

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 77 (1951)
Heft: 19-20: 62e Assemblée générale, Lausanne, 5-7 octobre 1951

Artikel: L'aménagement hydroélectrique de Lavey
Autor: Meystre, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-58162>

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: 25.01.2026

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

L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE LAVEY

par P. MEYSTRE, ingénieur

Chef du Service de l'Electricité de la Ville de Lausanne

Avant-propos

L'ingénieur qui, durant une longue période, a fait d'une œuvre telle Lavey sa préoccupation constante, se trouve, lorsqu'il doit en écrire une relation, devant un vrai dilemme.

Pendant des années, il a eu, jour après jour, à résoudre les difficultés qu'entraîne toute réalisation. La matière et les faits ont posé des problèmes et créé des situations souvent difficiles et toujours attachantes. Certaines questions, quelquefois de détail, ont suscité parfois, pour leur résolution, des recherches et des complications, et par là même, ont pris une importance accrue.

Au moment d'en faire une relation, comment procéder ? Faut-il se borner à quelques questions d'un intérêt essentiellement professionnel et laisser dans l'ombre tout ce qui n'a pas présenté des solutions techniques nouvelles ? C'est bien tentant, et la relation de quelques cas particuliers est souvent, pour l'auteur comme pour le lecteur spécialisé, pleine d'intérêt.

Faut-il, au contraire, s'efforcer de donner de l'œuvre une image aussi fidèle que possible, mais qui sera toujours incomplète et toujours approximative parce que l'auteur, dans son travail, ne peut se dissocier des événements qu'il a vécus et qu'il doit se limiter ?

Nous avons essayé de nous en tenir à cette seconde méthode, sans ignorer que le fait de vouloir faire une description générale entraîne des énumérations peut-être fastidieuses et des longueurs regrettables. L'auteur s'en console, peut-être à tort, en espérant cependant qu'ainsi faisant la documentation que cela constitue permettra à d'autres de juger des résultats et de trouver de meilleures solutions aux problèmes de ce genre qu'ils pourront avoir à résoudre.

I. Avant Lavey — Historique

Le Rhône

Après avoir surgi du glacier du Rhône, dans le massif du Saint-Gothard, au haut de la vallée de Conches, le Rhône, tout au long du Valais, coule dans une vallée étroite, encaissée entre de hautes montagnes, les Alpes valaisannes au sud, les Alpes bernoises au nord. Son cours supérieur, qui aboutit au lac Léman, est ainsi complètement situé dans le climat alpestre.

Son bassin versant a, de ce fait, un caractère particulier. Une proportion importante est constituée par des glaciers. Il va en résulter un décalage entre le régime des précipitations et celui des écoulements. Cet effet sera encore accentué par la densité variable des précipitations, très réduite dans le fond de la vallée, où elle reste voisine de 50/60 cm l'an ; elle atteint, sur les sommets, des valeurs très élevées, de plus de 3 m l'an, sur tous les sommets des Alpes valaisannes ; elle dépasse encore cette valeur dans certaines zones des Alpes bernoises.

Successivement, des nombreuses vallées latérales, plus particulièrement du versant sud, ses affluents, viennent y déver-

ser des apports importants qui grossissent considérablement son débit.

Son bassin versant, à son arrivée au lac Léman, est de 5220 km².

Le régime qui en résulte est caractérisé par :

- des hautes eaux de printemps et d'été, venant de la fonte des neiges et des glaces ;
- des crues rares, dues aux pluies dans le bas du bassin ;
- une période d'étiage prononcé, en hiver.

Le lit du fleuve conserve, jusqu'au lac Léman, son caractère torrentiel. Il est loin cependant de présenter une pente uniforme, entre sa source et le lac Léman. Il est aisément décomposé en trois tronçons, qui peuvent être caractérisés comme suit :

Le tronçon supérieur, de sa source à Brigue, situé dans la vallée très encaissée de Conches, a, pour 50 km environ, une différence de niveau de 1155 m. Gletsch : altitude 1830 m ; Brigue : 675 m, soit une pente moyenne d'environ 23‰. Il s'agit là de conditions de chute très favorables. Aussi, sur ce tronçon, plusieurs aménagements sont en cours de travaux, en projet ou en exploitation (Oberwald, Ulrichen, Mörel, Massaboden).

Le tronçon central et inférieur, Brigue-Evionnaz, coule dans une plaine de plus en plus large, sa pente se réduit progressivement de Brigue à Sion. Sur 50 km (675-495), la pente moyenne n'est plus que de 3,6‰ ; elle tombe à 1‰ environ entre Sion et Evionnaz. Cette même pente se retrouve dans le tronçon inférieur de la plaine du Rhône, entre Saint-Maurice et le lac, où la pente moyenne est de 1‰ environ. Saint-Maurice : 402 ; lac Léman : 375. Km : 23.

Entre Evionnaz et Saint-Maurice, une zone de raccordement, de perturbation, vient s'insérer entre ces parcours tranquilles, les rapides du Rhône sont atteints. Là, la rivière coule avec impétuosité dans un terrain mouvementé et dans un lit encaissé. Sur 5 km environ, le Rhône passe de l'altitude 443 à la cote 400. La dénivellation est ainsi de 43 m. La pente moyenne est de l'ordre de 8‰, donc particulièrement favorable à une utilisation.

Si l'on fait abstraction de la chute du Rhin, il n'existe nulle part en Suisse un cours d'eau avec une chute aussi grande, alliée à un débit aussi important.

L'Usine du Bois-Noir

Les conditions particulièrement favorables à un aménagement que présentent les rapides du Rhône n'avaient pas échappé aux ingénieurs du début de ce siècle. En 1895 déjà, ce tronçon avait retenu leur attention et le premier aménagement de la Ville de Lausanne y avait été établi. La solution adoptée était à l'échelle des connaissances de l'époque. Des notions telles que l'utilisation rationnelle d'un cours d'eau n'avaient pas encore vu le jour. Des statistiques un peu précises sur les débits faisaient défaut. Il s'agissait, pour les premiers constructeurs du Bois-Noir, après avoir supposé les besoins de la ville de Lausanne pour une période qui paraissait longue, de les couvrir par une usine construite à cet effet calibrée, peut-on dire, à la demande, et celle-ci était estimée bien modestement. Qu'on en juge !

En 1897, la Ville de Lausanne, déjà alimentée, très partiellement il est vrai, par une petite usine privée, ouvrit un concours en vue d'augmenter ses ressources en énergie électrique. Les propriétaires de concessions hydrauliques, disposant de forces suffisantes, étaient appelés à concourir.

L'utilisation du Rhône fut retenue, entre diverses propositions. Le 26 juillet 1898, le Conseil communal décidait le rachat de la concession des forces motrices du Rhône à Saint-Maurice et chargeait une société, issue du consortium propriétaire et qui comprenait les fournisseurs de tout le matériel, de l'exécution à forfait des installations prévues.

En 1898, Lausanne comptait 42 000 habitants environ. Les experts techniques consultés pour comparer les propositions reçues avaient déterminé les besoins de Lausanne comme suit : lumière 1380 kW ; force motrice 480 kW ; tramways 690 kW. Total 2550 kW.

Ils avaient soin de spécifier que « la vente de cette quantité d'énergie ne serait pas atteinte d'emblée, mais seulement au bout de quinze ans » !

L'équipement prévu, situé entièrement sur la rive gauche du fleuve, était basé sur un débit utilisé maximum de 40 m³/sec et une chute de 32 à 36 m. Il comportait notamment :

1. un barrage mobile pour prise d'eau à niveau constant ;
2. un canal d'aménée comprenant une partie supérieure avant le bassin de dépôt et une partie inférieure après le bassin ;
3. un dépotoir pour débouiller l'eau dérivée de ses sables et de la plus grande partie de ses limons ;
4. un réservoir de prise de charge où se déposent encore les limons les plus fins ;
5. une conduite métallique de mise en charge ;
6. une décharge pour trop-plein, vidange et chasse du réservoir de prise en charge ;
7. un bâtiment des turbines avec atelier et logements ;
8. un canal de fuite avec rentrée au Rhône ;
9. divers travaux accessoires.

Certaines installations, comme les travaux hydrauliques (barrage, canal supérieur, dépotoir, canal d'aménée inférieur, mise en charge, canal de fuite) n'ont subi au cours de cinquante ans que des modifications de détail. Les éléments qui ont été remplacés ne présentent qu'un intérêt historique.

Le bâtiment des machines était prévu pour pouvoir y installer quinze groupes de 1000 CV, cinq groupes principaux étant installés primitivement. Un groupe de réserve y fut ajouté par la suite. Ces turbines principales entraînaient chacune deux machines à courant continu Thury système série, pouvant fournir une tension de 23 000 volts en pleine charge, tension de transport de la ligne série Bois-Noir-Pierre-de-Plan. Cette réalisation technique était tout à fait remarquable pour l'époque.

Le développement de la production depuis 1920

Les prévisions de consommation faites lors du projet du Bois-Noir, jugées très optimistes à l'époque, furent rapidement dépassées par les événements. Il fallut aviser. On s'en tira, à la suite d'études entreprises en 1909 et 1910, par un développement marqué de la centrale thermique de Pierre-de-Plan. En fait, rien n'était résolu, aussi parmi les problèmes difficiles qui surgirent lors de la première guerre mondiale, celui de l'approvisionnement de Lausanne en énergie, se posa de nouveau. La question fut ainsi reprise en 1917 et 1918.

La population de Lausanne avait passé, en 1920, à 70 000 habitants environ, et les installations de la première étape, même complétées par les installations de Pierre-de-Plan mentionnées plus haut, n'étaient plus suffisantes pour faire face à la consommation. Il était donc nécessaire de compléter ou de transformer les installations de 1902.

Au point de vue hydraulique, il s'agissait d'amener de nouvelles conduites forcées au bâtiment des turbines et d'installer de nouveaux groupes à l'usine.

Au début, trois conduites forcées avaient été prévues, dont une seule, en tôle, avait été établie d'emblée. En deuxième étape, la conduite « 2 » fut construite ; pour des raisons purement économiques, elle le fut en béton armé. Cette conduite venait se raccorder sur le collecteur placé parallèlement à l'usine.

Les génératrices à courant continu étaient remplacées par des groupes comprenant chacun une turbine de 3000 à 3400 CV, entraînant par accouplement direct un alternateur triphasé de 2800 kVA, à la vitesse de 375 tours/minute. Les turbines étaient munies d'orifices compensateurs.

Ainsi donc, le système de production et de transport à courant continu, adopté à l'origine, se trouvait remplacé par le courant triphasé produit à la tension de 6000 V environ à l'usine et transporté à Lausanne par une nouvelle ligne à la tension de 50 000 V environ. L'alimentation du réseau local (Saint-Maurice, etc.) se faisait directement à la tension des alternateurs.

Trois groupes furent installés dès l'origine. Dans les bâtiments, l'emplacement de trois groupes suivants à installer en même temps que la troisième conduite, était prévu.

Les installations électriques de transformation, les tableaux, les organes auxiliaires ont existé, sans changement notable, jusqu'à l'arrêt de l'usine, en 1950. Mentionnons la ligne à 50 kV, établie en même temps, et dont la capacité de transport est d'environ 10 000 kVA.

Dès 1921, l'usine du Bois-Noir était raccordée au réseau de l'Energie Ouest Suisse (EOS) qui, à cette époque, avait une tension d'exploitation de 60 kV. Le couplage était assuré par un transformateur de 6300/63 000 volts.

En 1925, une partie de la fourniture du Bois-Noir est transportée à Lausanne par la ligne EOS à 60 000 volts, en parallèle avec la ligne à 50 000 volts propriété de la Commune de Lausanne.

Le développement constant et rapide de la consommation obligea à établir un quatrième groupe en 1930, ce qui fit l'objet d'un préavis daté du 21 mai 1929 et d'une décision du Conseil communal du 10 juillet 1929. Ce groupe est d'une puissance de 2800 kVA, à 6500 V, comme les précédents.

L'usine de production ne subit pas de changement important jusqu'en 1934, année où l'EOS¹ changea la tension de son réseau de transport en passant de 60 à 125 kV. Cette opération entraîna, pour la Ville de Lausanne et pour l'usine du Bois-Noir, en particulier, des transformations très importantes. Il s'agit d'établir au Bois-Noir (ainsi qu'à Pierre-de-Plan) une station de transformation en plein air qui comporte notamment deux transformateurs-élévateurs de 8000 kVA, avec réglage sous charge par gradins 6300/119-135 000 volts, tout l'appareillage nécessaire et un transformateur de réglage en quadrature de 8400 kVA de puissance traversante.

Si ces installations n'ont pas augmenté la capacité de production de l'usine, elles ont cependant nettement amélioré les possibilités de transport de l'énergie produite et la sécurité d'exploitation.

Rappelons, avant de terminer ce petit historique, que le débit susceptible de passer dans les ouvrages est celui de 40 m³/sec, fixé lors de la construction, et qu'il est entièrement absorbé par les quatre groupes demeurés en service jusqu'en avril 1950.

L'évolution des besoins du Service de l'électricité

La population de Lausanne et des communes alimentées, directement ou indirectement, dépasse, en 1950, 150 000 habitants (fig. 1). Au cours de ces cinquante années et tenu compte des modifications de l'équipement survenues au Bois-Noir, la production a évolué de façon telle que, dès 1938, le plafond de production de l'usine est constamment atteint (fig. 2). Toutes les machines sont en permanence en service et un groupe n'est arrêté, et une révision entreprise, qu'en cas d'impérieuse nécessité. Cela ne suffit pas à couvrir les besoins. On constate, en effet, à la sortie de Pierre-de-Plan, côté distribution (fig. 3) des charges constamment accrues, et la disproportion entre les possibilités de production du Bois-Noir et les besoins annuels d'énergie s'accroît toujours davantage (fig. 4). Des achats massifs d'énergie d'appoint, auprès de l'Energie Ouest Suisse (EOS), couvriront les insuffisances de production propre. Répétons quelques chiffres de la consommation totale annuelle enregistrée en : 1930, 37 millions de kWh ; 1940, 86 millions de kWh ; 1945, 187 millions de kWh ; 1950, 211 millions de kWh.

¹ Energie Ouest Suisse S. A., à Lausanne.

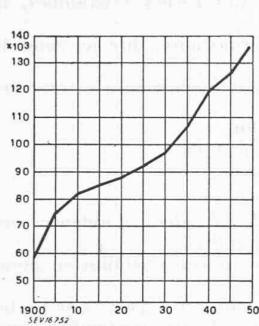


Fig. 1. — Population desservie par le Service de l'électricité de la ville de Lausanne, en 1000 habitants, de 1900 à 1948.

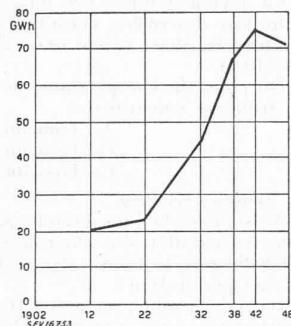


Fig. 2. — Production de l'usine du Bois-Noir, en GWh.

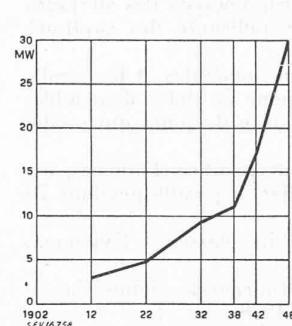


Fig. 3. — Charge maximum annuelle du réseau de distribution.

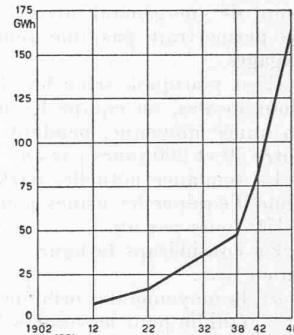


Fig. 4. — Energie électrique triphasée mesurée au départ de l'usine de Pierre-de-Plan, en GWh.

La deuxième guerre mondiale, comme la première, a accéléré l'accroissement des besoins en énergie et, la production du Bois-Noir, d'énergie de base qu'elle était, ne couvrit bien-tôt plus qu'une minime partie des besoins totaux. Il fallait aviser. De nombreuses études ont été entreprises dans ce but. Les conceptions modernes de l'utilisation des cours d'eau ne sont plus celles du début du siècle. Le Rhône, cette magnifique possibilité si imparfaitement utilisée, est réétudiée. Il en sortira l'usine de Lavey.

Les études de Lavey

En 1940, un événement va faire démarrer une action qui, bien que déjà entreprise, n'était pas dans une période active. Une crue du Rhône provoque des avaries au barrage du Bois-Noir. Les constatations faites montrent que certains ouvrages devront faire l'objet de travaux très importants si l'on veut leur donner la sécurité correspondante aux nécessités de l'époque. Le problème de la production a lui-même pris une importance de premier plan. Il fallait aviser et trouver le moyen d'augmenter notre propre production.

La Municipalité de l'époque, avec M. Aloïs Bron comme municipal aux Services industriels, chargea une commission d'ingénieurs d'entreprendre des études. Cette commission comprenait MM. Pierre Oguey, professeur à l'Ecole polytechnique de Lausanne, actuellement conseiller d'Etat, Maurice Ebner, ingénieur-conseil, et Paul Meystre, ingénieur, chef du Service de l'électricité. Ces personnalités assumeront ensuite la direction des travaux.

De nombreuses études furent mises sur pied ; elles ne se limitèrent pas à la recherche d'une meilleure utilisation du palier concédé. Le problème de l'utilisation du Rhône fut examiné en se basant sur la conception moderne de l'utilisation rationnelle du fleuve et c'est l'ensemble de la question qui fut repris.

Très rapidement, il fut possible d'élargir dans les nombreuses solutions envisagées, et c'est ainsi qu'en 1942 était présenté aux autorités lausannoises un projet d'aménagement général du Rhône, basé sur la zone déjà utilisée du Bois-Noir. Les études démontrent, en effet, les gros avantages du tronçon déjà concédé pour le Bois-Noir. Les ingénieurs du siècle dernier en avaient déjà reconnu l'intérêt et l'avaient utilisé avec les moyens connus à l'époque. Le projet de 1942 est à l'image de l'évolution considérable de la technique au cours de ce demi-siècle.

II. La conception de Lavey

L'élaboration du projet

Le projet de juillet 1942 prévoit la création d'une nouvelle usine à Lavey, sur la rive droite du Rhône, alors que le Bois-Noir est sur la rive gauche. Le tronçon utilisé est plus étendu que celui du Bois-Noir.

Le bassin versant: Il comprend une superficie de 4726 km², entièrement dans le climat alpestre.

Le régime hydraulique a fait l'objet de mesures prolongées du Service fédéral des eaux, dans ses stations de Sion et de la Porte-de-Sex. Il n'existe, par contre, pas de mesure directe du débit du Rhône à Evionnaz. Depuis nombre d'années, il était admis, au Service de l'Électricité de Lausanne, que le débit probable à Evionnaz s'obtenait en ajoutant au débit mesuré à Sion les 73 % de la différence entre les débits mesurés à Sion et à la Porte-de-Sex. La justification de ce mode de faire avait disparu.

Retenant les données de la carte pluviométrique de J. Maurer et M. Lugeon, les auteurs déterminèrent le débit à Evionnaz en repartant des lectures des deux stations de mesure précitées. Les calculs permirent d'établir que le facteur de correction noté plus haut était la résultante d'un calcul rigoureux et correspondait pleinement à la réalité.

Les débits classés à Evionnaz. — La figure 5 représente les débits classés à Evionnaz en année moyenne (prise sur vingt-deux années). Il est intéressant de relever au passage que le Bois-Noir, avec son équipement pour 40 m³/sec correspondait, en année moyenne, à une marche à pleine charge permanente. Ce simple fait permet de mesurer l'évolution qui s'est produite, depuis, dans la conception d'un aménagement.

Choix du tronçon à aménager. — L'étude du Rhône a fait ressortir l'intérêt de la zone des rapides et ses caractéristiques particulièrement favorables. Il était indiqué cependant d'examiner si une extension de l'aménagement, soit vers le haut, soit vers le bas, pouvait être retenue, d'où l'examen de variantes Fully, Colombey, et différentes sous-variantes. On constata qu'il n'était pas indiqué de chercher à placer la prise d'eau en amont d'Evionnaz alors que l'aval pouvait, dans une certaine mesure, être reporté en aval de la restitution du Bois-Noir.

Choix du débit maximum utilisable. — Equiper une usine pour le débit d'étiage conduit au coût minimum de premier établissement, mais à un gaspillage de l'énergie du fleuve. Equiper l'usine pour le débit moyen maximum serait idéal au

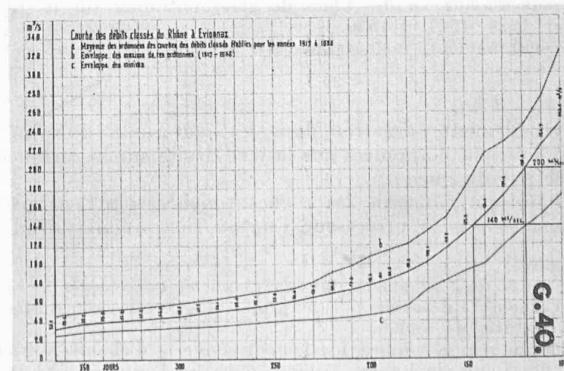


Fig. 5. — Courbe des débits classés à Evionnaz.

point de vue général, mais le coût trop onéreux des ouvrages ne permettrait pas une rentabilité suffisante des capitaux engagés.

C'est pourquoi, selon les conditions générales et les conditions locales, on équipe les usines pour un débit disponible, en année moyenne, pendant un nombre de jours qui oscille entre 50 et 200 jours par an.

La tendance actuelle, parfaitement justifiée d'ailleurs, est donc d'équiper les usines pour le débit disponible pendant 70 à 150 jours par an.

En considérant la figure 5 des débits classés à Evionnaz, on en tire :

- la moyenne des ordonnées des courbes des débits classés établie pour les années 1917 à 1938 ;
- l'enveloppe des maxima de ces ordonnées, années 1917 à 1938 ;
- l'enveloppe des minima de ces ordonnées, années 1917 à 1938.

La variation de débit est très rapide entre 140 et 100 jours : le débit choisi est $200 \text{ m}^3/\text{sec}$, disponible en année moyenne durant 118 jours.

Relevons que cette valeur est la plus élevée existant en Suisse pour une chute telle que celle de Lavey.

Etude géologique

Conditions générales

Le professeur Maurice Lugeon qui, à une vaste expérience des installations hydrauliques, joint une connaissance exceptionnelle de la région, fit un examen d'ensemble du projet. Ses conclusions générales peuvent être résumées comme suit.

Parlant de la nécessité de reporter l'ensemble des ouvrages sur la rive droite, il dit :

Ces cônes (il s'agit du cône torrentiel du Saint-Barthélemy), on ne saurait l'oublier, sont des objets en construction. Le torrent cherche à les agrandir et le fleuve à les détruire. Il y a instabilité et les méfaits du torrent de Saint-Barthélemy sont encore dans la mémoire de chacun pour que nous nous contentions, plus loin, d'en résumer l'histoire.

Par contre, la rive vers laquelle est chassé le fleuve est toujours rocheuse et stable. On aura donc, en principe, avantage à placer tout ouvrage humain sur ou dans le versant opposé au torrent.

On se rend compte de toute l'importance de cette indication si l'on se souvient des dégâts que le Saint-Barthélemy a causés à l'usine du Bois-Noir, en 1926 et 1930 seulement. M. le professeur Lugeon le souligne en ces termes :

Le massif de la Dent-du-Midi, disons la Cime-de-l'Est, domine la vallée du Rhône d'une hauteur sensiblement égale à celle dont le Cervin surmonte Zermatt, mais il y a cette énorme différence que le matériel rocheux, dans lequel est taillé le bassin d'alimentation du Saint-Barthélemy, est particulièrement friable. L'homme ne peut rien contre les actions des intempéries qui peu à peu désagrègent les roches et dont les débris engorgent peu à peu les lits torrentiels, accumulant ainsi le matériel pour une future débâcle.

Le mieux que l'homme doit faire, c'est plutôt s'éloigner de ces lieux néfastes, s'il n'a pas l'impérieuse nécessité d'y subsister.

Il ne faut pas oublier qu'au cours d'une centaine d'années on a assisté à de nombreux méfaits du Saint-Barthélemy. Ainsi, en 1820, 1832, 1835 (très forte débâcle), 1869, 1877, 1891 (le soussigné se souvient d'avoir vu des blocs de glace entraînés sur la grande route), 1926, 1927 et 1930.

