

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 88 (1962)
Heft: 19

Artikel: Développements récents des installations d'accumulation par pompage: compensation d'énergie avec les centrales thermiques modernes
Autor: Lavanchy, Jean
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-771849>

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: 18.02.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: † J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; E. Martin, arch.
J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermaten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; C. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,
arch.; A. Robert ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION

Vacat
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.80		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° 157 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 320.—
1/2 » » 165.—
1/4 » » 85.—
1/8 » » 42.50

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Développements récents des installations d'accumulation par pompage, par J. Lavanchy, ingénieur EPF.
Divers. — Bibliographie. — Les congrès.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Nouveautés. Informations diverses.

DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS DES INSTALLATIONS D'ACCUMULATION PAR POMPAGE

Compensation d'énergie avec les centrales thermiques modernes¹

par J. LAVANCHY, ingénieur EPF.

Introduction

L'accumulation hydraulique par pompage a pour but de compenser les décalages entre les puissances disponibles à un moment donné et la consommation de courant du réseau desservi. L'excédent de puissance est utilisé pour l'entraînement de pompes refoulant dans un bassin d'accumulation. L'eau ainsi accumulée alimentera des turbines et le réseau au moment désiré.

L'application de l'accumulation hydraulique se présente essentiellement sous les deux aspects suivants.

On sait que la puissance des centrales au fil de l'eau varie au cours de l'année, passant d'un minimum en hiver à un maximum en été. L'accumulation a pour objectif de compenser ces fluctuations annuelles. Une telle accumulation est dite saisonnière.

Mais on peut aussi chercher à suivre et à compenser les variations rapides des puissances absorbées par le réseau au cours d'une même journée. L'installation doit être capable d'intervenir à chaque instant, en

fournissant (marche en turbine) ou en absorbant du courant (marche en pompe). Par son rôle régulateur, une telle installation permet aux centrales thermiques avec lesquelles elle est connectée de travailler dans les meilleures conditions, à charge pratiquement constante.

Cette connexion entre une installation d'accumulation hydraulique et des centrales thermiques (et atomiques) sera particulièrement intéressante pour les centrales de plus en plus puissantes imposées par les besoins croissants d'énergie électrique.

Exemples d'accumulation saisonnière

Une installation d'accumulation saisonnière répond en général au schéma représenté par la figure 1.

Un bassin supérieur est alimenté par gravité et par pompage.

¹ Conférence donnée le 16 février 1962 devant la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.

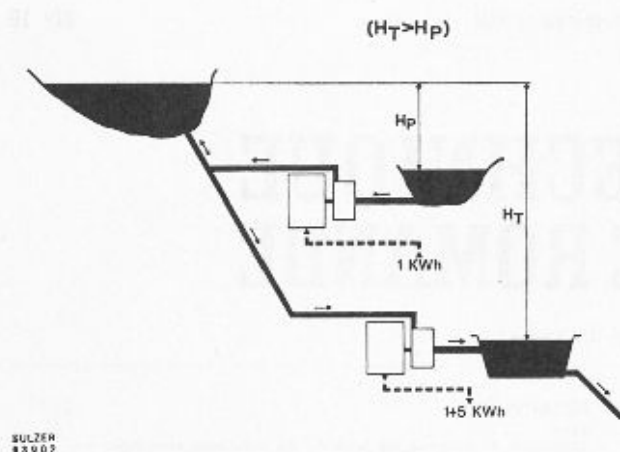


Fig. 1. — Schéma d'une installation d'accumulation saisonnière $H_T > H_P$.

La hauteur de refoulement des pompes H_P est donnée par le niveau des prises d'eau alimentant ces pompes.

Les turbines travaillent sous une chute totale H_T utilisée en un ou plusieurs paliers échelonnés.

Le rapport H_T/H_P étant un des facteurs déterminants de la rentabilité, on cherchera à réaliser le plus grand écart possible entre ces deux valeurs.

En règle générale, 1 kWh absorbé par les pompes permet d'en récupérer plusieurs à l'époque désirée.

Afin de pouvoir compenser des fluctuations de longue durée, des quantités très importantes d'énergie doivent être accumulées. Aussi, ce n'est que lorsque les conditions topographiques permettent à la fois une forte chute et l'accumulation d'un important volume que de telles installations peuvent être raisonnablement envisagées.

Nous donnons maintenant un aperçu de deux ensembles remarquables de chez nous, celui de la Grande Dixence S.A. et celui des Forces motrices de la Gougria S.A., en nous limitant aux questions relatives à l'accumulation proprement dite.

Pour alimenter ses usines, la Grande Dixence dispose des eaux du val d'Hérens et de la vallée de Zermatt, qu'un important collecteur amène au lac d'accumulation du Val-des-Dix. La figure 2 donne l'aménagement général de ses installations.

Le volume des eaux captées dans ces deux bassins versants est en moyenne d'environ 420 millions de m^3 par an, tandis que le volume utile du lac est de 400 millions de m^3 .

La moitié du débit capté, provenant de prises situées à un niveau inférieur à celui du collecteur, doit être remonté par pompage. Quatre stations sont prévues à cet effet : Stafel, Z'Mutt, Ferpèche et Arolla. Les hauteurs de refoulement varient entre 200 et 505 m ; la puissance totale installée dans ces quatre stations atteindra 250 000 CV.

L'eau accumulée est turbinée dans les centrales de Fionnay et de Nendaz, d'une puissance globale de 1 million de CV, sous la chute maximum de 1880 m.

La chute utilisée étant un multiple de la hauteur de refoulement des pompes, on peut prévoir une rentabilité élevée de l'opération de pompage.

En effet, si l'énergie nécessaire pour remonter 1 m^3 d'eau est en moyenne 1,25 kWh, ce même m^3 fournit

4 kWh dans les deux centrales de Fionnay et de Nendaz. Comme le pompage a lieu en été alors que l'énergie produite est de l'énergie d'hiver, le rendement financier n'est pas de trois, mais de huit fois environ la valeur investie dans le pompage.¹

La station de Stafel, mise en service récemment, présente quelques particularités intéressantes.

La durée du pompage étant relativement courte, la Grande Dixence a envisagé des centrales à utilisation polyvalente. C'est ainsi que les machines de Stafel sont utilisées non seulement pour le pompage, mais aussi pour la production de courant et pour la production d'énergie réactive.

La centrale de Stafel est équipée de trois groupes horizontaux (fig. 3), refoulant 3,315 m^3/sec à 212 m, en absorbant 10 470 CV, à la vitesse de 1500 tours min. Grâce à cette vitesse élevée, rendue possible par une mise en charge de 25 m, les poids et les dimensions ont été réduits au minimum, facteur précieux pour les transports en haute montagne, dans des zones peu accessibles.

Les pompes sont de construction normale, avec une seule roue à double entrée (fig. 4). Par cette disposition symétrique, ces machines sont équilibrées. Les faibles poussées axiales qui pourraient intervenir sont absorbées par un palier de butée à patins.

Un accouplement à plateau, facilement démontable, permet de découpler la pompe pour le régime en compensateur de phase.

La possibilité de capter en hiver des eaux à un niveau d'environ 220 m au-dessus de celui de la pompe et de les restituer dans le bassin de la centrale a engagé la Grande Dixence à étudier le fonctionnement du groupe, non seulement en pompe, mais aussi en turbine.

Les essais obtenus avec cette machine réversible sont excellents (fig. 5). Le rendement en pompe atteint 90 %, alors qu'en turbine il dépasse 85 %, bien qu'à l'origine les machines n'aient pas été conçues pour ce service et que les conditions de l'installation n'aient pas permis d'atteindre la zone du rendement maximum de la turbine. (Il aurait fallu une chute plus élevée ou une vitesse plus faible.)

¹ Voir « Les usines de pompage de Grande Dixence S.A. », par P. Meystra, dans la *Nouvelle Revue de Lausanne* du 30 octobre 1961.

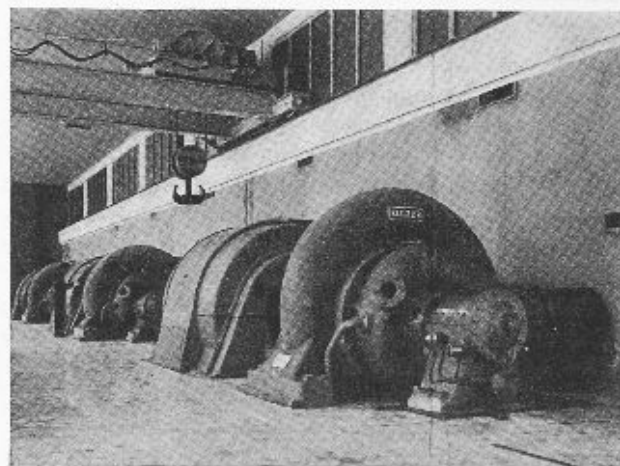


Fig. 3. — Centrale de Stafel, de Grande Dixence, équipée de trois pompes-turbines, d'une puissance unitaire de 10 000 CV.

