Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 96 (1970)
Heft: 2

Artikel: L'équipment électromécanique de la centrale hydro-électrique de Robiei
Autor: Graeser, Jean-Émile
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70841

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'équipement électromécanique de la centrale hydro-électrique de Robiei [1]

par JEAN-EMILE GRAESER, ingénieur dipl. EPUL, Bureau d'ingénieurs Maggia S.A., ingénieurs-conseils, Locarno

1. Introduction

Avec la construction de l'usine hydro-électrique de Robiei (puissance installée 160 MW) et la mise en service des cinq groupes de cette centrale, les « Officine Idroelettriche della Maggia S.A. », Locarno (Tessin), ont apporté en Suisse une contribution importante au développement des installations d'accumulation par pompage et à celui de leur équipement.

Dans notre pays, la majeure partie des pompes d'accumulation a pour fonction essentielle d'assurer le remplissage saisonnier des bassins, auquel les apports naturels ne peuvent suffire. A Robiei, en revanche, ce mode d'utilisation ne constitue qu'une fraction du service de pompage, car la grande puissance installée des machines permet de superposer à ce cycle annuel un autre cycle dit de « pompage-turbinage », de période beaucoup plus courte. En effet, aux heures de faible consommation, de nuit ou en fin de semaine, il est possible, à l'aide des pompes, d'utiliser l'énergie excédentaire du réseau pour remplir le lac supérieur de Cavagnoli avec de l'eau prélevée dans le bassin de Robiei, situé 360 mètres plus bas. Cette eau accumulée, disponible en tout temps, est restituée au bassin inférieur à travers les turbines qui produisent alors de l'énergie électrique de haute valeur pendant les heures de pointe de consommation de la semaine. La même eau, recyclée plusieurs fois, assure la continuité du service hebdomadaire.

Cette caractéristique de fonctionnement ne constitue pas la seule particularité de l'installation. En effet, celle-ci se signale avant tout par la nouveauté de ses machines hydrauliques. Quatre d'entre elles sont des pompes-turbines réversibles, une primeur pour la Suisse, la cinquième est une turbine-pompe « Isogyre », première réalisation industrielle d'une invention récente.

La centrale de Robiei appartient au complexe hydroélectrique réalisé au cours de la deuxième étape des travaux de la Maggia. L'ensemble des ouvrages de cet important aménagement (fig. 1a et 1b), dont la production électrique en année moyenne atteindra 1230 GWh, dont 703 GWh en hiver, a déjà fait l'objet de diverses publications auxquelles le lecteur se reportera avec profit (voir plus loin la bibliographie). [1] à [4].

Les paragraphes suivants sont consacrés à la description de l'équipement électromécanique principal de Robiei et à l'exposé des raisons du choix des machines, dans le cas très particulier de cette centrale souterraine. Les premières expériences réalisées lors des essais de mise en service et au cours d'une courte période d'exploitation font également l'objet d'un large résumé. Les informations données ne touchent qu'à l'essentiel de l'installation et de son fonctionnement. De très nombreux détails, apanage du spécialiste, ont été volontairement écartés. Le lecteur en trouvera un reflet dans les publications des constructeurs et fournisseurs concernés. [5] à [12].

[1] Une traduction en allemand de cet article paraîtra dans la *Schweizerische Bauzeitung*.

2. Projet d'équipement de la centrale

2.1 *Généralités*

Pour bien comprendre les raisons du choix des machines équipant la centrale de Robiei, il est indispensable de se reporter à l'époque des dernières études relatives au projet de l'installation, alors que le maître de l'œuvre avait déjà définitivement fixé les grandes lignes de l'aménagement.

Rappelons-en les plus marquantes :

L'usine prévue et ses ouvrages d'adduction doivent servir de trait d'union entre les lacs jumelés de Cavagnoli et de Naret, d'une part, et les bassins communicants de Robiei et de Zöt, d'autre part (fig. 2). La disposition favorable des lieux permet, tout en maintenant la longueur totale des galeries de liaison à environ 1600 m pour une chute brute de 360 m (rapport L/H = 4,45), d'implanter la caverne bien au-dessous du niveau aval de restitution, sans pour cela renoncer à une galerie d'évacuation par gravité des eaux d'infiltration ou des fuites, facteur de sécurité important. Grâce à cette particularité, les machines hydrauliques sont en mesure de bénéficier d'une contre-pression au niveau des roues toujours supérieure à 35 mètres. A l'emplacement choisi pour la centrale correspond une galerie à basse pression, longue de 600 m, dont les caractéristiques nécessitent la présence d'une chambre d'équilibre, placée à proximité immédiate des machines.

En raison de la profondeur des bassins, suivant l'état de remplissage de ceux-ci, la chute brute peut osciller entre 285 m et 395 m. Néanmoins, une étude préliminaire des conditions d'exploitation montre clairement que la majeure partie de l'énergie produite ou consommée sera concentrée sur une gamme de chutes comprises entre 330 m et 375 m. En conséquence, on peut s'attendre à ce que le rendement global [2] de l'installation, en service de pompage-turbinage, reste supérieur à 70 %, quel que soit le type de machines choisi.

A ce stade d'élaboration du projet, des considérations économiques et de politique énergétique ont déjà fait adopter le genre d'exploitation décrit dans l'introduction, avec cycles hebdomadaires et saisonniers. La puissance installée prévue est de 160 MW, de loin supérieure à la puissance de 42 MW en turbine et de 30 MW en pompe, nécessaires à la seule exploitation saisonnière primitivement envisagée.

Les ouvrages hydrauliques d'adduction sont dimensionnés pour un débit de $\pm$ 50 m³/s. Du côté électrique, la centrale peut être connectée sans difficulté à la ligne 220 kV Peccia-Innertkirchen, qui passe à proximité.

[2] Par rendement global, il faut entendre le quotient de l'énergie électrique produite par le turbinage d'une certaine masse d'eau divisé par l'énergie absorbée par le pompage préalable de cette même quantité de liquide. Ainsi, avec un rendement de 70 %, la production de 1 kWh d'énergie électrique de pointe, donc de grande valeur, nécessite une consommation préalable de $1 \times 1/0{,}70 = 1{,}43$ kWh d'énergie électrique de déchet à bon marché.

Fig. 1a. — Situation générale de l'aménagement hydro-électrique de la Maggia.

1 Bassin d'accumulation
2 Barrage
3 Galerie principale
4 Chambre d'équilibre
5 Conduite forcée
6 Centrale
7 Galerie secondaire
8 Prise d'eau
9 Ligne électrique 220 kV
10 Station de couplage

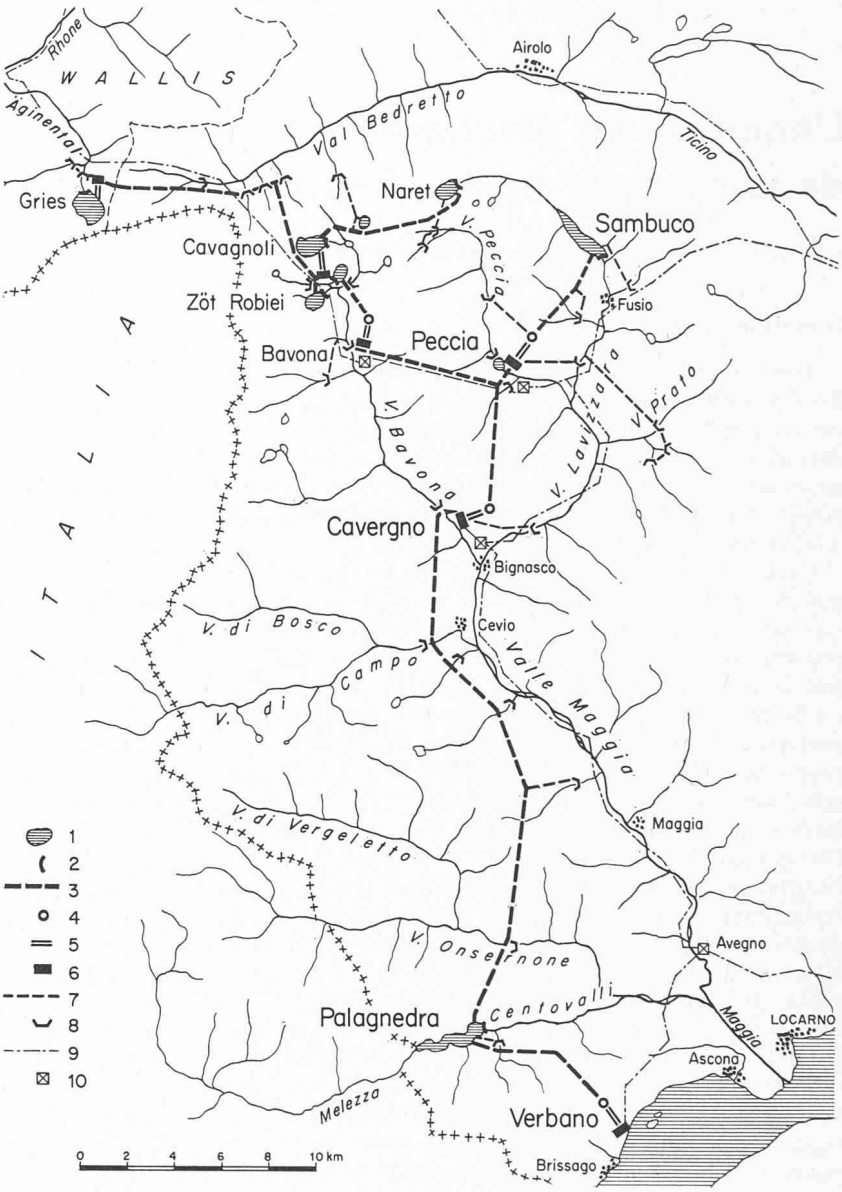
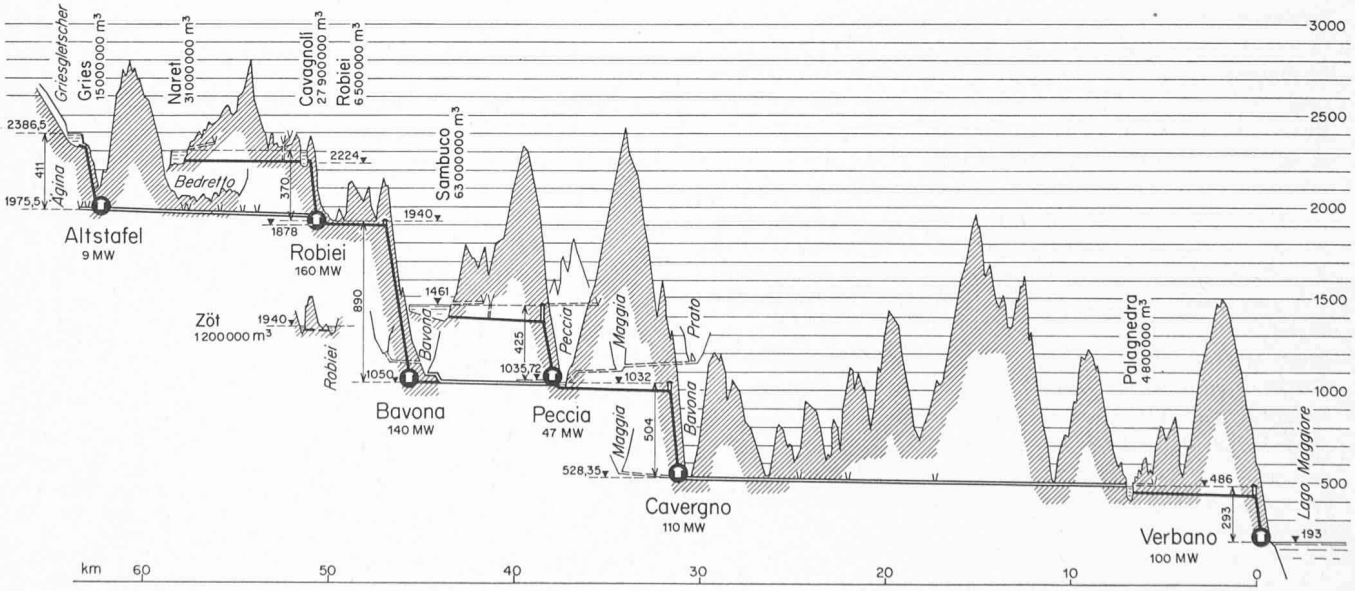
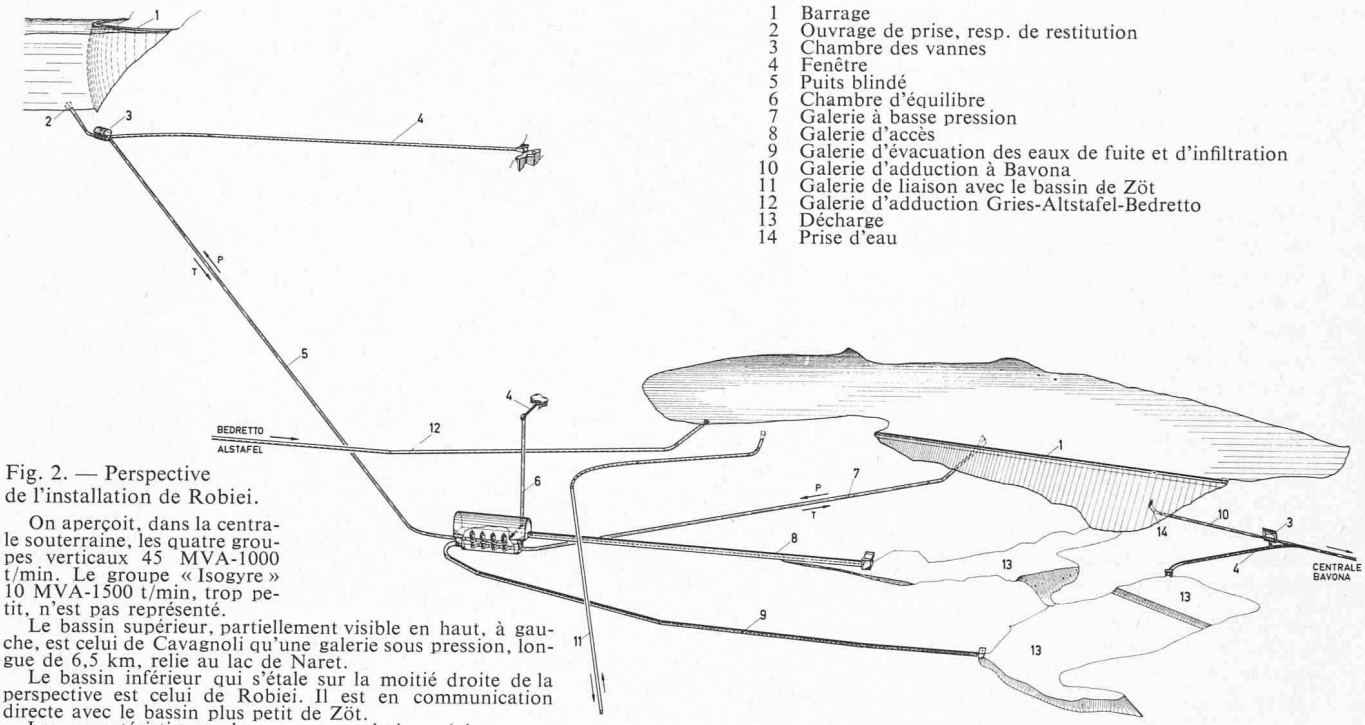


Fig. 1b. — Profil en long de l'aménagement hydro-électrique de la Maggia.