Périodiquement, inéluctablement, le Saint-Barthélemy en fait des siennes.

La prise d'eau

Actuellement encastrée dans les matériaux du cône du Bois-Noir, elle s'appuiera sur la rive droite sur la roche constituée par du gneiss.

En ce qui concerne les roches touchées par l'ensemble de l'aménagement, le professeur Lugeon s'exprimait ainsi :

La galerie

Il n'y a qu'à se placer dans la plaine et contempler la région montagneuse intéressée par le projet pour voir immédiatement deux natures de roches.

Sur une région sombre, localement couverte d'éboulis aux environs des Bains de Lavey, s'étend, dans les hauteurs, une région rocheuse, claire, soutenant par ses escarpements les forts de Savatan et de Dailly.

La région sombre est formée par des roches cristallines, la claire par des roches calcaires.

Entre les deux existe une zone intermédiaire, dite ici zone de transition.

Du point de vue pratique, la galerie d'aménée aura à traverser les tronçons suivants :

- Tronçon cristallin,
- Tronçon de transition,
- Tronçon calcaire.

Le tronçon cristallin

Ainsi donc la plus grande partie de la galerie d'aménée sera dans le Cristallin, soit environ les trois quarts.

Quelle sera la nature des roches du tronçon cristallin au point de vue perforation ?

Dans l'ensemble, roches particulièrement dures, parce que toutes quartzées avec variation de dureté. Usure particulièrement grande des taillants des fleurets. Vu la présence de la silice, nécessité de forer à l'eau.

La zone de transition

Ainsi, dans la galerie d'aménée, vu la diminution de pente des roches, le Trias commencera par apparaître (en marchant vers l'aval) d'abord au plafond, puis quittera en radier à environ 200 m plus loin.

Le tronçon calcaire

Il y aura trois sortes de roches calcaires à franchir.

- Le calcaire jurassique (Malm).
- Le Berriasien.
- Le calcaire du Valanginien, dans lequel se trouvera la cheminée d'équilibre et la centrale.

Le rapport-préavis de 1942

Sur la base des études brièvement mentionnées plus haut, un rapport-préavis de novembre 1942 fut présenté aux autorités lausannoises. Il résumait à la fois l'ensemble du problème et présentait, après étude de nombreuses variantes, la solution à retenir pour l'exécution.

La simple énumération des chapitres suffit pour situer le cadre dans lequel les études se sont poursuivies : I Historique. — II Etat des installations de l'usine du Bois-Noir. — III Extension de l'usine et accroissement de la production. — IV Consommation et production d'énergie électrique à Lausanne. — V Etude des conditions hydrauliques. — VI Extension de l'usine actuelle. — VII Recherche d'une meilleure utilisation du Rhône par une usine nouvelle. — VIII Usine complémentaire rive gauche. — IX Usine rive droite — Solutions 140 ou $200 \text{ m}^3/\text{sec}$. — X Devis de construction et plans financiers. — XI Conclusion de l'étude générale. — XII Usine nouvelle rive droite. Solution $200 \text{ m}^3/\text{sec}$ avec restitution au Rhône à l'embouchure du Courset.

Le Conseil communal de Lausanne, dans sa séance du 15 juin 1943, décidait :

- d'envisager le principe de construire une nouvelle usine hydro-électrique sur le Rhône ;
- d'entreprendre l'ensemble des travaux préparatoires, de procéder à l'établissement du projet d'exécution et d'allouer dans ce but un crédit de 400 000 fr., crédit à prélever sur le fonds de renouvellement 4 des S. I.

Le premier pas était fait ; on pouvait poursuivre. Les conclusions, répétées au début du préavis de 1945, marquaient déjà les éléments essentiels acquis. Nous les rappelons ici :

- La Suisse romande se doit de participer à l'effort d'équipement national et d'exploiter au mieux ses sources d'énergie électrique en augmentant son capital productif tout en fournissant, elle aussi, des occasions de travail pour l'après-guerre.
- Il est d'impérieuse nécessité d'accroître la production du Service de l'électricité, actuellement déjà très insuffisante, qui nécessite et nécessitera par la suite des achats d'énergie toujours plus importants, coûteux et difficiles.
- L'usine actuelle du Bois-Noir, de conception ancienne, ne présente plus la sécurité requise de la seule source d'énergie propre d'un réseau comme celui de Lausanne. De par sa situation et ses caractéristiques, elle ne se prête pas à une extension de quelque importance.
- La recherche d'une meilleure utilisation du Rhône aboutit à la conclusion qu'il ne convient pas de s'écartier sensiblement du tronçon actuellement utilisé, avec prise d'eau à Evionnaz et restitution dans le voisinage du Mauvoisin, limite aval de la concession en vigueur. L'utilisation du fleuve en un seul

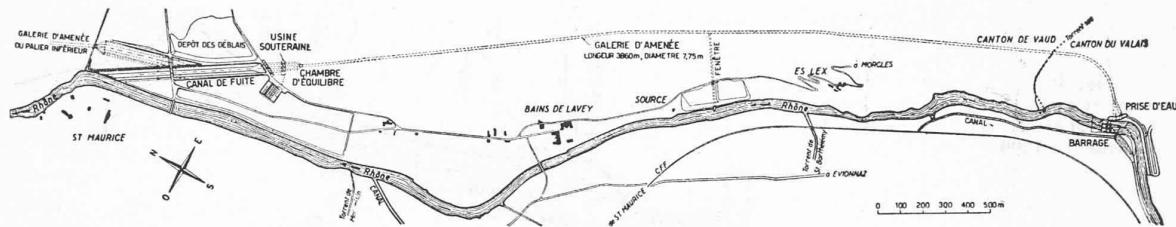


Fig. 6. — Plan d'ensemble de l'aménagement de Lavey. — Echelle 1 : 30 000.

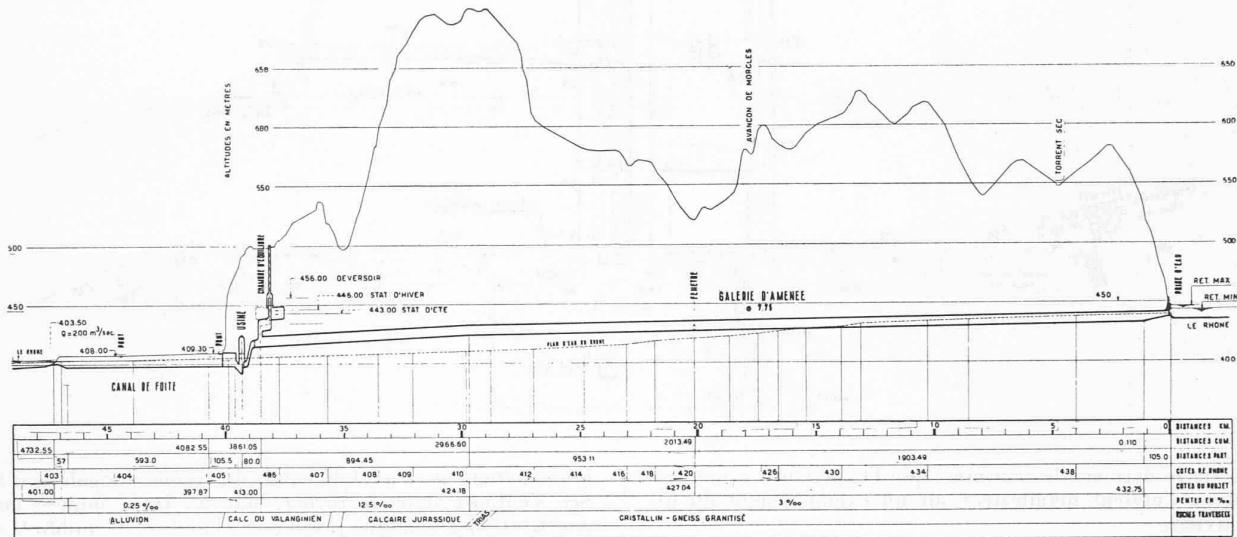
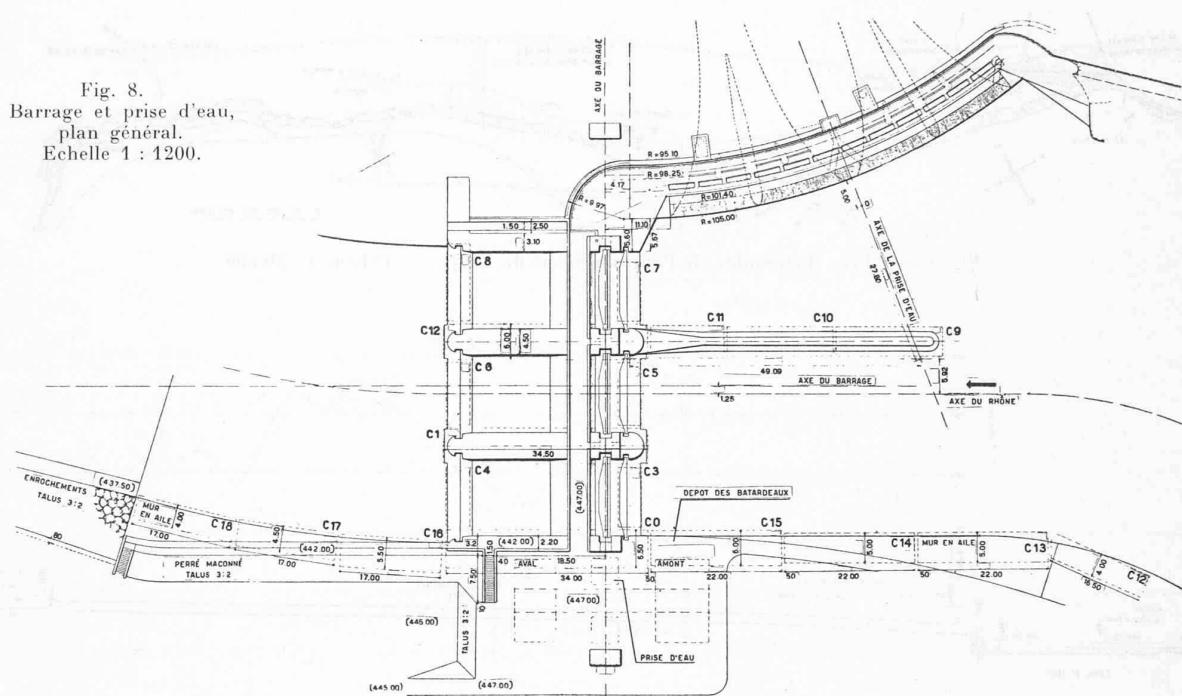


Fig. 8.
Barrage et prise d'eau,
plan général.
Echelle 1 : 1200.



fin du siècle dernier, des craintes, que l'expérience a montré infondées, s'étaient manifestées sur un exhaussement du lit de la rivière.

Bien que le problème soit tout autre et que la technique ait fait de grands progrès depuis cinquante ans, il était nécessaire d'être assuré sur ce point. C'est pourquoi le Service fédéral des eaux demanda que la question de la stabilité du lit du Rhône soit résolue, et que des essais soient entrepris au Laboratoire de recherches hydrauliques de l'Ecole polytechnique fédérale, à Zurich. Ce laboratoire, sous la direction de M. le professeur Meyer-Peter, a mis au point les méthodes d'essais sur modèles réduits des phénomènes d'entraînement et d'alluvionnement. Il a pu les contrôler par de nombreuses observations sur le Rhin, ce qui lui assure, de ce fait, une expérience unique, expérience valable également pour les charriages et tous les problèmes connexes.

Les résultats de ces essais ont été convaincants et, de ce fait, l'accord des autorités obtenu, sur les dispositions du projet définitif.

Choix du débit dérivé: Les études de 1942 avaient démontré l'intérêt de la solution basée sur une utilisation maximum de 200 m³/sec. Le projet de 1942 prévoyait, dans ce cas, la construction de deux galeries d'aménée de section circulaire de 6 m. 50 de diamètre intérieur ; cela permettait, pour l'exécution en deux étapes, la construction d'une seule galerie en première période ; il en résultait, par contre, une immobilisation importante pour les galeries. Les études poursuivies ont démontré que l'outillage moderne permettait d'envisager la construction d'une galerie de très grandes dimensions, soit 7,75 m de diamètre intérieur, avec des moyens mécanisés adéquats. Géologiquement, l'opération était possible. Économiquement, elle était intéressante en tenant compte du fait que le débit d'hiver est un débit faible, donc à pertes de charges réduites ; il était possible, par contre, de tolérer des pertes de charge relativement grandes en sacrifiant un peu d'énergie d'été pour réduire le coût total, sans pour autant influencer de manière intolérable la production d'hiver. Cette solution fut ainsi adoptée.

Les ouvrages de génie civil

Situation générale

La figure 6 donne la situation des ouvrages. Les éléments les plus caractéristiques seront repris plus loin.

Le barrage et la prise d'eau sont conservés à l'emplacement des projets primitifs, que les essais ont démontré favorable,

immédiatement en aval du coude du Rhône. La galerie d'aménée s'enfonce dans le rocher, suit un tracé imposé par la constitution géologique jusqu'à la chambre d'équilibre, d'où partent les trois conduites forcées aboutissant à l'usine. Les aspirateurs des turbines se prolongent par des canaux souterrains débouchant dans le canal de fuite qui traverse la plaine de Lavey jusqu'au point de restitution, à l'embouchure du Courset.

Le profil en long de la dérivation est représenté par la figure 7.

Barrage et prise d'eau

La disposition d'ensemble du barrage et de la prise d'eau est donnée par la figure n° 8, les détails par les figures 9, 10 et 11 (photo).

Le barrage comporte trois passes égales de 13,0 m de largeur. L'ouverture de chaque pertuis est réglée par deux vantaux pouvant être manœuvrés de manière à obtenir soit séparément, soit simultanément un déversement supérieur et un écoulement inférieur, ou encore être relevés totalement pour laisser le passage absolument libre.

Les autorités fédérales exigent actuellement que les plus grandes crues possibles puissent être évacuées pour Lavey par deux pertuis quelconques du barrage, les vannes du troisième étant supposées accidentellement bloquées en position fermée. Cette prescription comme la recherche des dispositions propres à éliminer les graviers, et que les essais ont permis d'arrêter, entraîne un abaissement sérieux du radier devant la prise et du seuil du barrage fixé à la cote 435,00.

Le mur guideau prolongeant en amont la pile rive droite a pour but de créer un courant déviant automatiquement les matériaux charriés sur les passes centrale et rive gauche, seules ouvertes en service normal de l'usine. Les vannes de la passe rive droite seront donc habituellement fermées, même en temps de crues ; elles s'ouvriront jusqu'à la cote 442,50 environ pour libérer les corps flottants accumulés devant la prise ou pour opérer des chasses destinées, soit à évacuer les matériaux, éventuellement déposés dans la chambre de tranquillisation précédant la prise d'eau, soit à rétablir une situation créée dans le lit amont par une crue accidentelle.

Le barrage est suivi d'un dispositif amortisseur avec radier à contre-pente.

La prise d'eau

La prise d'eau comporte deux entrées de 4,0 m de haut et 30 m de large, partagées chacune par un mur médian et pro-

Fig. 9.
Barrage et prise d'eau,
coupe longitudinale.
Echelle 1 : 1200.

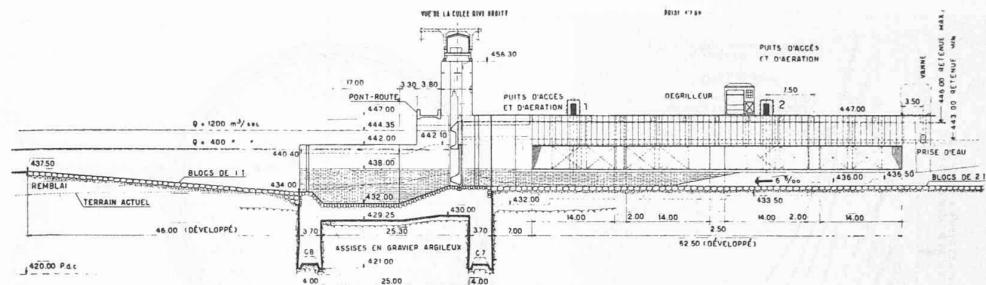


Fig. 10. — Barrage et prise d'eau, coupes transversales. — Echelle 1 : 1200.

longées par des canaux dont la section diminue progressive-
ment jusqu'au raccordement à la galerie d'aménée. La hauteur de son seuil par rapport au radier a été déterminée par la double condition d'éviter l'intrusion de matériaux dans la dérivation et d'évacuer ces matériaux automatiquement par les pertuis du barrage.

L'entrée de la prise est protégée par une grille fine avec dégrilleur mécanique, et des batardeaux permettent d'isoler les ouvrages daval en cas de révision ou réparation.

Galerie d'aménée

Tenant compte qu'une seule galerie coûte moins cher que deux à vitesse de l'eau égale, à la complication de l'exécution d'une deuxième galerie, la première étant en service, la solution d'une seule galerie de diamètre relativement réduit a été retenue.

En effet, avec le diamètre choisi, en première période de fonctionnement, les pertes de charge sont très faibles, soit de 1,80 m pour le débit maximum de 132 m³/sec. En seconde période, elles augmentent, pour atteindre 4,15 m lors du débit maximum d'équipement de 200 m³/sec. Cet accroissement peut être justifié en relevant que les fortes pertes de charge correspondent aux mois d'été, où l'énergie est de moindre valeur, et que la production d'hiver, la plus intéressante, n'est pas sensiblement affectée par la diminution de diamètre. Ce principe admis, le calcul de la courbe totalisant la somme des charges d'intérêt et d'amortissement du capital engagé et de la valeur de l'énergie des six mois d'hiver présente un minimum pour un diamètre compris entre 7,70 et 7,80 m, et, considérant les possibilités d'exécution actuelles des galeries et la résistance des revêtements aux usures même à grande vitesse, le diamètre de 7,75 m a été finalement adopté (fig. 12 et 12a).

Dessableur

Il a déjà été dit que les gros graviers sont déviés par la disposition même de la prise d'eau, et que seuls pénètrent dans la dérivation les graviers fins et les sables en suspension dans l'eau.

Toutefois, il faut prévoir de fausses

maneuvres possibles des vannes du barrage, desquelles pourraient résulter une entrée accidentelle de matériaux, d'une part, et d'autre part veiller à l'élimination des sables déposés sur le radier de la galerie.

A cette fin, un dégraveur-dessableur, dont l'étude a été confiée à M. Henri Dufour, ingénieur-conseil à Lausanne, a été inséré à 2 km de la prise, à l'endroit de la fenêtre d'attaque utilisée pour les travaux de la galerie. Il comporte des rigoles aboutissant à des orifices de purge, suivis de tuyaux coudés, terminés par des vannes de réglage et un canal d'évacuation, qui élimine automatiquement les matériaux charriés par l'eau ou flottant à faible hauteur au-dessus du sol. Des réservoirs-préleveurs permettent de contrôler en tout temps la teneur en alluvions de l'eau de purge et de régler en conséquence les vannes du dégraveur, qui ne fonctionne, bien entendu, qu'en période où l'état du Rhône le rend nécessaire.

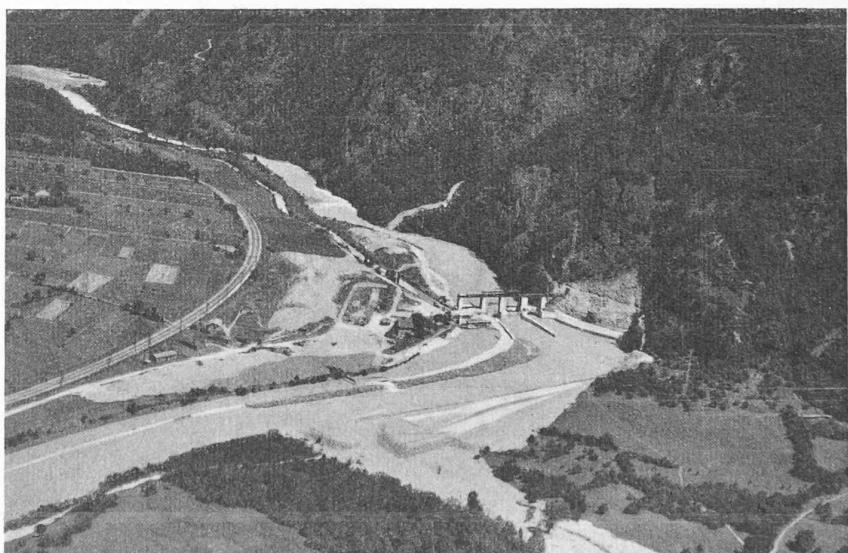


Fig. 11. — Vue aérienne de la région du barrage.

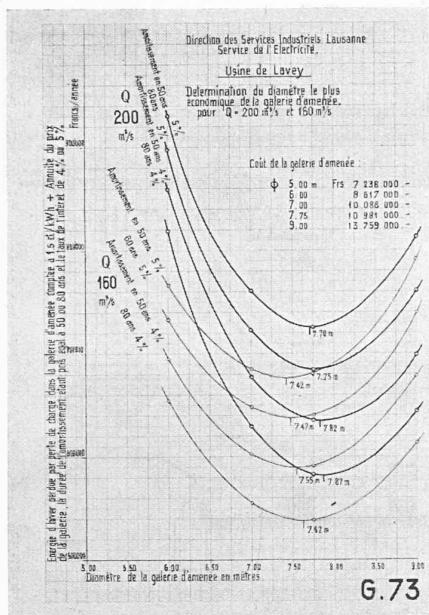


Fig. 12. — Détermination du diamètre le plus économique de la galerie d'aménée.

Chambre d'équilibre

La chambre d'équilibre est l'aboutissement aval de la galerie. Divers types de chambres ont été étudiés pour satisfaire aux données fondamentales de l'équipement, en considérant simultanément les oscillations en masse, la protection de la galerie contre les coups de bélier, les exigences de l'exploitation et les conditions de stabilité de réglage, tout en cherchant à réduire le cube des excavations.

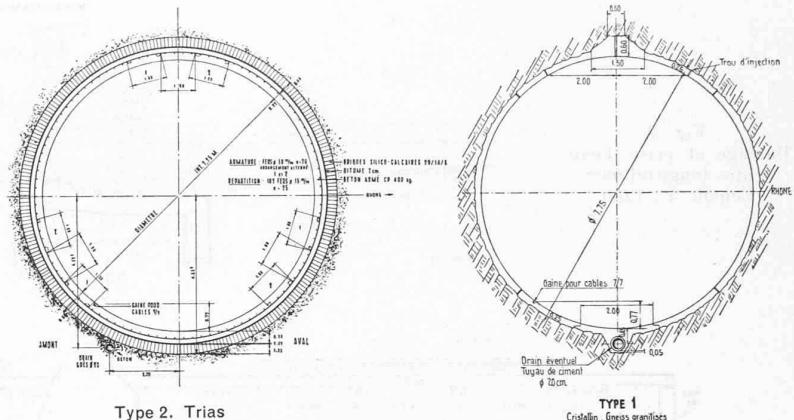
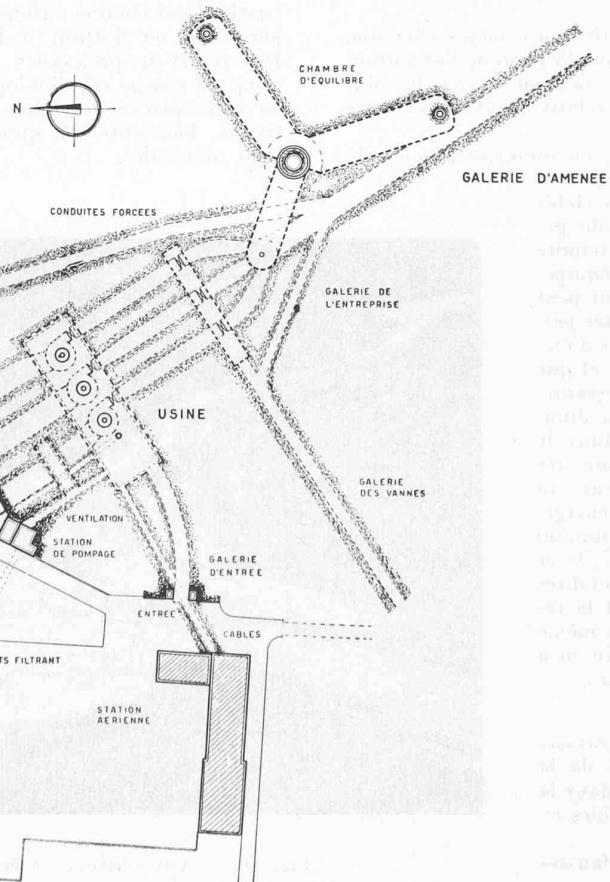


Fig. 12 a. — Profils-type de la galerie d'aménée. — Echelle 1 : 200.