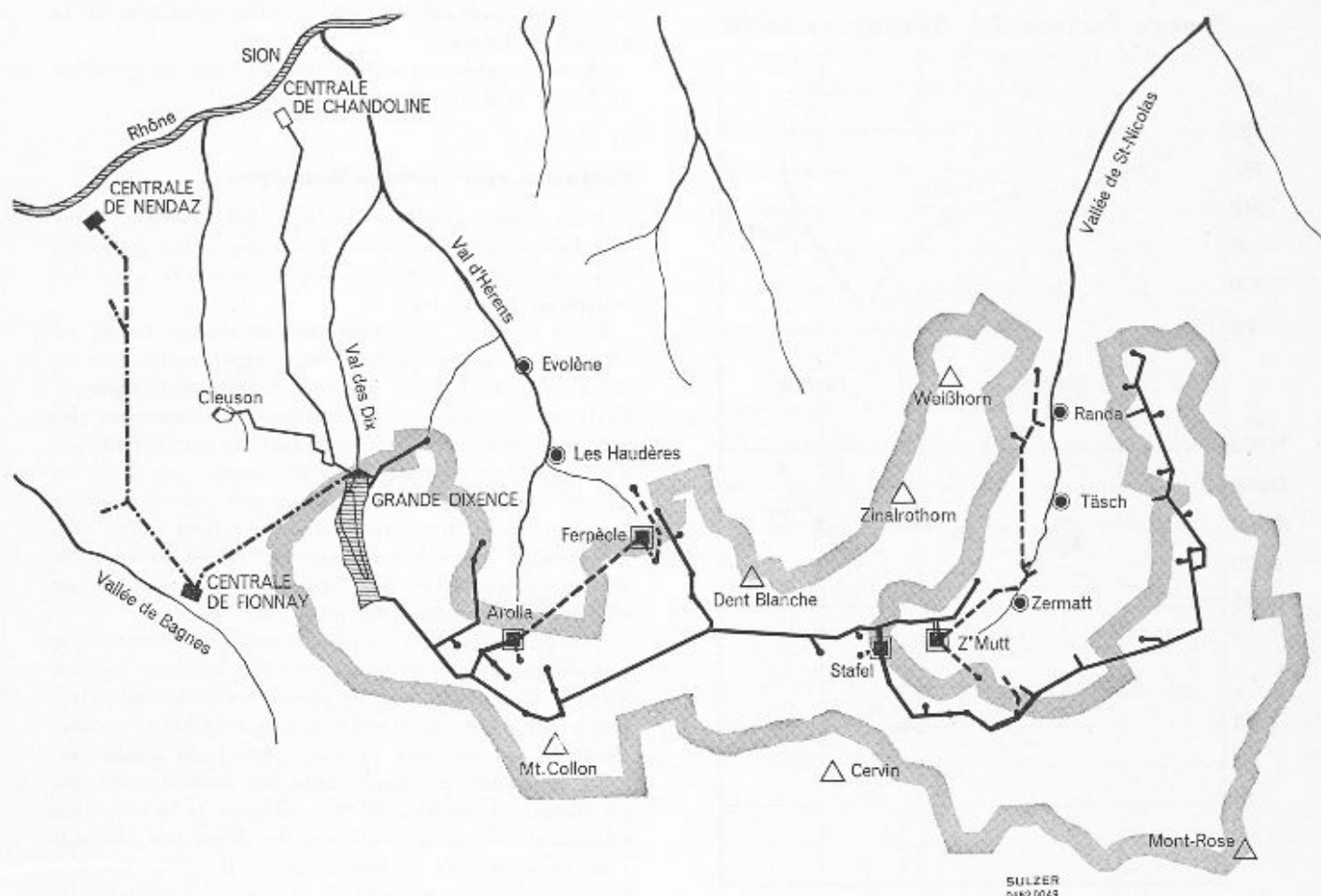


Fig. 2. — Aménagement hydro-électrique de Grande Dixence S.A.

Notons que c'est la première fois qu'une machine réversible de cette puissance est installée en Suisse.

Cette puissance sera d'ailleurs dépassée largement dans la centrale de Z'Mutt. Dès 1965 en effet, les fonctions dévolues à cette marche en turbine seront reprises à Z'Mutt avec une chute et une puissance plus élevées.

Les deux machines réversibles de Z'Mutt, à deux étages, sont construites chacune pour les conditions suivantes :

Elles refouleront $3,1 \text{ m}^3/\text{sec}$ à 365 m en absorbant 16 950 CV, à la vitesse de 1500 tours min.

En turbine, elles produiront 21 850 CV sous une chute de 490 m, avec un débit de $3,7 \text{ m}^3/\text{sec}$.

A notre connaissance, cette chute de 490 m est un record mondial pour une machine réversible.

L'ensemble des installations des Forces Motrices de la Gougria S.A. est donné par le profil en long de la figure 6.

Trois centrales en cascade, Motec, Vissoie et Chippis, utilisent la chute de 1720 m entre le lac de Moiry et le Rhône.

Le lac, d'une capacité de 77 millions de m^3 , est alimenté par gravité et par deux pompes installées à Motec, et entraînées par les alternateurs de deux des groupes.

L'une de ces pompes reçoit l'eau du bassin de Tourtemagne et refoule $6,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ à une hauteur variant de 43 à 126 m.

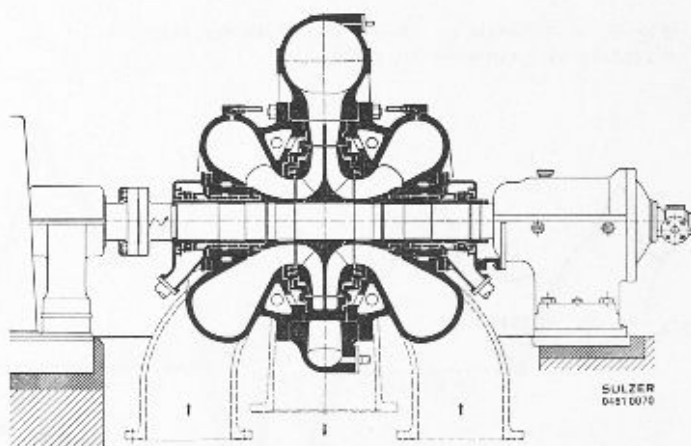


Fig. 4. — Centrale de Stafel. Coupe d'une pompe-turbine.

La seconde des pompes est alimentée par la Navisence. Elle débite $3,26 \text{ m}^3/\text{sec}$ à 628 m en absorbant 30 670 CV.

Compte tenu des hauteurs de refoulement de ces deux pompes, on en déduit que, là aussi, il a été possible d'obtenir une excellente rentabilité de l'opération de pompage.

La pompe à haute pression comporte trois étages (fig. 7), avec équilibrage hydraulique des poussées axiales.

Reliée à l'alternateur par un accouplement à dents à

Grande Dixence S.A. Centrale de Stafel

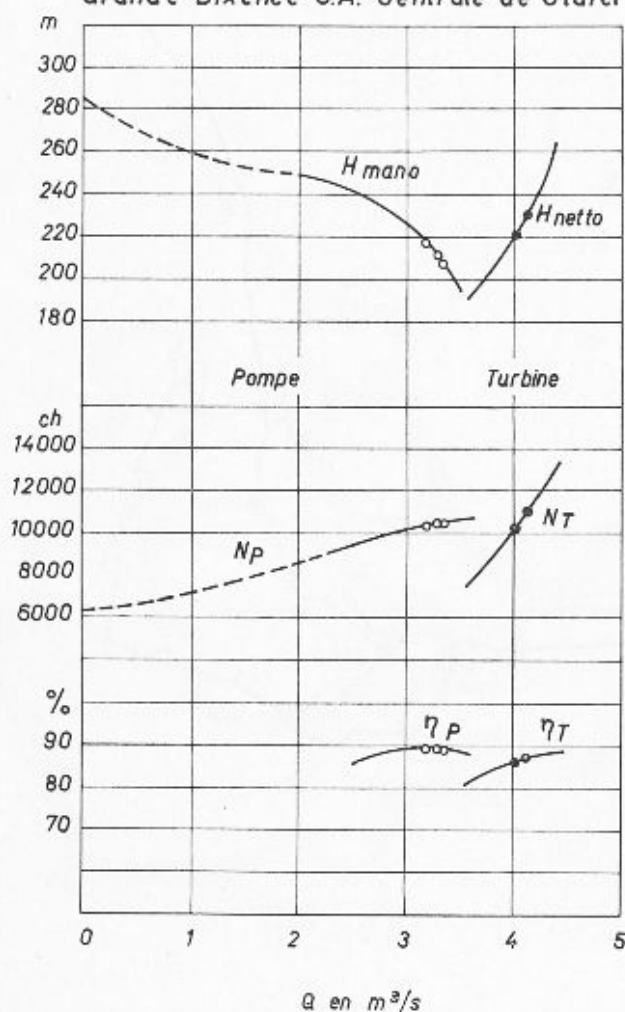


Fig. 5. — Centrale de Stafel. Résultats des essais de réception en pompe et en turbine.

commande hydraulique, elle est découplée lors de la marche en turbine.

Quelques pièces en ateliers fixent l'ordre de grandeur de la machine (fig. 8).

Connexion avec centrales thermiques

Nous allons examiner de plus près comment une installation d'accumulation hydraulique par pompage peut collaborer d'une manière intéressante avec des centrales thermiques.

Les puissances absorbées par un réseau donné, au cours d'une même journée, sont représentées par un diagramme du type bien connu donné par la figure 9. Cette image varie selon le caractère économique des régions desservies. Certaines industries peuvent utiliser un important courant de nuit, tandis que dans un réseau purement urbain, ce courant est très faible. Par le jeu des interconnexions qui relient entre elles des réseaux desservant un large espace, on arrive à une moyenne caractérisée par un minimum durant la nuit et deux fortes pointes durant la journée.

Par l'adjonction d'une installation d'accumulation par pompage, ce diagramme peut être amélioré du tout au tout. Pendant la nuit, les puissances sont augmentées par le pompage, pendant les heures de pointe le réseau électrique est alimenté en partie par l'eau accumulée.

La puissance maximum absorbée normalement par un réseau est de 60 à 90 % au-dessus de la puissance minimum. Une accumulation hydraulique par pompage peut ramener cette valeur à moins de 20 %. On voit l'intérêt que présente cette liaison pour la marche des groupes thermiques.

