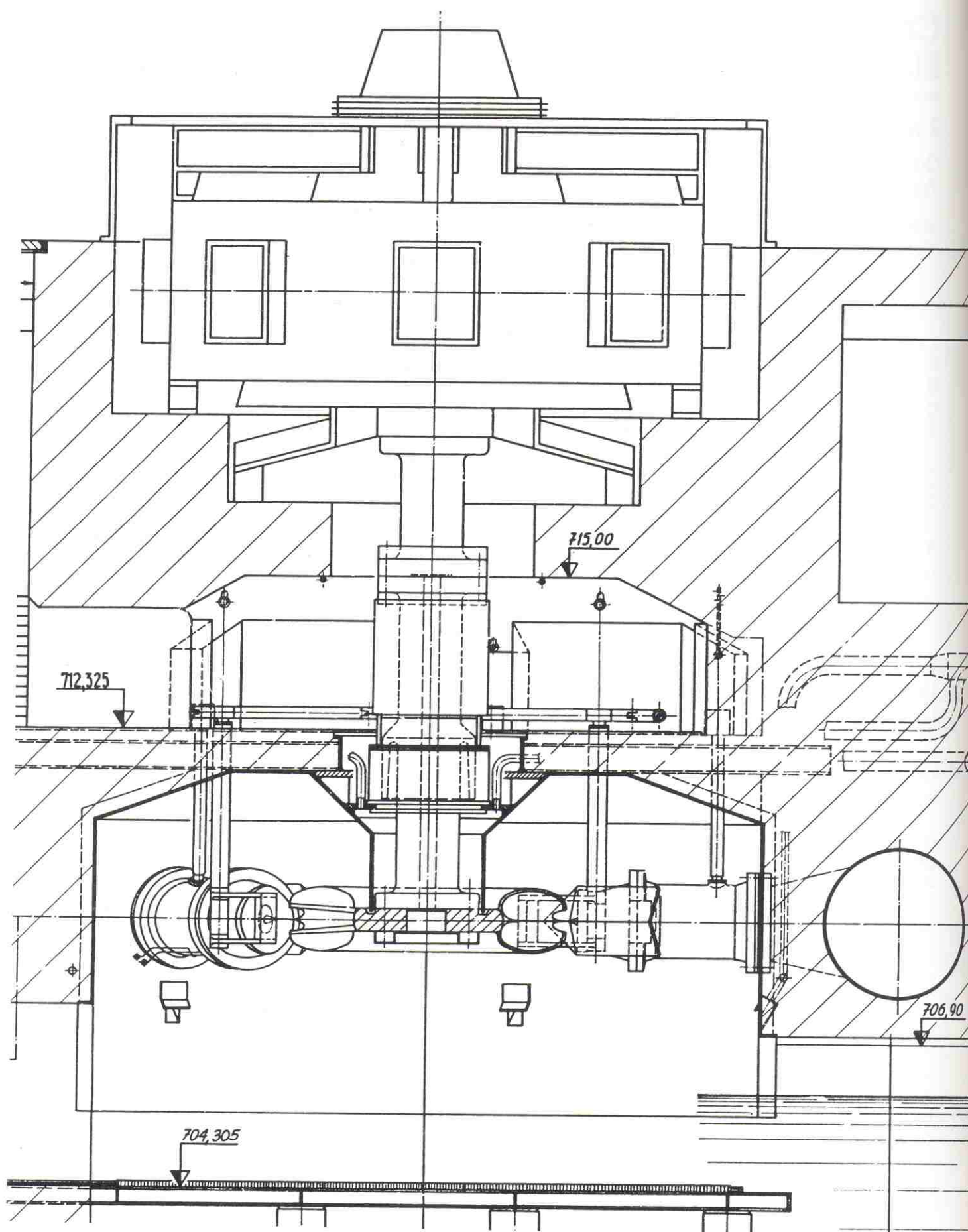
Le répartiteur circulaire a un diamètre d'entrée de 2,5 m et une masse totale de 104 t. Il est fabriqué en tôle d'acier N-A-XTRA 70 et divisé en 7 parties pour le transport (fig. 2 et 3).

Les nervures sont disposées à l'intérieur des bifurcations.

Les injecteurs rectilignes ont des corps en acier coulé GS - 45.3. Le pointeau et la buse sont en acier inoxydable X5 Cr Ni 13.4 revêtus de chrome X 20 Cr 13.