1 Chambre d'équilibre
2 Conduite forcée
3 Centrale

N. B. : Faute de place, la cheminée d'équilibre située en aval de la centrale de Robiei, sur la conduite à basse pression (voir fig. 2, rep. 6), n'est pas représentée.





1 Barrage
2 Ouvrage de prise, resp. de restitution
3 Chambre des vannes
4 Fenêtre
5 Puits blindé
6 Chambre d'équilibre
7 Galerie à basse pression
8 Galerie d'accès
9 Galerie d'évacuation des eaux de fuite et d'infiltration
10 Galerie d'adduction à Bavona
11 Galerie de liaison avec le bassin de Zöt
12 Galerie d'adduction Gries-Altstafel-Bedretto
13 Décharge
14 Prise d'eau

Fig. 2. — Perspective de l'installation de Robiei.

On aperçoit, dans la centrale souterraine, les quatre groupes verticaux 45 MVA-1000 t/min. Le groupe « Isogyre » 10 MVA-1500 t/min, trop petit, n'est pas représenté.

Le bassin supérieur, partiellement visible en haut, à gauche, est celui de Cavagnoli qu'une galerie sous pression, longue de 6,5 km, relie au lac de Naret.

Le bassin inférieur qui s'étale sur la moitié droite de la perspective est celui de Robiei. Il est en communication directe avec le bassin plus petit de Zöt.

Les caractéristiques de ces accumulations (niveaux et capacité) sont données sur la figure 1b.

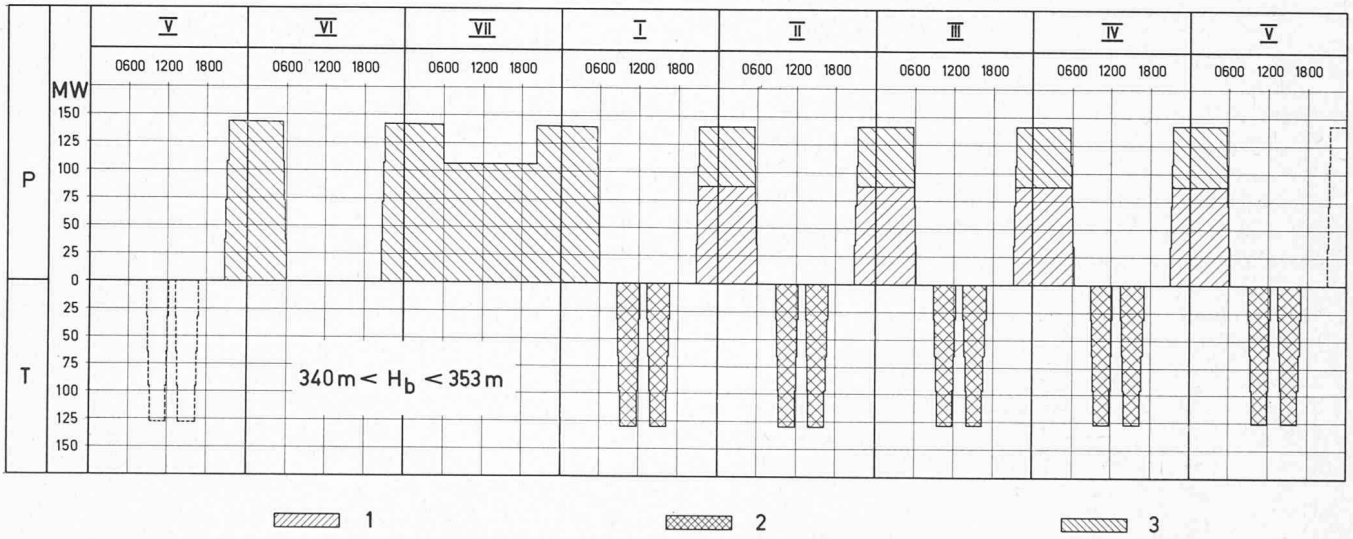


Fig. 3. — Diagramme type d'exploitation hebdomadaire pour une semaine d'été.

I ... VII Lundi ... dimanche
1 Pompage hebdomadaire
2 Turbinage hebdomadaire
3 Pompage saisonnier

Dans les meilleures conditions de fonctionnement, les machines doivent être susceptibles d'assurer le service suivant :

	Cycle saisonnier 10^6 m³/an	Cycle hebdomadaire 10^6 m³/an
Turbinage	60	env. 250
Pompage	29	env. 250

Le nombre d'heures d'utilisation annuelle des machines correspondant à ces chiffres atteint ainsi 1800 à 1900 heures en turbine et 2200 à 2300 heures en pompe.

La figure nº 3 illustre le genre d'exploitation auquel doivent faire face les machines. L'énergie est consommée ou fournie par « paquets ». Aucun réglage de puissance n'est envisagé, qui conduirait à faire de la « dentelle ».

En raison de l'inaccessibilité relative de la cuvette de Robiei, il est prévu d'y acheminer le matériel au moyen d'un téléphérique dont la charge utile maximum est fixée à 20 tonnes (fig. 4). Cette condition est appelée à jouer un rôle non négligeable dans le choix de certaines dispositions constructives des machines.

2.2 *Choix du type de machines*

A partir des données exposées dans le paragraphe précédent, malgré la réticence de certains constructeurs peu enclins à sortir des chemins battus, un équipement comportant quatre groupes d'une puissance électrique de 45 MVA, tournant à 1000 t/min, s'avérait être la solution la plus avantageuse à bien des égards. Qu'on en juge :

— Grâce à la grande contre-pression régnant au niveau des roues, qui garantit un fonctionnement sans cavitation, la vitesse spécifique (ns) d'environ 150, assurant le meilleur rendement, peut être adoptée.

— La puissance absorbée en pompe, non réglable, variant entre 30 et 40 MW en fonction de la chute, permet un étagement judicieux, sans sauts d'une ampleur exagérée, des niveaux de la consommation d'énergie.

— Les dimensions relativement petites des groupes, résultant de la vitesse élevée de rotation, entraînent une construction ramassée de la centrale, réduisant ainsi le volume à excaver et à aménager, et, par conséquent, le coût de la construction.

— Les pièces les plus lourdes et les plus encombrantes au transport (demi-stator non bobiné, rotor sans les pôles, spirale entière) atteignent exactement, sans les dépasser, les limites de poids et de dimensions imposées. Une puissance unitaire plus grande ou, à puissance égale, une vitesse nominale plus faible, conduirait à une fragmentation plus poussée des éléments les plus importants des machines.

Sur la base des différentes offres remises par les fournisseurs de machines hydrauliques et électriques, trois variantes d'équipement principal faisaient l'objet d'une étude comparative, dont naîtra finalement le projet d'exécution de la centrale.

Il s'agissait, en résumé, de :

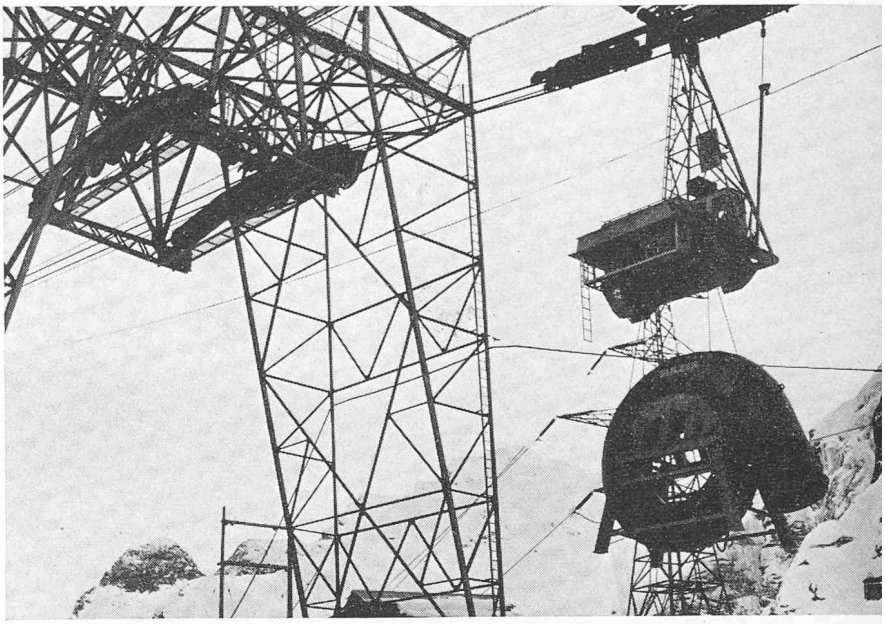


Fig. 4. — Transport d'une bâche spirale par téléphérique
Le poids de la bâche avec son support atteint la limite de charge de 20 t.
Photo bureau d'ingénieurs MAGGIA 16 851

A. *Groupe ternaire* à axe horizontal, comportant un alternateur synchrone unique, fonctionnant indifféremment en moteur ou en générateur avec le même sens de rotation, une turbine Francis et une pompe centrifuge disposée de part et d'autre de l'alternateur.

Ce groupe constitue un assemblage de machines connues et déjà longuement éprouvées. La pompe et la turbine, calculées et construites chacune pour des conditions de marche bien définies, accusent les meilleurs rendements. La turbine Francis, munie d'un régulateur et d'un orifice compensateur, conserve intactes toutes ses caractéristiques. Grâce à la présence de la turbine qui, quel que soit le service prévu, assure la synchronisation du groupe, le démarrage en pompe ne pose aucun problème.

La seule originalité de cette variante, par rapport au groupe ternaire classique, réside dans la suppression de l'accouplement débrayable de la pompe. Il en résulte une économie de matériel importante (groupe à deux paliers) et de frais de construction (longueur réduite du groupe, donc raccourcissement sensible de la centrale) d'un mon-

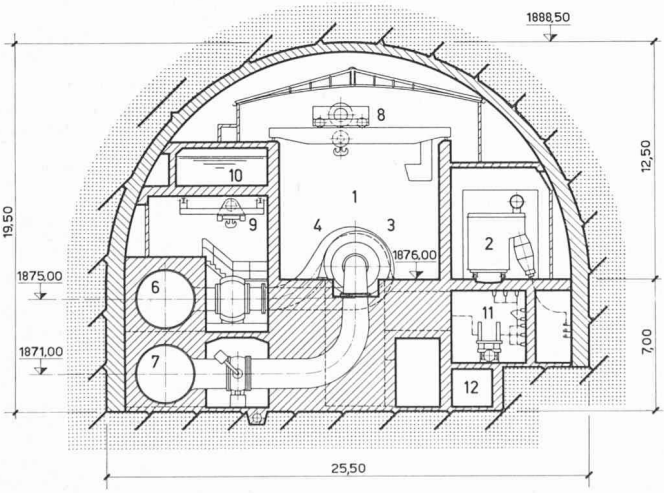


Fig. 5. — Projet de centrale équipée de groupes ternaires (variante A). Section transversale 1 : 400.

1 Salle des machines
2 Transformateurs principaux 12/220 kV
3 Moteur-générateur 45 MVA — 1000 t/min
4 Pompe et turbine principales
5 Turbine-pompe « Isogyre »
6 Collecteur haute pression
7 Collecteur basse pression
8 Ponts roulants 2 × 40 t
9 Pont roulant 20 t
10 Réservoir d'eau de refroidissement
11 Installation électrique 12 kV
12 Fosse pour récupération de l'huile

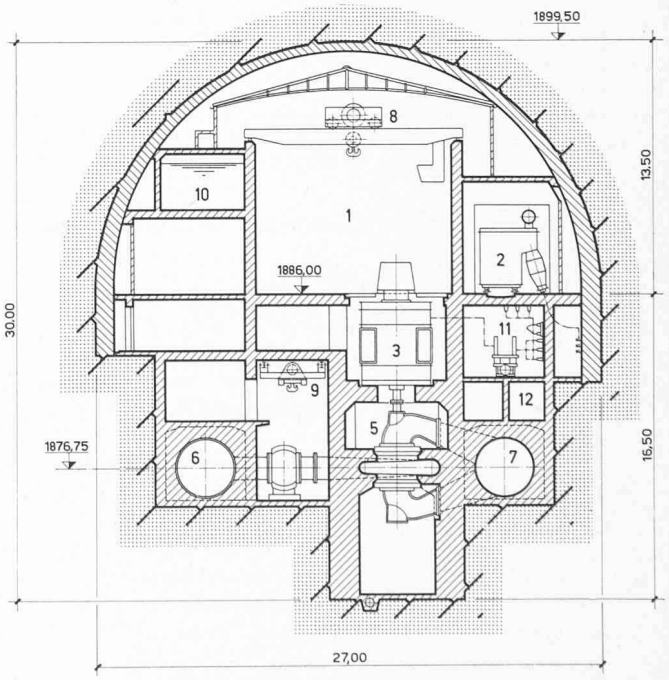


Fig. 6. — Projet de centrale équipée de groupes « Isogyre » (variante C). Section transversale.

tant égal, sinon supérieur, à celui du capital équivalent aux pertes supplémentaires provoquées par la rotation de la pompe dénoyée, tournant à vide, en service turbine.