Elle est du type différentiel. La grande longueur de la galerie, et par ses dimensions la grosse masse d'eau qu'elle contient, donne une importance particulière à une chambre d'équilibre très soigneusement étudiée pour assurer à l'usine une stabilité de marche capable de répondre à tous les desiderata d'une exploitation moderne*. Des essais sur modèles très poussés ont été effectués par le *Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de Lausanne*, sous la direction des professeurs A. Stucky et D. Bonnard et ont permis d'obtenir des résultats excellents. Complètement creusée dans le rocher, elle constitue une excavation de très grandes dimensions (fig. 12 b et 12 c).

En tête des conduites forcées, des vannes-papillon, situées dans la chambre des vannes, permettent d'isoler les conduites, en cas de nécessité, des ouvrages situés en amont.

Canal de fuite

Les courbes de remous obtenues par le calcul ont permis de déterminer le niveau de l'eau à la sortie de la centrale en fonction du débit du Rhône et du niveau au point de restitution (voir fig. 13).

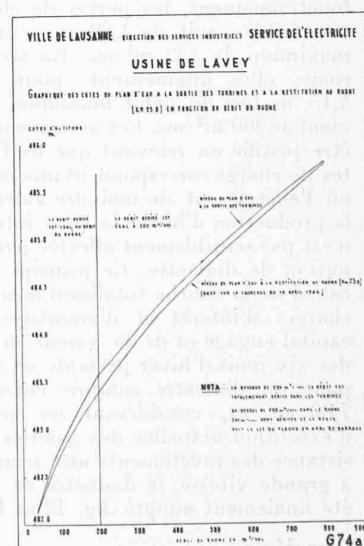


Fig. 43.
Graphique des cotes du plan d'eau
à la sortie des turbines et à la
restitution au Rhône.

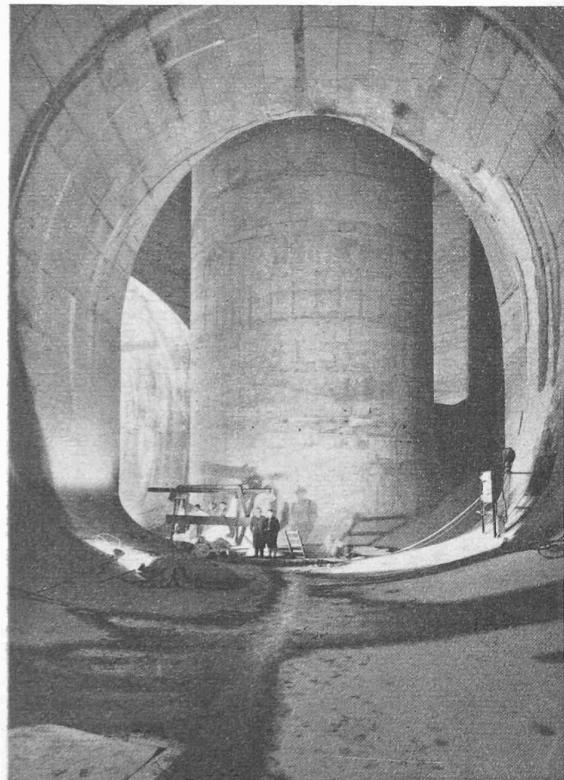


Photo J. Mühlhauser

Fig. 12 c. — Chambre d'équilibre.
Le puits central vu de l'un des épanouissements.

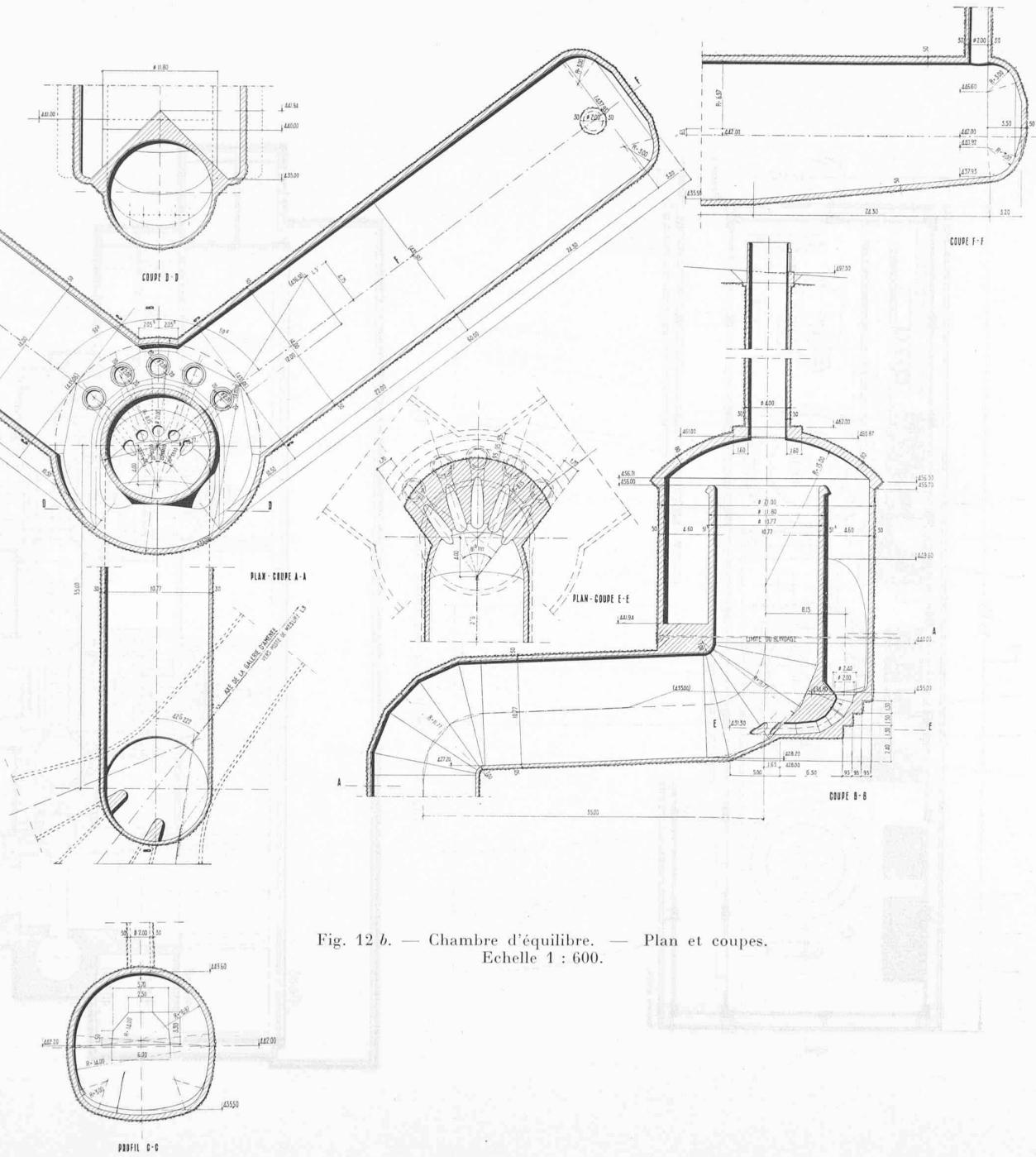


Fig. 12 b. — Chambre d'équilibre. — Plan et coupes.
Echelle 1 : 600.

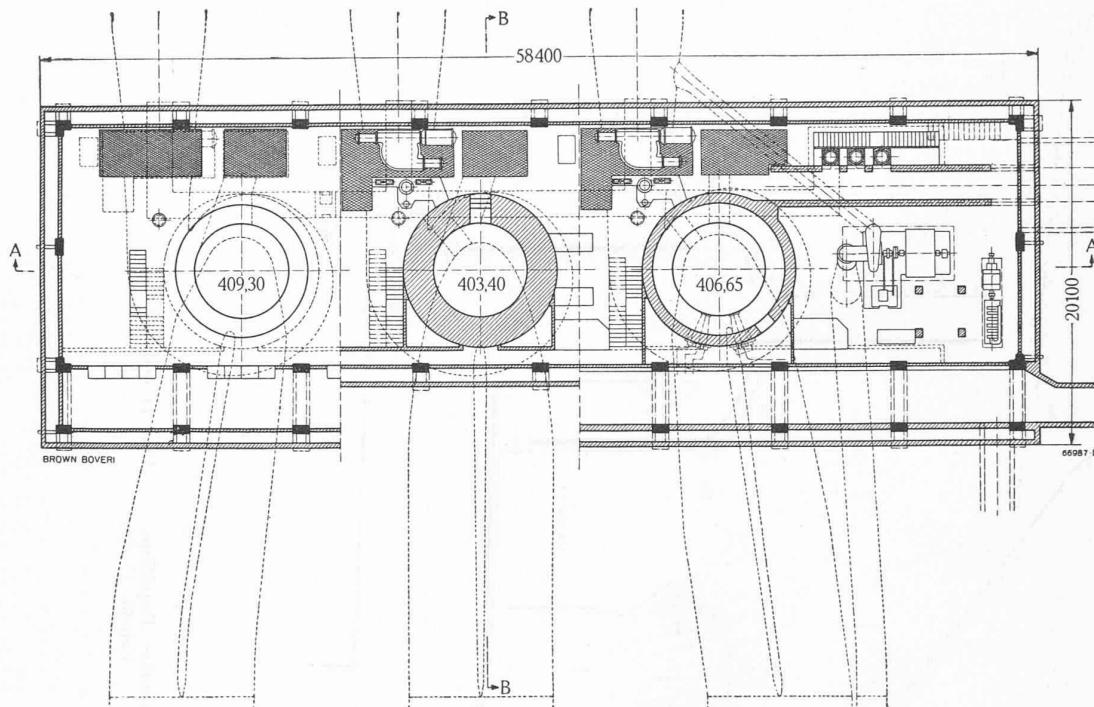


Fig. 15. — Salle des machines souterraine. — Plan.

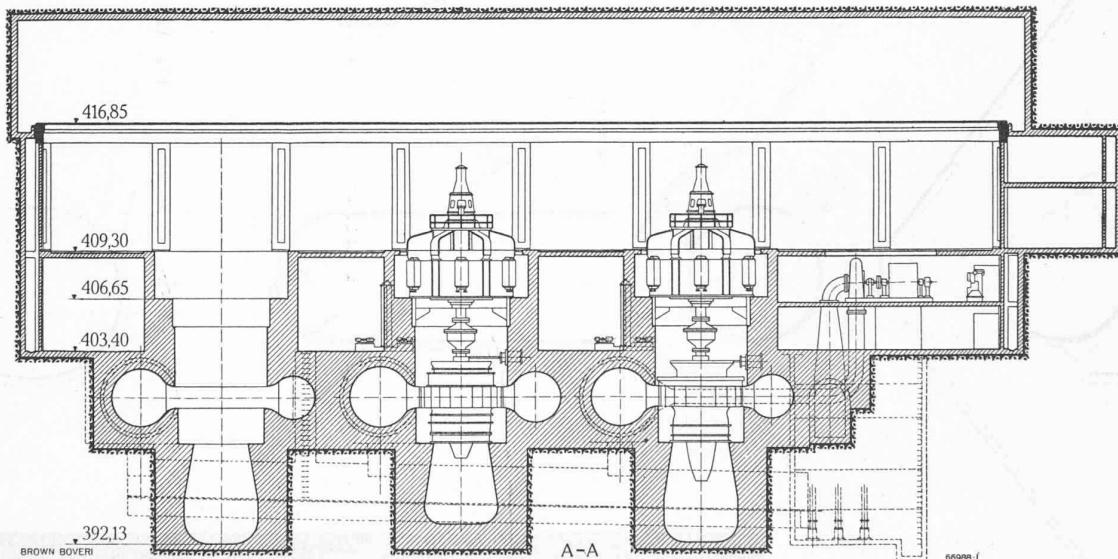


Fig. 16. — Salle des machines souterraine. — Coupe longitudinale.

Le bâtiment extérieur est d'un cube imposant, qui, quelquefois laisse croire qu'il s'agit de l'usine elle-même. Il n'en est rien. Ses trois parties correspondent à trois fonctions nettement déterminées.

Le centre renferme l'appareillage électrique à 6000 et 10 000 volts ; c'est là qu'aboutissent les câbles venant des machines.

L'aile est est consacrée aux services d'entretien, atelier de réparations, tour de décuvage, dépôt de matériel et locaux pour le personnel : vestiaires, douches, infirmerie, réfectoire, etc.

L'aile ouest, elle, renferme la salle de commande, communément appelée tableau, au deuxième étage. Au rez-de-chaussée, les locaux à côté du poste extérieur sont réservés aux services dits auxiliaires, centrale d'air comprimé, sous-station, local pour batteries, alors que le côté sud constitue le groupe administratif : bureaux, archives, central téléphonique, salle des commissions.

La centrale

Située près de Lavey, la centrale est entièrement souterraine. La figure 14 fait ressortir la disposition des conduites forcées partant de la chambre d'équilibre, de l'usine, des tunnels de sortie de l'eau et du canal de fuite, tous ouvrages disposés en ligne droite, ainsi que celle des bâtiments extérieurs contenant les services auxiliaires et du poste extérieur à haute tension.

Le matériel mécanique et électrique de la centrale est introduit par un tunnel d'accès principal. Un tunnel de moindres dimensions est destiné à recevoir les câbles et sert d'entrée d'air de ventilation de la caverne. Une galerie partant de la partie supérieure de la salle des machines permet la sortie de cet air et constitue, en même temps, une issue de secours pour le personnel.

La disposition générale de l'usine proprement dite est donnée par les figures 15, 16 et 17. Elle a été étudiée de manière

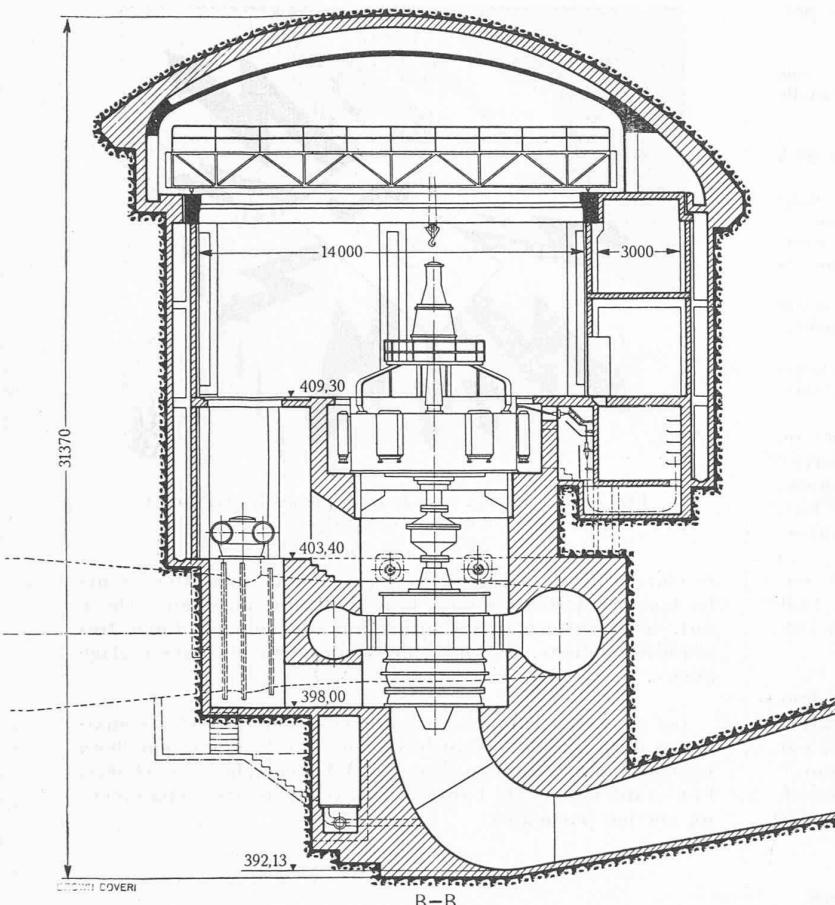


Fig. 17. — Coupe transversale de la salle des machines souterraine. Les alternateurs sont encastrés dans le sol. Seuls le croisillon supérieur et les excitatrices sont au-dessus du plancher de la salle des machines. Cette disposition des alternateurs a permis de réduire au minimum la hauteur du crochet du pont roulant.

à réduire le cube des excavations au minimum compatible avec les conditions d'un montage ou démontage correct des machines et les exigences de l'exploitation. Tout l'appareillage électrique est placé d'un côté, contre une paroi latérale, directement au-dessus de l'arrivée de la galerie des câbles, ainsi que certains locaux accessoires nécessaires au service.

L'accès aux différentes parties de l'usine à surveiller est facile et les pièces lourdes du matériel peuvent toutes être manœuvrées par les deux ponts roulants de 60 tonnes chacun, pouvant travailler soit séparés, soit jumelés.

Les eaux de fuite et d'infiltration sont conduites dans des canaux collecteurs vidangés par des pompes d'épuisement à commande électrique, puis refoulées dans une conduite d'évacuation située dans la galerie supérieure de ventilation.

Lors de réparation ou révision des turbines, l'usine peut être isolée des eaux d'amont par les vannes de garde des groupes, éventuellement les vannes-papillon d'entrée des conduites, et des eaux daval par des batardeaux dans les tunnels succédant aux aspirateurs.

L'équipement électro-mécanique

La partie mécanique

Après avoir examiné les diverses possibilités d'équipement, l'étude générale prévoyait trois turbines Kaplan, à axe vertical, de $66 \text{ m}^3/\text{sec}$ chacune, tournant à 214 tours-minute, solution la plus économique et la plus rationnelle, compte tenu des variations de débit selon la saison, des exigences d'installation et du programme d'exécution.

Il a été reconnu que la solution à trois groupes était la meilleure. Un plus grand nombre aurait conduit à un coût plus élevé des installations et de la centrale. Par ailleurs, un

groupe unique étant exclu, une usine à deux unités électrogènes ne présentait pas la souplesse et la sécurité de service indispensables et, de plus, ne se prêtait pas à une construction en deux étapes.

En ayant tenu compte des données générales de l'installation, des courbes de débit, chute nette et brute, cela conduit à la puissance de 33 000 CV, proposée par les constructeurs consultés.

Un groupe auxiliaire à axe horizontal, de 1500 CV, a été installé ; il alimente les services auxiliaires de la centrale en cas de manque total de courant extérieur. Sa conduite, de faible diamètre, prend son départ sur l'une des conduites forcées principales, immédiatement avant la vanne de garde.

La position des turbines principales, à une cote inférieure au niveau aval, est imposée par les conditions hydrauliques, pour éviter les usures par cavitation. A l'étage des turbines se trouvent les vannes de garde et les servomoteurs de commande du vannage, tous organes pouvant momentanément être noyés sans inconvenient majeur.

Les organes délicats des régulateurs automatiques de vitesses, le groupe auxiliaire de secours et toute la partie électrique sont placés au-dessus de la cote des hautes eaux normales. Il faudrait donc la conjonction d'un accident aux turbines, provoquant une fuite d'eau, et d'une immobilisation accidentelle des pompes d'épuisement survenant en période de hautes eaux exceptionnelles, pour entraîner un arrêt de l'usine ; hors cette accumulation peu probable d'événements malheureux, le fonctionnement, au moins partiel, de l'usine est assuré.

Le démontage des turbines, des vannes et du groupe de secours peut s'effectuer par les ponts roulants, dont la disposition est choisie de manière à limiter au minimum la hauteur totale de la salle des machines.

La partie électrique

Il s'agissait, avant de fixer les éléments électriques de l'usine proprement dite, de résoudre un certain nombre de problèmes généraux qui peuvent être résumés comme suit :

Les *jonctions de l'usine avec l'extérieur*, que doivent-elles être ?

Pour répondre à cette question, il faut constater qu'il existait, au Bois-Noir :

- une ligne de transport à 50 000 volts, qui aboutissait à Pierre-de-Plan, à capacité de transport réduite ;
- une liaison avec le réseau d'EOS, à 135 kV ;
- que l'alimentation de la région de Saint-Maurice s'effectuait à 6000 volts, tension du réseau local !

En outre, il fallait observer les conditions suivantes :

La « ligne directe » reliant Lavey à Pierre-de-Plan doit être à même de transporter la production complète de Lavey ; bien plus, elle doit avoir les caractéristiques des lignes de grand transport de l'EOS et devenir ainsi un maillon de l'interconnexion, un maillon qui ne doit pas constituer un étranglement.

Lavey doit, tant pour bénéficier d'un courant de complément ou de secours que pour livrer en d'autres moments la quantité d'énergie produite supérieure aux besoins de son réseau, être reliée au réseau de l'EOS, dont une des lignes était d'ailleurs déjà utilisée pour le transport à Lausanne de l'énergie produite au Bois-Noir, lequel est alternatif triphasé.

Le réseau d'EOS, auquel Lavey doit pouvoir se raccorder à une tension variable de 125 à 140 kV au droit de l'usine, le réglage de la tension du réseau d'EOS s'effectuant en maintenant constante la tension de 125 kV à Romanet ; il était donc indiqué de prévoir, pour la nouvelle ligne directe, les caractéristiques identiques aux lignes les plus récentes d'EOS et la tension d'équipement de 150 kV.

Les éléments ci-dessus vont conditionner le schéma électrique général.

Le schéma électrique général. — Il était nécessaire de prévoir :

- 2 départs assurant la jonction avec le réseau d'EOS ; soit la première jonction avec l'amont, la Salanfe sise à Miéville et le poste de Chandoline « entrée » ; la seconde avec le poste de Saint-Tiphon « sortie » ; ce réseau impose une variation de tension, à l'usine, de 25 à 30 %.
- 1 départ, ligne S. E. L. 135 kV mentionnée plus haut, dont le réglage de la tension doit suivre ses lois particulières.
- 2 départs à 60 kV alimentant 2 lignes indépendantes, c'est-à-dire 1 ligne S. E. L., ligne de grosse distribution dans la partie aval de la vallée du Rhône.
- 1 ligne S. R. E., interconnexion à 60 kV avec la Société romande d'Électricité au passage de sa ligne Sembrancher-Vouvy, à la hauteur de Lavey.
- L'alimentation du réseau local à 6,3 kV, dont l'importance peut devenir très grande, à tension pratiquement constante

On voit donc, sans faire intervenir les problèmes de schéma de la centrale proprement dite, nous avons, à Lavey un *vrai carrefour de lignes de transport* à différentes tensions, tensions dépendant des lignes elles-mêmes, et que, de ce fait, il va en résulter un ensemble complexe et de grande envergure (fig. 18).

Ce qui précède explique les difficultés à vaincre pour conserver un schéma électrique aussi simple que possible, tant pour réduire les frais de premier établissement que pour réaliser la sécurité maximum de service.

Le réglage de la tension. — Les liaisons avec EOS imposent des limites de réglage très étendues et dont la loi de variation est complètement différente de celle des autres départs, par exemple de celui de la ligne S. E. L. 135 kV. Il est inutile d'énumérer les différentes possibilités de réglage de la tension. Elles ont été étudiées, et successivement abandonnées, pour

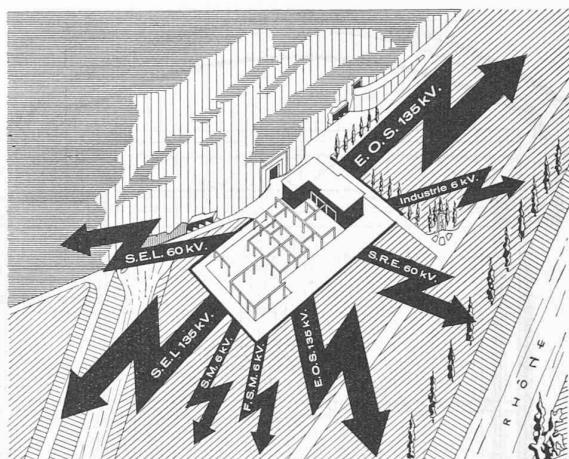


Fig. 18. — Lavey, carrefour de lignes de transport d'énergie électrique.

retenir en définitive la solution qui effectue aux alternateurs les réglages de tension dans toute l'étendue nécessaire. De ce fait, les transformateurs principaux deviennent d'une très grande simplicité. Ils sont à deux enroulements, sans réglage aucun.