Pour fournir le courant de pointe exclusivement avec des machines thermiques, on peut avoir recours à des centrales spécialisées qui, pour être prêtes à intervenir rapidement, fournissent à charge très réduite du

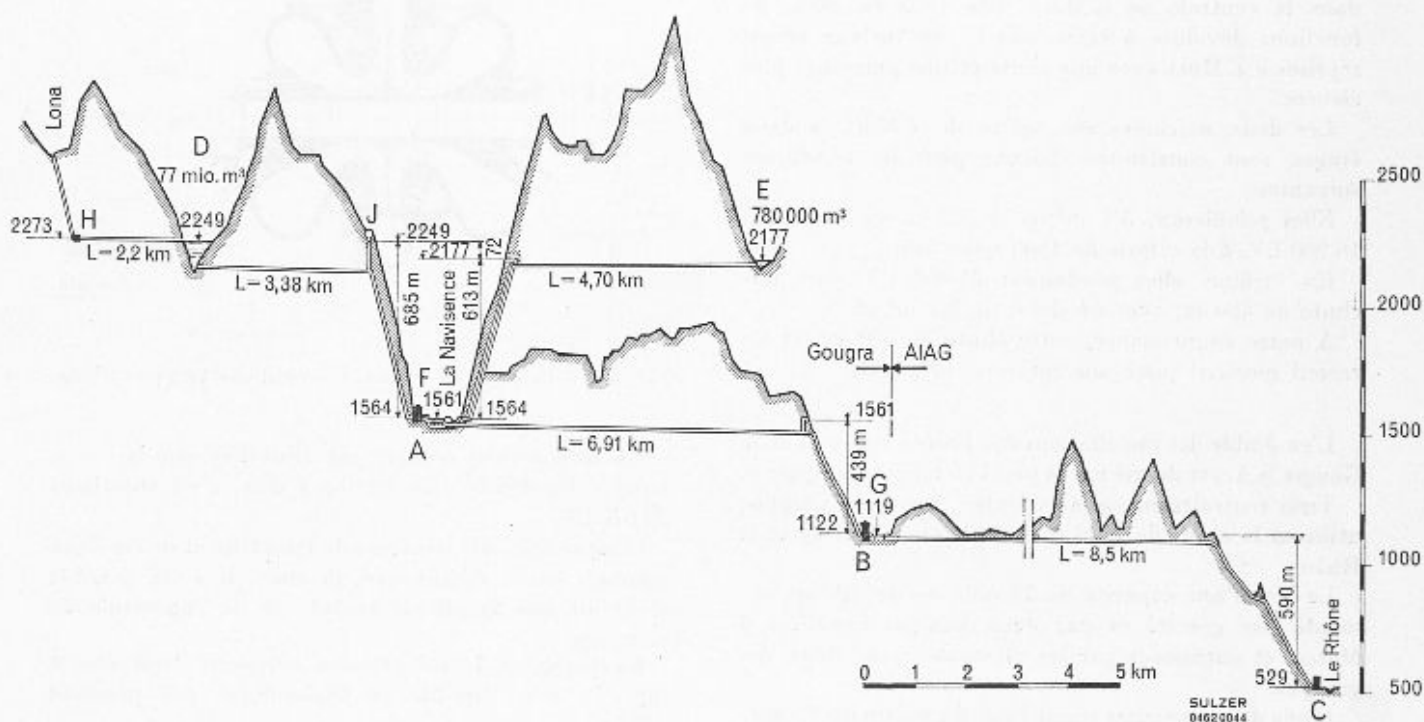


Fig. 6. — Installations de la Gougra S.A. Profil en long lac de Moiry à Chippis.

A Centrale de Motec B Centrale de Vissoie C Centrale de Chippis D Lac de Moiry E Bassin de Tourtemagne

courant de base. On utilisera de préférence pour ce but des anciennes centrales, dont la rentabilité est de toute façon médiocre.

Des études comparatives ont montré que l'énergie de pointe obtenue par l'accumulation hydraulique est moins chère que celle provenant de machines thermiques.

Mais d'autres facteurs importants jouent en faveur de l'accumulation hydraulique.

Nous l'avons vu déjà, l'augmentation de la demande de courant a conduit les constructeurs à des machines thermiques de plus en plus puissantes et — afin d'en augmenter la rentabilité — de plus en plus poussées.

Les puissances des groupes turbo-alternateurs atteignent aujourd'hui des centaines de milliers de kW, avec des pressions d'admission de plus de 300 atm et des températures de vapeur dépassant 600°.

On conçoit que de telles unités aient peu de souplesse, car il faut éviter toute variation rapide de température, donc de régime.

Par contre, une machine hydraulique, que ce soit une pompe ou une turbine, peut être mise en ou hors service presque instantanément. Une installation d'accumulation pourra donc agir comme régulateur de fréquence en faisant intervenir immédiatement soit les pompes, soit les turbines pour maintenir la fréquence dans les limites voulues. Remarquons que ce rôle régulateur est exactement celui d'un volant ordinaire.

Par la rapidité de leur mise en marche, les turbines hydrauliques constitueront par ailleurs une précieuse réserve momentanée.

Le schéma de principe d'une installation d'accumulation en liaison avec des centrales thermiques est élémentaire : un certain volume d'eau fait la navette entre deux bassins à des niveaux différents. La hauteur (statique) de refoulement des pompes est égale à la chute (statique) dont disposent les turbines (fig. 10).

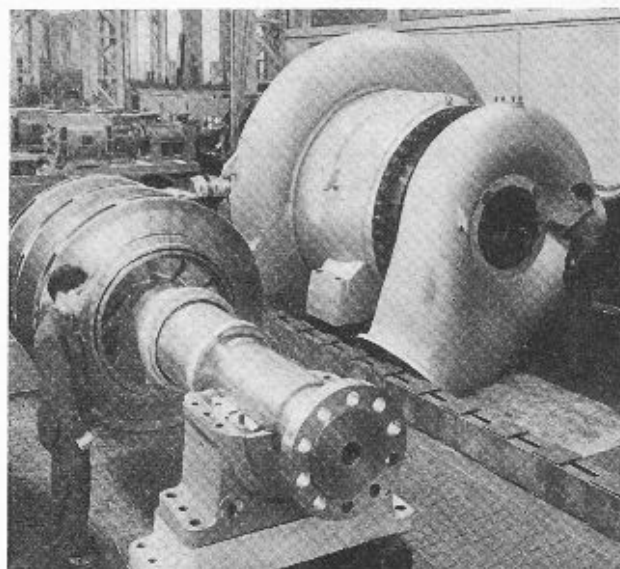


Fig. 8. — Montage en ateliers de la pompe de Motec.

On est ainsi conduit à installer dans une même station des turbines et des pompes. Comme c'est l'une ou l'autre de ces machines qui travaille, on utilise la même machine électrique fonctionnant en alternateur dans le régime turbine, en moteur synchrone dans le régime pompe.

En régime turbine, la pompe est mise hors service soit par débrayage, soit par évacuation de l'eau. En régime pompe, la turbine tourne dans l'air.

Le rendement global d'une installation d'accumulation de grande puissance est aujourd'hui de l'ordre de 75 à 78 %. Le rendement le plus élevé est atteint aux basses et moyennes pressions.

L'augmentation générale des puissances absorbées

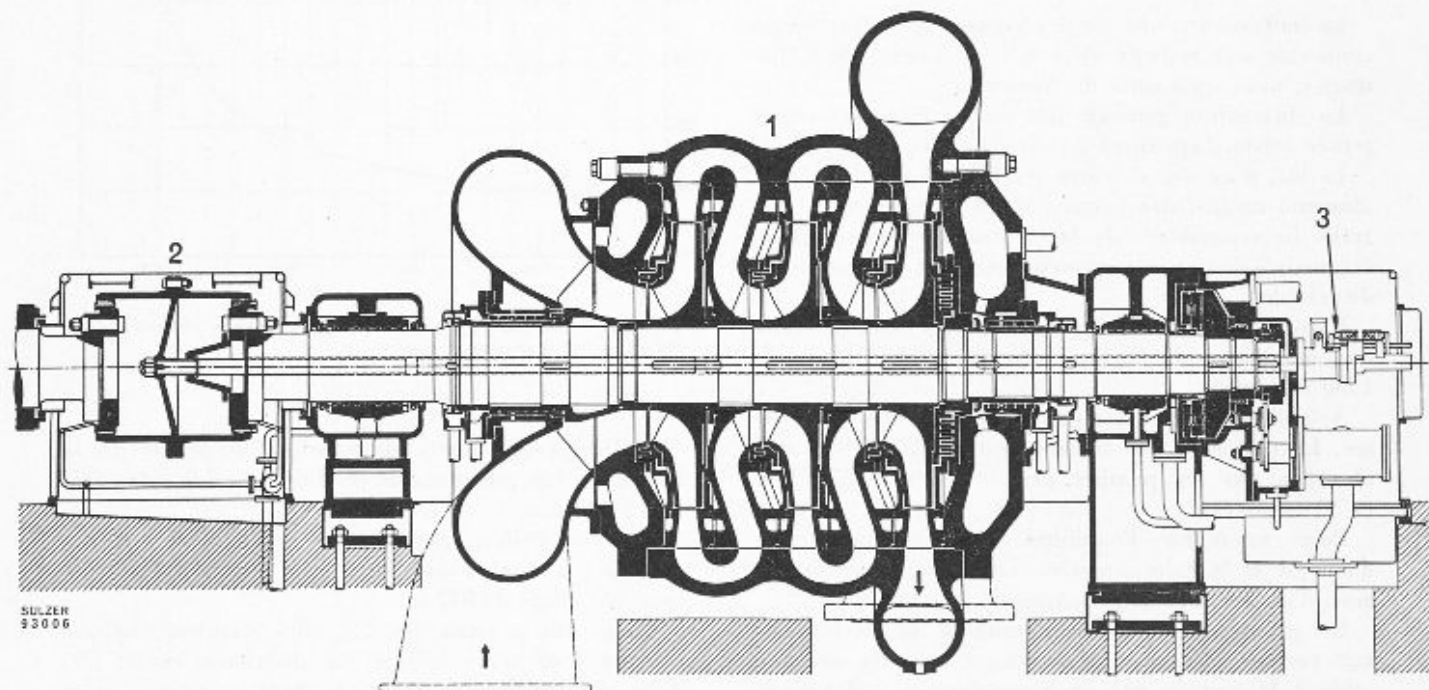


Fig. 7. — Coupe de la pompe d'accumulation à haute pression, de 30 670 CV, installée à Motec.