Les deux extrémités de l'arbre du générateur étant occupées, l'excitatrice normalement entraînée par le groupe est remplacée par un dispositif d'excitation statique.

La centrale destinée à abriter les groupes de cette variante, dont une section illustre ce texte (fig. 5), se signale par sa grande longueur et par les nombreux embranchements, au total seize, des deux collecteurs qui s'étirent sur un de ses flancs.

B. *Groupe réversible* à axe vertical, comportant une pompe-turbine réversible surmontée d'un moteur-générateur synchrone, conçu pour le démarrage en régime asynchrone.

La même machine hydraulique, une pompe centrifuge munie d'un diffuseur-distributeur [1] à pales mobiles, peut passer du service pompe au service turbine par simple changement du sens de rotation. La simplification réalisée du côté hydraulique trouve sa contrepartie dans la complication de l'installation électrique : un autotransformateur réducteur de tension, destiné à maintenir le fort appel de courant de démarrage du moteur (service pompe) dans des limites acceptables, ainsi qu'un inverseur de phase sont nécessaires. De plus, la roue unique de la pompe-turbine réversible ne réalisant qu'un compromis hydraulique, le rendement de cette machine reste inférieur à celui des autres variantes.

Cette solution, séduisante par sa simplicité et caractérisée par un faible encombrement, se signale par un coût d'installation réduit. La centrale conçue pour recevoir les quatre groupes réversibles est la plus compacte (voir fig. 7a et 7b).

C. *Groupe « Isogyre »* à axe vertical, comportant une machine brevetée d'un genre nouveau, n'existant qu'à

[1] Nous avons donné à la couronne d'aubes mobiles disposée entre la roue et la spirale le nom de diffuseur-distributeur (ou distributeur-diffuseur) qui caractérise clairement les deux fonctions de cet appareil. En pompe, l'écoulement est centrifuge et l'aubage joue le rôle de diffuseur. En turbine, au contraire, l'écoulement est centripète, l'aubage joue alors le rôle de distributeur.

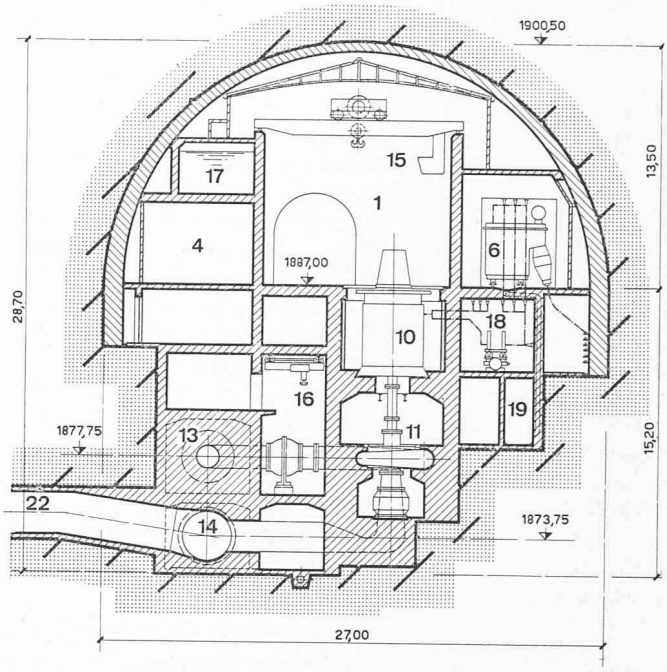


Fig. 7a. — Centrale souterraine existante de Robiei (selon variante B du projet), section transversale 1 : 400 à travers un groupe réversible.

1 Salle des machines
2 Salle de commande
3 Atelier
4 Magasin
5 Salle de révision des transformateurs
6 Transformateurs principaux 12/220 kV
7 Transformateur de démarrage
8 Infirmerie
9 Galerie d'accès
10 Moteur-générateur 45 MVA-1000 t/min
11 Pompe-turbine réversible
12 Turbine-pompe « Isogyre »
13 Collecteur haute pression
14 Collecteur basse pression
15 Ponts roulants 2 × 40 t
16 Pont roulant 20 t
17 Réservoir d'eau de refroidissement
18 Installation électrique 12 kV
19 Fosse pour récupération de l'huile
20 Réservoir d'huile
21 Puits blindé
22 Raccordement à la chambre d'équilibre
23 Conduite à basse pression
24 Transformateur auxiliaire 12/16 kV
25 Vanne papillon DN 3100 mm

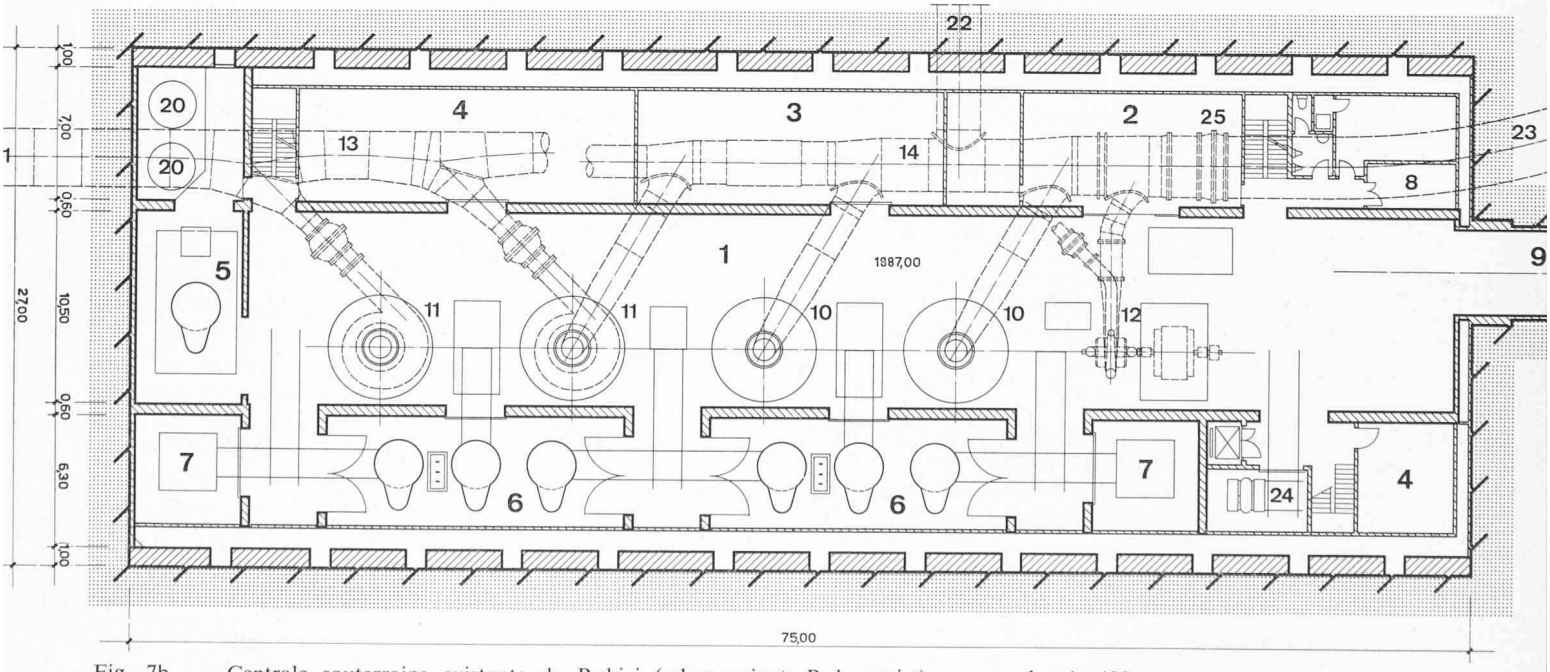


Fig. 7b. — Centrale souterraine existante de Robiei (selon variante B du projet), vue en plan 1 : 400.

l'état de prototype, jamais éprouvée à l'échelle industrielle, l'« Isogyre », accouplée à un moteur-alternateur synchrone.

Sur le plan des caractéristiques de fonctionnement, ce groupe s'apparente à celui de la variante A. Ce qui fait son originalité, c'est la présence dans une spirale unique des roues de la pompe et de la turbine, logées côte à côte. Des vannes d'isolement judicieusement conçues permettent de dénoyer celle des roues qui n'est pas en service. Il résulte de cette disposition une économie de matériel et une réduction d'encombrement notables, dont la répercussion sur le prix d'installation n'est pas négligeable. Ces avantages, alliés à la simplicité de la partie électrique du groupe, rendent cette variante digne d'un intérêt réel. Cependant, au stade de développement qui est le sien au moment de notre étude, la complexité mécanique de la turbine-pompe « Isogyre » en fait une machine nécessitant de grandes précautions au montage et présentant encore une certaine incertitude quant à sa sécurité de fonctionnement.

Une section de la centrale dessinée pour cette variante (fig. 6) illustre la disposition choisie pour l'implantation des groupes.

Un des éléments importants de cette étude, celui de la comparaison des coûts des différentes variantes, figure plus loin sous forme de tabelle. Etablie sur la base d'offres soumises à des conditions de concurrence et de développement technique en constante évolution, elle ne présente qu'une image à laquelle il serait inopportun d'attacher une signification trop absolue.

CENTRALE DE ROBIEI

Tableau de comparaison des coûts pour différentes solutions d'équipement

(Base de comparaison : Groupe ternaire)

Spécification	Coût		
	Variante A Groupe ternaire %	Variante B Groupe réversible %	Variante C Groupe « Isogyre » %
Machines hydrauliques, y compris vannes et accessoires	61	32	49
Moteurs-générateurs synchrones, y compris excitatrices, régulateurs de tension et dispositifs éventuels de démarrage et d'inversion des phases (mais sans les transformateurs principaux 220/12 kV, identiques pour les trois variantes)	39	43,5	39
Coût total de la fourniture et du montage	100	75,5	88
Capitalisation des pertes supplémentaires (moindre rendement)		20,5	6,5
Moindre coût de la construction, partie génie civil (centrale et collecteurs)		— 9,0	— 4,5
Coût comparatif	100	87	90

Se fondant sur les conclusions de l'étude comparative des trois variantes décrites plus haut, le maître de l'œuvre portait finalement son choix sur un équipement principal composé de quatre groupes réversibles (variante B).

Plus tard, il décidait d'y adjoindre un groupe « Isogyre », à axe horizontal, de puissance réduite (variante C).

Ce sont ces machines, et certains éléments de l'installation à laquelle elles sont rattachées, qui sont l'objet des commentaires rassemblés dans les paragraphes suivants.

3. Description de l'équipement existant

L'équipement principal de la centrale souterraine de Robiei (fig. 7), tel qu'il se présente actuellement, se compose de :

4 GROUPES RÉVERSIBLES PRINCIPAUX (fig. 8), comprenant :

— 4 *pompes-turbines réversibles*, construites par Sulzer Frères S.A., Winterthour

	Turbine	Pompe	
H =	276/390	285/395	m
Q =	9.85/11.72	11.80/6.45	m/³s
N =	23.0/40.8	37.3/29.7	MW
n =	+ 1000	— 1000	t/min

— 4 *vannes sphériques* et 4 *vannes conico-sphériques*, disposées à l'amont, respectivement à l'aval, des pompes-turbines principales, livrées par les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A., Vevey

Vannes	Diamètre nominal	Pression d'essai
Haute pression	1200 mm	800 mCE
Basse pression	1144/1375 mm	650/160 mCE

— 4 *moteurs-générateurs synchrones*, avec rotor spécialement conçu pour le démarrage électrique en régime asynchrone, fournis par la Société Anonyme des Ateliers de Sécheron, Genève

N =	45 MVA	f =	50 Hz
cos phi	(générateur)	=	0,8
	(moteur)	=	0,95
U =	12 kV	n =	± 1000 t/min
PD^2 =	43 tm²	n_{emb} =	1650 t/min

— 2 *autotransformateurs de démarrage*, réducteurs de tension (Sécheron).

1 GROUPE « ISOGYRE » (fig. 9), constitué par :

— 1 turbine-pompe « Isogyre », à axe horizontal, fournie par les Ateliers des Charmilles S.A., Genève

	Turbine	Pompe	
H =	276/390	285/395	m
Q =	2.25/2.94	2.30/1.12	m³/s
N =	5.46/10.0	8.22/5.30	MW
n =	+ 1500	+ 1500	t/min

— 1 *moteur-générateur synchrone* (Sécheron)

N =	10 MVA	f =	50 Hz
cos phi	(générateur)	=	0,8
	(moteur)	=	0,95
U =	12 kV	n =	± 1500 t/min
PD^2 =	3,5 tm²	n_{emb} =	2550 t/min

3.1 *Pompes-turbines réversibles*

Mécaniquement, la pompe-turbine réversible diffère peu d'une turbine « Francis ». Le profil hydraulique et le nombre des aubes de sa roue, par contre, sont ceux d'une pompe centrifuge classique. Le diffuseur-distributeur à pales mobiles, d'un tracé particulièrement étudié, assure un écoulement aussi régulier que possible dans les deux sens. Des essais préliminaires sur modèle ont permis de donner à la pale la forme la plus résistante aux sollicitations dynamiques, et ont conduit à la suppression de tout système de blocage des aubes. La manœuvre de ces dernières est assurée par une commande extérieure, identique à celle des turbines à réaction. Un dispositif (voir fig. 10), comparable au limiteur d'ouverture d'un régulateur ordinaire de vitesse remplace ce dernier. Un servomoteur différentiel (6) amène l'aubage mobile du diffuseur-distributeur (5) au degré d'ouverture dicté par la position d'un élément pilote (8a) solidaire d'un moteur électrique d'entraînement (14). Grâce à ce dernier, l'élément pilote et, par conséquent, le diffuseur-distributeur se prêtent à la commande à distance. Les mouvements de manœuvre de l'aubage mobile sont lents. Une installation de graissage centralisé alimente les nombreux points de lubrification des articulations et des paliers des aubes et de leur système de commande.