Les services auxiliaires. — L'alimentation des services auxiliaires ainsi que du réseau local à 6 kV est assurée par deux transformateurs auxiliaires de 5 kVA, réglables sous charge, l'un étant réserve de l'autre ou pouvant assurer séparément un service particulier.

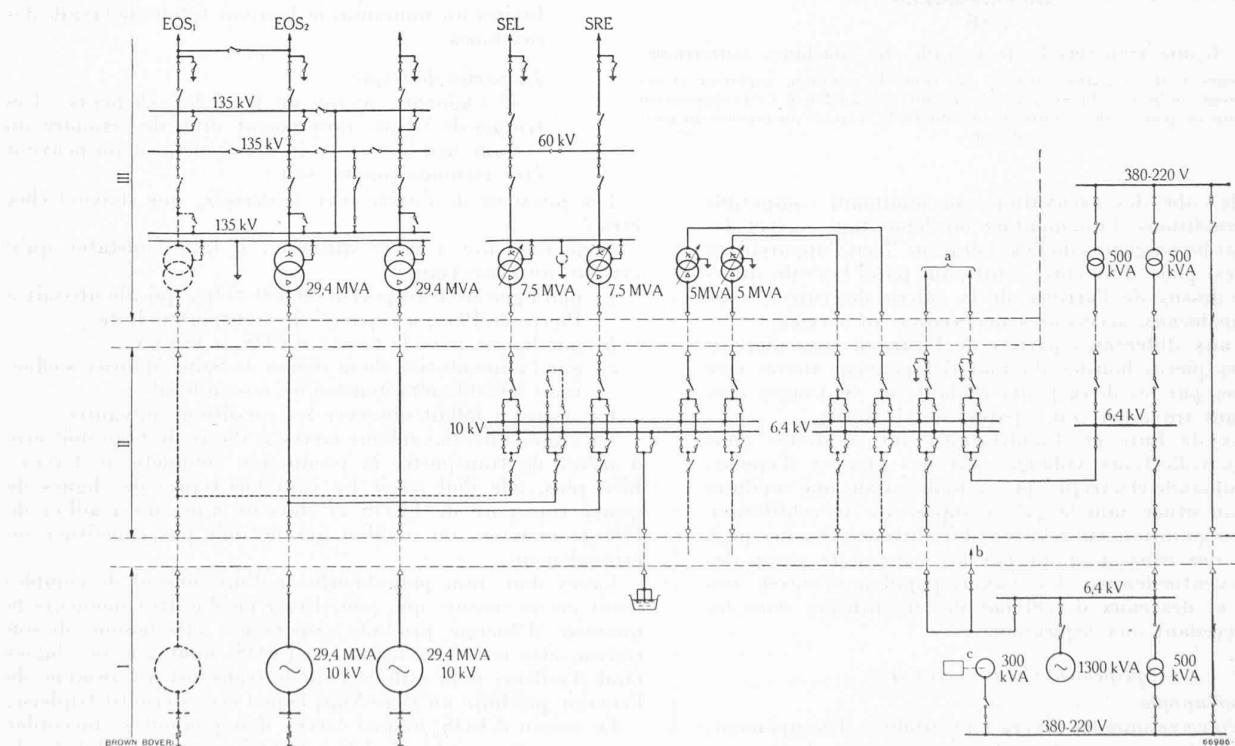


Fig. 19. — Schéma général unifilaire de l'usine de Lavey.

En service normal, deux des alternateurs principaux sont reliés directement chacun à un transformateur élevant la tension à 135 kV. Le troisième alimente simultanément les barres à 135 kV et, par l'intermédiaire des barres à 10 kV et de transformateurs, les départs à 60 et à 6,4 kV. Ce schéma électrique confère à cette installation une grande souplesse d'exploitation et lui permet de remplir les nombreuses conditions qui étaient imposées, tout en assurant la plus grande sécurité de service.

I = centrale souterraine

II = poste de distribution à 10 et à 6,4 kV

III = poste de distribution extérieur

a = lignes de départ pour réseau local

b = ligne de départ pour réseau local

c = groupe de secours entraîné par moteur Diesel

Cependant, un groupe hydroélectrique auxiliaire de 1500 CV, 1300 kVA, a été établi pour remplir des tâches particulières et assurer les services essentiels de l'usine. Les 3 m³/sec d'eau nécessaires à ce groupe sont d'une importance si minime par rapport au débit normal d'un groupe (66 m³/sec) qu'il est branché en dérivation sur la conduite forcée alimentant le groupe I ; son alimentation est cependant assurée même en cas d'arrêt et de révision du groupe I.

La dislocation du matériel électrique. — Une centrale souterraine entraîne surtout la dislocation du matériel électrique entre :

la salle des machines sous rocher,
le bâtiment du poste de commande, à l'extérieur,
le poste extérieur à 135 kV.

Il ne s'agit plus ici d'une simple répartition du matériel entre différents locaux et emplacements adjacents, mais bien de la résolution d'un problème que la distance entre les différents locaux comme aussi des conditions très diverses (par exemple la salle des machines dans le rocher à l'abri de la lumière du jour) obligent à considérer et à régler selon d'autres principes.

Le schéma électrique. — Le matériel, très disloqué géographiquement, comme cela vient d'être relevé, est schématiquement d'une homogénéité remarquable, qu'il vaut la peine de relever par un examen rapide de la figure « Schéma général unifilaire de l'usine de Lavey » (fig. 19).

Ses caractéristiques sont résumées ci-dessous :

Les trois génératrices d'une puissance unitaire de 29 400 kVA alimentent simultanément un double jeu de barres à 10 kV et, par l'intermédiaire de trois transformateurs principaux, un double jeu de barres à 135 kV. De ces dernières partent trois lignes aériennes à 135 kV, dont l'une va directement à Lau-sanne, tandis que les deux autres assurent la liaison avec des réseaux voisins (EOS).

Aux barres à 10 kV sont raccordés deux transformateurs réglables de 7500 kVA chacun alimentant deux lignes aériennes à 60 kV. A ces mêmes barres sont encore branchés deux transformateurs réglables de 5000 kVA chacun alimentant eux-mêmes un double jeu de barres à 6,4 kV. De ces dernières barres partent trois lignes à 6,4 kV pour l'alimentation de centres de consommation peu éloignés de l'usine. Deux transformateurs de 500 kVA pour les services auxiliaires sont également branchés à ces barres à 6,4 kV. L'installation aurait pu être simplifiée en construisant les alternateurs pour 6,4 kV, ce qui aurait permis de supprimer les barres collectrices à 10 kV. On ne l'a pas fait, tout d'abord, parce que les alternateurs auraient été beaucoup plus chers et, ensuite, parce que le coût des câbles de liaison entre alternateurs et transformateurs serait devenu excessif. En outre, le prix de l'appareillage aurait été beaucoup plus élevé, vu l'augmentation des courants de court-circuit qui en serait résultée.

Le schéma de principe de l'usine, tel qu'il a été conçu, permet une très grande souplesse d'exploitation. Il permet aussi de remplir les nombreuses conditions qui étaient imposées et dont les principales sont les suivantes :

Installation à 10 kV

Alimentation des barres à 10 kV par l'une ou l'autre des génératrices, sans interruption de service.

Essai d'un alternateur quelconque sur la résistance hydraulique, sans que l'alimentation des barres à 10 kV soit coupée.

Installation à 135 kV

Alimentation séparée de l'un quelconque des départs par l'un quelconque des alternateurs.

Mise en parallèle de toutes les machines et de tous les départs sur le même jeu de barres, le deuxième constituant une réserve. Alimentation de l'un quelconque des départs par deux alternateurs en parallèle.

Fonctionnement de l'usine en 3 sections — 3 centrales élémentaires — chaque section comprenant un groupe alternateur-transformateur avec barres et un départ.

Arrêt d'une de ces tranches sans interruption de service.

Passage rapide, sans interruption de service, d'un service séparé à un service groupé.

Possibilité, en cas de révision, de remplacer l'un quelconque des disjoncteurs des transformateurs, par le disjoncteur de couplage.

Possibilité d'isoler les deux lignes « EOS » de l'ensemble du poste à 135 kV.

Possibilité de disposer, si c'est nécessaire, de deux jeux de barres auxiliaires.

Installation à 60 et 6,4 kV

Les tensions des départs à 60 kV et à 6,4 kV doivent pouvoir être ajustées indépendamment des variations de la tension des barres à 10 kV. Ces dernières variations, pouvant atteindre $\pm 12\%$ de la tension moyenne, sont obtenues en agissant sur l'excitation des alternateurs et sont nécessaires pour régler la tension des départs à 135 kV.

Services auxiliaires

Maintien dans tous les cas de la tension auxiliaire triphasée 380/220 V, 50 Hz, aussi bien dans l'usine souterraine que dans le bâtiment de distribution.

Normalement, les services auxiliaires sont alimentés par un alternateur de 1300 kVA installé dans l'usine. En cas d'arrêt de cet alternateur, ils sont alimentés par les barres collectrices à 6,4 kV auxquelles ils sont reliés à l'aide d'un disjoncteur de couplage.

Si, à la suite d'une perturbation, la tension à 380/220 V vient à disparaître subitement, un groupe Diesel de secours de 300 kVA entre automatiquement en service.

Enfin, en cas d'avarie sur la ligne de liaison à 6,4 kV entre l'usine souterraine et le poste, cette liaison est remplacée par une liaison directe à 380 V.

Disposition générale. — La disposition générale doit se faire, étant donné le caractère des différents locaux, en limitant au strict minimum l'appareillage électrique dans l'usine souterraine, et en concentrant les différents services à l'extérieur dans le bâtiment du poste de commande, les conditions de sécurité en particulier des services auxiliaires étant, bien entendu, respectées.

On a ainsi centralisé dans le bâtiment du poste de commande toutes les opérations ayant trait à l'exploitation (contrôle de mesure, réglage, signalisation, commande) : du barrage, de la prise d'eau, des groupes hydroélectriques principaux et auxiliaires, de l'appareillage à moyenne tension 10 kV, des services auxiliaires, du groupe de secours, de la résistance hydraulique d'essai, de la station de pompage d'eau de réfrigération, des pompes de sécurité, etc., de la station extérieure à 135 kV.

Seules les manœuvres de mise en marche et de réglage des groupes s'effectuent de la salle des machines. Tous les appareils dont l'accès est fréquent se trouvent disposés de façon à en faciliter l'usage et le contrôle.

La salle de commande a des dimensions très importantes. Sa situation dominant le poste extérieur permet un accès rapide aux installations à 10 kV qui toutes se trouvent dans le bâtiment du poste, un accès rapide au poste à très haute tension adjacent ; un ascenseur est disponible pour le matériel et les personnes ; et un accès également rapide du chef d'usine est possible par la proximité de son bureau.

Un grand tableau lumineux avec pupitres de commande permet d'effectuer, sans erreur possible, les opérations désirées et d'en contrôler l'exécution.

Sous toute la surface de la salle de commande, une salle de répartition des câbles assure le maximum de clarté et d'accessibilité des nombreux câbles des services auxiliaires, de commande, de mesure et de signalisation.

Basés sur ces principes généraux, on a ainsi, dans l'usine électrique souterraine :

Les trois alternateurs principaux à axe vertical de 29 400 kVA, 214 t/min (2 en première étape), accouplés à des turbines Kaplan de 33 000 CV ; un groupe auxiliaire à axe horizontal de 1300 kVA, 600 t/min entraîné par une turbine Francis ; un groupe de secours constitué par un moteur Diesel Sulzer à 4 temps, 350 CV, 600 t/min, accouplé à un alternateur triphasé de 300 kVA, 380/220 V ; l'appareillage indispensable à la mise en marche, au réglage et à la protection des machines susmentionnées.

Deux ponts roulants de 60 t chacun, avec équipement électrique et pouvant travailler séparément ou jumelés à l'aide d'un palonnier d'une force de 115 t, permettent la manutention des parties de machines même les plus lourdes.

Dans le bâtiment extérieur voisin se trouvent l'appareillage à 10 et à 6,4 kV et la salle de commande de l'ensemble de l'installation. On y trouve également la tour de décuvage des transformateurs, l'atelier pour l'entretien et les réparations,

la station de production d'air comprimé, les magasins de matériel, les locaux pour le personnel et les services administratifs.

Dans le *poste extérieur à haute tension* placé à côté du bâtiment sont installés les transformateurs assurant le raccordement avec les lignes de transport du service de l'électricité de la Ville de Lausanne et des réseaux voisins à 135, 60 et 6,4 kV.

Il est intéressant de relever que l'installation des transformateurs principaux en plein air s'est avérée plus avantageuse, tant au point de vue économique qu'au point de vue de la sécurité d'exploitation. En plaçant ces transformateurs dans la centrale souterraine à proximité des alternateurs, on aurait dû assurer leur liaison avec le poste extérieur par des câbles à huile à 135 kV très coûteux et très vulnérables en cas de guerre. D'autre part, l'agrandissement du cube souterrain aurait entraîné une augmentation importante de prix et la présence d'huile aurait constitué un grave danger d'incendie qui ne pouvait être annihilé que par des mesures très onéreuses.

Un *bâtiment des pompes* adossé au canal de fuite contient trois groupes moto-pompes à axe vertical de 43 CV chacun pompant l'eau d'une nappe souterraine. Ces pompes alimentent le réservoir d'eau central de l'installation, réservoir d'où s'écoule, par gravité, l'eau de refroidissement des alternateurs et de leurs paliers porteurs, des transformateurs principaux, etc. Sa contenance est de 300 m³. La résistance hydraulique d'essai, adossée au bâtiment de pompage, est également alimentée par la station de pompage.

III. Recherches et essais

Charriages et alluvions

Le bassin versant du Rhône comporte, cela a été relevé, une part importante de glaciers. Les roches constitutives des Alpes valaisannes et bernoises sont, pour la plupart, de nature granitique, donc extrêmement dures et abrasives.

L'exploitation de l'usine du Bois-Noir avait permis de constater que le Rhône, lorsqu'il est en crue, charrie des quantités très importantes d'alluvions, comprenant tous les calibres : du limon le plus fin aux pierres de 15 à 20 cm de diamètre et même plus.

Des recherches effectuées par l'usine du Bois-Noir au Pont de Collonges, donc dans le tronçon du Rhône correspondant à la zone retenue pour la prise d'eau de Lavey, avaient essayé de préciser les données connues concernant les charriages et de trouver, en particulier, la granulométrie des matériaux solides transportés, en fonction du débit de la rivière. Il était procédé de la façon suivante : une benne d'un type particulier prélevait journalièrement dans la rivière un volume déterminé ; on effectuait la séparation des matériaux solides dont on connaissait ainsi la quantité et on pouvait opérer une certaine classification.

Une étude sur le « Charriage des alluvions dans le Rhône à Evionnaz » fut également établie par M. *Henri Dufour*, ingénieur, chargé d'assurer le dessablage de l'eau dérivée. M. Dufour s'est basé, pour cela, sur les études du Service fédéral des eaux sur le même sujet, particulièrement sur les mesures de Chippis, sur des renseignements obtenus du Service des eaux du canton du Valais, ainsi que d'une documentation déjà étendue sur la matière. Dans ses conclusions, M. Dufour disait :

Il résulte de l'exposé qui précède qu'au printemps et en été, soit du 15 mai au 15 septembre, le volume journalier des alluvions roulées sur le fond du Rhône à Evionnaz peut être de 4000 à 6000 m³, ce qui, pour une densité de 1,8, représente la charge de 720 à 1080 wagons de 10 tonnes. Au moment des crues, avec vagues d'alluvions, ce volume journalier doit être notamment plus élevé.

Les dimensions de ces alluvions vont de celles des galets de 15 cm de diamètre au limon le plus fin, en passant par toute la gamme des graviers et des sables, la majeure partie de ceux-ci étant de nature granitique.

Les études ci-dessus ont permis de décider la construction d'un dessableur « Dufour », dont une description, due à M. Dufour lui-même, a paru dans le *Bulletin technique* du 13 janvier 1951.

La prise d'eau

Les essais du Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'E. P. F.

exécutés sous la direction de M. le professeur Meyer-Peter.

Les données résultant des études pouvaient se résumer ainsi :

L'implantation des ouvrages est donnée par les figures 8 et 11, à l'endroit où le Rhône fait un coude entre un tronçon sensiblement rectiligne dont la pente est de 1,6 % et une partie plus rapide à 6 %. Le barrage est situé après le coude et la prise d'eau immédiatement en amont, sur la rive droite.

La *prise d'eau* proprement dite se compose de deux trompes dont la section d'entrée a 4,0 m de haut et 30 m de large, partagées chacune par un mur médian, et dont les sections varient progressivement jusqu'au raccordement à la galerie d'aménée.

Elle est munie de grilles, de pente 5 : 2, avec dégrilleur, et peut être fermée par des batardeaux.

Le radier devant la prise est à la cote 435,00, le seuil d'entrée à la cote 438,00

L'ouverture de chaque pertuis du *barrage* est réglée par deux vannes pouvant être manœuvrées de manière à obtenir soit séparément, soit simultanément, un déversement et un écoulement inférieur, ou être relevées totalement pour laisser le passage absolument libre.

Le mur guideau prolongeant en amont la pile rive droite a pour but de créer un courant déviant automatiquement les matériaux charriés sur les passes centrale et rive gauche, seuls ouvertes en service normal de l'usine.

Les vannes de la passe rive droite seront donc normalement fermées, même en temps de crues ; elles s'ouvriront jusqu'à la cote 442,50 environ, uniquement pour laisser passer des corps flottants accumulés devant la prise ou pour créer des chasses destinées, soit à évacuer des matériaux éventuellement déposés devant la prise, soit à rétablir une situation créée dans le lit amont par une crue accidentelle.

Le barrage est suivi d'un dispositif amortisseur, cuvette et radiers à contrepointe.

Conditions particulières. — La pente moyenne du lit du Rhône est de 1,6 % en amont de l'ancien barrage, puis d'environ 6 % jusqu'à environ 2200 m ; plus à l'aval, la pente s'accentue encore.

Afin d'utiliser la chute comprise entre l'ancienne prise et la nouvelle, le niveau de la retenue au barrage à construire doit être relevé. Compte tenu de l'importance et de la valeur des terrains inondés, la retenue maximum a été fixée à la cote 446,00.

Toutefois, la diminution de vitesse, créée par la retenue, favorise la formation de dépôts de graviers. La retenue d'hiver doit donc être abandonnée et le niveau au barrage abaissé, selon la fonction qui lie le charriage du Rhône et son débit, compte tenu de la correction du fleuve en amont. En principe, pour éviter un relèvement nuisible du lit, il faut que les cotes en amont de l'ancien barrage restent celles qu'on obtient avec le régime actuel pour tous les débits susceptibles de charrier des matériaux solides, et les crues doivent, bien entendu, être évacuées sans créer de remous.

Les essais de Zurich furent entrepris pour s'assurer que les hypothèses avancées étaient bien confirmées par les faits et que les ouvrages, tant par leur position que leurs dimensions et leur utilisation future, n'aient aucune influence défavorable sur le comportement du fleuve en amont.

Les autorités concédantes, tant valaisannes que le Service fédéral des eaux, demandèrent donc d'apporter la preuve préalable que la prise d'eau pouvait être construite pour répondre aux conditions rappelées ci-dessus. Corrélativement, ils devaient montrer que les dispositions pratiques, prises

pour y satisfaire, pouvaient l'être en évitant l'entrée de graviers dans la galerie d'aménée.

Il s'agissait donc de reconstituer, en modèle, le fleuve sur une très grande longueur, 4 km, et de reproduire le jeu des débits et charriages de matériaux tel qu'il se produit dans la nature au cours d'années hydrologiquement très variables.

Le modèle représentait le fleuve sur environ 3700 m en amont du nouveau barrage et 300 m en aval. Il a été construit à l'échelle de 1 : 100, suffisante pour l'étude de tout ce qui concerne le charriage, l'atterrissement et l'entrée des matériaux charriés dans les ouvrages de prise.

Le premier travail fut de reconstituer l'*ancien règlement de barrage*.

Simultanément, on a déterminé la *loi de charriage du Rhône en amont de l'ancienne prise* avec le fleuve dans son état actuel. Le calcul et les essais, à débit constant et selon variation chronologique des débits, a permis d'établir que cette loi est comprise entre les valeurs suivantes :

Pour un débit du Rhône égal à 300 500 800 m³/sec
Le débit solide est compris entre 600 3700 10 000 et 1400 5400 12 700 m³/jour

Lorsque le débit du Rhône est inférieur à 200 m³/sec, il n'y a pas de matériaux roulés ; le fleuve commence à charrier des matériaux solides entre 200 et 300 m³/sec.

Ces données de base ainsi réunies, on a recherché un *règlement provisoire pour le nouveau barrage*.

L'étude de la *forme à donner à la prise pour éviter l'entrée de graviers* a démontré que la situation de cet ouvrage était très favorable, car la pente transversale de la surface liquide dévie les matériaux charriés vers le centre de courbure et les éloigne de l'entrée ; et l'affouillement stable produit à la partie extérieure du coude permet d'abaisser le seuil à l'entrée de la prise, ce qui permet d'en diminuer la largeur. Elle a également démontré qu'un barrage à trois passes égales convenait.

On a tout d'abord étudié, sur le modèle, quelles dimensions il convient de donner aux passes pour satisfaire aux conditions imposées par le charriage des matériaux, puis on a déterminé la cote du seuil de façon à pouvoir évacuer les plus grandes crues sans outrepasser le règlement, ainsi que les dimensions du mur guideau de protection de l'entrée.

Sans que les lois de manœuvre proprement dite des vannes des trois passes aient été déterminées, on peut fixer les *principes suivants*, à observer pour que les conditions de bonne évacuation soient obtenues :

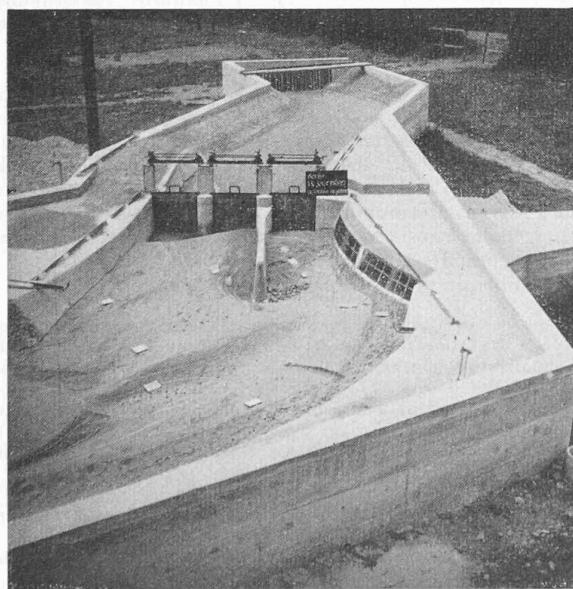


Fig. 21. — Essais sur modèles réduits exécutés au Bois-Noir.
Vue générale de l'installation.

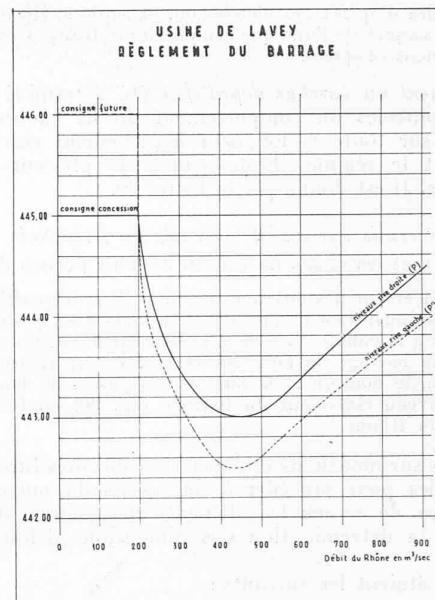


Fig. 20. — Règlement du barrage.

Les vannes de la passe rive droite sont normalement fermées lorsque l'usine est en exploitation. Si le Rhône amène des corps flottants en quantité importante, on pourra baisser la vanne supérieure jusqu'à la cote 442,50 environ.

Le débit, non utilisé par l'usine, sera évacué le plus longtemps possible par la passe centrale, en combinant le jeu des deux vannes, de manière à laisser passer, selon les besoins, les matériaux charriés et les corps flottants.

En cas de grandes crues, la passe de gauche entrera à son tour en action.

La vanne inférieure de la passe droite ne sera ouverte que



Fig. 22. — Essais sur modèles réduits exécutés au Bois-Noir.
Aspect de la retenue après un charriage en année moyenne.

lorsqu'il s'agira d'opérer des chasses ou, exceptionnellement, dans le cas où les vannes de l'une quelconque des autres passes seraient accidentellement bloquées.