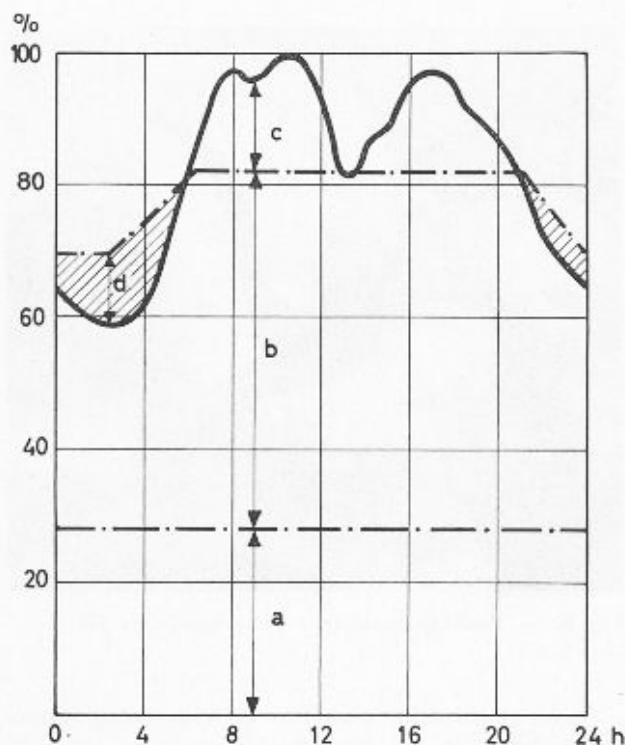


Fig. 9. — Diagramme de charge d'un réseau.

- a Centrales au fil de l'eau.
- b Centrales thermiques.
- c Centrales d'accumulation.
- d Pompes.

par les réseaux s'est répercutée sur la puissance unitaire des pompes (fig. 11).

En dix ans, de 1950 à 1960, elle a passé de 60 000 CV à plus de 100 000 CV.

La hauteur par étage a également évolué rapidement (fig. 12). De 200 m vers 1950, elle a franchi maintenant le cap des 300 m. Une telle valeur n'est admissible que lorsqu'une forte mise en charge est disponible.

La centrale de Lunersee des Vorarlberger Illwerke est connectée aux réseaux du sud et de l'ouest de l'Allemagne, ainsi qu'à celui du Vorarlberg.

La disposition générale des installations est représentée schématiquement par la figure 13.

Le lac, d'un volume utile de 76 millions de m^3 , est alimenté en majeure partie par les pompes de la centrale. Le remplissage du lac a lieu non seulement en été, mais à chaque instant où un excédent de courant est disponible.

L'eau accumulée est turbinée dans les deux centrales de Lunersee et de Rodund avec une chute totale de 1350 m environ.

Actuellement, cinq groupes sont en service à Lunersee. La puissance des turbines est de 224 MW; celle absorbée par les pompes peut s'élever à 252 MW (à 52 périodes).

Pour maintenir l'équilibre entre la production d'énergie et la consommation des réseaux, on dispose ainsi d'un éventail de puissance de 476 MW.

Les groupes verticaux comprennent un alternateur, une turbine Pelton et une pompe à haute pression reliée à la turbine par un accouplement hydraulique Voith (fig. 14).

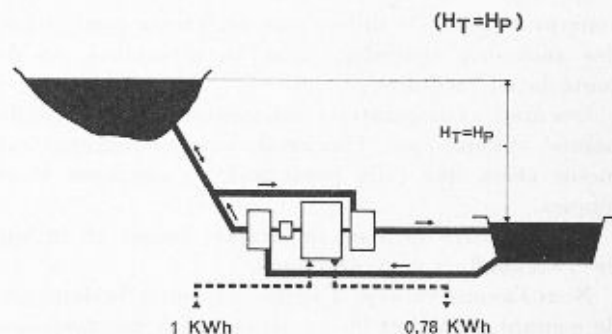


Fig. 10. — Schéma d'une installation d'accumulation journalière, en liaison avec les centrales thermiques.

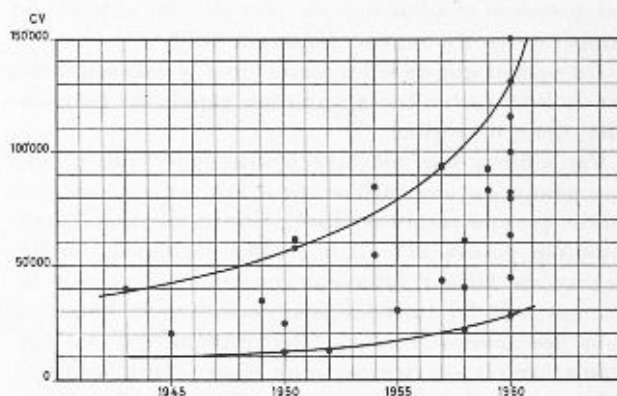


Fig. 11. — Evolution des puissances unitaires des pompes d'accumulation.

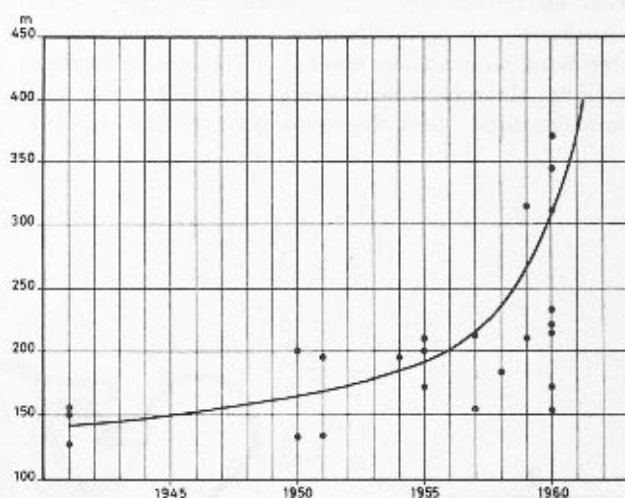


Fig. 12. — Evolution des hauteurs par étage réalisées dans les pompes d'accumulation.

L'alternateur, monté directement au-dessus de la turbine, a une puissance de 56 000 kVA, à la vitesse de 750 tours/min.

La roue Pelton, coulée d'une seule pièce, est alimentée par quatre injecteurs. Elle fournit 63 000 CV sous une chute de 972 m.

Quant aux pompes (fig. 15), elles refoulent chacune environ $4 m^3/sec$ à 950 m, en absorbant 58 000 CV. Avec cinq étages, la hauteur par étage est au maximum de l'ordre de 200 m.

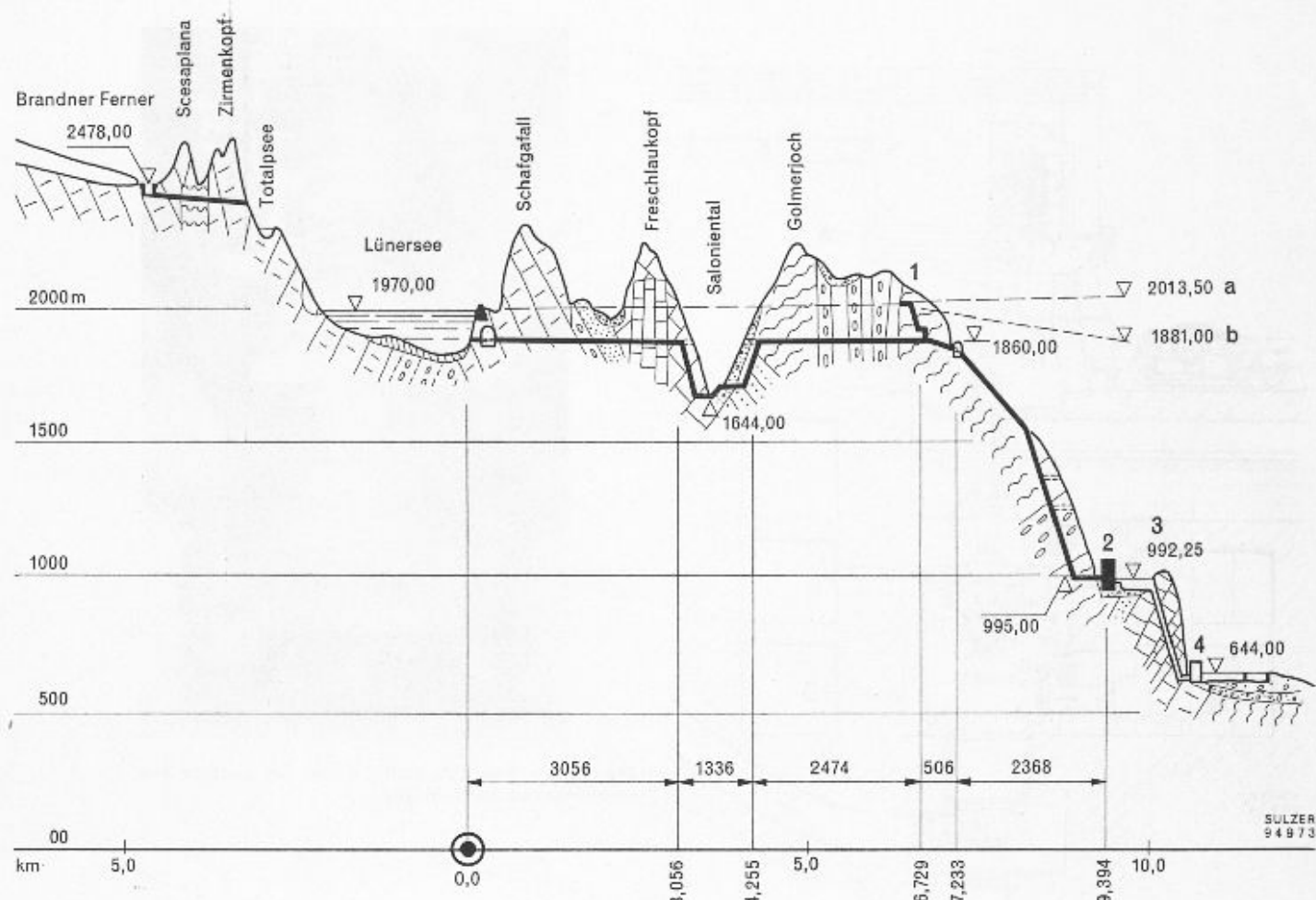


Fig. 13. — Installation de Lunersee. Profil en long Lunersee-Rodund.

1 Château d'eau 2 Centrale de Lunersee 3 Bassin de compensation de Latschau 4 Centrale de Rodund

Les résultats d'essais obtenus avec l'une de ces machines sont très remarquables. Les rendements dépassent 88 % dans tout le domaine d'emploi, et le débit est de plusieurs pour-cent au-dessus de la garantie.