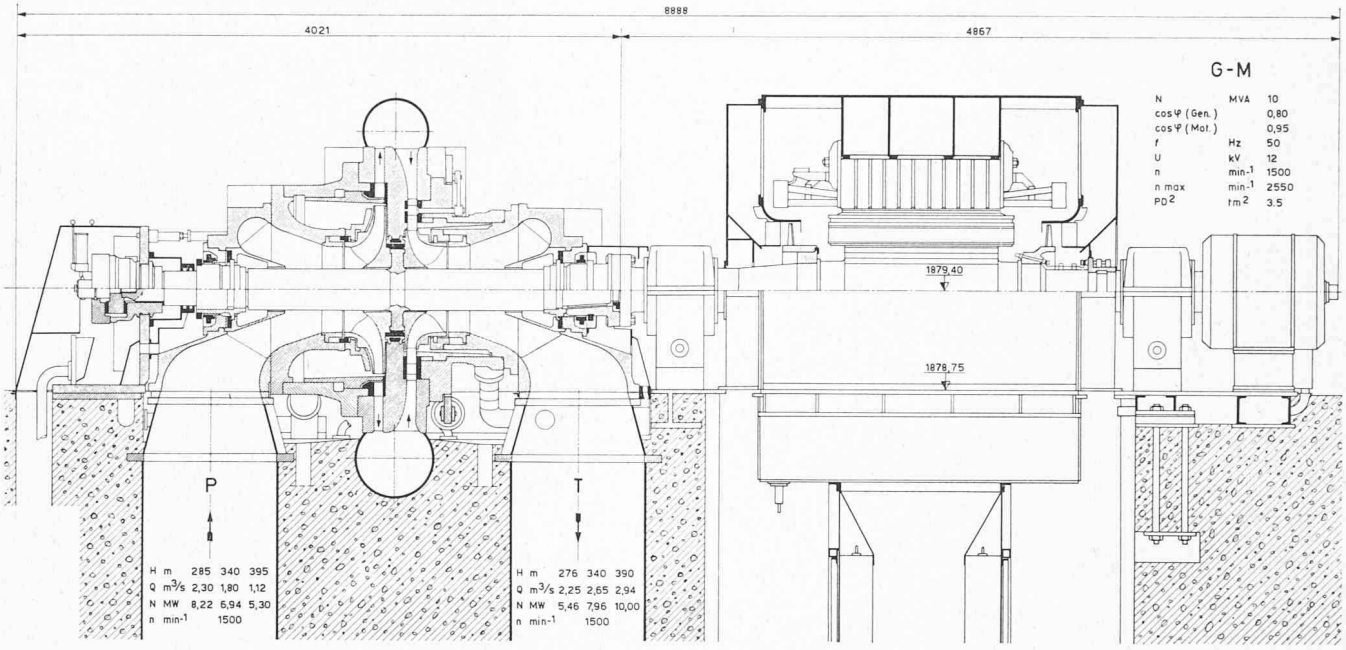


Fig. 9. — Groupe « Isogyre » 10 MVA — 1500 t/min. Section longitudinale 1 : 40.

La bâche spirale, en construction soudée mixte, viroles de tôle rapportées sur un anneau d'entretoises en acier coulé, est calculée et construite pour tenir la pression d'essai de 800 mCE. Solidement ancrée aux fondations du groupe par son anneau d'entretoises, la spirale est séparée du béton qui l'enrobe par une épaisse enveloppe élastique, dont la présence permet la libre dilatation des viroles et empêche une transmission trop intense des vibrations provenant de la machine.

Les couvercles sont particulièrement robustes et rigides : en raison de l'existence d'une vanne à l'aval de la machine (voir paragraphe 3.2), ils sont dimensionnés pour résister à la pleine pression amont.

La nécessité d'assurer une bonne tenue de la pompe-turbine sous une chute élevée a conduit le constructeur à faire un très large usage d'aciers spéciaux et inoxydables.

Pour faciliter les travaux de révision, la pompe-turbine est conçue de manière à pouvoir être démontée et montée sous l'alternateur, sans qu'il soit nécessaire de toucher à ce dernier.

Le pivot, également fourni par l'hydraulicien, est disposé au-dessus de l'alternateur. Il est conçu pour fonctionner indifféremment dans les deux sens de rotation. Un groupe de pompage séparé en assure la lubrification correcte dans n'importe quel cas de fonctionnement.

3.2 *Vannes des groupes réversibles*

Le diffuseur-distributeur n'étant animé que de mouvements lents, c'est à la vanne sphérique de garde qu'il incombe, en cas de nécessité, de jouer le rôle d'organe de sécurité à fermeture rapide. Elle est calculée pour fermer sous le plein débit du groupe dans un temps très court [1]. Cette disposition permet à la fois d'éviter un dévirage très important et de réduire le coup de bélier, lors d'un déclenchement en pompe. Ses organes de commande sont dimensionnés pour manœuvrer l'obturateur même si les pressions ne sont pas équilibrées. [12].

[1] Temps de fermeture : voir fig. 16.

En raison de l'implantation particulière de la centrale, le collecteur aval est constamment soumis à une contre-pression variant entre 35 et 65 m. Une vanne d'isolement à l'aval de chaque pompe-turbine est nécessaire, qui permet de démonter une machine sans avoir à vider le collecteur et, par conséquent, à mettre hors service tous les groupes de la centrale. La vanne qui remplit cette fonction est du type sphérique à passage conique (fig. 11). Elle présente sur une vanne papillon l'avantage d'une absence totale d'obstacle dans une zone d'écoulement fortement perturbé. Dans la position ouverte de l'obturateur, le profil hydraulique de l'aspirateur n'offre aucune solution de continuité et conserve ainsi sa forme idéale. Du point de vue du génie civil, une telle vanne permet une économie de place non négligeable ; disposée à l'endroit où les sections de la tubulure d'aspiration sont les plus petites, elle ne présente, en effet, qu'un faible encombrement.

Un tuyau conique facilement démontable, disposé entre la vanne et le fond inférieur de la pompe-turbine, est prévu pour accéder directement à la roue en cas de réparations.

L'importance des dégagements nécessaires au passage de la vanne et du tuyau de raccordement a rendu indispensable un renforcement du massif de béton, soutenant la bâche. Deux consoles en construction soudée reprennent les efforts provenant de l'anneau d'entretoises et les transmettent aux parois adjacentes.

Notons, enfin, que les vannes sphériques, tant à haute qu'à basse pression, ne sont pas dotées de by-pass automatiques. Lors de la première mise en route, la machine est remplie d'eau à l'aide d'une conduite auxiliaire. En service normal, la pompe-turbine est toujours pleine d'eau et l'équilibrage des pressions a lieu lors de l'ouverture du joint de service, éventuellement de l'obturateur de la vanne.

3.3 *Moteurs-générateurs*

L'alternateur accouplé à la pompe-turbine réversible travaille non seulement indifféremment en moteur ou en générateur à la vitesse synchrone, mais est également capable d'assurer à lui seul, sans le secours d'un dispositif auxiliaire de lancement, le démarrage de la pompe dont le

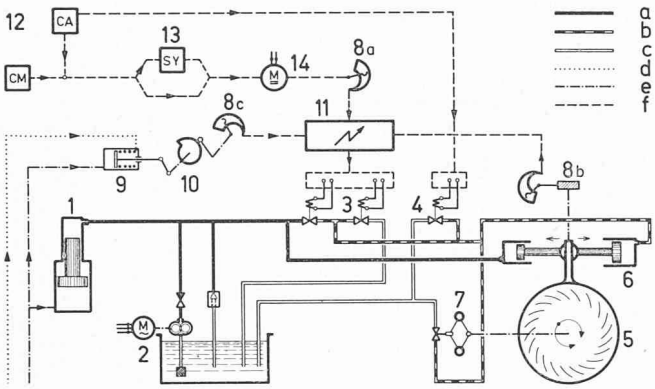


Fig. 10. — Schéma de la commande du distributeur-diffuseur des pompes-turbines réversibles 40 MW - 1000 t/min.

a Huile, pression constante
b Huile, pression variable
c Huile, aspiration et échappement
d Eau du collecteur basse pression
e Eau du collecteur haute pression
f Liaison électrique
1 Accumulateur d'huile sous pression
2 Groupe de pompage d'huile
3 Soupape de commande (ouverture et fermeture par « tout ou rien »)
4 Soupape de commande (arrêt d'urgence)
5 Distributeur-diffuseur
6 Servomoteur de commande pour 5
7 Protection de survitesse
8 Transmetteurs de position (à chaque position du transmetteur correspond un signal électrique d'intensité déterminée)
8a Organe fixant la valeur de consigne de l'ouverture du distributeur-diffuseur
8b Indicateur d'ouverture du distributeur-diffuseur (asservissement)
8c Organe donnant la valeur de consigne assurant une ouverture déterminée du distributeur-diffuseur en fonction de la chute (service pompe, seulement)
9 Balance pour la mesure de la chute nette
10 Came de liaison entre 8c et 9
11 Châssis de commande électronique
12 Armoires pour la commande automatique (CA) et la commande manuelle (CM)
13 Appareil de synchronisation
14 Moteur pour la commande de 8a

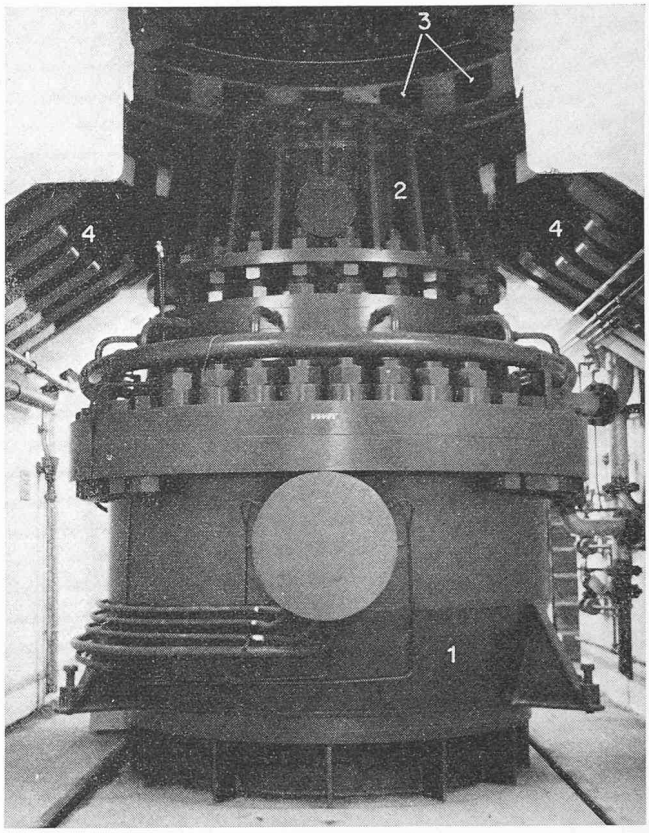


Fig. 11. — Vanne conico-sphérique disposée sous la pompe-turbine (vue du côté opposé au servo-moteur de commande).

On distingue notamment :
— le corps de la vanne (1) ;
— le tuyau conique (2) dont le démontage permet d'accéder à la roue, à vannes haute et basse pression fermées ;
— le dégagement dans le béton, sous la spirale, pour le retrait latéral du tuyau ;
— les « lumières » (3) de l'anneau d'entretoises, le corps central de la pompe-turbine n'étant pas monté ;
— les consoles latérales (4) en tôle soudée, auxquelles la bâche spirale est solidement fixée.

Photo bureau d'ingénieurs Maggia 20013

couple résistant à pleine vitesse atteint une fraction non négligeable du couple nominal. Cette fonction nécessite des dispositions constructives spéciales qui permettent au moteur de travailler correctement en régime asynchrone. Des connexions interpolaires, visibles sur la figure 12, disposées aux extrémités des pôles saillants, canalisent les courants énormes qui parcourent le rotor tout au long de cette brève phase de fonctionnement. La réalisation de ces connexions a profité de l'expérience du fabricant dans ce genre de construction. [8, 9]. L'inertie thermique de l'alternateur est telle que deux démarrages consécutifs en pompe sont possibles avant que les limites usuelles d'échauffement ne soient atteintes.

La circulation de l'air de refroidissement ne pouvant pas être entretenue par la simple rotation de la machine, ce sont huit ventilateurs séparés, montés par paire sur les réfrigérants à eau, qui l'assurent.

Etant donné les caractéristiques de l'installation et celles du groupe, à chaque déclenchement électrique en turbine, à pleine charge, les parties tournantes atteignent la vitesse d'emballement avant de s'arrêter. En raison de cette particularité, les rotors ont été dimensionnés pour supporter sans dommage une vitesse de rotation de 1650 t/min, alors que la vitesse d'emballement sous la plus haute chute est de 1390 t/min en régime permanent et de 1560 t/min en régime transitoire (influence du coup de bélier).

La limite de poids au transport fixée par le maître de l'œuvre a obligé le constructeur à procéder sur place au bobinage du stator. Ce travail de longue haleine a été effectué dans la centrale, sur une plage de montage prévue à cet effet.

3.4 *Transformateurs de démarrage*

Les moteurs-générateurs sont branchés sur le réseau par l'intermédiaire de deux groupes de transformateurs monophasés 12/220 kV, d'une puissance unitaire triphasée de 90 MVA. Chaque groupe de transformateurs dessert une paire de machines à travers une installation 12 kV qui présente les particularités suivantes :

— Présence de sectionneurs-inverseurs de phases aux bornes d'entrée de chaque moteur-générateur, permettant de réaliser le changement de sens de rotation du groupe.

— Présence d'un transformateur de démarrage par paire de groupes, avec le jeu de barres nécessaire à l'insertion momentanée de ce transformateur dans le circuit d'alimentation des moteurs-générateurs.

Le transformateur de démarrage est un autotransformateur triphasé à gradins, destiné à réduire la tension aux bornes des moteurs au moment du démarrage, afin de

limiter l'appel de courant sur le réseau et la chute de tension correspondante. Le graduateur dont il est muni permet de passer progressivement de la tension réduite à la tension nominale de l'installation, dès que la machine a atteint son régime de fonctionnement (voir paragraphe 3.5).