Le règlement du barrage définitif a été déterminé par des essais et contrôles du comportement du lit en amont du barrage et sur toute la longueur actuellement corrigée, en reproduisant le régime chronologique de plusieurs années consécutives. Il est donné par la figure 20.

Les essais sur modèle exécutés au Bois-Noir

Les études et les essais de Zurich avaient permis de fixer :

- 1^o L'emplacement des ouvrages de prise, leur disposition générale, les dimensions de l'entrée de la dérivation et son raccordement à la galerie d'aménée, la hauteur des seuils et radiers jusqu'au barrage, la longueur et la cote supérieure du mur guideau, le nombre et la largeur des passes du barrage.
- 2^o Le nouveau règlement du barrage (fig. 20) en fonction du débit du Rhône.

Des essais sur modèle de dimensions suffisantes furent jugés indispensables pour procéder à des essais d'écoulement au barrage, afin de réunir les éléments nécessaires au calcul exact et à la détermination des dimensions définitives de l'ouvrage.

Les buts étaient les suivants :

- 1^o Ecoulement au travers du barrage du débit non dérivé, permettant de déterminer la meilleure forme à donner à la cuvette aval.
- 2^o Détermination des niveaux et de la répartition des pressions sur les piles et le mur guideau pour tous les régimes intéressants (retenue, évacuation des débits entre 200 m³/sec et grandes crues, chasse par la passe de droite, cas accidentel où l'évacuation devrait se faire par deux passes quelconques, la troisième étant supposée bloquée, etc.).
- 3^o Répartition des pressions sur les piles lors de la réparation d'une vanne, lorsque les batardeaux de protection sont en place.
- 4^o Détermination du règlement de manœuvre des vannes pour l'évacuation du débit non dérivé de manière à produire le minimum d'érosion dans le bassin amortisseur aval.

Le modèle fut établi à l'échelle du 1 : 25 sur les terrains de l'usine du Bois-Noir. Ce mode de faire permettait de disposer sans difficulté de toute la place voulue. L'eau nécessaire aux essais était dérivée du canal de décharge du Bois-Noir et y était restituée, une installation de pompage étant ainsi économisée. L'usine était mise à contribution dans toute la mesure du possible, donc maximum d'économie. En fait, toutes les installations mécaniques du modèle furent construites par le Bois-Noir qui fournit les aides nécessaires aux essais. Ceux-ci s'effectuèrent sous la conduite et la responsabilité du Laboratoire de recherches hydrauliques de l'E. P. F. de Zurich, qui avait effectué les premiers essais.

Les essais de longue durée précisèrent, comme on l'attendait, les données nécessaires à la construction des éléments du barrage et de la prise d'eau. Cela permit notamment de supprimer tous les travaux d'enrochements dans le lit de la rivière en aval des ouvrages.

Ils confirmèrent la nécessité d'un dessableur dans la galerie d'aménée et l'importance de celui-ci.

Le règlement du barrage fut précisé et le mode de faire pour les vidanges, très variables suivant l'hydraulique des années et des charriages qui en résultent, établi.

Les figures 21 et 22 se rapportent à ce modèle.

La chambre d'équilibre

Les essais du Laboratoire hydraulique de l'Ecole polytechnique de Lausanne
exécutés sous la direction des professeurs A. Stucky et D. Bonnard.

Une brève mention de cet ouvrage a été faite plus haut, dans le chapitre traitant les organes principaux de génie civil.

Rappelons que le but principal d'un tel ouvrage est de réfléchir les ondes de coup de bâlier, qui prennent naissance

dès qu'une variation du régime d'écoulement a lieu aux turbines. Simultanément, la chambre d'équilibre forme un volant d'eau entre le débit amené par la galerie et celui demandé par les turbines. Elle est conçue de façon à amortir rapidement les oscillations qui prennent naissance entre la réserve d'eau située à la prise et celle contenue dans la chambre.

Après avoir été étudiée et concrétisée par plusieurs types, il était nécessaire d'effectuer, par des essais, la discrimination des différents modèles étudiés et de trouver la chambre remplissant les conditions imposées par l'exploitation avec des dimensions les plus réduites, donc de coût minimum.

Le Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne fut chargé de ces recherches.

Il fallait notamment effectuer les essais permettant :

- a) La vérification du volume de l'expansion supérieure en cas de fermeture totale des turbines.
- b) La détermination de la cote minimum du plan d'eau dans la chambre à la suite des manœuvres d'ouverture successives données par le programme d'exploitation.
- c) L'étude du comportement de la chambre à la suite de manœuvres alternées. Ouvertures données suivant immédiatement une fermeture partielle ou totale (selon le programme d'exploitation).
- d) L'étude de l'amortissement de l'oscillation en masse après une manœuvre de fermeture ou des manœuvres compatibles avec l'exploitation.
- e) L'étude des ondes de translation éventuelles dans les chambres d'expansion.

Ce programme fut complété par la suite par des essais destinés à servir de base au calcul de stabilité de réglage pour des variations de puissance instantanées de 10 % de la puissance maximum :

lors de la fermeture instantanée totale des trois groupes (le cas de déclenchement de l'usine) ;
lors de l'ouverture successive des trois groupes en 12 minutes ;
l'ouverture instantanée d'un groupe consécutivement à une fermeture totale et cela dans différentes conditions ;
d'autres cas encore ont été envisagés.

Il s'agissait donc, en résumé, d'effectuer l'examen détaillé du fonctionnement de la chambre telle que prévue et, cas échéant, l'exécution d'essais portant sur un ou plusieurs modèles de la chambre modifiée à la suite des premières constatations, essais dont les résultats devaient permettre de proche en proche le choix de la solution la meilleure. Celle-ci devait assurer, avec le volume minimum d'excavation, une grande sécurité d'exploitation, tant en ce qui concerne les niveaux extrêmes de l'eau dans la chambre (débordement supérieur ou entrée d'air dans la conduite forcée) que l'amortissement rapide des oscillations en masse.

L'étude sur modèle d'une chambre d'équilibre nécessite la construction à échelle réduite non seulement de la chambre d'équilibre proprement dite, mais aussi de la retenue amont, de la galerie d'aménée en charge, d'une fraction des conduites forcées et de tout un dispositif de vannage tenant lieu des divers groupes de l'usine. L'oscillation en masse, objet de l'étude, est en effet conditionnée par les caractéristiques de l'aménagement considéré dans son ensemble dont il convient donc de reprendre fidèlement les diverses influences.

L'ensemble du dispositif expérimental comportait :

- 1) Une canalisation d'alimentation reliant la station de pompage du laboratoire au bassin amont du modèle. Sur cette canalisation pouvait être monté un diaphragme pour jaugeage des débits.
- 2) Un bassin amont à niveau maintenu constant par goulottes déversantes.
- 3) La galerie d'aménée en charge de 100 m de long et 400 mm de diamètre.
- 4) Le modèle de chambre proprement dite.
- 5) Les conduites forcées et les vannes tenant lieu des obtuseurs des turbines.
- 6) Les canalisations de restitution de l'eau au circuit du laboratoire.

Les essais étant effectués sur un premier modèle, les résultats en furent utilisés pour déterminer les caractéristiques

fondamentales du modèle suivant. On passa ainsi successivement jusqu'au modèle 4 qui, par rapport au modèle précédent, était une disposition identique dans sa conception générale (fig. 23). Toutefois, on avait réalisé fidèlement les formes imposées par les conditions topographiques et les raisons d'ordre constructif (fig. 24, 25 et 26).

On put ainsi serrer de très près le problème du type de l'ouvrage, de la répartition en altitude des volumes des puits et épanouissement, fixer la cote du déversoir et la section du by-pass.

Les conclusions générales des essais étaient en substance les suivantes :

L'étude expérimentale de la chambre d'équilibre de l'usine de Lavey a permis de déterminer sans risque d'erreur appréciable les

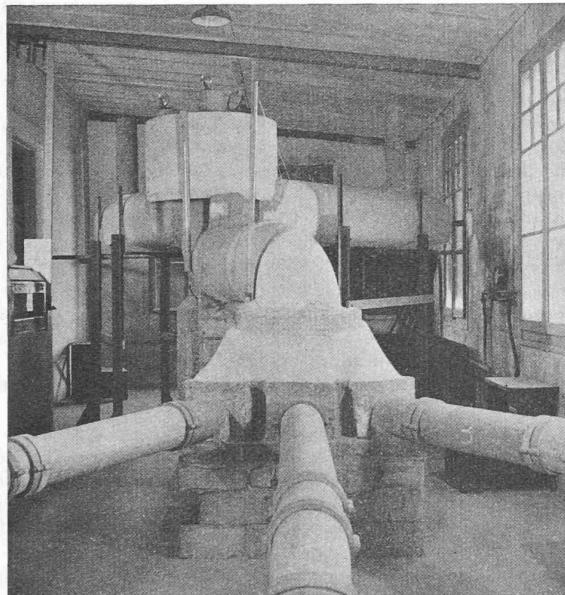


Fig. 24. — Modèle de la chambre d'équilibre.
Vue générale d'aval.

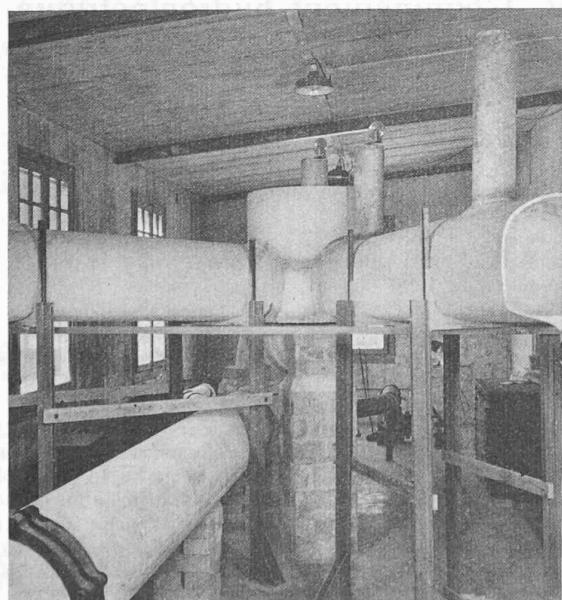


Fig. 25. — Modèle de la chambre d'équilibre.
Vue générale d'amont.

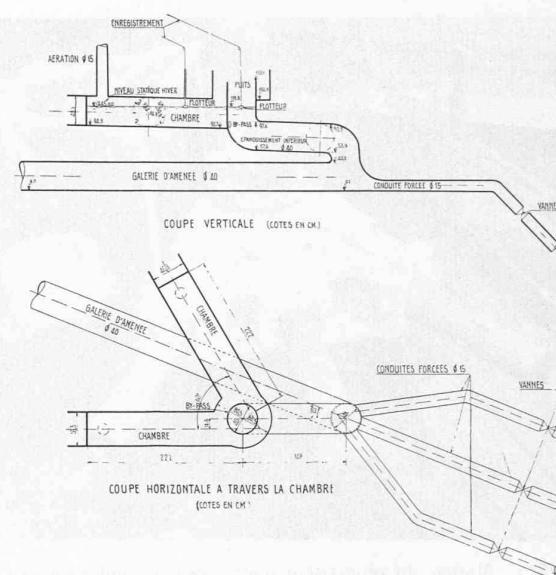


Fig. 23. — Modèle de la chambre d'équilibre.
Echelle 1 : 100.

dimensions et dispositions d'un ouvrage donnant entière satisfaction avec le minimum de volume d'excavation.

La chambre d'équilibre qui, dans toutes les conditions prévues de niveaux statiques et de manœuvres, permet d'obtenir la protection de la galerie d'aménée contre le coup de bâlier, tout en étant le siège d'oscillations en masse convenablement limitées en amplitude et rapidement amorties, est du type franchement différentiel complétée par un épanouissement inférieur.

En adoptant cette solution, on limite le cube des excavations au minimum tout en assurant une grande sécurité d'exploitation. L'ouvrage est largement dimensionné pour les manœuvres d'ouverture si le temps minimum de mise en marche de l'usine ne descend pas au-dessous de celui prévu.

La section du by-pass indiquée aux enregistrements du modèle 4 doit être considérée comme approximative ; la détermination exacte de l'orifice à choisir en vraie grandeur ne peut résulter en toute rigueur des essais. Il faut prévoir la possibilité de régler les dimensions de cette ouverture sur l'ouvrage lors de la mise en exploitation de l'usine.

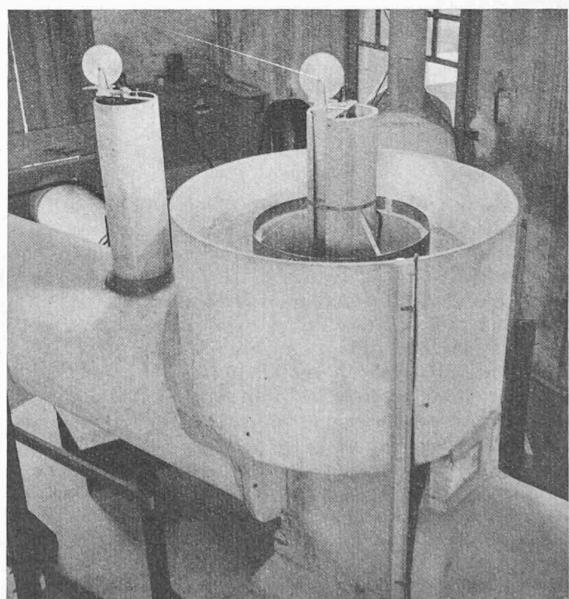


Fig. 26. — Modèle de la chambre d'équilibre.
Détail du puits et dispositifs d'enregistrement des oscillations.

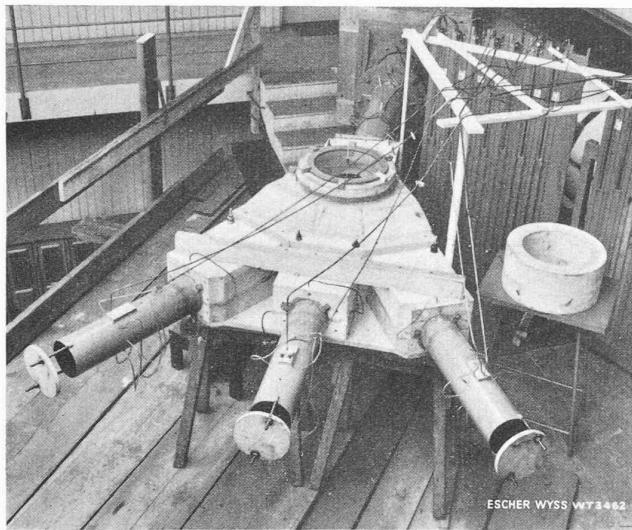


Fig. 27. — Modèle du répartiteur pour essais d'écoulement à l'air.

Les essais du répartiteur

Le répartiteur, situé à la partie aval de la galerie, est l'organe de jonction de celle-ci avec la chambre d'équilibre et avec les trois conduites forcées. Il s'agit là d'un véritable carrefour hydraulique dont les dimensions sont à la mesure des autres organes et, comme ceux-ci, conditionnées par le débit d'eau nécessaire aux turbines.

Les ingénieurs s'appliquent, dans toutes leurs constructions, à les établir en tenant compte des lois de la physique et des données de l'expérience la plus étendue. C'est à fortiori le cas quand il s'agit d'ouvrages tels que le répartiteur qui, par sa fonction, va jouer un rôle non négligeable, dans le rendement de l'ensemble et dont le coût peut être le plus réduit possible. Les données générales de la construction n'étaient pas suffisantes pour cela ; il était nécessaire de les compléter par des essais en modèle réduit. Ceux-ci ont été effectués par le Département des recherches de la S. A. Escher-Wyss, à Zurich.

Il s'agissait donc d'étudier, sur modèle réduit, la forme du répartiteur donnant le minimum de pertes de charge dans les divers cas de répartition du débit total, c'est-à-dire dans le cas d'une, deux ou trois turbines en service. Les données étaient en vraie grandeur les suivantes :

Diamètre de la galerie d'aménée	$\varnothing q = 7,75 \text{ m}$
Nombre de conduites forcées	$n = 3$
Chute brute	$H = 43 \text{ m}$
Débit maximum	$Q_{\max} : 200 \text{ m}^3/\text{sec}$
Puissance totale	$N = 70 000 \text{ kW}$
Turbines type	Kaplan

Les essais ont été exécutés sur modèle réduit au $1/30$ et selon la méthode aérodynamique. Le remplacement de l'eau par l'air, tout en permettant d'obtenir des résultats d'une précision suffisante, a l'avantage de ne pas nécessiter des dispositifs d'étanchéité compliqués et coûteux. Cette méthode est beaucoup plus rapide.

Les lois de la similitude ayant été établies, des essais successifs furent entrepris en modifiant les parois de guidage prévues, ceci pour en tirer la forme la plus adéquate.

On put ainsi constater que les pertes de charge étaient en général faibles. Si l'on ne perd pas de vue que, parmi les différents cas d'exploitation, deux sont plus particulièrement intéressants, le débit d'étiage et en demi-saison, on arrive à la conclusion que la forme générale était bonne, le raccordement avec des guideaux courts donne les coefficients de perte de charge les plus réduits, ceci pour tous les écoulements.

L'exécution n'étant pas compliquée, il en résultait en outre une simplification importante dans la construction du répartiteur et, par là, une réduction notable du prix d'exécution de cet ouvrage.

IV. Les travaux préliminaires

Le 15 juin 1943, le Conseil communal de Lausanne décidait le principe de construire Lavey et accordait un crédit de 400 000 fr. pour la poursuite des études. Cela rendait possible les travaux préliminaires indispensables à l'assise du projet définitif :

Ces travaux se subdivisaient en deux parties :

a) Sondages de reconnaissance dans la plaine de Lavey et au barrage.

b) Perforation d'une galerie de sondage dans le rocher à l'emplacement prévu pour la centrale souterraine.

a) *L'exécution de sondages de reconnaissance sur l'emplacement des installations extérieures de l'usine et du canal de fuite devait renseigner sur la constitution géologique du terrain sur une profondeur de 20 m environ. L'équipement ultérieur des forages en tubes piézométriques permettait de suivre les variations de la nappe phréatique.*

Le terrain à perforent comportait en surface une couche d'alluvions d'épaisseur variable.

L'alluvion devait être traversée par un forage tubé à percussion ; le rocher par un forage à rotation carottée.

Une deuxième série de sondages s'effectuait à l'emplacement prévu pour le barrage.

Ces travaux adjugés, en octobre 1943, conjointement à la STUAG S. A., à Lausanne, et SWISSBORING S. A., à Berne, furent exécutés d'octobre 1943 à mars 1944.

b) *La perforation d'une galerie de 100 m de long dans le rocher calcaire, de 1,5 m sur 2 m, complétée par un puits vertical de 12 m environ, devait donner les précisions nécessaires à l'établissement de la centrale souterraine.*

Ces travaux furent adjugés le 14 avril 1944 à l'entreprise OYEX-CHESSEX & Cie S. A., à Lausanne.

Ils furent exécutés d'avril à juillet 1944.

Les résultats obtenus, contrôlés au cours des travaux définitifs, ont montré que les sondages, de par leur dimension extrêmement réduite, ne donnaient qu'une image qualitative des terrains traversés, quantitativement de grosses différences se sont présentées par la suite.

La galerie de sondage, elle aussi, permit de constater que le calcaire de surface se prolongeait jusqu'à l'emplacement de la centrale. Des fissurations très importantes, trouvées par la suite, ne furent pas signalées par ces travaux.

V. L'équipement hydroélectrique et mécanique¹

Barrage et prise d'eau (fig. 28 à 32).

1. Les vannes et batardeaux du barrage

Les données essentielles sont, répétons-le :

Trois passes égales, largeur utile de chacune	13,0 m
Cote du seuil, des vannes	435,00
Cote de retenue maximum	446,00
Hauteur d'eau en cas de grandes crues exceptionnelles de $1200 \text{ m}^3/\text{sec}$, les trois passes étant ouvertes env.	444,35
Hauteur de retenue maximum	11 m
Débit dérivé maximum	$200 \text{ m}^3/\text{sec}$
Numérotation des passes : rive gauche n° 1, centrale n° 2, rive droite n° 3.	

Le matériel mécanique et la construction métallique du barrage sont mis en soumission le 22 mars 1946. Les constructeurs présentent leurs propositions jusqu'au 15 juin 1946, et en novembre 1946, la construction est adjugée au consortium des constructeurs romands constitué par : ZWAHLEN & MAYR à Lausanne, LES ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY S. A., Vevey, GIOVANOLA FRÈRES à Monthey.

¹ L'abondance de la matière nous oblige à adopter pour une partie de ce chapitre des caractères plus petits, soucieux en cela de ne rien supprimer qui puisse présenter quelque intérêt de documentation.

Il s'agit de :

a) *Trois vannes de barrage doubles* de 13 m d'ouverture, comprenant chacune : une vanne supérieure de 4,85 m de hauteur totale, roulant sur rails par l'intermédiaire de quatre bogies de deux galets chacun. Une vanne inférieure de 7 m de hauteur totale, roulant sur rails par l'intermédiaire de deux bogies de deux galets chacun, avec galets d'appui sur la vanne supérieure. *Les accessoires, bogies, galets, dispositifs d'étanchéité, etc.* — b) *Les mécanismes de commande* : Partie mécanique et électrique. — c) *Un dispositif de réglage automatique des vannes en fonction du niveau de la retenue.* — d) *Six indicateurs à distance* de la position des vantaux avec émetteurs d'impulsion, tableaux, etc. — e) *Les seuils en fers profilés.* — f) *Les six armatures de niches*, rails d'appui et de guidage, blindages de protection, etc. — g) *Un pont de service* des vannes et batardeaux avec cabine de protection des mécanismes des vannes sur les trois passes du barrage. — h) *Un jeu de batardeaux amont* avec armatures pour les niches, rails, etc. — i) *Un jeu de batardeaux aval* avec armatures pour les niches, rails, etc. — k) *Une grue portique* pour le transport des batardeaux. — l) *L'installation de dépôt* et les engins de manutention des batardeaux.

Fonctionnement et caractéristiques principales

Chaque passe est fermée par deux vannes, une vanne principale inférieure et une vanne supérieure. Ces deux vannes ont le bordage étanche côté amont et poutres principales côté aval. La vanne supérieure s'efface derrière la vanne principale de façon que son arête principale, formant déversoir, peut-être abaissée jusqu'à la cote 443 environ.

La forme en plan des poutres principales de la vanne inférieure est trapézoïdale avec une hauteur maximum de la partie centrale de 1,8 m.

Les poutres principales de la vanne supérieure sont des poutres pleines, de hauteur constante de 1 m.

Les galets principaux sont montés sur roulements à rouleaux avec joints étanches.

Protection contre le gel

Un chauffage des niches a été prévu ; il comprend : a) une chaudière électrique à circulation pour huile ; b) une pompe de circulation.

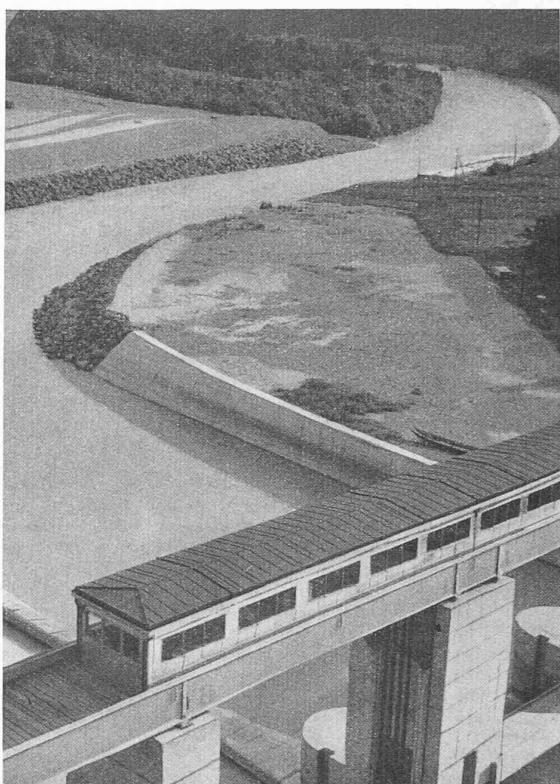


Photo J. P. Meystre

Fig. 28. — Le Rhône à l'amont du barrage.



Photo J. P. Meystre

Fig. 29. — Barrage, vue amont.

lation ; c) l'appareillage ; d) les conduites dans les niches avec raccordement dans la chambre des mécanismes.