L'accouplement hydraulique (fig. 16) comporte une roue pompe montée sur l'arbre de la turbine Pelton, une roue turbine montée sur l'arbre de la pompe à haute pression, et, entre ces deux roues, deux appareils directeurs. L'un d'eux possède des aubages mobiles qui permettent de régler avec précision la vitesse de la machine entraînée. Lorsque l'écart entre les vitesses de la turbine et de la pompe est réduit à environ 0,4 %, un accouplement à dents est enclenché et l'accouplement hydraulique mis hors service par vidange. L'accouplement est capable de transmettre 32 000 CV à 750 tours/min.

La mise en vitesse de la pompe se fait très rapidement : le passage de l'arrêt à l'enclenchement de l'accouplement à dents ne demande que 25 secondes.

Le passage du régime turbine au régime pompe et inversement est, lui aussi, rapide, de l'ordre de 2 à 3 minutes. Ce temps est imposé en grande partie par la manœuvre des vannes.

L'application de l'accouplement hydraulique présente le grand avantage de permettre à l'alternateur de rester constamment accroché au réseau.

Par sa rapidité de manœuvre, l'installation complètement automatisée peut suivre très exactement toutes les fluctuations du réseau. Les expériences faites à ce jour montrent sa parfaite adaptation aux conditions qui avaient été posées à l'origine.

La première grande installation d'accumulation par pompage d'Angleterre vient d'être mise en service à Ffestiniog, dans le Pays de Galles.

Elle est appelée à travailler en liaison avec un groupe de centrales thermiques et atomiques. On n'a pas cherché à suivre les fluctuations du réseau d'aussi près qu'à Lunersee. On se contente d'une seule marche en pompe d'une durée de 6 à 7 heures pendant cinq nuits par semaine, et d'une marche en turbine de 4 à 5 heures, cinq jours par semaine.

Il a donc été possible d'admettre des temps de passage d'un régime à l'autre beaucoup plus longs que ceux de Lunersee et de simplifier considérablement la question de l'accouplement.

La disposition générale correspond au schéma de la figure 10. Le volume utile du bassin d'accumulation est de 1,7 million de m³ seulement. Il suffit pour alimenter les turbines à pleine charge pendant 4 à 5 heures.

L'installation est équipée de quatre groupes verticaux, d'une hauteur totale d'environ 30 m (fig. 17).

Chaque groupe comprend un alternateur d'une

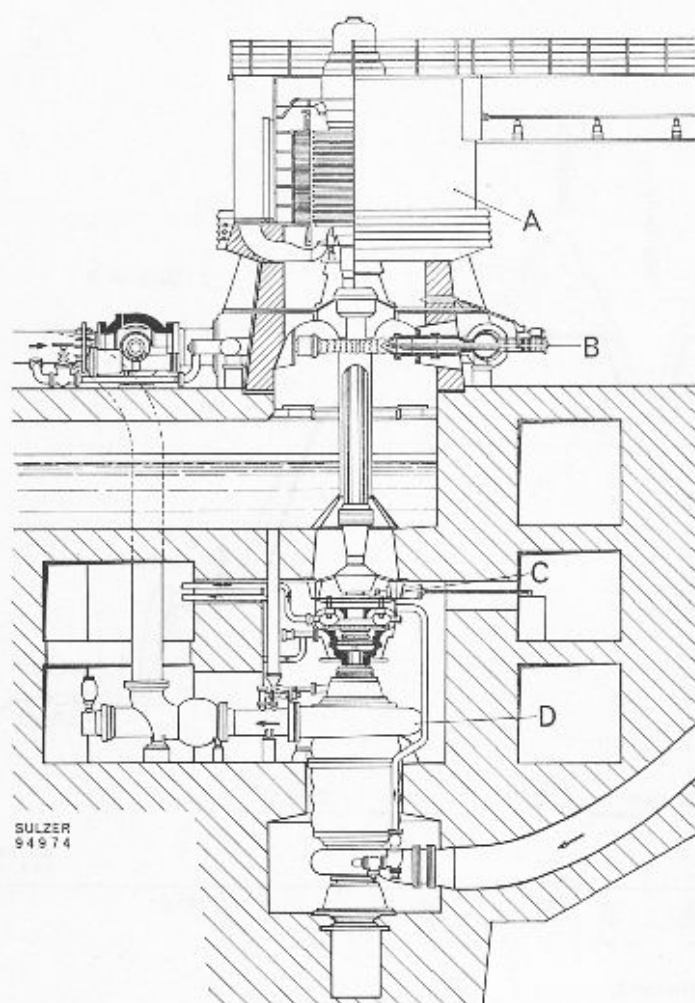


Fig. 14. — Vue d'ensemble d'un groupe de Lunersee.

puissance de 75 000 kW à 428 tours/min., une turbine Francis de 105 000 CV et d'une pompe qui absorbe jusqu'à 110 000 CV.

Les conditions hydrauliques et la mise en charge disponible relativement modeste ont conduit à adopter une pompe à deux étages (fig. 18). Le premier étage comporte deux roues à simple entrée, symétriques, entre lesquelles est montée la roue double du second étage.

Les trois roues, d'un diamètre de 2600 mm, sont en acier au chrome.

Les conditions de marche sont les suivantes :

Débit	21,1 m ³ /sec
Hauteur de refoulement . .	305 m
Nombre de tours	428 tours/min.
Puissance absorbée	env. 94 600 CV

La puissance maximum, à 51 périodes, est d'environ 110 000 CV.

Un accouplement à dents, à commande hydraulique, manœuvré à l'arrêt, relie la pompe à la turbine. La mise en marche de la pompe se fait par la turbine.

Après synchronisation, l'eau de la turbine est évacuée, et la vanne de la pompe ouverte.

La durée du passage de la marche en turbine et la marche en pompe, et inversement, est de l'ordre de

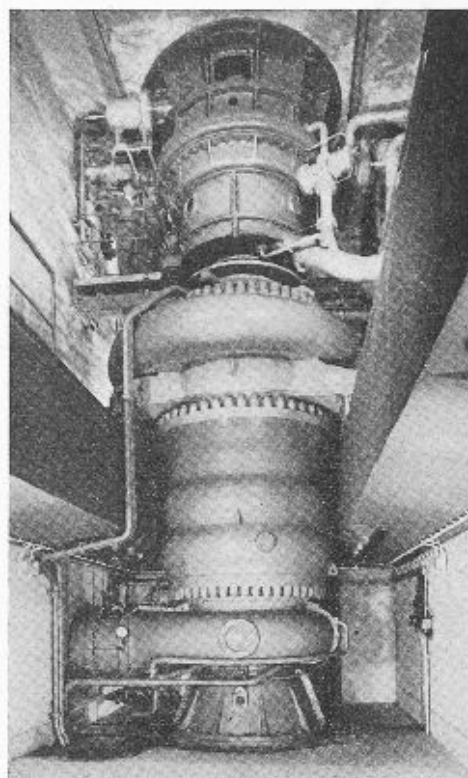


Fig. 15. — Vue d'ensemble d'une des pompes avec accouplement hydraulique.

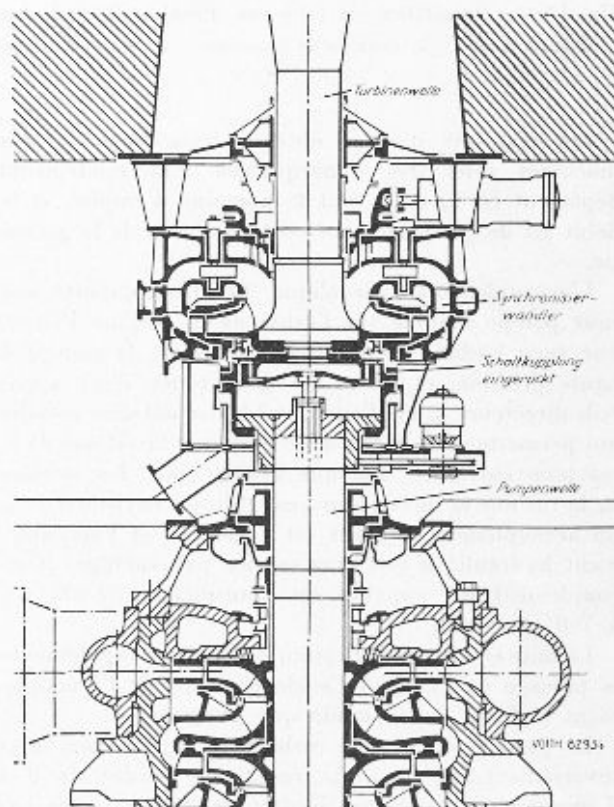


Fig. 16. — Accouplement hydraulique Voith.

Le passage du régime pompe au régime turbine, et inversement, a lieu en pleine vitesse de la turbine et de l'alternateur, qui reste ainsi toujours accroché au réseau.

6 à 8 minutes, ce qui est parfaitement acceptable pour le caractère prévu de l'exploitation.

La figure 19 donne une image des dimensions de la pompe.

Machines réversibles

La solution classique du groupe d'accumulation conduit à des installations relativement compliquées. Cette disposition implique en effet la nécessité de mettre la pompe hors service (par accouplement débrayable ou par évacuation de l'eau) pendant la marche en turbine, un double jeu de vannes, des conduites supplémentaires, etc. Ces éléments renchérissent le bâtiment et compliquent l'exploitation elle-même.

Aussi a-t-on cherché à simplifier cette solution en recourant à une seule machine hydraulique. L'analogie entre une turbine Francis et une pompe à un étage a favorisé ces études et aujourd'hui plusieurs installations importantes sont équipées de ces machines réversibles.

Citons, à titre d'exemple, la centrale de Hiwassee (USA).

En pompe, la machine réversible refoule $110 \text{ m}^3/\text{sec}$ à 61 m, à 136 tours/min, en absorbant 102 000 CV.

En turbine, elle fournit 80 000 CV sous 61 m, à la vitesse réduite à 106 tours/min.