Ce transformateur n'est équipé d'aucun système de refroidissement. Son inertie thermique est suffisamment grande pour qu'il soit capable de participer à quatre démarrages consécutifs. Après une telle utilisation, un temps de repos de deux heures est nécessaire.

3.5 *Commande des groupes principaux*

La commande électrique qui équipe chaque groupe permet soit une manœuvre par opérations indépendantes, ordonnées manuellement, soit une manœuvre automatique. Dans ce dernier cas, la manipulation d'un sélecteur (pompe ou turbine) et celle d'un contacteur à deux directions suffisent à déclencher la suite entière des séquences de démarrage ou d'arrêt, en pompe ou en turbine.

La description de l'appareillage constituant la partie électrique de la commande sortant de notre propos, nous nous bornerons à résumer, en les condensant, les opérations essentielles de démarrage telles qu'elles se présentent au niveau des machines.

Démarrage en turbine : Dans un premier temps, la vanne sphérique basse pression s'ouvre. Au moment où elle atteint la pleine ouverture, la vanne haute pression s'ouvre à son tour, donnant après quelques dizaines de degrés de course un ordre qui amène le distributeur de la pompe-turbine dans la position de marche à vide, déterminée par la chute (deux positions : hautes et basses chutes). Le groupe démarre et atteint rapidement une vitesse très proche de la vitesse nominale.

L'appareil de synchronisation prend alors le relais et corrige, au moyen d'impulsions livrées au moteur de l'élément pilote, la position du distributeur, jusqu'à l'obtention de la vitesse synchrone et de la concordance des phases. L'enclenchement de l'alternateur sur le réseau est la dernière fonction automatique de la chaîne de démarrage. Il incombe ensuite à l'opérateur de régler l'ouverture du distributeur en fonction de la puissance désirée.

Un autre processus de démarrage est également possible, dans lequel la phase de synchronisation classique n'est plus dirigée par le synchronisateur. Dans ce cas, dès que le groupe approche de la vitesse nominale, l'alternateur non excité est enclenché sur le réseau à travers l'autotransformateur de démarrage ; la synchronisation s'effectue alors d'une façon analogue à celle décrite plus loin pour le service pompe.

Démarrage en pompe : Lors de l'établissement du projet, en raison des caractéristiques des machines composant le groupe réversible, il est rapidement apparu intéressant de prévoir un démarrage avec pompe noyée, notamment grâce aux caractéristiques favorables de l'alternateur. Tout en maintenant l'appel de courant, côté réseau, à une valeur inférieure à deux fois le courant nominal, ce dernier est capable de lancer le groupe tout en vainquant le couple résistant de la roue barbotant dans l'eau. On conçoit le double avantage de ce procédé :

— La pompe étant toujours pleine d'eau, un dispositif compliqué de dénoyage et de noyage de la roue est superflu.

— Le moteur-générateur assurant à lui seul le démarrage et le service continu, un dispositif de lancement indépendant (moteur ou turbine auxiliaire) n'est pas nécessaire.

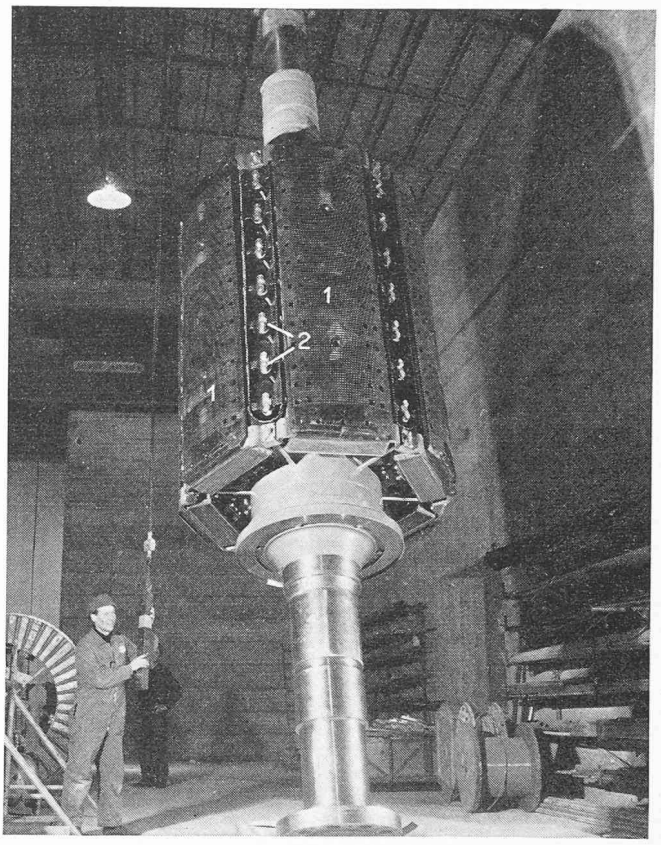


Fig. 12. — Rotor d'un moteur-générateur synchrone 45 MVA — 1000 t/min.

Les connexions interpolaires mentionnées dans le texte sont nettement visibles. Reliant les extrémités des pôles massifs (1), elles sont constituées par des paquets de lames de cuivre brasées sous les becs polaires. La structure lamellaire donne à la connexion une souplesse qui la rend insensible aux effets mécaniques de la dilatation produite par l'échauffement. Le repère 2 concerne les cales destinées au maintien des enroulements polaires.

Photo bureau d'ingénieurs Maggia 18'507.

Les diagrammes I, II, III et IV de la figure 13 illustrent quatre possibilités de démarrage en pompe :

— La variante I (démarrage à distributeur ouvert et vanne sphérique fermée : couple résistant élevé), envisagée lors de l'élaboration du projet, n'a jamais été appliquée.

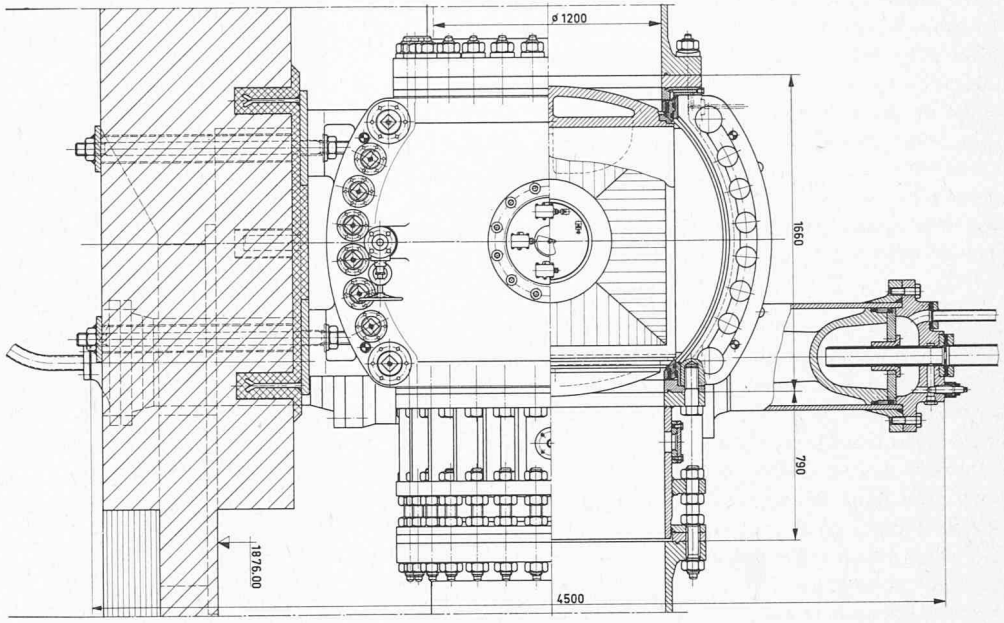
— La variante II, élaborée sur la base d'expériences réalisées sur d'autres installations et d'une meilleure connaissance du comportement du diffuseur-distributeur, est celle qui a été éprouvée pendant la première période d'exploitation (voir paragraphe 4.3).

— La variante III, issue de la précédente, sera mise en pratique prochainement.

— La variante IV, démarrage direct, constitue une curiosité expérimentale dont l'application conduirait, de l'avis même du fournisseur, à une fatigue accélérée du matériel.

Dans les trois derniers cas, dès que le groupe est synchrone avec le réseau, le diffuseur-distributeur est amené automatiquement dans la position d'ouverture optimum en fonction de la chute. L'appareillage de commande comprend le dispositif nécessaire à la réalisation de cette séquence (fig. 10). Aucun réglage de puissance n'est possible ; à chaque chute correspond un seul point de fonctionnement.

Changement de marche : Jusqu'à présent, les changements de marche ont été opérés en faisant succéder une phase de démarrage à une phase complète d'arrêt. Des séquences de liaison sont prévues pour raccourcir la durée prolongée de ces opérations, supprimant les manœuvres de la vanne basse pression et maintenant les auxiliaires en action. Leur mise au point sera effectuée plus tard.


ø 1200
1660
790
1876.00
4500

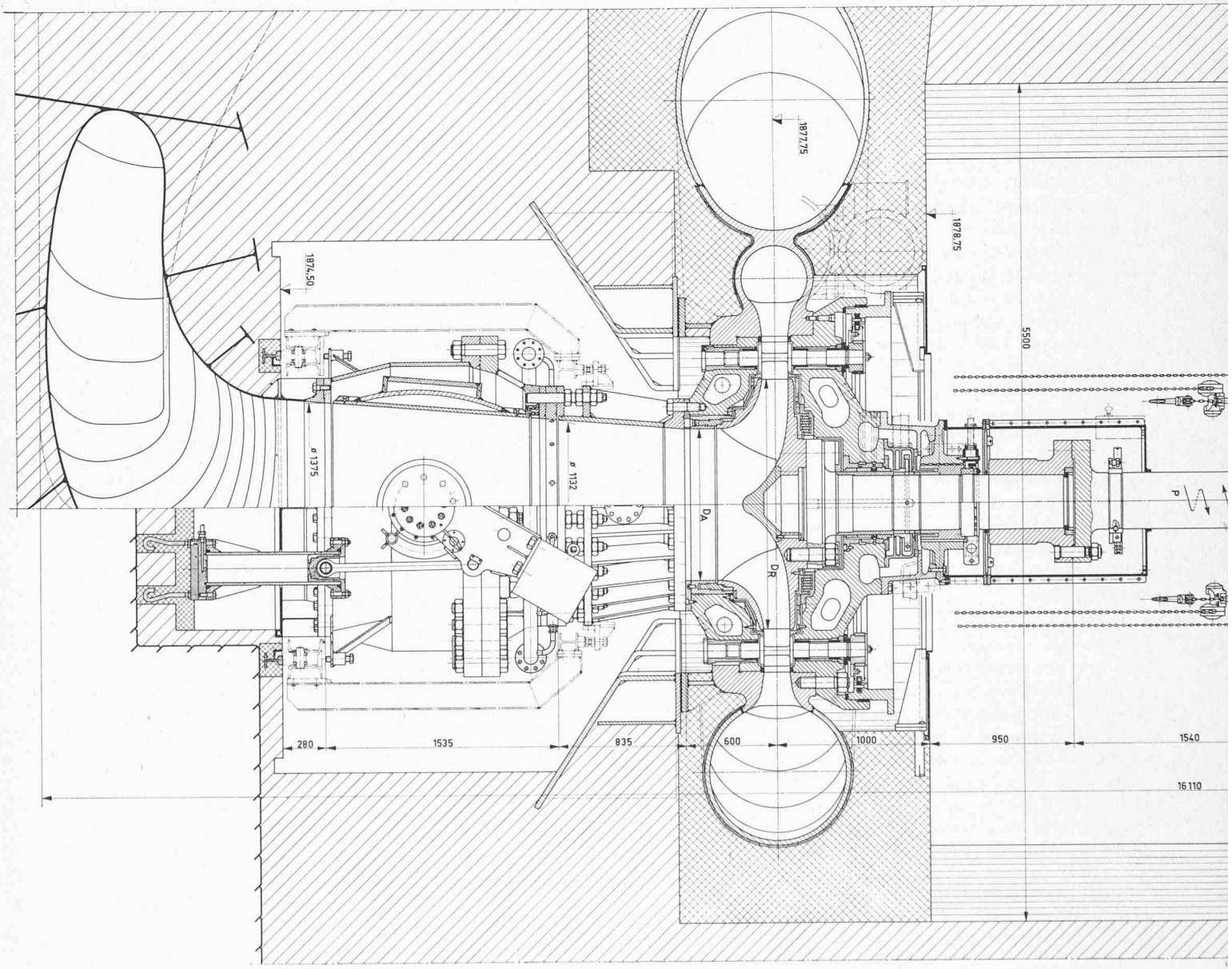
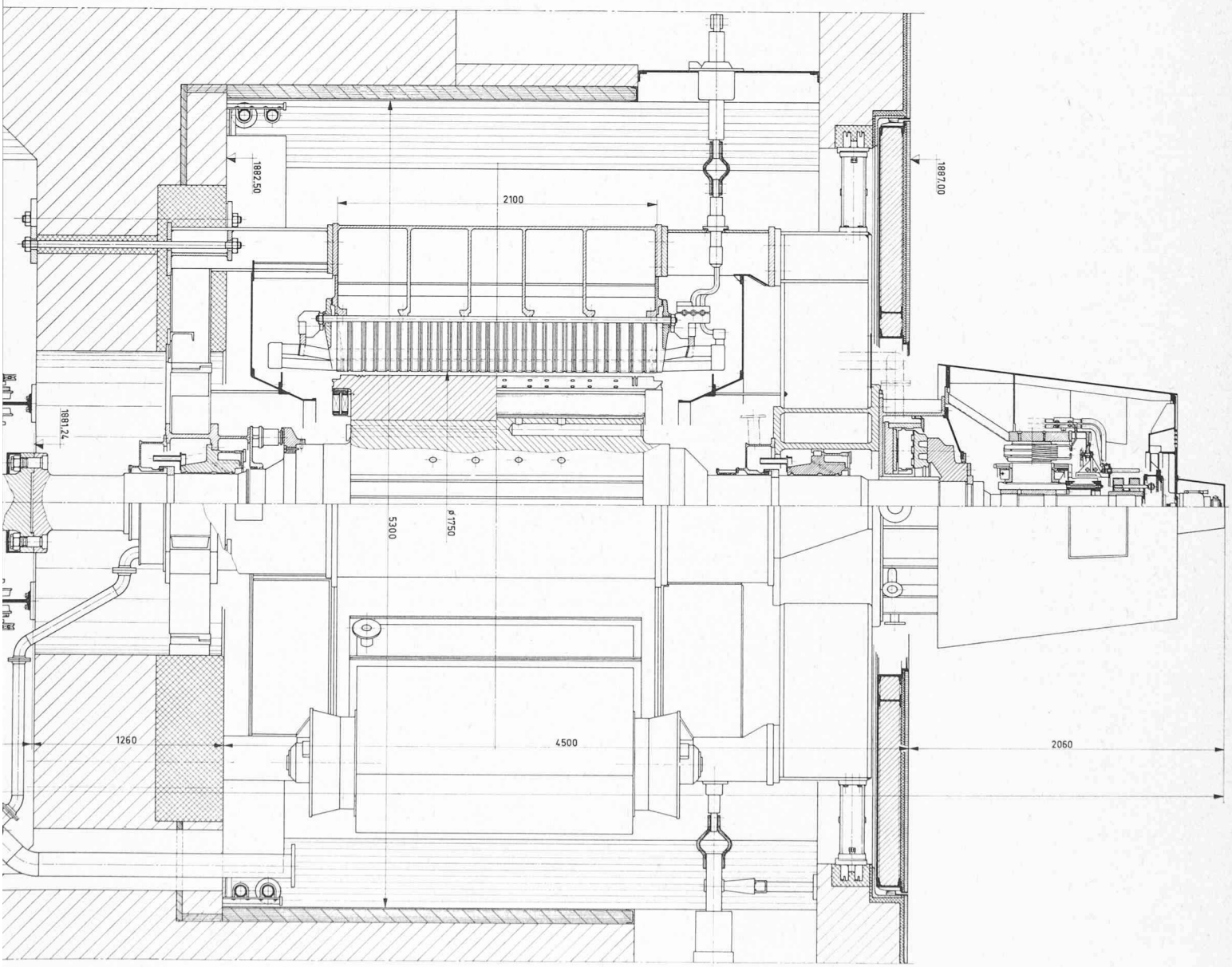