Seules ces conduites ont été installées ; l'expérience démontrera si la mise en service de l'ensemble est nécessaire ou non.

Le jeu de batardeaux amont est constitué par sept éléments en fer profilé et tôle, le poids maximum d'un élément est de 8 tonnes.

Le jeu de batardeaux aval comporte cinq batardeaux en fer profilé et tôle.

La manœuvre des batardeaux amont. — *Mise en place.* Le chariot étant placé sous le premier élément, pour permettre le chargement on soulève celui-ci de quelques centimètres par des vérins. L'élément est alors amené sous la grue. L'accrochage se fait automatiquement. Le décrochage est également automatique dès que l'élément est en place.

Reprise des batardeaux. L'opération est analogue. Le contre-poids du palonnier étant placé sur position « accrochage ».

La manœuvre des batardeaux aval. La manœuvre est identique ; le même palonnier est utilisé. La différence réside dans le fait que les niches ne sont pas à l'aplomb des becs de grue. Le déplacement se fait alors par un portique roulant sur les becs situés en aval des piles et utilisable pour toutes les passes.

La commande des vannes

La commande des vannes peut s'effectuer : a) du tableau de l'usine (cas normal). — b) Automatiquement, elle dépend du niveau amont. — c) A la main, de la passerelle du barrage.

Ceci étant valable pour chacun des vantaux des trois vannes. Il est bon de rappeler la grande distance qui sépare l'usine du barrage (plus de 4 km), ce qui limite de façon impérieuse le nombre des conducteurs de commande, le simple coût des câbles devenant prohibitif. L'utilisation d'un sélecteur à cinq positions complété par un combinateur à neuf programmes a permis la réalisation complète des conditions posées.

Le câble de commande usine-barrage est logé dans une gorge aménagée dans la paroi de la galerie d'aménée.

La prise d'eau

La prise d'eau se trouve sur la rive droite du Rhône en un point où le Rhône décrit un coude prononcé. La prise se trouve à l'extérieur de la courbe. Il a été relevé plus haut combien le problème des charriages a retenu l'attention. Etant donné les quantités énormes de matériaux solides

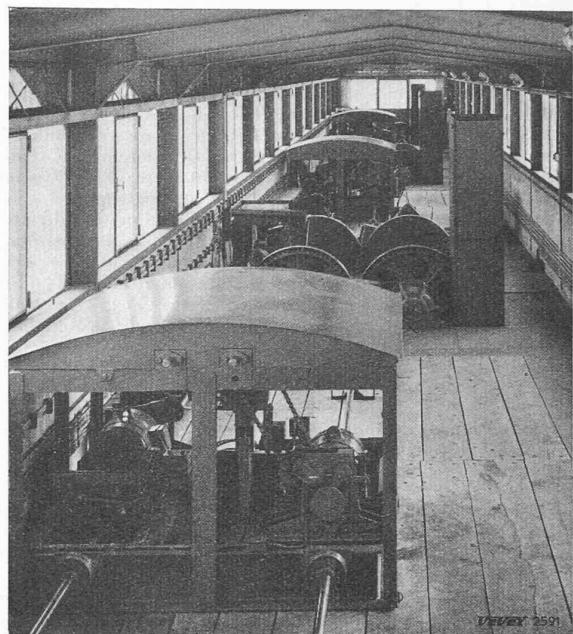


Fig. 32. — Barrage, passerelle de commande.

transportés par le Rhône en période d'été, il est essentiel que des dispositions judicieuses soient prises à la prise d'eau elle-même pour éviter la pénétration de ces matériaux dans la galerie. Des études théoriques complétées par les essais mentionnés plus haut ont permis d'arriver à maîtriser la question, donc d'éviter toute entrée de gravier dans la galerie.

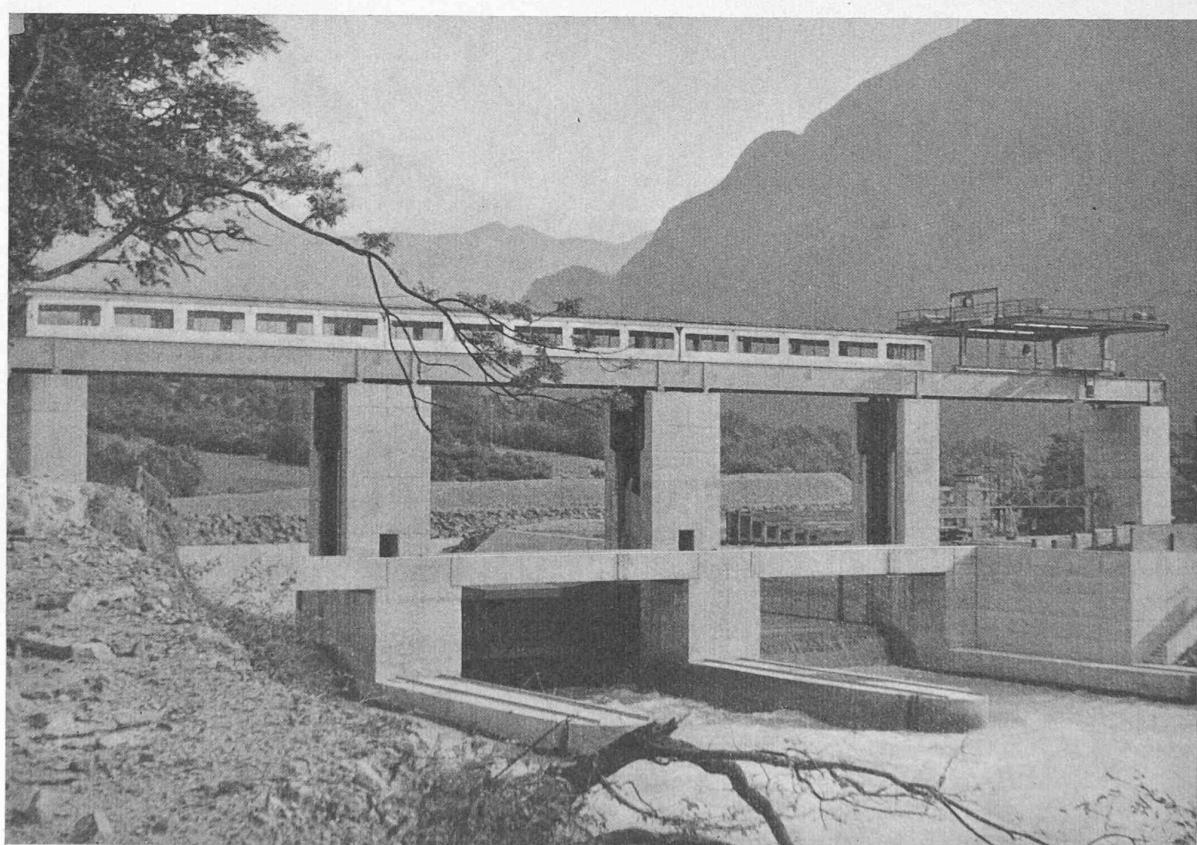


Fig. 31. — Barrage, vue aval.

Photo J. P. Meystre

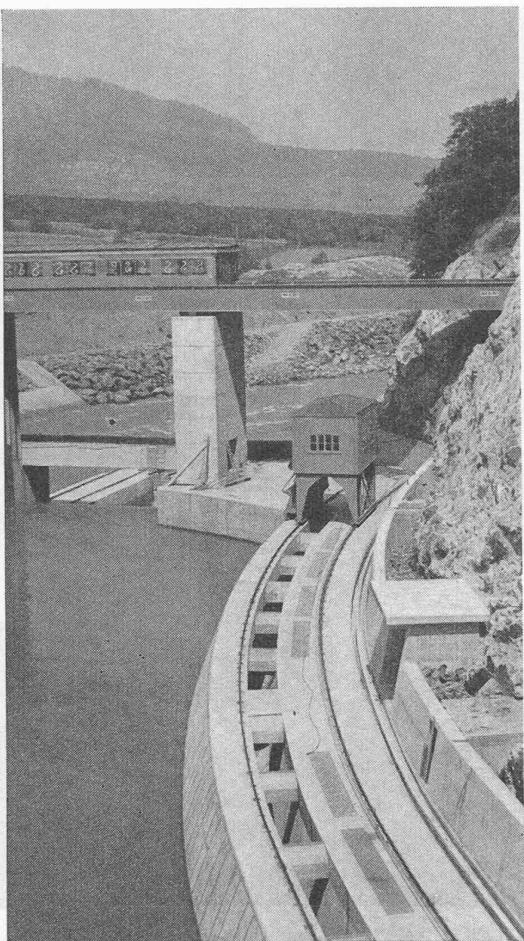


Photo J. P. Meystre

Fig. 33. — Prise d'eau et dégrilleur.

Ce résultat a été obtenu par l'emplacement de la prise (à l'extérieur d'une courbe prononcée) par son grand développement (faible vitesse aux grilles) et par ses particularités constructives (décrochement entre le radier et la base des grilles).

La figure 33 donne les détails et aspects de cette partie de l'ouvrage.

L'équipement de la prise d'eau comprend essentiellement :

Une grille d'entrée, constituée par : 32 panneaux de grille à quinze barreaux chacun, les seuils correspondant, les appuis supérieurs et intermédiaires, 16 guidages pour le chariot dégrilleur.

La fermeture de la galerie est possible immédiatement en aval de la grille par huit jeux de batardeaux de trois éléments chacun, de construction type caisson ouvert en aval.

Les seuils et armatures de niches correspondants :

Ce matériel fut commandé en juin 1947 au Consortium des Constructeurs romands, fournisseur de la partie mécanique du barrage.

Le dégrilleur. Le très grand développement de la grille, longueur en place, 60 m, hauteur, 6 m, les grosses quantités de matériaux étrangers flottant dans le fleuve à certaines époques de l'année, les feuilles en automne par exemple, obligaient de prévoir un dégrillage mécanique.

Le type de dégrilleur retenu est combiné avec un treuil de manutention des batardeaux et une grue pivotante.

Ainsi, les opérations se présentant à la prise d'eau sont assurées par un seul et même appareil.

Les caractéristiques sont :

Dégrilleur : largeur de poche, 1875 mm ; course du chariot nettoyeur, 12 m ; force de levage utile, 800 kg.

Treuil de manutention des batardeaux : force de levage utile, 4000 kg ; hauteur de levage du palonnier, 11,2 m.

Grue pivotante : force de levage, 1200 kg ; hauteur de levage, 12 m environ.

L'ensemble constitue une cabine surélevée contenant la machinerie, les moteurs, l'appareillage électrique, etc. En prolongation

de la grille, un tablier sert de chemin de roulement au chariot nettoyeur ; il reçoit les détritus extraits des grilles par le chariot nettoyeur qui sont déversés dans le canal d'évacuation.

Le chariot nettoyeur possède une poche-réceptacle. Ce réceptacle, en tôle d'acier, est muni d'un dispositif dégrilleur dont les dents pénètrent entre les barreaux de la grille.

Le dispositif de manutention des batardeaux comprend un palonnier muni de deux crochets en acier, reliés par une tringlerie. L'accrochage et le décrochage des batardeaux s'exécutent automatiquement.

Un dispositif particulier, un guide-câbles automatique évite que, pendant la manœuvre, les câbles puissent sortir des rainures du tambour.

La grue pivotante est équipée d'un grappin d'une ouverture de 600 mm.

Le dégrilleur se déplace sur la prise d'eau sur une voie à l'écartement de 2800 mm. Cette voie est curviligne avec un rayon de courbe de 98,25 m.

L'alimentation électrique se fait par un câble placé sur un tambour enrouleur monté sur le dégrilleur ; ce tambour est muni d'un dispositif d'enroulement automatique avec navette.

L'ensemble de ce matériel fut commandé le 26 avril 1947 aux ATELIERS DE CONSTRUCTIONS JONNERET FILS AINÉ, à Genève.

Matériel accessoire. L'équipement de la prise d'eau comprend encore :

des vannes secondaires, dont l'une pour le canal d'évacuation des détritus ;

un dispositif by-pass permet également d'effectuer le remplissage de la galerie avant l'enlèvement des batardeaux.

La chambre des vannes

L'examen des plans figurant dans la présente publication permet de constater la présence d'une excavation de dimensions non négligeables, la chambre des vannes. Cette caverne contient un équipement mécanique important :

trois vannes de garde des conduites forcées, dont deux en première étape ;

un couvercle sphérique provisoire pour la troisième conduite non encore utilisée ;

les organes de commande mécanique et électrique de ces vannes.

Le poids total du matériel ci-dessus ascende à 160 tonnes.

Un pont roulant de 40 t fourni par les ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY S. A. (fig. 34).

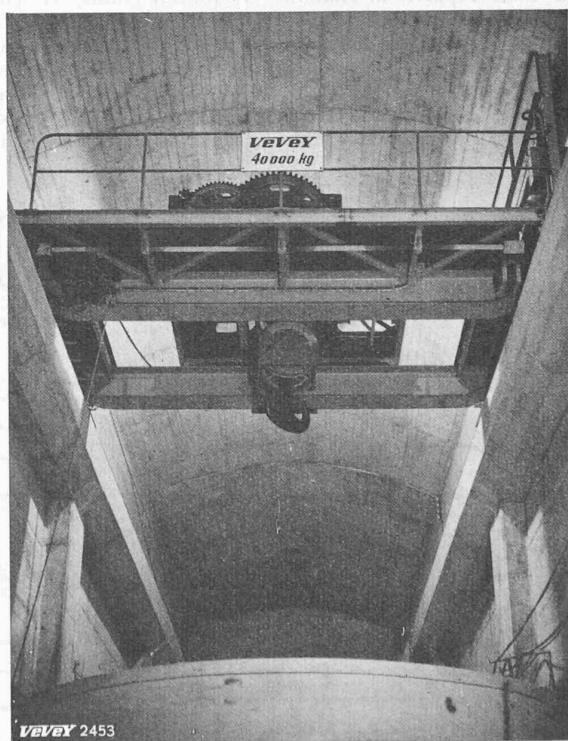


Fig. 34. — Pont roulant de la chambre des vannes des conduites forcées.

Les vannes à papillon, de 5100 mm de diamètre intérieur, comportent :
 1 corps en deux parties, construction soudée en acier, avec deux paliers pour la lentille ;
 1 lentille en trois parties de 5100 mm, en acier, avec tourillons insérés ; la lentille tourne autour de son axe qui est horizontal ;
 1 joint spécial entre la lentille et le corps de vanne ;
 1 servo-moteur à pression d'huile avec accessoires.

La commande se fait à pression d'huile.

Le couvercle sphérique, obturant la conduite 3, en tôle de 10 mm d'épaisseur, est riveté et soudé. La position de ce couvercle dans la conduite 3 est telle que le montage de la troisième vanne pourra avoir lieu sans interrompre le service de l'usine. Cette opération effectuée, le couvercle sera enlevé, ceci ne nécessitant qu'une interruption de service de courte durée.

Il vaut la peine de souligner que ces vannes papillon sont les plus grandes vannes papillon de Suisse. Elles ont été commandées le 15 mars 1947 à la S. A. ESCHER-WYSS, à Zurich (fig. 37).

Le dessableur

Nous avons déjà vu que les quantités de sable transportées par le Rhône sont telles que des mesures propres à éliminer le sable devaient, de toute évidence, être prises. Le système choisi est le dessableur Dufour, placé au km 2 de la galerie. Sa particularité est d'assurer l'évacuation des sables d'une galerie, en pression.

Son créateur, Henri Dufour, ingénieur, a donné une description circonstanciée de cet ouvrage au *Bulletin technique* du 13 janvier 1951.

Chambre d'équilibre

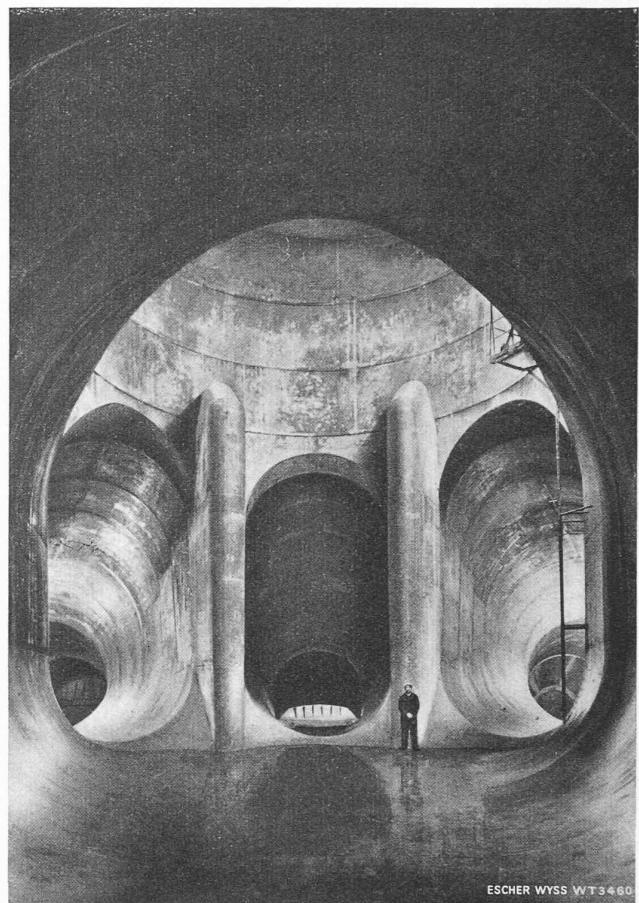
L'équipement mécanique de cet ouvrage est constitué, blindage mis à part, par cinq trompes de by-pass blindées permettant le retour de l'eau déversée dans les deux chambres d'expansion supérieures. Constructeur : S. A. ESCHER-WYSS, à Zurich (fig. 35).

Les blindages et les conduites forcées

Blindages

La galerie d'aménée aboutit au répartiteur, surmonté lui-même par la chambre d'équilibre et suivi par les conduites forcées (fig. 36).

La zone répartiteur-chambre d'équilibre subit, en cours d'exploitation, toutes les fluctuations imposées par les besoins du service, variations de puissance brusques ou lentes, quelquefois instantanées, en cas d'ouverture ou de fermeture brusques des machines. Cela se traduit, dans la zone considérée, par des variations de vitesse, de niveau et de pression très importantes, rapides, donc des effets destructeurs très



ESCHER WYSS WT 3460

Fig. 36. — Le répartiteur, vu de la galerie d'aménée.

puissants. Il était donc indispensable de blinder sérieusement les endroits exposés.

Etant donné les grandes dimensions des ouvrages, cette opération devait être limitée aux endroits strictement indispensables, c'est-à-dire le répartiteur et son raccordement avec la galerie d'aménée, le coude et la chambre d'expansion inférieure de la chambre d'équilibre : les autres éléments de cet ouvrage sont simplement bétonnés à même le rocher excavé ; ils peuvent supporter les effets des variations de niveau qui s'y présentent.

Le poids des blindages du répartiteur atteint 220 tonnes. La mise en place constituait un travail extrêmement délicat ; des installations particulièrement importantes ont été nécessaires pour assurer le montage de plaques de tôle, dont certaines pesaient 25 tonnes et devaient être mises en place à des hauteurs atteignant 25 m.

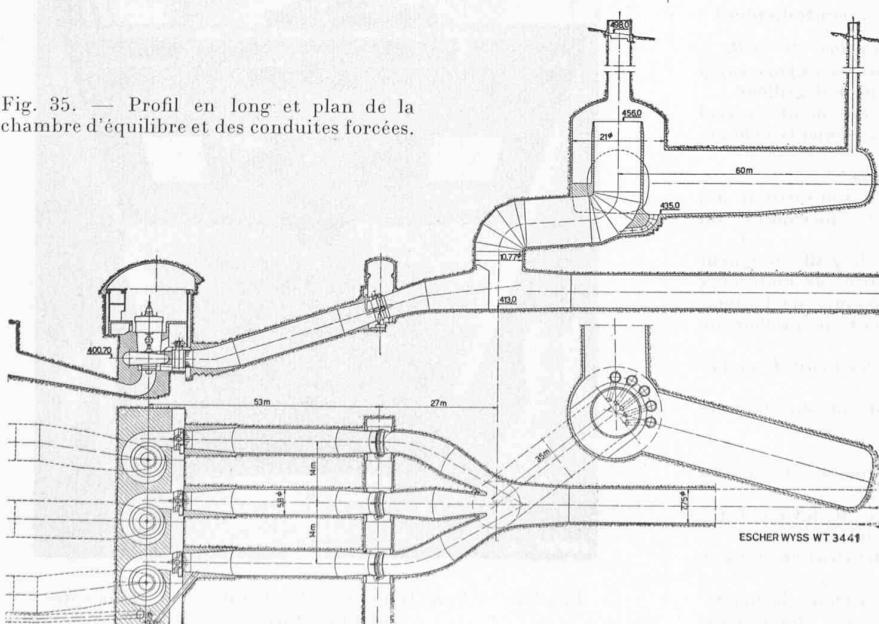
Ces travaux, commandés le 15 mars 1947, ont été exécutés par la S. A. ESCHER-WYSS, à Zurich, qui chargea la maison ZWAHLEN & MAYR, constructions métalliques, à Lausanne, de la préparation de certains éléments.

Conduites forcées

Trois conduites forcées, une par groupe, sont enrobées dans le béton et le rocher. Elles sont constituées par des viroles en tôle d'acier, mises en place les unes après les autres, leur montage s'effectuant dans la chambre des vannes.

Leurs dimensions varient : de 8,50 m de hauteur au répartiteur, elles ont

Fig. 35. — Profil en long et plan de la chambre d'équilibre et des conduites forcées.



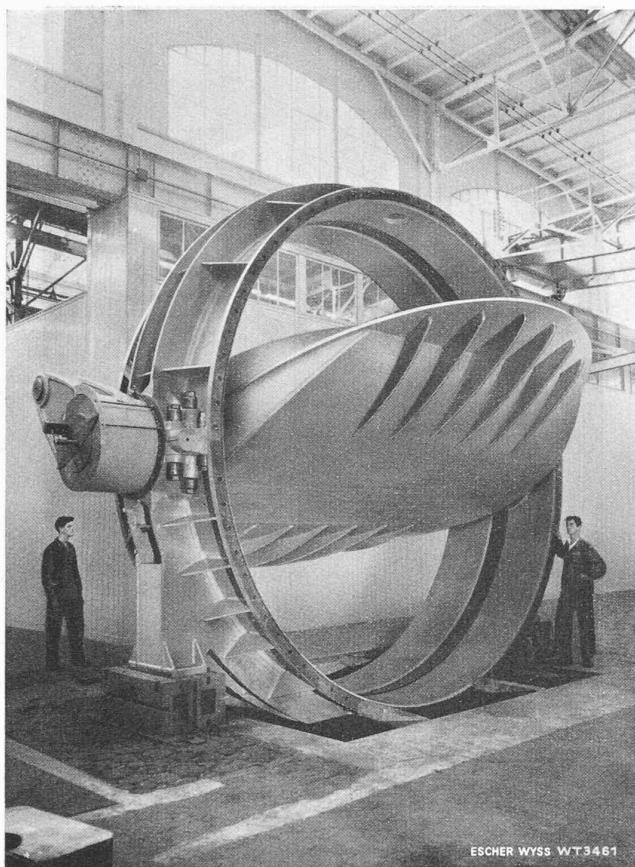


Fig. 37. — Vanne de garde des conduites forcées.

successivement des diamètres de 6,50 m à 5,40 m (raccord aux vannes de garde, fig. 37), puis un diamètre moyen de 5,80 m avec raccordement aux vannes des machines à un diamètre de 4,2 m. Ces dimensions sont supérieures, en longueur et en diamètre, à celles de Génissiat.

Bétonnés, virole après virole, des cercles de raidissement assuraient la conduite contre l'écrasement pendant le bétonnage. Le poids des conduites forcées est de l'ordre de 400 tonnes.

Cette fourniture fut commandée à ESCHER-WYSS, à Zurich, en même temps que les blindages.

Les turbines et leurs accessoires

Les vannes papillon des turbines (fig. 38, 39 et 42).

Chacune des turbines principales de Lavey est munie d'une vanne d'arrêt placée à l'entrée de la bâche et permettant de l'isoler de la conduite forcée. Elle est, comme la vanne de garde de la conduite elle-même, du type papillon.

Ces vannes présentent les caractéristiques principales suivantes ; pression d'essai, 84 m ; pression statique maximum, 56 m ; diamètre de la lentille, 4,20 m ; diamètre du corps à l'entrée, 4,20 m ; diamètre du corps à la sortie, 4 m.

Elles sont à axe vertical, avec commande par pression d'huile, et calculées pour se fermer en toute sécurité sous le débit d'emballage de la turbine.