Pour les hauteurs inférieures à 100 m, un ingénieur suisse, Dériaz, a développé une très remarquable

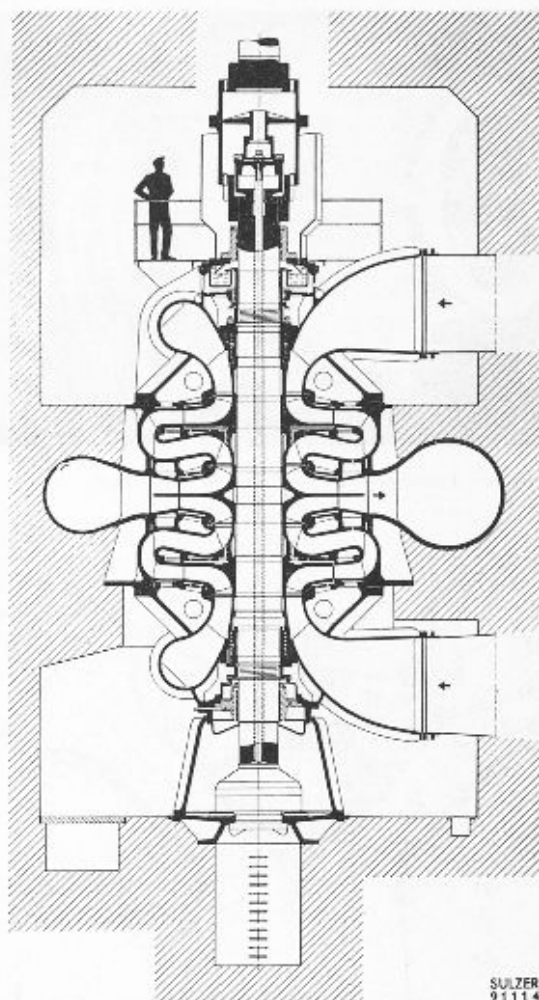


Fig. 18. — Coupe de la pompe de Ffestiniog. Puissance max. 110 000 CV.

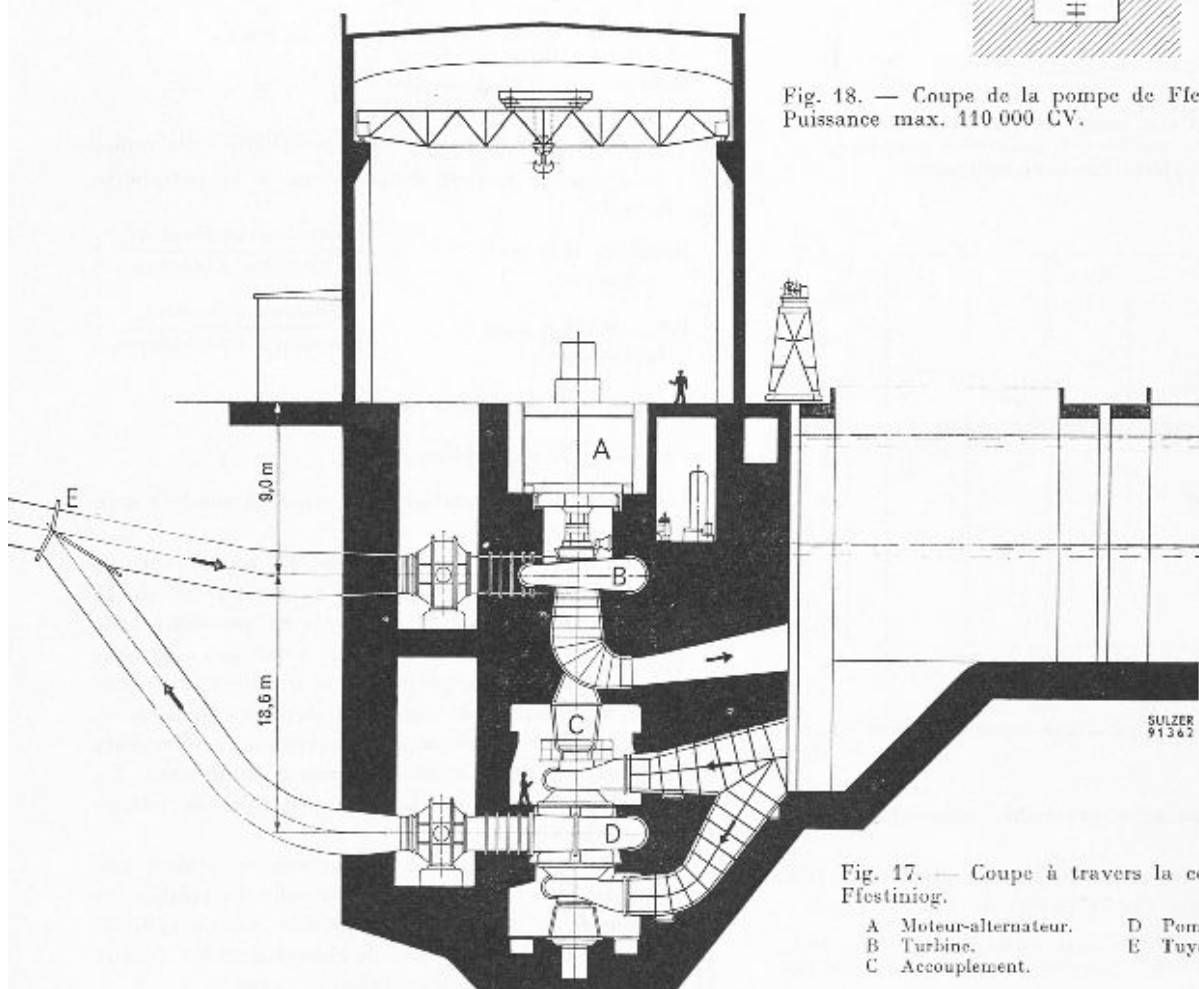


Fig. 17. — Coupe à travers la centrale de Ffestiniog.

- | | |
|-----------------------|------------------|
| A Moteur-alternateur. | D Pompe. |
| B Turbine. | E Tuyau colotte. |
| C Accouplement. | |

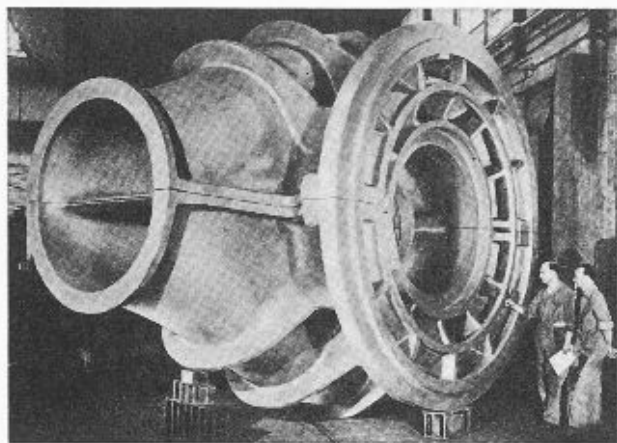


Fig. 19. — Couvercle avec orifice d'aspiration.

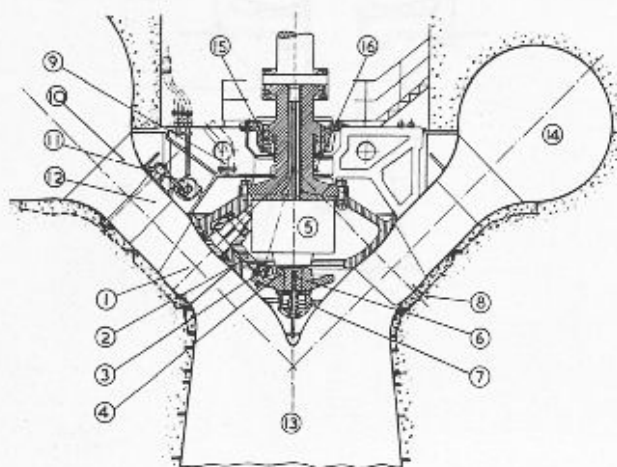


Fig. 20. — Coupe d'une pompe-turbine Dériaz, axio-centrifuge, à aubes mobiles et directrices réglables, d'où très grande souplesse des caractéristiques.

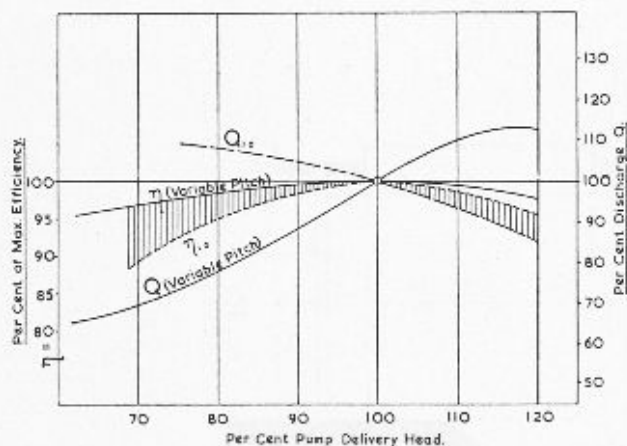


Fig. 21. — Caractéristiques d'une machine Dériaz en pompe.

construction, la machine réversible axio-centrifuge à pas variable.¹

Le pas variable des aubes de la roue donne une très grande souplesse des caractéristiques.

¹ Voir *Bulletin technique de la Suisse romande* du 20 octobre 1955, « La turbine-pompe réversible axio-centrifuge à pas variable », par PAUL DÉRIAZ.

La coupe d'une des six machines de l'installation Sir Adam Beck, au Canada, est donnée par la figure 20.

Le problème de la rotation des aubes a été résolu très élégamment par un servo-moteur rotatif.

En pompe, la machine refoule 116 m³/sec à 27 m, 92,3 tours/min en absorbant 47 500 CV.

En turbine, sous la chute de 27 m et à la même vitesse, elle fournit 40 500 CV.

Les résultats très intéressants obtenus sont illustrés par les figures 21 et 22.

La surface hachurée de la figure 21 donne le gain de rendement obtenu en pompe en fonction de la hauteur.

La chute de rendement à une hauteur égale à 80 % de la normale est de 7 % avec des aubes fixes et de 1 % seulement avec les aubes mobiles.

De la figure 22, on relèvera l'allure très favorable du rendement en turbine. Ce rendement reste supérieur à 90 % pour des charges variant de 30 à 130 % de la charge normale.

Le programme de développement des machines réversibles a porté également sur des machines centrifuges non réglables.

Une série d'essais a été réalisée sur une pompe multicellulaire (trois étages) absolument normale. La figure 23 en reproduit les caractéristiques.