1877.75
1878.75
1974.50
5500
ø 1375
ø 1132
DA
DR
P
280
1535
835
600
1000
950
1540
16.110

Fig. 8. — Groupe réversible 45 MVA - 1'000 t/min avec vanne sphérique haute pression, section verticale 1 : 40.



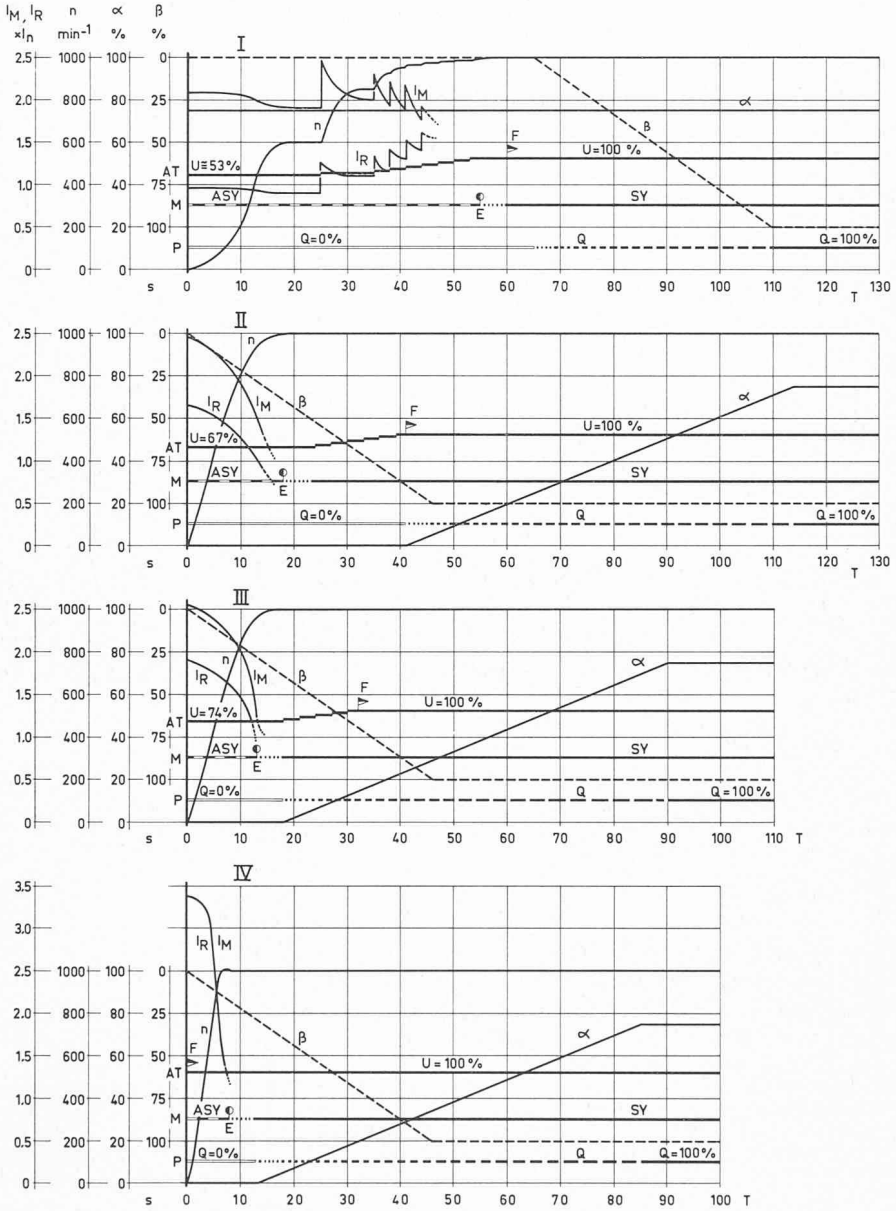


Fig. 13. — Diagrammes représentant différents processus de démarrage en pompe à roue noyée.

Démarrage à tension réduite aux bornes du moteur :

I. Projet initial (données approximatives).
II. Pendant la première période d'exploitation (mesures).
III. Pour l'exploitation future (selon calculs basés sur les mesures déjà effectuées).

Démarrage à pleine tension aux bornes du moteur :

IV. Démarrage direct (mesures effectuées lors d'essais spéciaux).

I_M Courant mesuré aux bornes du moteur
I_R Courant, côté réseau 220 kV
I_n Courant nominal
— moteur : 2160 A (12 kV)
— réseau : 118 A (220 kV)
n Vitesse de rotation en t/min
α Ouverture du distributeur en % (0 = fermé)
β Ouverture de la vanne-sphérique haute pression en % (0 = fermé)
T Temps en secondes
$T = 0$: enclenchement du moteur, vanne basse pression ouverte, pompe-turbine pleine d'eau, services auxiliaires en fonctionnement.
P Ligne représentative du régime de la pompe
Q Débit en %
M Ligne représentative du régime du moteur
ASY Régime asynchrone
SY Régime synchrone
E Enclenchement de l'excitation
AT Ligne représentative du fonctionnement de l'autotransformateur réducteur de tension
U Tension en % définie par le rapport de transformation
$U = 100$ % : autotransformateur hors service, alimentation directe du moteur)

Durée des opérations : Rappelons avant tout, au risque de nous répéter, qu'à aucun moment le maître de l'œuvre n'a misé sur la rapidité des manœuvres, puisque l'exploitation prévue ne nécessite que deux ou trois périodes de service journalier, suivant un programme établi d'avance. Que ce soit en pompe ou en turbine, la durée de démarrage jusqu'à l'obtention de la pleine charge oscille entre 2 ½ et 3 ½ minutes. La durée de l'arrêt est un peu plus longue [1].

3.6 *Turbine-pompe « Isogyre »*

Bien que destinée à l'exploitation régulière, la turbine-pompe « Isogyre » de Robiei présente un caractère expérimental indéniable. Ce qui a été dit précédemment, au paragraphe 2.2, est valable pour cette machine (fig. 14). Elle diffère de celles initialement prévues par sa puissance plus faible et ses dimensions réduites, d'une part, et par la disposition de son axe, d'autre part. L'arbre horizontal a permis la suppression des vannes-clapets séparées, côté basse pression. En effet, la continuité du dénoyage est assurée par une injection intermittente d'air sous pression, qui maintient le niveau d'eau éloigné de la roue hors service, sans qu'il soit nécessaire d'isoler la volute d'aspiration correspondante. Pour le reste, le lecteur se reportera avec profit aux descriptions figurant dans les publications mentionnées dans la bibliographie. [5, 6, 7].

Le régulateur de la turbine, avec régleur électronique, et le groupe de pompage destiné à la lubrification du pivot et de tous les paliers ne constituent pas les seuls accessoires de la turbine-pompe « Isogyre ». En effet :

— une batterie de vannes et de soupapes destinées à la réalisation des différentes manœuvres de noyage et de dénoyage en cours de marche,

— un groupe motocompresseur ($N = 17$ PS ; $p = 30$ kg/cm^2) avec un réservoir d'air comprimé ($V = 2{,}3$ m^3),

— deux groupes motopompes (dont un de réserve) pour l'alimentation en eau propre de certains joints,

ont dû encore trouver place à proximité immédiate du groupe.

En outre, une vanne sphérique et une vanne papillon montées sur les embranchements des collecteurs permettent, en cas de besoin, d'isoler la pompe-turbine du reste de l'installation.

Actuellement, la commande du groupe est purement manuelle. Le constructeur a déjà livré un dispositif de contrôle réalisant un certain nombre de verrouillages destinés à éviter celles des fausses manœuvres qui pourraient entraîner des dommages. La commande automatique, complèment indispensable de la télécommande, est à l'étude. Elle entrera en service en 1970.

3.7 *Equipement accessoire*

En relation directe avec les groupes de production, la centrale de Robiei est équipée des objets suivants :

— Une installation de distribution d'eau de refroidissement avec plusieurs groupes motopompes totalisant une puissance de 350 kW.

[1] Le lecteur constatera peut-être avec étonnement que ces temps sont plus longs que ceux donnés à la figure 13, cas II et III, pour le démarrage en pompe. Qu'il ne perde pas de vue que les diagrammes de cette figure ne concernent qu'une partie des opérations de démarrage qui comprennent, en outre, les séquences d'ouverture de la vanne conico-sphérique et de mise en marche de tous les auxiliaires.

En cas de nécessité, sous réserve de certaines modifications, des temps plus courts pourraient être obtenus.

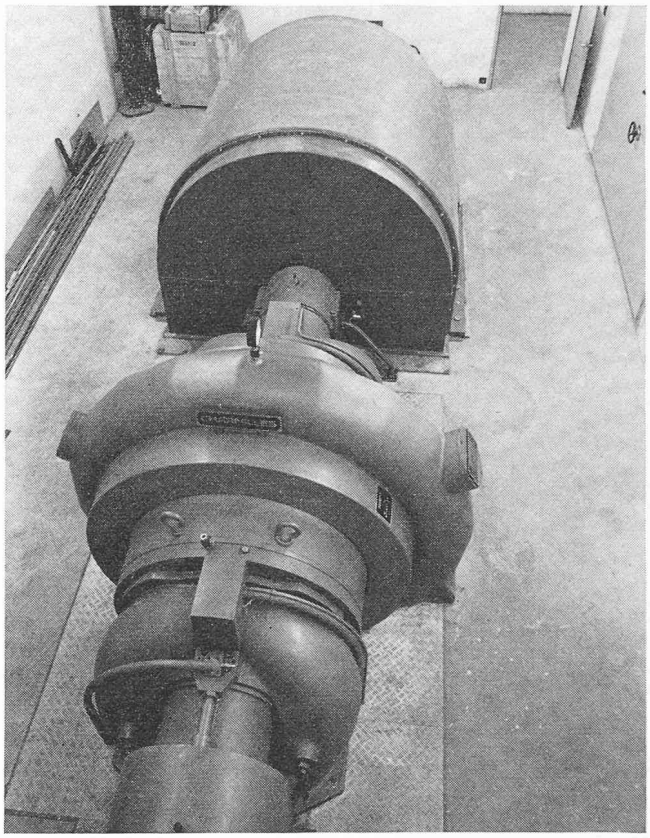


Fig. 14. — Groupe « Isogyre » 10 MVA — 1500 t/min.

Au premier plan, partiellement visible, le papier-butée, puis la volute d'aspiration de la pompe, suivie du fond contenant la vanne-fourreau. Au centre, la spirale, commune aux deux roues, cachant la partie turbine du groupe. Au fond, le moteur-générateur synchrone sur lequel se détache le palier central de la ligne d'arbres.
Photo bureau d'ingénieurs Maggia 19'507.

— Un dispositif de protection incendie par CO_2 pour l'ensemble des moteurs-générateurs et des transformateurs, à commande double, électrique et pneumatique.

— Une installation de production et de distribution d'air comprimé, assurant, notamment, l'alimentation des organes de commande pneumatique (freinage groupes principaux, protection incendie).

— Une vanne papillon DN 3100 mm, montée à l'extrémité aval du collecteur basse pression et permettant d'isoler celui-ci en cas de contrôle des vannes des groupes, des aspirateurs et de la chambre d'équilibre.

— Un groupe de secours diesel-électrique de 870 kVA [2] assure essentiellement l'alimentation de la machinerie du téléphérique de 20 t et des auxiliaires de la centrale, en cas de panne sur la ligne électrique secondaire 16 kV desservant la centrale et les ouvrages extérieurs.

Grâce à l'utilisation de groupes turbocompresseurs (« Abgasturbolader ») judicieusement adaptés au cours d'essais, le moteur fournit la même puissance qu'au stand d'essais, malgré la pression atmosphérique notablement plus faible qui règne à 1900 m d'altitude.