Le corps de vanne est en acier, coulé en deux parties assemblées suivant un plan horizontal. Les paliers sont garnis de bronze pour le passage des tourillons de la lentille.

La lentille (papillon), en acier coulé, comprend une partie centrale et deux segments d'extrémité. Ces trois pièces, en forme de caissons et nervurées, sont assemblées entre elles au moyen de brides et de goujons. La périphérie de la lentille comporte une rainure usinée pour recevoir un siège d'étanchéité.

Les deux tourillons sont en acier SM, avec portée de centrage, et munis d'un plateau de fixation à la partie centrale de la lentille. Le tourillon supérieur reçoit le levier de commande du mécanisme.

Le jeu de sièges d'étanchéité comprend un anneau en acier inoxy-

dable en plusieurs pièces, fixées par vis dans le corps de la vanne, et d'un anneau de bronze en plusieurs segments encastrés à la périphérie de la lentille ; ces segments sont ajustables.

Un dispositif d'étanchéité existe au passage du tourillon supérieur dans le corps de la vanne.

Le mécanisme de commande, à pression d'huile, comprend : un levier de commande ; deux cylindres à huile ; un dispositif d'amorce de la fermeture, etc., etc.

Les vannes possèdent : deux by-pass, deux postes de pompage d'huile.

Poids d'une vanne complète 80 tonnes

Poids du papillon seul 28 tonnes.

Deux de ces vannes sont installées en première période.

Ce matériel fut commandé, le 13 novembre 1945, aux ATELIERS DES CHARMILLES, à Genève.

Les vannes sont installées immédiatement en amont de la bâche spirale, à l'étage turbine de la salle des machines. Elles sont desservies par les ponts roulants, de l'étage électrique, par des ouvertures ménagées pour le passage des crochets des ponts et des vannes elles-mêmes.

Le corps de la vanne est relié rigidelement par des brides et boulons à la virole aval de la conduite et, d'autre part, à la virole entrée de la bâche de la turbine avec l'interposition d'un joint de démontage.

Le mécanisme de commande de la vanne, comprenant les servomoteurs et leurs organes accessoires, est placé à proximité immédiate de la vanne, un peu au-dessus du tourillon supérieur, et sur le plancher de l'étage turbine.

Le dispositif by-pass est destiné à assurer l'équilibrage des pressions de part et d'autre de la lentille avant une manœuvre d'ouverture. Ce dispositif est double.

Des dispositifs de sécurité. La fermeture est possible en tout temps ; elle s'effectue par la simple mise à l'échappement de l'huile des cylindres du servo-moteur.

La fermeture s'effectue automatiquement dès que la pression d'huile tombe au-dessous d'une valeur-limite.

Contrôle et signalisation. Les manœuvres de la vanne peuvent être commandées, soit d'un tableau individuel placé à proximité de la vanne, soit depuis le tableau de groupe placé dans la salle des alternateurs.

Turbines (fig. 40, 41, 42 et 43)

Les caractéristiques essentielles des turbines principales sont les suivantes :

Type : Kaplan à axe vertical.

Puissance : 33 500 CV sous une chute de 40,7 m.

Débit correspondant : 66 m³/sec.

Vitesse normale : 214 t/min.

Vitesse d'emballage : 500 t/min.

Poids total : 407 tonnes environ.

Chaque turbine comprend les organes essentiels suivants :

1 bâche spirale divisée en plusieurs segments comprenant :

1 anneau d'entretoises en acier coulé, en plusieurs pièces assemblées par brides usinées et boulons, avec couronnes inférieure et supérieure venues de fonderie avec les entretoises profilées ; portées usinées pour les fonds du distributeur ; une volute en tôle d'acier formée de viroles soudées électriquement et assemblées par soudure à l'anneau d'entretoises ; une tubulure de raccordement en tôle entre la bâche et la vanne-papillon de garde assemblée par soudure à la première virole amont de la bâche ; une bride pour l'assemblage de cette tubulure à la vanne ; les boulons d'assemblage ; un couvercle pour trou d'homme.

1 distributeur comprenant :

1 fond supérieur annulaire en fonte acierée exécuté en plusieurs parties assemblées par brides usinées, avec logements pour les paliers supérieurs des aubes directrices.

Les blindages en acier pour le fond supérieur annulaire.

1 fond central en fonte acierée en plusieurs parties, en forme de caisson fortement nervuré, reposant sur le fond annulaire et dont le profil méridien assure, hydrauliquement parlant, un raccordement progressif entre le fond annulaire et le moyeu de la roue motrice par l'intermédiaire d'un support du palier, avec portée pour : le cercle de vannage, le support du carter des pompes, le support du palier de guidage et les reniflards.

1 support de palier.

1 fond inférieur en fonte acierée, nervuré, en plusieurs parties, avec logements pour les paliers inférieurs des aubes directrices.

Les blindages en acier pour le fond supérieur annulaire ainsi que pour le fond inférieur du distributeur.

24 aubes directrices en acier coulé constituant le vannage de la turbine avec tourillons.

24 paliers supérieurs des aubes directrices avec douilles de guidage en bronze, graisseurs Técalémít, dispositifs d'étanchéité et

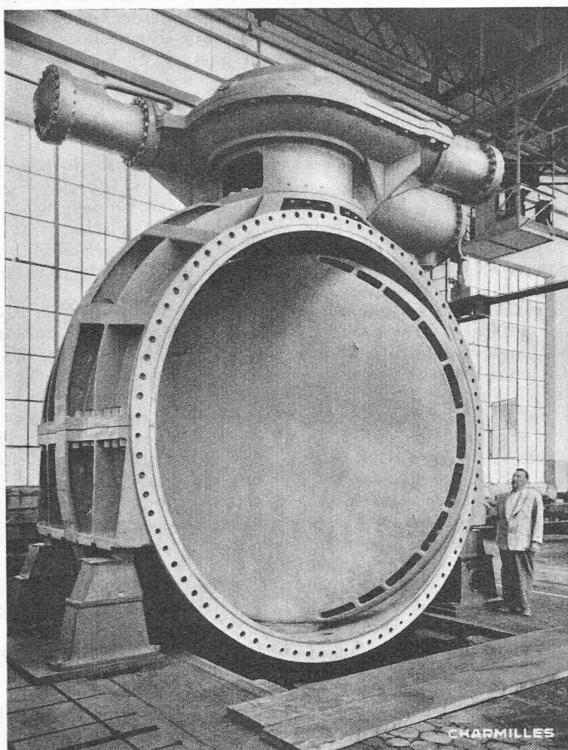


Fig. 38. — Vanne-papillon des turbines Charmilles, Ø 4200 mm.

dispositifs de réglage en hauteur de la position des aubes directrices.

24 paliers inférieurs des aubes directrices avec douilles de guidage en bronze.

Le mécanisme de commande du vannage de la turbine comprend : les leviers reliés aux tourillons ;

les bielles de liaison ;

1 cercle de vannage.

La roue motrice Kaplan comprend :

1 moyeu en acier coulé à profil extérieur sphérique, se raccordant au profil du support du palier avec logements pour les paliers qui reçoivent les tourillons des pales et portée usinée avec centrage pour l'accouplement à l'arbre moteur.

8 pales en acier inoxydable.

16 paliers en bronze spécial, logés à l'intérieur du moyeu pour recevoir les tourillons des pales.

8 leviers clavetés sur les tourillons des pales entre les paliers.

Mécanisme de commande des pales intérieur au moyeu, avec croisillon commun fixé à l'extrémité inférieure de la tige de commande ci-après spécifiée et relié par bielles aux leviers des tourillons.

Dispositifs d'étanchéité à la traversée du moyeu par les tourillons des pales, démontables depuis l'extérieur du moyeu.

1 ogive.

1 manteau de la roue motrice.

1 anneau de scellement.

1 arbre moteur en acier forgé avec : plateaux forgés pour la fixation de la roue motrice et du cylindre du servo-moteur qui commande les pales de la roue ; forage axial pour le logement de la tige reliant le piston de ce servo-moteur au croisillon logé dans le moyeu de la roue.

1 palier de guidage de l'arbre moteur, comprenant :

1 corps en fonte en deux pièces ;

1 coussinet en fonte en deux pièces, garni de métal antifriction ;

1 cuvette de récupération d'huile, disposée sous le palier ;

1 dispositif de circulation d'huile avec deux pompes à huile, dont une à commande par l'arbre de la turbine au moyen d'engrenages et l'autre à commande par moteur électrique ; manostat pour mise en marche automatique de la pompe électrique en cas de défaillance de la première ; les tuyauteries de circulation d'huile.

1 joint d'étanchéité autour de l'arbre moteur, chicanes en acier, joint au graphite appuyé par des ressorts, ce qui assure la compensation automatique de l'usure du graphite.

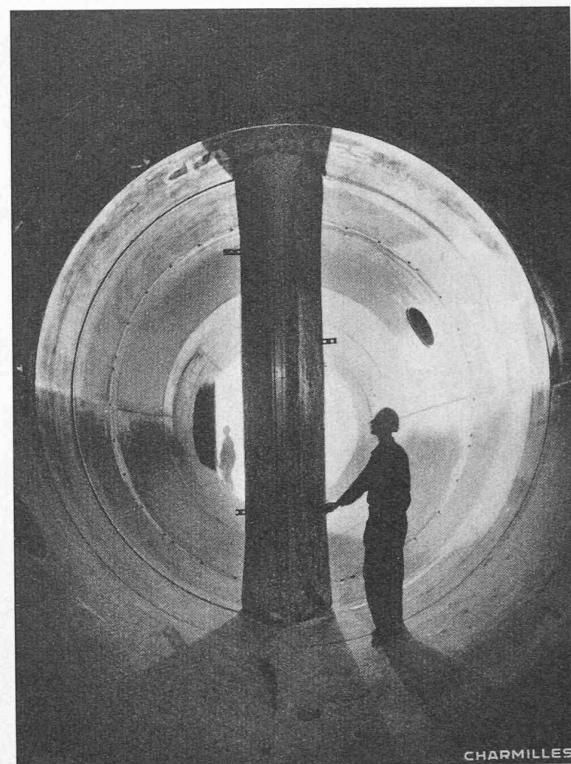


Fig. 39. — Intérieur de l'une des bâches spirales de la turbine Kaplan-Charmilles, avec vanne ouverte.

1 servo-moteur pour la commande des pales de la roue motrice avec cylindre en acier logé entre les plateaux d'accouplement de la turbine et de l'alternateur, piston coulissant dans le cylindre, tige de commande reliant ce piston au croisillon de commande à l'intérieur du moyeu de la roue, les douilles de guidage en bronze, les tubes à huile logés dans le forage axial de l'arbre de l'alternateur pour l'introduction d'huile au servo-moteur, ces tubes assurant également la commande mécanique du dispositif d'asservissement.

2 reniflards.

Les dispositifs d'évacuation des fuites d'eau et d'huile avec pompe à commande mécanique pour les fuites d'huile, pompe à commande électrique pour les fuites d'eau, flotteurs, tuyauterie.

La bâche spirale a été montée sur place, virole après virole. D'un diamètre d'entrée de 4 m, elle a été soumise à des essais de pression intérieure poussée jusqu'à 86 m, soit au double de la chute maximum, avant d'être enrobée de béton. La mise en place du béton s'est faite avec la bâche sous pression pour limiter les risques de déformation.

Les dimensions du stator, d'un diamètre libre de 4800 mm permettent le passage de la roue de la turbine complète, y compris son fond supérieur. Cependant, un soin tout particulier a été porté à l'étude du montage vers le bas. Le montage des aubes directrices peut se faire sans qu'il soit nécessaire de démonter l'alternateur.

La salle des machines étant souterraine, un examen attentif des constructions a été fait afin de réduire le plus possible la hauteur totale de la salle des machines.

Tous les efforts mécaniques du groupe sont transmis à la partie inférieure par un cuvelage plein, noyé dans le béton ; la liaison mécanique du groupe, entre l'alternateur et la turbine, est de ce fait excellente. La fourniture du cuvelage est assurée par le constructeur de la turbine.

La commande de la première turbine avec pivot et de deux vannes de garde fut passée, le 13 novembre 1945, aux ATELIERS DES CHARMILLES, à Genève.

La deuxième turbine, avec pivot et deux régulateurs automatiques, a été passée à la même date aux ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY S. A.

Chaque constructeur a conservé, dans l'exécution de la machine qui lui étaient attribuée, les particularités constructives qui lui étaient propres. Cependant, des mesures d'unification furent prises pour assurer de façon identique la jonction avec l'alternateur.

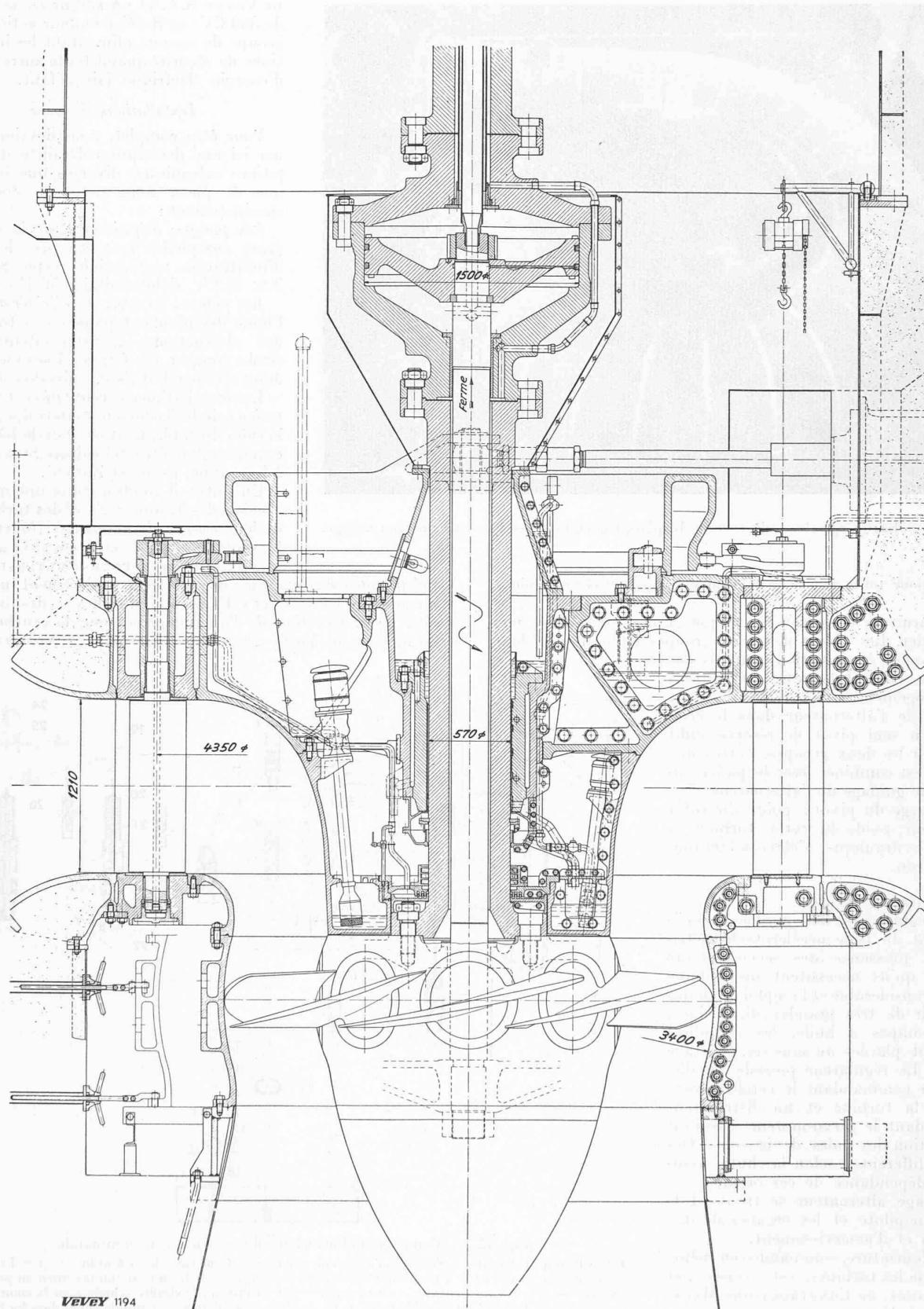


Fig. 40. — Coupe transversale de la turbine Kaplan, Vevey.

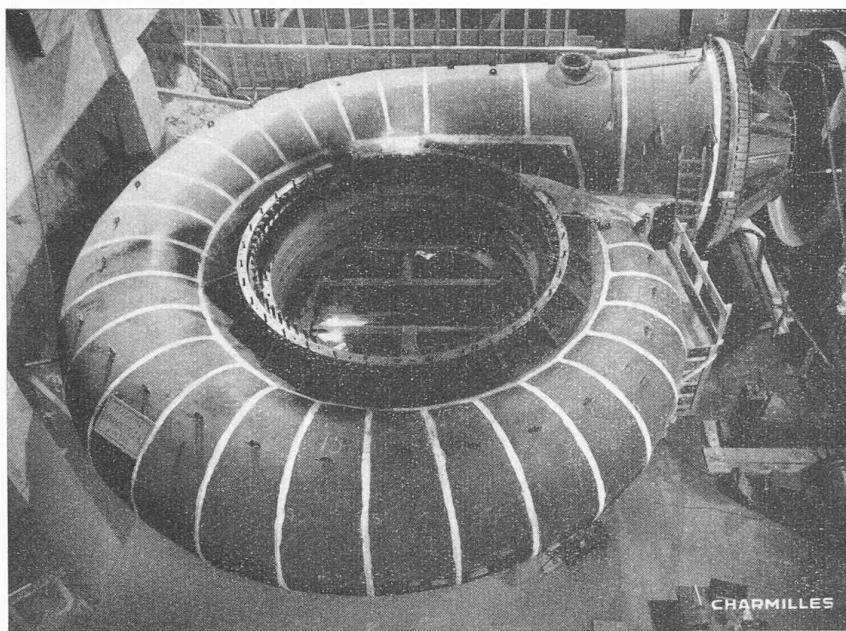


Fig. 41. — Bâche spirale de la turbine Kaplan, Charmilles. — Essai de mise en charge.

teur, et pour toute une série d'éléments constructifs accessoires.
Pivots

La fourniture du pivot de chaque groupe est assurée par le turbinier. Les pivots des deux groupes ne sont pas identiques comme construction, mais ils ont le même encombrement ; ils entrent dans le logement, aménagé par le constructeur de l'alternateur dans le croisillon. Un seul pivot de réserve suffit donc pour les deux groupes. Cette construction est combinée avec le palier supérieur de guidage de l'alternateur.

La charge du pivot : poids du rotor alternateur, poids du rotor turbine et poussée hydraulique, s'élève à 500 tonnes environ.

Régulateurs (fig. 43 a)

Les régulateurs des groupes principaux sont du type accélérotachymétrique. La puissance des servo-moteurs est telle qu'ils nécessitent un volume d'huile considérable et l'emploi de chambres d'air de très grandes dimensions.

Les pompes à huile, les chambres d'air sont placées au sous-sol, à l'étage turbine. Le régulateur possède un distributeur commandant le cercle de vanne de la turbine et un distributeur commandant le servo-moteur assurant l'orientation des pales de la roue. Des cames, différentes selon la chute, assurent la dépendance de ces organes.

A l'étage alternateur se trouvent le régulateur-pilote et les organes de distribution et d'asservissement.

Cette fourniture, commandée en même temps que les turbines, est assurée par les ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY S. A.

Groupes auxiliaires

Sont à signaler sous ce titre une *turbine de 1500 CV* fournie par les ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

DE VEVEY S. A. et un moteur Diesel Sulzer de 350 CV ; ce dernier moteur actionne le groupe de secours alimentant les installations de sécurité quand toute autre source d'énergie fait défaut.

Installations diverses

Pour être complet, nous devrions donner ici une description détaillée d'installations mécaniques diverses que le manque de place nous oblige à énumérer succinctement :

Les pompes d'épuisement de la centrale grâce auxquelles sont évacuées les eaux d'infiltration souterraine (type SULZER, 3 × 15 CV, débit unitaire 50 l/sec).

Les pompes de l'eau de réfrigération de l'huile des pivots et paliers des turbines, des alternateurs, transformateurs, etc. (trois pompes de forage ESCHER-WYSS, débit unitaire 100 l/sec, puissance 43 CV).

Les installations de *ventilation et climatisation* soit de la centrale souterraine, soit de la salle du tableau située dans le bâtiment extérieur (fig. 49 a) (fourniture SIFRAG S. A. à Lausanne, Berne et Zurich).

En outre, il faudrait faire une mention spéciale des *batardeaux aval* des turbines et de leur *chariot de manœuvre* (fourniture : CONSORTIUM DES CONSTRUCTEURS ROMANDS DE CHARPENTES MÉTALLIQUES) ; la *charpente métallique* du poste extérieur, entièrement tubulaire (fourniture : GIOVANOLLA FRÈRES à Monthey) ; des installations de *distribution de l'air comprimé* pour la centrale souterraine et le poste extérieur (fourniture : ATELIERS DE

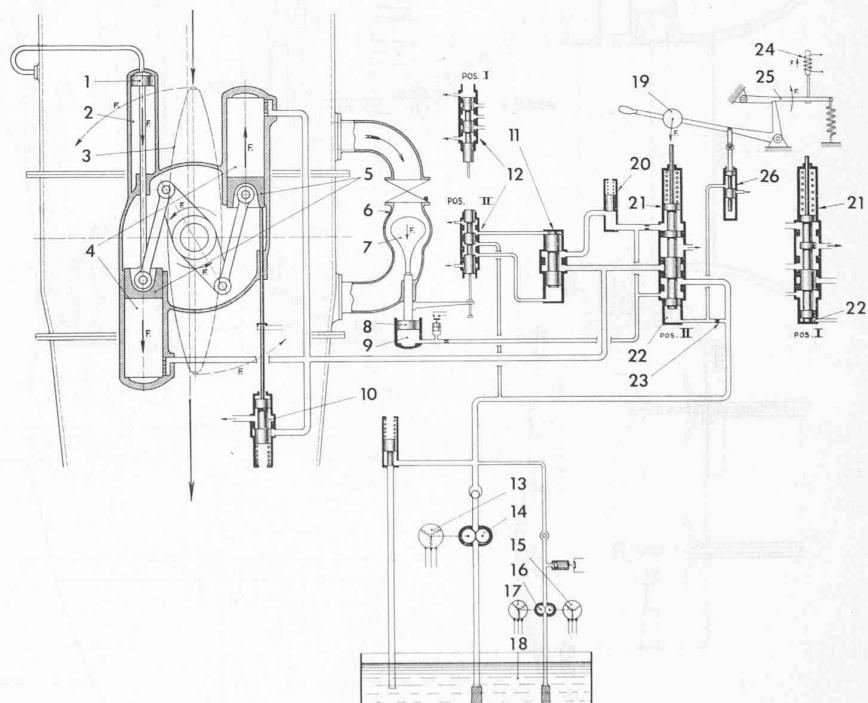


Fig. 42. — Vannes-papillons Charmilles. Schéma de commande.

1-2 = Piston et cylindre à pression d'eau pour amorcer la fermeture de la lentille. — 3 = Lentille. 4-5 = Pistons et cylindres à pression d'huile pour l'ouverture de la lentille et son maintien en position ouverte. — 6-7 = Vanne-autoclave du by-pass. — 8-9 = Piston et cylindre à huile pour la commande de la vanne du by-pass. — 10 = Soupape de fin de course pour éviter les coups de bâlier dans les tuyauteries à huile en fin d'ouverture. — 11-12 = Tiroirs actionnés par la vanne du by-pass en vue de commander l'ouverture de la lentille 3 en fin d'ouverture du by-pass 6-7. — 13-14 = Groupe de pompage d'huile à faible débit pour maintenir la lentille ouverte en service normal. — 18 = Bac à huile. — 19 = Contrepoids pour commander le tiroir de distribution 21. — 20 à 23 = Tiroir de distribution et accessoires. — 24 à 26 = Appareillage mécanique et à pression d'huile pour commander le tiroir de distribution 21, en vue de fermer la lentille.