Afin de comparer aisément diverses pompes entre elles, les résultats ont été transformés en coefficients sans dimensions, définis comme suit :

$$\text{Hauteur} \quad \Psi = \frac{H}{U^2 / 2g}$$

où U est la vitesse périphérique de la roue.

$$\text{Débit} \quad \Phi = \frac{Q}{U \cdot S} = \frac{C}{U}$$

où S est la surface de passage à la périphérie de la roue ; C = composante radiale de la vitesse à la périphérie de la roue ;

$$\text{Rendement } \eta \text{ pour la pompe} = \frac{\text{Puissance hydraulique}}{\text{Puissance absorbée}} ;$$

$$\text{Rendement } \eta \text{ pour la turbine} = \frac{\text{Puissance fournie}}{\text{Puissance hydraulique}} ;$$

$$\text{Puissance } \lambda \text{ en pompe} = \frac{\Psi \Phi}{\eta} ;$$

$$\text{Puissance } \lambda \text{ en turbine} = \Psi \Phi \eta.$$

L'examen des caractéristiques relevées conduit aux remarques suivantes.

On constate tout d'abord que le rendement en turbine est légèrement supérieur au rendement de la pompe. La transformation d'énergie en pression, dans la pompe, entraîne des pertes qui n'ont pas l'équivalent en turbine. Remarquons que la machine réversible suppose un écoulement rationnel dans les deux sens. Les canaux d'une turbine sont fortement convergents et ne conviennent qu'à un seul sens d'écoulement. La machine réversible doit donc procéder de la pompe et non de la turbine.

Le rendement maximum en turbine se situe à une hauteur de 15 à 30 % supérieure à celle du rendement maximum de la marche en pompe. Cet écart serait nul pour une machine sans pertes de charge dans les canaux et comportant un nombre infini d'aubes.

Les puissances fournies en turbine sont en général inférieures à celles absorbées par la pompe. L'application d'une vitesse de 10 à 13 % inférieure à celle de la pompe permettrait d'augmenter cette puissance.

La vitesse d'emballlement d'une machine réversible est plus faible que celle d'une turbine normale. La survitesse n'est que de 30 à 40 %, alors qu'il faut compter avec 70 à 90 % pour une turbine classique. Ce fait permet de pousser davantage les vitesses de régime.

Dans la machine réversible, c'est le service pompe qui demande les mises en charge les plus élevées. L'implantation se déterminera donc comme pour une pompe normale.

Les recherches qui ont été poursuivies ont eu pour but de diminuer, pour une même vitesse, l'écart des hauteurs correspondant aux rendements maxima en pompe et en turbine.

Ce résultat a été atteint avec des aubages directeurs mobiles.

La machine d'essai (fig. 24), à un étage, comportait une roue de 350 mm qui refoulait 300 l/sec à 350 m, à la vitesse de 5000 tours/min.

Les résultats obtenus montrent, une fois de plus, que les aubes directrices mobiles n'apportent pas de changements importants dans les caractéristiques de la pompe (fig. 25).

Par contre, le réglage est très efficace dans la marche en turbine (fig. 26). En augmentant fortement les canaux du diffuseur, on ramène le facteur ψ à celui de la pompe, tout en augmentant la puissance.

Ces résultats, très importants, ont permis l'emploi de machines réversibles pour les puissances les plus élevées réalisées à ce jour.

C'est ainsi que pour l'installation de Cruachan, en Ecosse, on a adopté, après constatation des résultats obtenus en laboratoire, des machines à un étage pour une hauteur de 350 m.

Cette station sera équipée de quatre unités construites pour les conditions de marche suivantes :

En pompe : le débit refoulé sera de 28,2 m³/sec, à la vitesse de 600 tours/min, en absorbant 144 430 CV.

En turbine : la puissance fournie sera de 128 520 CV sous une chute de 362 m, à la même vitesse de 600 tours/min, avec un débit de 29,2 m³/sec.

La machine se présente exactement comme une turbine Francis, avec aubes directrices réglables dans la marche en turbine, mais bloquées dans la marche en pompe (fig. 27).

Deux des quatre groupes sont fournis par une maison suisse travaillant en collaboration avec une maison anglaise.

La fig. 28 donne une comparaison entre une installation classique avec turbine et pompe et deux installations équipées de machines réversibles, l'une avec pompe double à deux étages, non réglable, l'autre avec machine réversible à un étage, réglable.

La simplification qui résulte de l'emploi de la machine réversible est frappante.

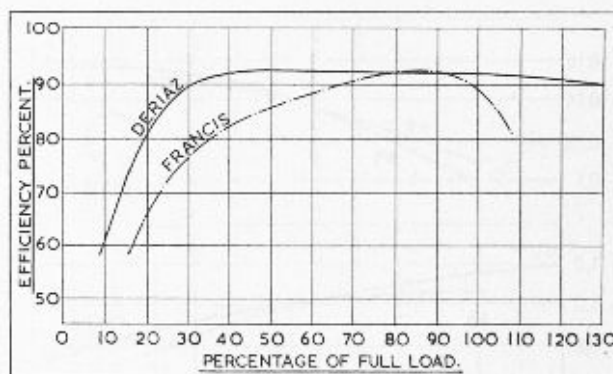


Fig. 22. — Caractéristiques d'une machine Dériaz en turbine.

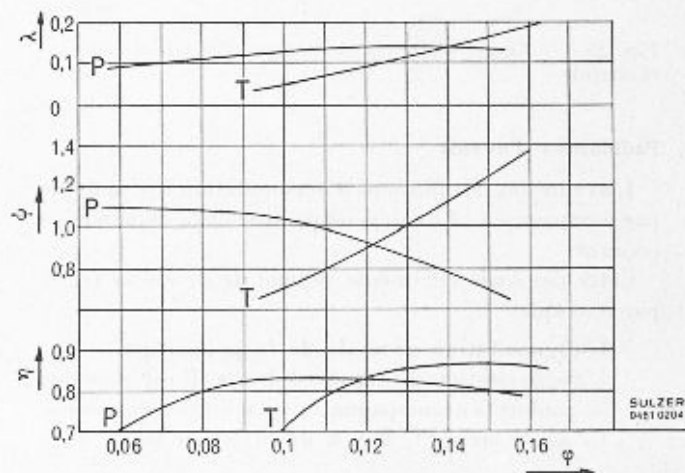


Fig. 23. — Caractéristiques d'une pompe multicellulaire à aubes directrices fixes, en pompe et en turbine.

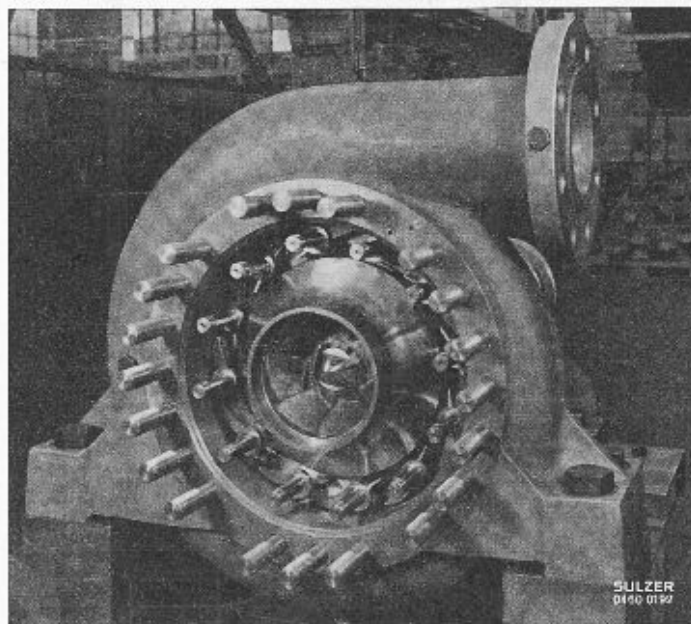


Fig. 24. — Pompe-turbine modèle, à un étage, avec aubes directrices réglables.

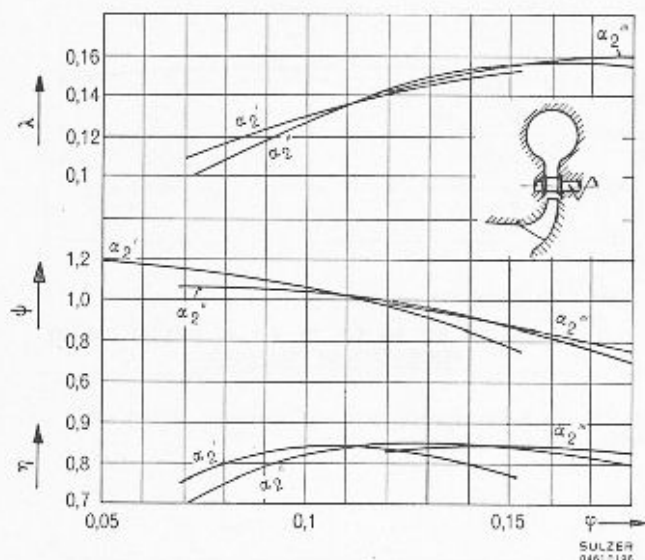


Fig. 25. — Caractéristiques en pompe d'une machine réversible.

Problèmes d'avenir

L'avenir des installations d'accumulation hydraulique par pompage est lié au développement de la demande de courant.