— Un ensemble d'engins de levage, dont les plus importants sont deux ponts roulants de 40 t équipant la salle des machines, un pont roulant de 20 t disposé dans la salle des vannes et un pont roulant de 7,5 t desservant le groupe « Isogyre ».

[2] Puissance active continue : 700 kW à 1500 t/min.

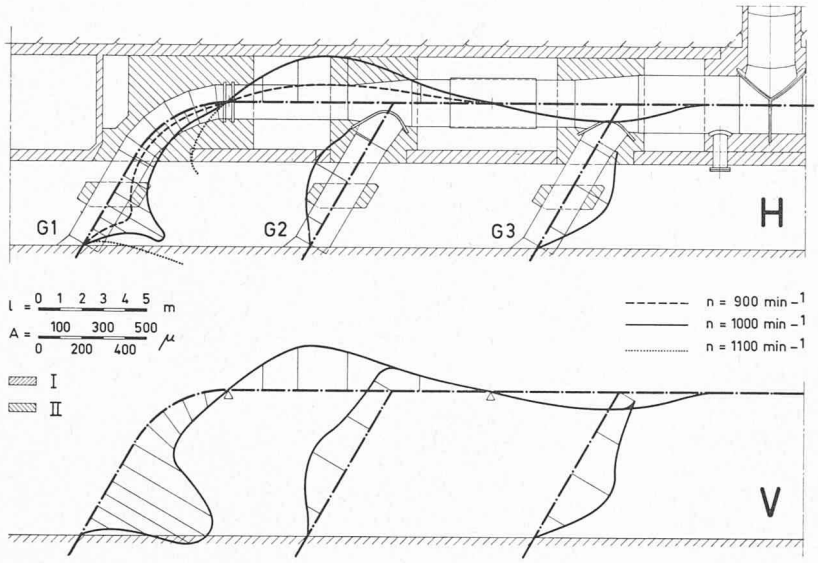


Fig. 15. — Collecteur basse pression : vibrations engendrées par le groupe n° 1 fonctionnant en turbine, en marche à vide, avant le bétonnage partiel de cet ouvrage.

G1, G2 et G3	Embranchements (aspirateurs) des groupes principaux n°s 1, 2 et 3
H	Mesure des amplitudes dans le sens vertital
V	Mesure des amplitudes dans le sens horizontal
I	Eléments de béton (murs et massifs) existant au moment des premiers essais, lors des mesures de vibrations
II	Eléments de béton exécutés après les mesures, déjà en place lors de première période d'exploitation
l	Echelle des longueurs
A	Echelle approximative des amplitudes

4. Comportement de l'installation pendant la mise en service et la première période d'exploitation

4.1 *Durée de marche*

Au moment de l'interruption de l'exploitation de l'installation, à la fin de l'été 1968, les groupes principaux, actuellement à l'arrêt, totalisaient entre 830 (gr. 1) et 117 (gr. 4) heures de service.

Quant au groupe « Isogyre », sa mise en route ayant eu lieu plus tard, il n'avait pas encore dépassé le stade des essais.

4.2 *Mise en service - Vibrations des collecteurs*

Lors des premiers essais de fonctionnement en turbine du groupe N° 1, en marche à vide, le collecteur aval et ses embranchements entrèrent en vibrations. Des mesures effectuées par le fournisseur permirent d'établir que l'ensemble du système de conduite basse pression vibrait à une fréquence propre d'environ 31 Hz, indépendante de la vitesse de rotation de la pompe-turbine. La figure 15 donne une image précise de ce phénomène.

Il fallait à tout prix diminuer l'amplitude intolérable de ces vibrations en augmentant fortement la rigidité du collecteur ; ce qui fut réalisé en bétonnant certains tronçons de ce dernier dans des espaces prévus à cet effet. Grâce à cette mesure, le phénomène de résonance évoqué plus haut a pu être complètement éliminé et les vibrations « forcées » qui subsistent encore n'engendrent que des contraintes parfaitement admissibles dans les sections de conduite qui y sont soumises.

Plus tard, lors des essais en turbine également, avec un ou plusieurs groupes travaillant à des charges supérieures à 80 % environ, le collecteur haute pression se mit à vibrer intensément, engendrant un bruit intolérable dans la chambre des vannes.

Une première série de mesures mit en évidence la fréquence de base de ces vibrations au spectre très complexe. Egale à celle des fluctuations de pression dans le collecteur, elle correspondait exactement à la deuxième harmonique des pulsations liées aux sept aubes de la roue $f_R = 16{,}7 \times 7 = 116{,}9$ Hz.

D'autres séries de mesures complétées par des calculs permirent de conclure à la nécessité d'atténuer le régime vibratoire auquel était soumis le collecteur. Le bétonnage de ce dernier, terminé récemment, doit, en augmentant son inertie, apporter une solution définitive à ce problème. La prochaine mise en route de l'installation permettra de juger de l'efficacité de cette modification.

4.3 *Fonctionnement des groupes réversibles*

En turbine, le démarrage n'a posé qu'un problème d'harmonisation du fonctionnement des différents appareils affectés à la synchronisation, les temps nécessaires au déroulement de cette phase en marche automatique ayant dépassé nos prévisions.

En marche à vide, ainsi qu'à faible charge, le distributeur n'étant qu'au début de sa course, la pompe-turbine est assez bruyante, côté aspiration. Au-delà de 25 % environ de la charge, à mesure que cette dernière croît, l'intensité de la rumeur diminue en suivant un cours comparable à celui de l'amplitude des fluctuations de pression à l'aval de la roue, mesurées par le constructeur. [11].

A une ouverture supérieure à 80 % environ, alors que l'écoulement à la sortie de la roue est silencieux, le phénomène de vibrations affectant le collecteur haute pression, décrit précédemment, apparaît rapidement, engendrant un bruit intense empêchant la perception de toute autre manifestation acoustique.

La marche en pompe est des deux régimes de fonctionnement celui qui est le plus stable et le moins bruyant. A l'entrée de la roue, côté basse pression, la machine est particulièrement silencieuse. A la sortie, côté haute pression, on note une absence presque complète de vibrations pour des ouvertures de distributeur variables avec la chute, mais toujours inférieures à 80 %.

Il n'en va pas de même lors du démarrage, au cours de la phase pendant laquelle la pompe pleine d'eau, entraînée par le moteur, tourne à la vitesse nominale ($n = 1000$ t/min) et à diffuseur fermé ($Q = 0$). Dans ces conditions, la puissance de freinage de la roue barbotant dans l'eau atteint environ 30 % de la puissance de pompage. La destruction d'énergie qui en résulte provoque des chocs ébranlant machine et installation environnante. Une amélioration s'imposait, qui est illustrée par la comparaison des diagrammes II et III de la figure 13. Le nouveau processus choisi permettra un démarrage plus rapide et raccourcira très avantageusement la durée de la phase transitoire.

Les essais de décharge effectués avec un, puis deux groupes ont permis de contrôler les variations de pressions et de vitesse consécutives à des déclenchements électriques

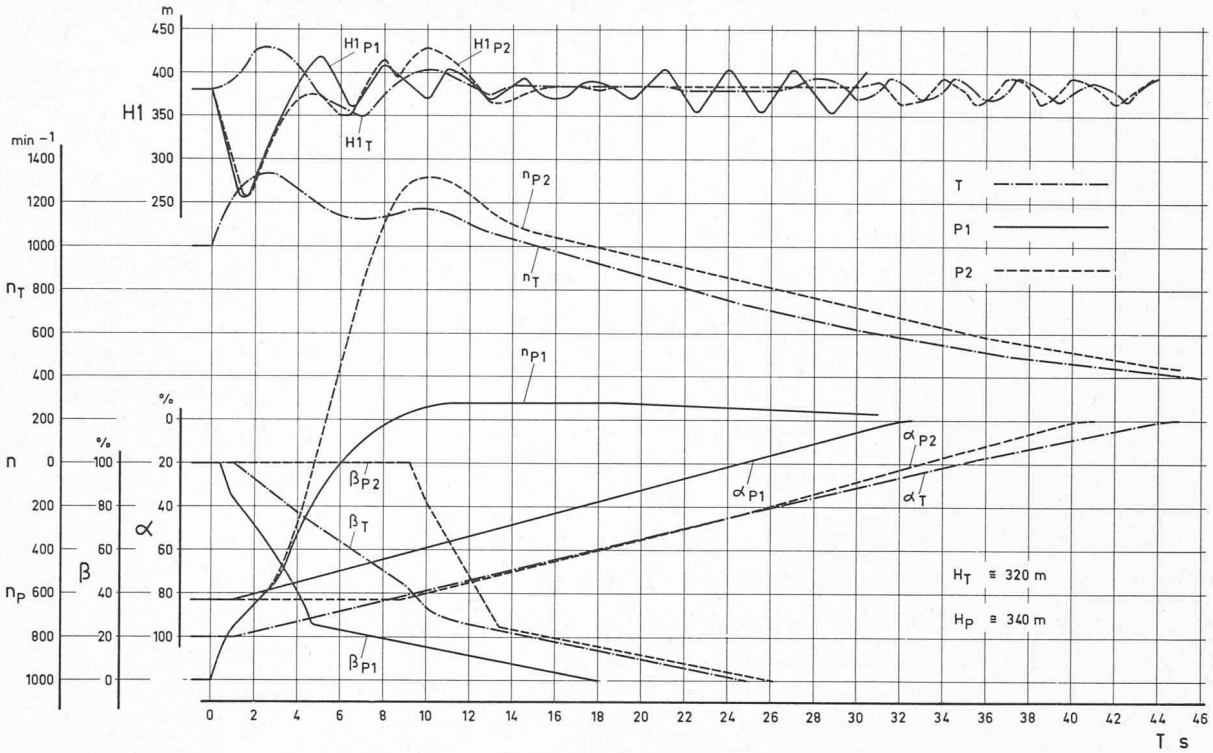


Fig. 16. — Décharges effectuées avec un seul groupe réversible fonctionnant en turbine, puis en pompe.

H_1 Pression dans le collecteur haute pression en m
n Vitesse de rotation en t/min
α Ouverture du distributeur-diffuseur en % (0 = fermé)
β Ouverture de l'obturateur de la vanne sphérique haute pression en % (0 = fermé)
T Indice relatif à la décharge en turbine
P_1 Indice relatif à une décharge en pompe, la vanne amorçant son mouvement de fermeture au moment même du déclenchement électrique (cas normal)
P_2 Indice relatif à une décharge en pompe, la vanne amorçant son mouvement de fermeture sous l'action du limiteur d'emballement, en retard sur le temps $T = 0$ du déclenchement électrique (cas d'une anomalie de fonctionnement dans le système des protections)

des groupes. La figure 16 donne, sous forme de courbes, un aperçu des résultats d'essais qui ont confirmé les garanties du constructeur, dans le cas d'utilisation d'un groupe.

Deux campagnes d'essais de rendement [1], sous deux chutes différentes et à vitesse variable [2] (en pompe), ont donné des résultats satisfaisants. [11]. Les rendements et les puissances garantis en turbine sont atteints (fig. 17). La puissance en pompe dépasse de quelques pour-cent les limites de tolérance fixées par les normes, ce qui n'entraîne aucune suite fâcheuse, en raison des précautions prises lors du dimensionnement des moteurs.

En pompe, le rendement mesuré pondéré reste dans la limite inférieure de la tolérance admise et rejoint même complètement le rendement garanti pondéré de 88,7 %, si l'on tient compte des corrections justifiées par l'inégale répartition de l'énergie dans les sections de mesure.

En ce qui concerne le moteur-générateur, les garanties d'échauffement en régime permanent ont été tenues. Du point de vue électrique, le système de démarrage adopté donne satisfaction. La température des pôles, évaluée au moyen de frottis de thermo-craies, a atteint

— 142°C au centre du fer après un démarrage ;
— 142°C partout à la surface du fer et 170°C au centre du fer après deux démarrages,

et reste ainsi dans le cadre des prévisions du constructeur.

[1] Par la méthode thermodynamique.

[2] Lors des essais en pompe, l'alternateur, fonctionnant en moteur, du groupe essayé a été mis en parallèle avec un des groupes générateurs (86 MVA-428 t/min) de la centrale voisine de Bavona (fig. 1). Moyennant certaines dispositions, la fréquence de ce réseau séparé a pu être modifiée en agissant sur le régulateur de la turbine Pelton double. Des mesures de rendement ont été ainsi effectuées à différentes vitesses de rotation sous une chute pratiquement constante. A l'aide de formules de transformation bien connues, les résultats obtenus ont été convertis pour obtenir les caractéristiques de fonctionnement à vitesse constante et chute variable.

4.4 *Constatations relatives à l'état des pompes-turbines réversibles*

Le démontage des pompes-turbines a mis en évidence quelques défauts que le constructeur s'est empressé de corriger. Plutôt que de les décrire, nous pensons plus intéressant de résumer quelques-uns des enseignements que l'on peut en tirer.

C'est un fait connu que les efforts hydrauliques agissant sur les éléments d'un diffuseur-distributeur de pompe-turbine sons importants. Les aubes directrices sont fortement sollicitées et leur forme les rend aptes à supporter les contraintes auxquelles elles sont soumises. Il est des régimes de fonctionnement au cours desquels l'aube est soumise à des efforts pulsants qui la font vibrer. On conçoit sans peine que le moindre contact entre un point de l'aube animé de mouvements rapides, même de faible amplitude, et une surface fixe, une plaque de protection des fonds, par exemple, peut entraîner un dommage. La recherche d'un compromis entre un jeu minimum, nécessaire à l'obtention de faibles pertes marginales du distributeur, et un jeu suffisant pour assurer l'absence de contacts néfastes entre les parties fixes et parties mobiles, est certainement plus délicate que dans le cas d'une turbine « Francis » usuelle. Il en va de même des dispositions à prendre pour assurer le guidage axial de l'aube. Dans le cas de Robiei, les solutions apportées à ces différents points ne manquent pas d'intérêt.

Les vibrations auxquelles nous avons fait allusion se propagent de l'aube à l'ensemble du système de commande, posant ainsi des problèmes de dimensionnement et le choix des matériaux, ainsi que des traitements de surface, pour la réalisation des organes de transmission.