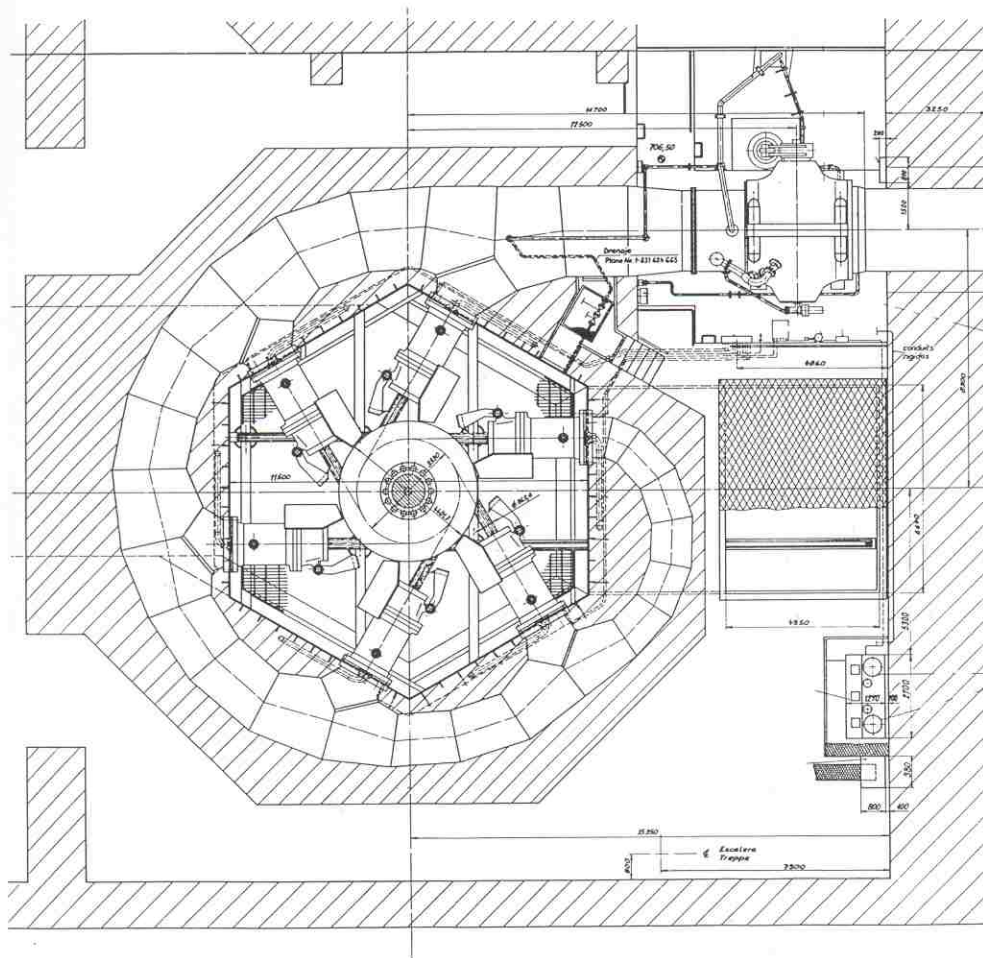
Généralités

Conception hydraulique et mécanique



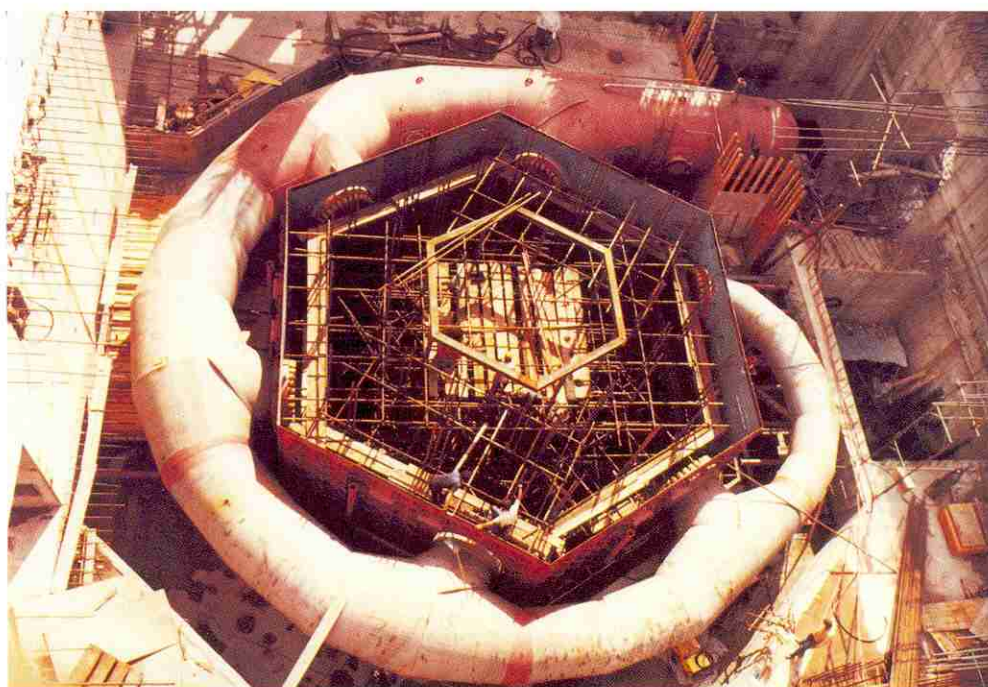


1. Centrale de San Agaton, Leonardo Ruiz Pineda. Une des turbines est en fonctionnement (photo Sulzer-Escher Wyss).

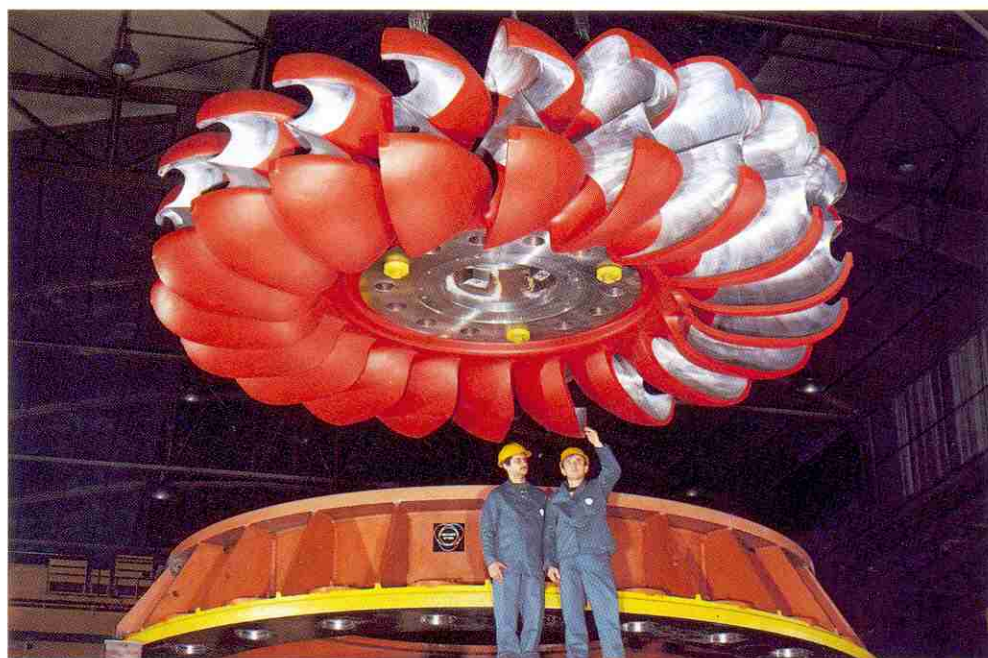


2. Vue en plan de la turbine (document Sulzer-Escher Wyss).

3. Répartiteur et chambre d'eau hexagonale en cours de montage (photo Sulzer-Escher Wyss).



4. Roue terminée en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4 d'une masse de 37,5 t (photo Sulzer-Escher Wyss).



Les déflecteurs dévient le jet en le coupant complètement; ils sont commandés par un servomoteur unique à pression d'eau.

La roue monobloc, en acier inoxydable G - X5 Cr Ni 13.4 a une masse de 37,5 t (fig. 4). Les augets sont usinés à l'aide d'une machine à commande numérique puis terminés et polis à la main (fig. 5).

La roue est fixée à l'arbre (fig. 6) par un accouplement à friction.



5. Meulage de finition des augets dont on remarque la très grande largeur ($B = 1,110$ m) (photo Sulzer-Escher Wyss).



6. Arbre de la turbine avec sa cloche de palier (photo Sulzer-Escher Wyss).

Le groupe possède 3 paliers, la butée axiale est située au sommet de l'alternateur.

Les essais de réception sur modèle réduit ont été exécutés dans le laboratoire de SEW-Bell à Kriens, avec un modèle de largeur d'auget $B = 90$ mm, sous une chute de 80 m.

A l'époque de leur mise en service (1987), les turbines de San Agaton avaient la plus grande largeur d'auget ($B = 1,110$ m).