Cette demande elle-même dépend de divers facteurs, par exemple :

- L'augmentation générale de la population.
- L'augmentation du standard de vie. Il est clair que le confort s'accompagne de machines consommatrices de courant. Il y a une relation nette entre

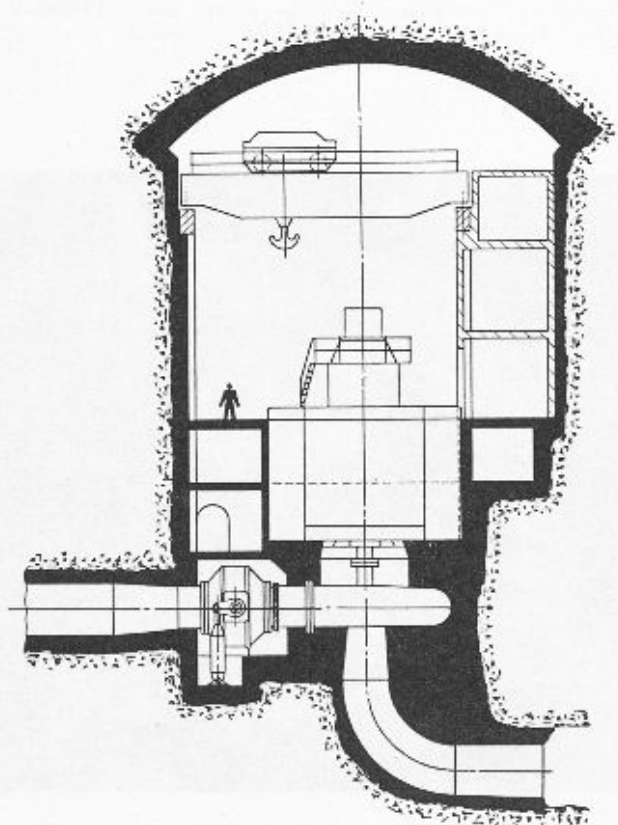


Fig. 27. — Coupe schématique au travers de la station de Cruachan.

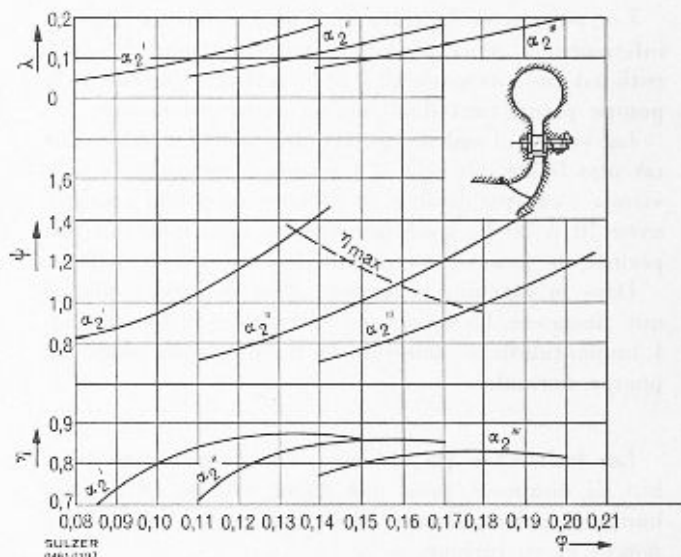


Fig. 26. — Caractéristiques en turbine d'une machine réversible.

la consommation de courant par tête de population et son standard de vie.

On a constaté que, dans les pays déjà fortement industrialisés, la consommation doublait actuellement à peu près tous les dix ans.

Même si un certain tassement du rythme de croissance devait se produire, les quantités d'énergie électrique à fournir seront de plus en plus considérables.

Les diagrammes de consommation auront sensiblement l'allure que nous leur connaissons.

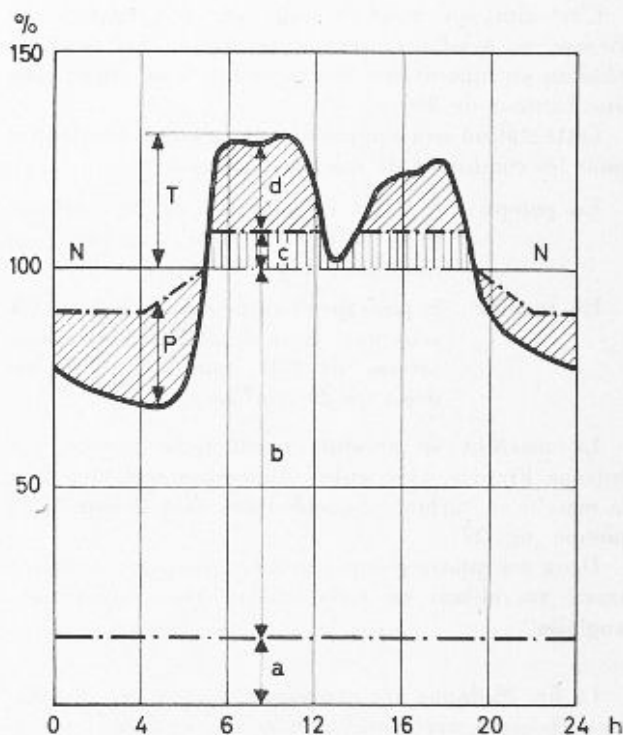


Fig. 29. — Diagramme schématique de charge.

- a Centrales au fil de l'eau.
- b Centrales thermiques et nucléaires.
- c Centrales d'accumulation par gravité.
- d Centrales d'accumulation par pompage.
- $T = 0,25 \div 0,35 N$ $P = 0,15 \div 0,20 N$

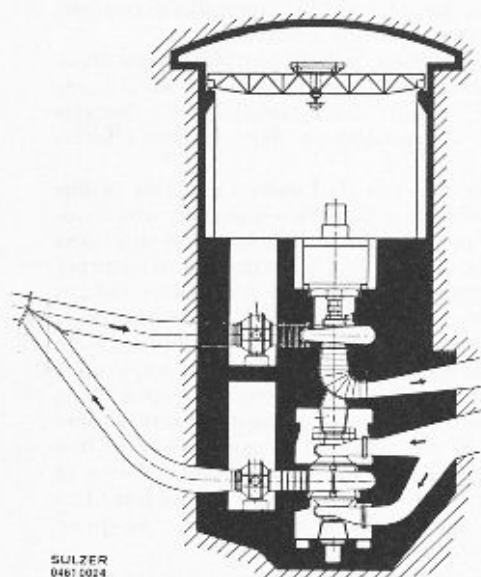
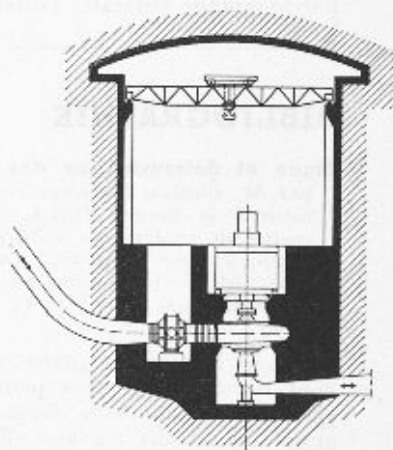
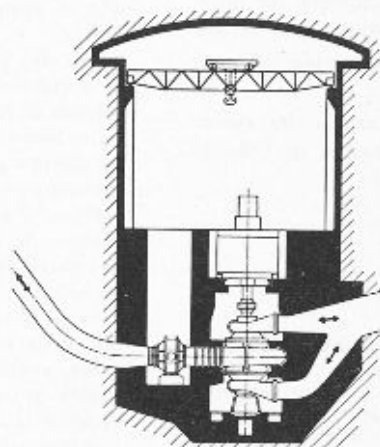


Fig. 28. — Comparaison du groupe d'accumulation classique avec trois machines, et de groupes équipés de pompes-turbines, l'une étant à deux étages et deux entrées, l'autre à un étage et une entrée.



Les ressources en énergie hydraulique étant limitées, on aura de plus en plus recours à de puissantes centrales thermiques et nucléaires pour répondre à la demande croissante de courant.

Le problème de compensation restera alors tel que nous l'avons vu, mais avec des puissances fortement accrues.

Nous avons cherché à chiffrer ces puissances en nous basant sur le diagramme représenté à la figure 29.

L'énergie de base serait fournie par des usines au fil de l'eau et par des centrales thermiques et nucléaires d'une puissance totale de N kW. Pendant la nuit, cette puissance pourrait être réduite de 10 %. On disposerait alors pour le pompage d'un excédent de puissance P de 0,15 à 0,20 N .

Une accumulation hydraulique, par gravité et par pompage, permettrait de couvrir les pointes journalières. La puissance des turbines T devrait être de 0,25 à 0,35 N .

L'application de ces rapports à l'Allemagne, pays fortement tributaire de l'énergie thermique, donne les résultats suivants.

Vers 1975, la puissance N serait de l'ordre de 35 millions de kW. D'où une puissance des turbines de 9 à 12 millions de kW et une puissance des pompes de 5 à 7 millions de kW, soit un éventail de réglage de 14 à 19 millions de kW.

Ces chiffres, qui ne peuvent être considérés que comme des approximations très sommaires, suffisent cependant pour donner un ordre de grandeur des puissances à envisager.

Par les qualités qui leur sont propres, les installations hydrauliques conserveront toute leur valeur, les centrales au fil de l'eau fournissant du courant de base, les installations d'accumulation du courant de pointe.

Par les avantages éminents qu'elle comporte, une connexion étroite entre les installations hydrauliques et thermiques est appelée à jouer un rôle important dans l'économie future.

DIVERS

La Documentation du bâtiment en Suisse

Le Conseil international du Bâtiment (CIB) a inscrit parmi ses activités principales le problème de la documentation. Afin d'éviter un travail à double considérable, il a organisé à partir de 1952 un échange entre ses membres, chaque pays envoyant à tous les autres des fiches sur les publications parues chez lui dans les domaines du bâtiment. Ces cartes comportent les données bibliographiques, un indice de la classification décimale universelle et un résumé; elles sont rédigées en français, une des langues officielles du CIB.

En Suisse, ces fiches furent établies de 1952 à 1961 par la Bibliothèque nationale et les bibliothèques de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, de l'Ecole d'architecture de Genève et de l'Ecole polytech-

nique fédérale de Zurich. Elles furent publiées régulièrement dans le *Bulletin technique de la Suisse romande*¹. Les tirages à part de cette revue furent envoyés aux partenaires de l'échange, qui purent ainsi, en découpant et en collant ces feuilles, adjoindre la documentation suisse à leurs fichiers.

Après une période de dix ans, il nous a paru intéressant de donner un aperçu général de la documentation du bâtiment en Suisse. Disposant encore d'un certain nombre de tirés à part, nous les avons rassemblés et complétés par un répertoire des auteurs. Les catalogues systématiques s'en trouvent complétés par une bibliographie chronologique et alphabétique. Les ingénieurs et les architectes peuvent avoir sous la main toute la documentation de la dernière décennie. Afin de permettre à chacun d'utiliser cette bibliographie sous la

¹ Dans les pages d'annonces.