Une haute chute d'utilisation nécessite des labyrinthes efficaces, limitant les fuites d'eau autour de la roue. Correctement conçus, ils peuvent avoir un effet stabilisateur sur la roue en rotation. Les expériences positives effectuées

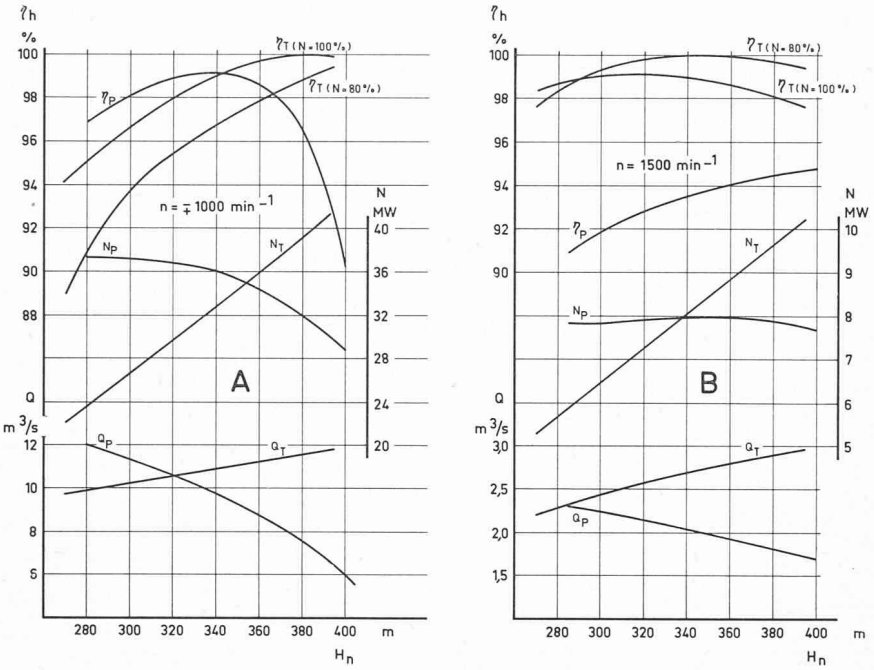


Fig. 17. — Courbes caractéristiques de fonctionnement, selon garantie des fournisseurs.

A Pompe-turbine réversible 40 MW — 1000 t/min
B Turbine-pompe « Isogyre » 10 MW — 1500 t/min
H Chute nette, resp. hauteur manométrique en m
Q Débit en m³/sec
η Rendement hydraulique en % du rendement maximum garanti
T Indice relatif au fonctionnement en turbine
P Indice relatif au fonctionnement en pompe
N_T resp. N_P Puissance fournie par la turbine, resp. absorbée par la pompe
(N = 100 %) Indice relatif au fonctionnement à pleine puissance N_T
(N = 80 %) Indice relatif au fonctionnement à 80 % de la puissance N_T

dans ce sens sur les turbines de Verbano (fig. 1) ont trouvé une application directe à Robiei.

4.5 *Fonctionnement du groupe « Isogyre »*

Le groupe « Isogyre » se signale avant tout par sa marche silencieuse, tant en turbine qu'en pompe.

Les premiers essais ont permis d'améliorer la succession d'arrêts et de changements de marche. Les derniers résultats obtenus ont montré que le constructeur est maître des problèmes qu'elles peuvent poser. La souplesse de manœuvre vantée par lui est effective, dans le cas de cette machine soutirant 2,9 m³/s et refoulant 2,3 m³/s à travers un système de conduites prévu pour un débit total de 50 m³/s (fig. 18).

Sur le plan mécanique, étant donné qu'en régime transitoire la poussée axiale peut changer temporairement de sens, il a fallu munir la butée d'un pivot double. De plus, la tenue de certains joints a posé quelques problèmes qui ont apparemment trouvé solution.

Les mesures de rendement (fig. 17), partiellement satisfaisantes, ont laissé apparaître certaines insuffisances. Le constructeur a pris les dispositions nécessaires à pallier ces défauts. Il serait prématuré de vouloir tirer des conclusions à ce sujet avant que de nouveaux essais aient eu lieu.

5. Conclusions

Tout au long de cet article, le lecteur a appris à connaître les machines de Robiei ainsi que leurs avantages et les principales difficultés auxquelles leur exploitation a donné lieu. S'il s'est étonné du nombre de problèmes que les constructeurs et le maître de l'œuvre ont dû résoudre, qu'il se rappelle que l'équipement adopté à Robiei constituait, à l'époque de son choix, une nouveauté à de nombreux égards et que les groupes installés doivent assurer non pas un, mais deux genres de service bien distincts.

L'équipement électromécanique décrit, qui a constamment profité des meilleurs soins des constructeurs intéressés, est prêt à fonctionner. L'avenir donnera bientôt une réponse aux dernières questions que le spécialiste pourrait encore se poser à son sujet.

En raison du délai actuellement prévu pour la reprise de l'exploitation, il nous a semblé inutile de retarder la publication de ce texte dans l'attente des résultats de nouvelles

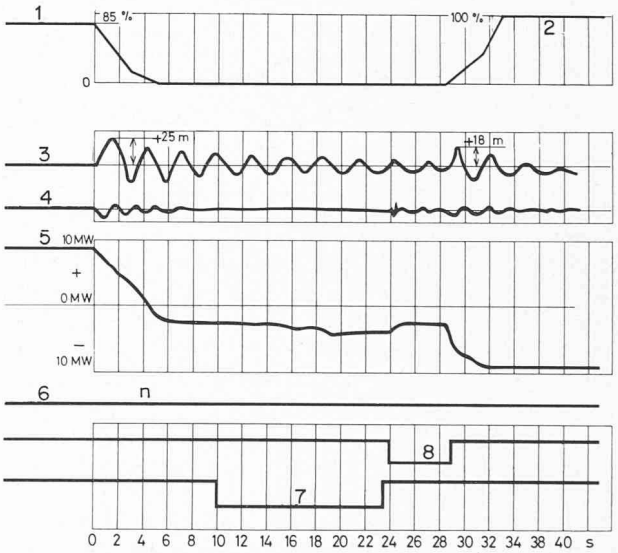


Fig. 18. — Diagrammes illustrant le passage de turbine en pompe réalisé avec la turbine-pompe « Isogyre ».

1 Ouverture du distributeur de la turbine 85 % (vanne fourreau ouverte à 100 %)
2 Ouverture de la vanne fourreau de la pompe 100 %
3 Pression amont (spirale)
4 Pression aval (aspirateurs)
5 Puissance électrique (produite : +, absorbée : —)
6 Vitesse de rotation 1500 t/min
7 Noyage de la roue de pompe
8 Dénoyage de la roue de turbine

observations. Le progrès qui ne cesse de se manifester dans le domaine du pompage turbinage aurait tôt fait d'émousser l'intérêt que peuvent encore présenter les informations rassemblées dans les paragraphes précédents.

Nous aimerions conclure en rendant hommage aux responsables des « Officine Idroelettriche della Maggia » qui ont accepté d'assumer les risques inhérents à toute construction de conception nouvelle, permettant ainsi à plusieurs industries de notre pays d'augmenter leur capital de connaissances et d'expérience techniques, facteur primordial dans la lutte que les constructeurs se livrent sur les marchés étrangers dans le domaine des machines destinées aux amé-

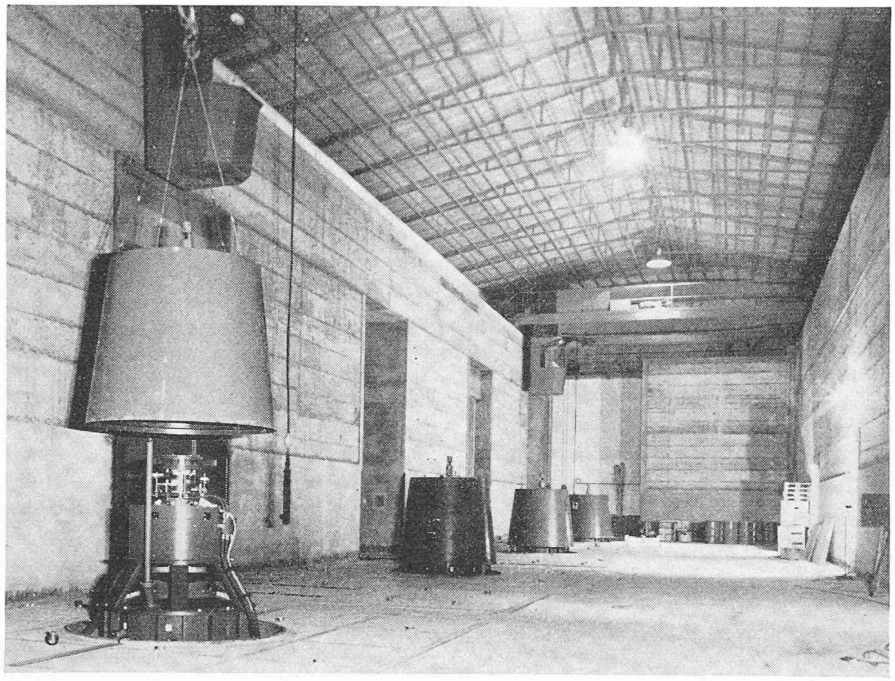


Fig. 19. — Salle des machines pendant la première période d'exploitation (état de construction 1968).
Photo bureau d'ingénieurs Maggia 18'944.

nagements hydro-électriques. Cette forme de collaboration au développement de la technique mérite d'être soulignée et d'être suivie par un nombre toujours plus grand d'entreprises.

BIBLIOGRAPHIE

a) Concernant l'aménagement de Robiei, en général :

[1] Geschäftsleitung MKW AG. : *Weiterausbau der Maggia Kraftwerke*. Wasser- und Energiewirtschaft (Baden) 1964, Nr. 6.

[2] H. Lüthi und H. Fankhauser : *Beitrag zur Entwicklung von Kavernenbauten*. Wasser- und Energiewirtschaft (Baden), 1967, Nr. 8/9.

[3] Geschäftsleitung MKW AG. : *Ausbauzustand der Kraftwerkgruppe Maggia im Frühjahr 1968*. Wasser-und Energiewirtschaft (Baden) 1968, Nr. 7/8.

[4] OFIMA S.A., Locarno : *Ampliamento Officine Idroelettriche della Maggia*.

b) Concernant l'équipement électromécanique de Robiei :

[5] Charmilles S.A., Genève : *Charmilles vous présente la turbine-pompe Charmilles (« Isogyre »)*.

[6] Charmilles Engineering Works Ltd. : *A Method of calculation of the pressure surges in pumped-storage schemes equipped with « Isogyre » pump-turbines*. Technical bulletin No. E2.

[7] A. Tschumy : *Commentaires concernant l'« Isogyre » de Robiei*. Discussion Symposium AIRH 1968 (distribution SIA), mai 1969, p. 80 et suivantes.

[8] J. Chatelain, M. Jufer et A. Périllard : *Groupes de pompage*. Sécheron (Genève), 1968.

[9] J. Chatelain, M. Jufer et A. Périllard : *Techniques de démarrage des groupes réversibles à pôles massifs*. Revue générale de l'Electricité (Paris), 1967, t. 76, nº 11.

[10] D. Florjancic and H. Waller : *Experience with pump-turbines*. Preprint Symposium IAHR 1968 (distribution SIA), July 1968.

[11] D. Florjancic und H. Waller : *Informationen über die Pumpenturbinen von Robiei*. Discussion Symposium IVHF 1968 (Herausgabe SIA), Mai 1969, S. 87 bis 89.

[12] J. Chappuis : *Organes d'obturation pour centrales hydro-électriques*. Bulletin technique Vevey 1965, p. 41 et 45.

c) Publications du Bureau d'ingénieurs Maggia S.A., ingénieurs-conseils, Locarno :

[13] G. Trucco : *Stollenbau durch Triasschichten - einige Beispiele und Erfahrungen*. Hoch- und Tiefbau, Schweizerische Baumeister- und Zimmermeisterzeitung (Zürich) 1968, Nr. 34.

[14] R. Gartmann et G. Trucco : *Essais sur modèles à trois dimensions pour la détermination des sous-pressions théoriques dans un barrage-poids avec joints évidés*. Communication au Congrès international des grands barrages, Istanbul 1967.

[15] W. Liechti et W. Haeberli : *Les sédimentations dans le bassin de Palagnedra et les dispositions prises pour le déblaiement des alluvions*. Communication au Congrès international des grands barrages, Montréal 1970 (à paraître).

[16] W. Liechti et E. Wullimann : *Voile d'étanchéité à travers l'écoulement souterrain du lac de Sfundau pour l'augmentation de sa retenue*. Communication au Congrès international des grands barrages, Montréal 1970 (à paraître).

[17] *** : *Barrage pour la protection d'une vallée alpine contre les crues*. Wasser- und Energiewirtschaft (Baden), 1970 (à paraître).

Adresse de l'auteur :
Bureau d'ingénieurs Maggia S.A.
Case postale 507, CH - 6601 Locarno TI

Bibliographie

La traduction scientifique et technique, par *Jean Maillot*, ingénieur EN, diplômé de l'ENLOV. Préface de Pierre-François Caillé, président de la Fédération internationale et de la Société française des traducteurs, vice-président de la Société des Gens de Lettres de France. Eyrolles, Paris, 1969. — Un volume 16×25 cm, 236 pages. Prix : 61 F + port.

En écrivant son livre, M. Maillot s'est attaché à apporter des solutions originales aux nombreux problèmes de la traduction scientifique et technique. Associant à la pratique intensive de la traduction une expérience personnelle approfondie de la documentation, de la terminologie et de la normalisation dans les domaines scientifique et technique, il a tenu à placer le sujet dans un contexte plus vaste que la traduction proprement dite.

Dans les tout premiers chapitres, l'auteur étudie successivement l'équivalence des termes et des notions (monosémie, polysémie, synonymies, et variantes nationales). Il met l'accent sur les « faux amis » ou les ressemblances trompeuses. — Les chapitres suivants traitent, notamment, de la documentation, de la terminologie, de la normalisa-