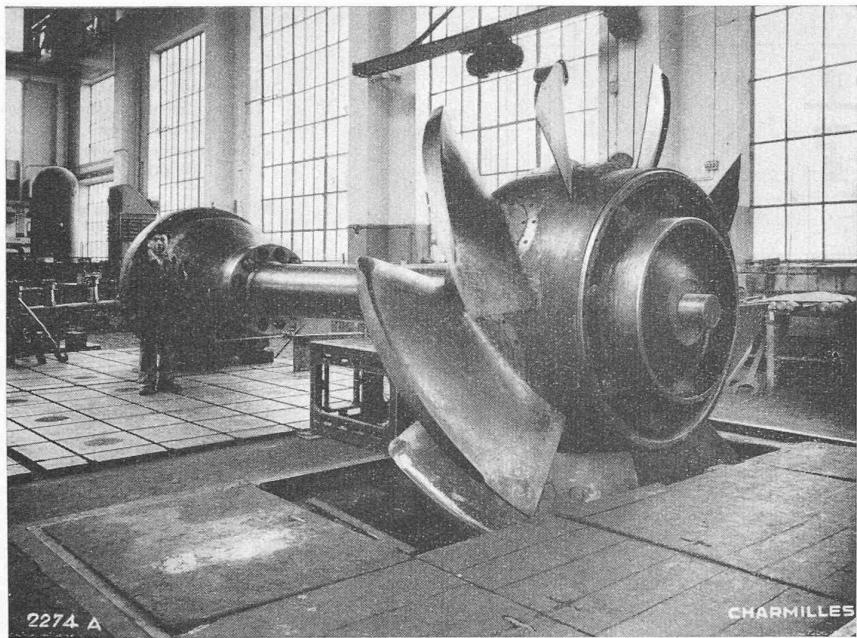


Fig. 43. — Roue de la turbine Kaplan-Charmilles.

CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY et BROWN BOVERI S. A., Baden).

Engins de manutention

A part les engins déjà cités plus haut se rapportant au barrage, à la prise d'eau et à la chambre des vannes, il y a lieu de mentionner sous cette rubrique :

Les deux ponts roulants de 60 tonnes de la salle des machines (fig. 44) (fourniture : ATELIERS DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES DE VEVEY S. A.) ; le pont roulant de 27 tonnes pour le décuvage des transformateurs (fournitures : SOCIÉTÉ DES USINES DE ROLL S. A., Berne) et divers monte-chARGE et palans de moindre puissance (fourniture : SCHINDLER & Cie, Lucerne et RUEGGER & Cie, Bâle).

Equipement électrique

Services principaux

Alternateurs principaux (fig. 45, 46, 47 et 48)

Caractéristiques principales. — Les alternateurs à axe vertical sont refroidis par auto-ventilation en circuit fermé et l'air passe dans six réfrigérants à circulation d'eau fixés directement à la carcasse.

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes : Courant triphasé, 50 per/sec

Puissance apparente en marche continue	29 400 kVA sous cos $\phi = 0,8$
Puissance active	23 500 kW
Tension composée nominale.	10 000 V $\pm 12\%$
Vitesse normale	214 t/min
Vitesse d'emballlement	500 t/min
Moment d'inertie	1 450 tm ²
Poids total	235 t env.
Poids du rotor	115 t env.

En bout d'arbre sont montés :

une excitatrice principale de 187 kW à 240 V,

une excitatrice auxiliaire de 5 kW à 85 V,

(le dimensionnement des excitatrices est particulièrement important pour tenir compte de la grande variation de tension imposée aux alternateurs du fait des caractéristiques du réseau à 135 kV à la jonction à Lavey) un alternateur pilote triphasé de 2 kVA, 110 V, 50 per/sec, pour l'alimentation du moteur d'entraînement du régulateur de la turbine hydraulique ; cet alternateur est combiné avec l'excitatrice auxiliaire.

Les valeurs du rendement, y compris les pertes dans les excitatrices et dans le palier de guidage inférieur mais non compris celles du palier porteur, dépassent 97 % à pleine charge avec cos $\phi = 0,8$ et 98 % avec cos $\phi = 1$.

Chaque alternateur peut débiter sa puissance nominale de 29 400 kVA, avec cos $\phi = 0,8$, sous toutes les valeurs de la tension comprises entre 10 000 V — 12 % et 10 000 V + 12 %. Il est en outre capable de fournir, en régime sous-excité, une puissance uniquement réactive de 17 000 kVar sous une tension égale à 80 % de la tension nominale et permet ainsi la mise sous tension du réseau à 135 kV sans danger d'auto-excitation.

Construction. — L'alternateur est construit pour être encastré dans le sol. Seuls le croisillon supérieur et les excitatrices sont au-dessus du plancher de la salle des machines. Cette disposition permet de réduire au minimum la hauteur du crochet du pont roulant pour le démontage.

L'arbre de l'alternateur est guidé axialement par deux paliers. Le poids de la partie tournante du groupe complet est supporté par un palier porteur logé dans le croisillon supérieur. Ce palier porteur (pivot) et le palier de guidage supérieur, qui ont été exécutés par le fournisseur de la turbine, sont placés dans un réservoir d'huile qui forme en même temps la partie centrale du croisillon supérieur.

La carcasse repose directement sur le cuvelage de la turbine. La partie supérieure de ce cuvelage a été livrée avec l'alternateur et comporte six consoles sur lesquelles s'appuie le croisillon inférieur. Cette disposition permet de supprimer les pieds de l'alternateur.

La carcasse, en deux parties, se compose de tôles d'acier et de fers profilés soudés. Sa section a été conçue de manière à présenter une très grande rigidité même en cas de sollicitations anormales.

Les tôles du stator, isolées au papier, sont fixées à la carcasse par des queues d'aronde et sont assemblées par paquets séparés par des canaux de ventilation. Ceux-ci sont réalisés au moyen de profilés spéciaux en forme d'U qui, près de l'alésage, sont disposés de manière à épouser exactement le contour des encoches. Celles-ci forment donc sur toute leur longueur des canaux continus et l'on évite ainsi que l'isolation ne se détériore en formant des bourrelets dans les canaux de ventilation.

L'enroulement statorique est prévu avec deux barres par encoche. Chaque barre est enrobée de micanite à la presse. Ainsi, les deux barres de l'encoche sont séparées l'une de l'autre par une double couche isolante.

Afin d'éviter les pertes supplémentaires pour courants de Foucault, les barres ont été subdivisées en un certain nombre de conducteurs isolés et toronnés de manière que chacun d'eux occupe successivement la position de tous les autres conducteurs le long d'une même barre.

La jante de la roue polaire est formée par quatre anneaux en fonte d'acier montés à chaud sur le croisillon qui comporte huit bras. Des encoches en forme de queue d'aronde pratiquées sur la surface extérieure de la couronne permettent de fixer les pôles.

La transmission du couple du croisillon à la couronne se fait à l'aide de boulons placés à cheval entre la couronne et les bras du croisillon. Ces boulons garantissent un centrage exact de la couronne sur le croisillon, même pour la vitesse d'emballlement.

Les pôles sont massifs, en fonte d'acier. Bien que les encoches du stator soient ouvertes, l'entrefer relativement grand permet d'éviter l'emploi d'épanouissements polaires lamellés. Ainsi, la construction des pôles est simplifiée et leur solidité mécanique est très grande. La forme donnée aux épanouisse-

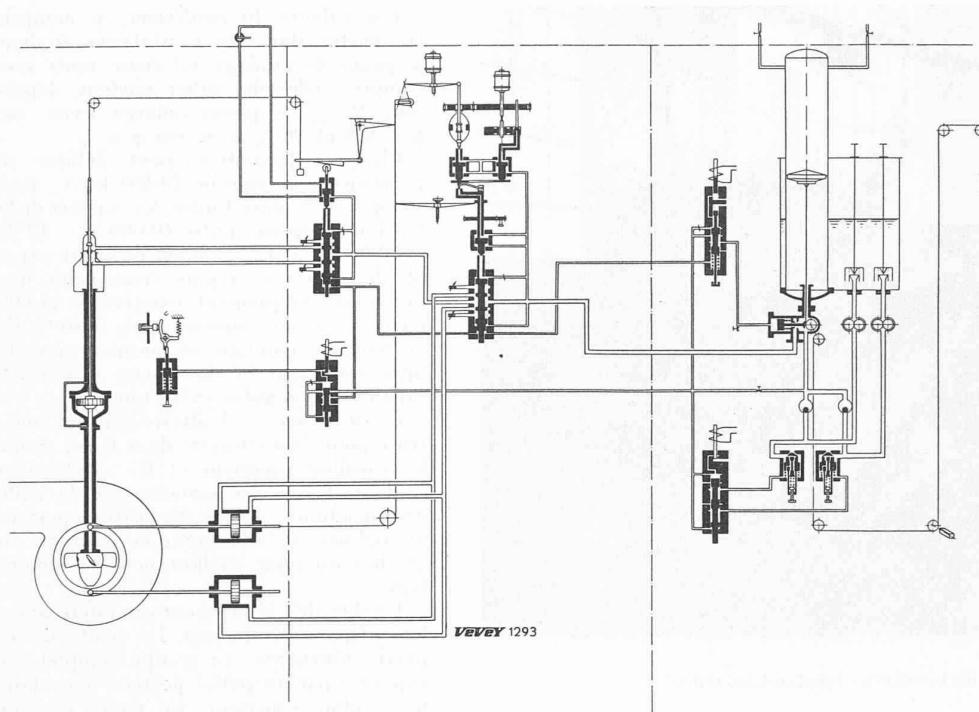


Fig. 43 a.
Schéma des régulateurs des
groupes de Lavey.
Régulateur
accéléro-tachymétrique
30 000 kgm

Le système de réglage comprend le régulateur proprement dit avec les pendules accélérométrique et tachymétrique et les dispositifs usuels : changement de vitesse, limiteur d'ouverture, dispositif de dosage, etc. Ce régulateur agit sur la soupape de réglage principale. Cette dernière commande les servomoteurs jumeaux du distributeur de la turbine. Une tringlerie agit sur une seconde soupape de réglage commandant le servomoteur des pales de la roue motrice. L'huile sous pression est fournie par un groupe de pompage composé de deux pompes à vis commandées par moteurs électriques et un réservoir d'air. Le système comprend en outre une soupape commandée par un limiteur de vitesses ainsi que par deux soupapes actionnées par électro-aimants et commandées par les appareils de sécurité.



Photo J. P. Meystre

Fig. 44. — Vue de la centrale souterraine.

ments polaires est telle que l'onde de tension obtenue est une sinusoïde pratiquement parfaite. En outre, la disposition des pôles en biais évite les harmoniques de denture.

Les bobines des pôles sont faites à l'aide de bandes de cuivre nu sur champ. Les spires sont isolées les unes des autres par une couche d'amianto.

La roue polaire complète a été équilibrée dynamiquement et statiquement en ateliers. C'est parce que les dimensions des anneaux de la jante permettaient leur exécution en une seule pièce qu'ils ont été fabriqués en fonte d'acier et que la roue a été soumise à un essai d'emballlement.

L'arbre de l'alternateur est en une pièce. Un alésage intérieur concentrique permet le passage des conduites d'huile nécessaires au réglage des pales de la turbine.

Les croisillons supérieur et inférieur du stator sont en acier et se composent chacun de six bras à section en forme de I. Les bras du croisillon inférieur sont soudés directement au moyeu, tandis que ceux du croisillon supérieur sont boulonnés, afin de pouvoir être démontés pour le transport. Le palier porteur, combiné avec le palier de guidage supérieur, forme la partie centrale du croisillon supérieur. La hauteur de ce croisillon a été prévue suffisamment grande afin de réduire

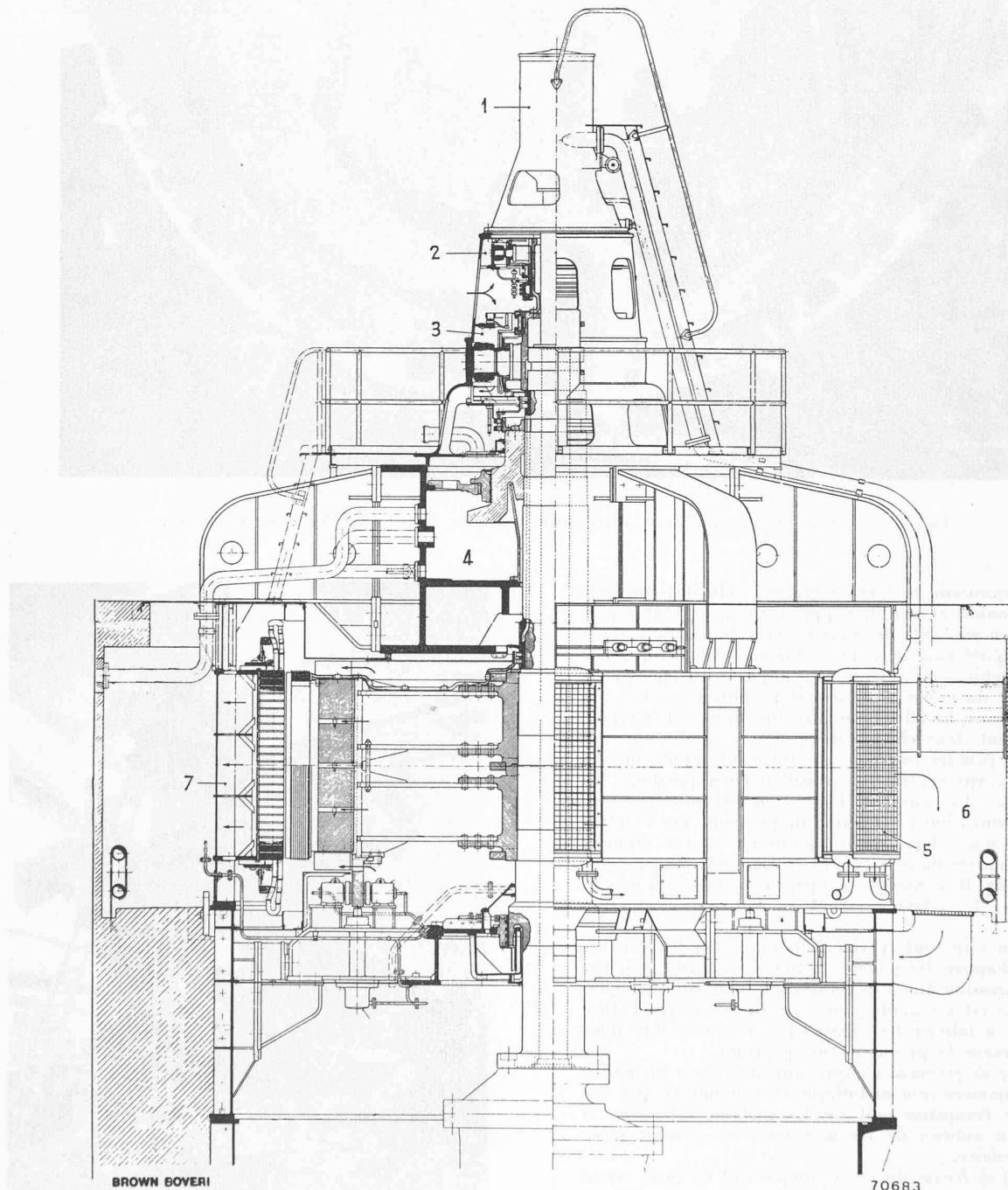


Fig. 45. — Vue en coupe d'un alternateur triphasé de 29 400 kVA, 10 000 volts, 214 t/min., de l'Usine de Lavey.

1 = Chapeau de réglage de la turbine Kaplan ; 2 = Excitatrice auxiliaire combinée avec un alternateur pilote ; 3 = Excitatrice principale ; 4 = Emplacement du palier pivot ; 5 = Réfrigérant ; 6 = Air refroidi ; 7 = Air chaud.

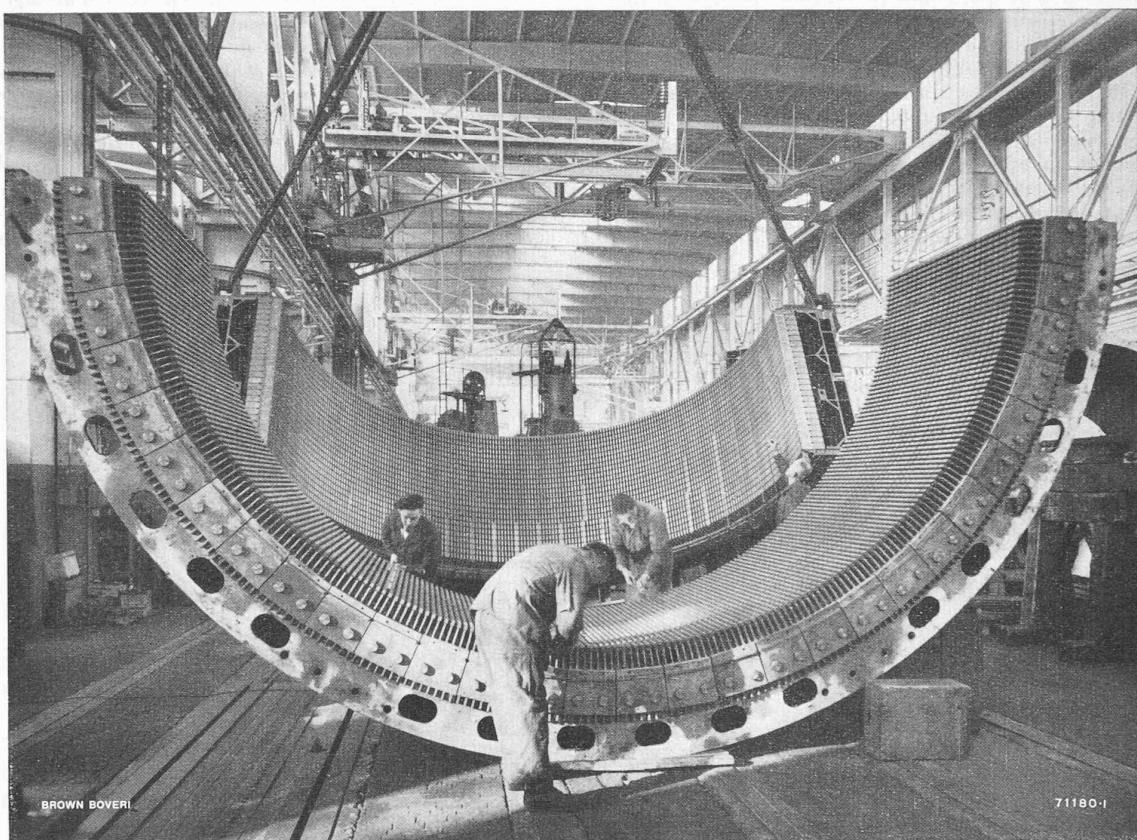


Fig. 46. — Stator de l'un des deux alternateurs triphasés 29 400 kVA, en cours d'usinage.

sa flexion au minimum malgré les grandes sollicitations auxquelles il est soumis et afin de supprimer toute vibration.

La disposition en étoile des bras du croisillon a l'avantage de répartir les déformations d'une manière symétrique sur l'axe de la machine, ce qui est très important pour que le fonctionnement du palier porteur soit parfait. De même, en cas de court-circuit, les efforts radiaux qui surgissent se répartissent également dans chaque direction.

Le *palier de guidage inférieur*, du type auto-graisseur, est placé dans le corps central du croisillon correspondant. La partie inférieure du coussinet baigne en permanence dans l'huile. La lubrification est assurée uniquement par la rotation de l'arbre qui oblige l'huile à monter dans des rainures en spirale pratiquées dans le coussinet. Ce mode de graissage est simple et sûr. Il n'exige ni pompe, ni réservoir, ni canalisations d'huile. Le refroidissement se fait par circulation d'eau.

On a pris un soin tout spécial pour empêcher les vapeurs d'huile de s'échapper des paliers. A tous les endroits où, par suite de la dépression due à la ventilation, une aspiration des vapeurs d'huile est à craindre, on a prévu des joints d'étanchéité doubles à labyrinthe séparés par une chambre d'air dans laquelle règne la pression atmosphérique.

Un *dispositif de freinage* comprenant six paires de patins garnis d'une manière non métallique et commandés par des cylindres à air comprimé agit sur les surfaces intérieure et extérieure d'un anneau de freinage en fonte d'acier placé sous la roue polaire.

Un *dispositif de levage* du rotor comportant de forts vérins à huile placés sur les bras du croisillon inférieur et agissant sur l'anneau de freinage permet de soulever la partie tournante du groupe. La manœuvre du dispositif se fait à l'aide d'huile sous pression fournie par une petite pompe à main.

Ce matériel, commandé le 9 juillet 1946, a été fourni par la S. A. BROWN BOVERI & Cie, à Baden.

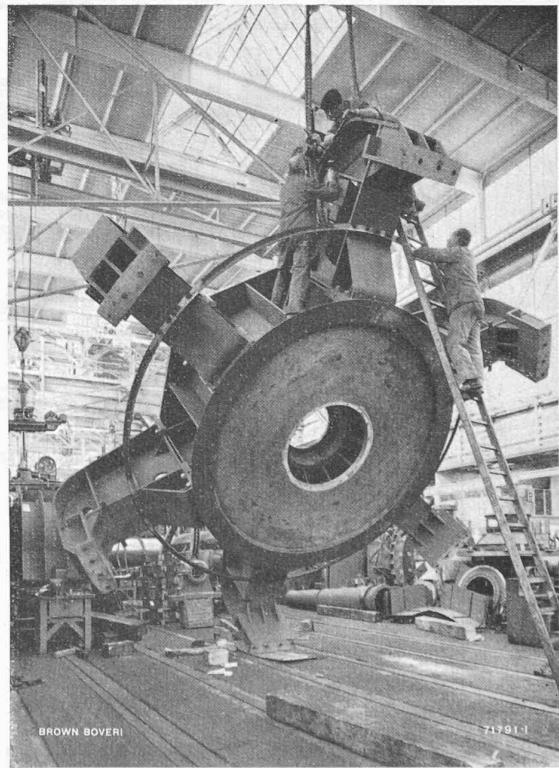


Fig. 48. — Montage en atelier des bras du croisillon supérieur d'un alternateur.

Tableaux des groupes principaux (fig. 49)

Des groupes de l'importance de ceux de Lavey comportent de nombreux auxiliaires électriques. Ceux-ci doivent être alimentés dans les meilleures conditions possibles et leur fonctionnement doit pouvoir être contrôlé avec le maximum de facilité. Cette condition sera obtenue par le choix judicieux du schéma des alimentations des auxiliaires et par un emplacement favorable des tableaux de groupe. L'exécution choisie sera également de première importance pour le personnel de service.

A Lavey, le tableau de groupe se trouve encastré dans la paroi aval de la salle de commande, face à l'alternateur. La surveillance de la machine et du tableau est ainsi simultanée.

Chaque tableau de groupe comprend quatre panneaux pour la vanne papillon, la turbine, le régulateur de la turbine et la partie électrique, mesure et protection de l'alternateur. Un schéma lumineux se subdivisant en trois parties : vanne, régulateur, turbine et alternateur, permet de contrôler toutes les manœuvres essentielles. La position de chaque organe se trouve nettement représentée. Les perturbations elles-mêmes sont signalées également au tableau lumineux, dans certains cas avec accompagnement de signaux acoustiques nettement discriminés. Il en est de même de la transmission des ordres de marche et d'arrêt qui sont transmis du poste de commande. Les avantages de cet appareillage sont nettement apparus lors de la mise en route de l'usine. Ils ont grandement facilité la mise au point du personnel de service et, de ce fait, le temps nécessaire à cette opération a été réduit au minimum.

En arrière du tableau de groupe, est installé le gros appareillage électrique, tel que transformateur de groupe, régulateur de tension, disjoncteurs d'excitation, etc., en un mot l'appareillage de gros encombrement dont la surveillance permanente n'est pas nécessaire et les interventions du personnel rares. On a ainsi simplifié le tableau de groupe, facilité le service et son encombrement étant de ce fait réduit, permis le choix de l'emplacement le plus favorable.

Le réglage de la tension des alternateurs se fait à l'aide de régulateurs de grande puissance à action rapide et à commande par huile sous pression (fig. 50). Ces régulateurs assurent un réglage précis et parfaitement stable. Suivant les circonstances, on peut les utiliser comme régulateurs automatiques ou comme rhéostats d'excitation commandés à distance. Lors de la mise en service ou en cas de besoin, ils peuvent être manœuvrés directement à la main, sur place. Ces régulateurs permettent de maintenir constante la tension des barres à 135 kV ou de la faire varier en fonction de la charge ; ils permettent aussi de répartir la puissance réactive entre les alternateurs fonctionnant en parallèle.

Constructeurs :

Tableaux de groupe : ELECTRO-TABLEAUX S. A., à Biel. Gros appareillage de groupe : S. A. BROWN, BOVERI & Cie, à Baden.

Fig. 49. — Tableaux des groupes principaux.

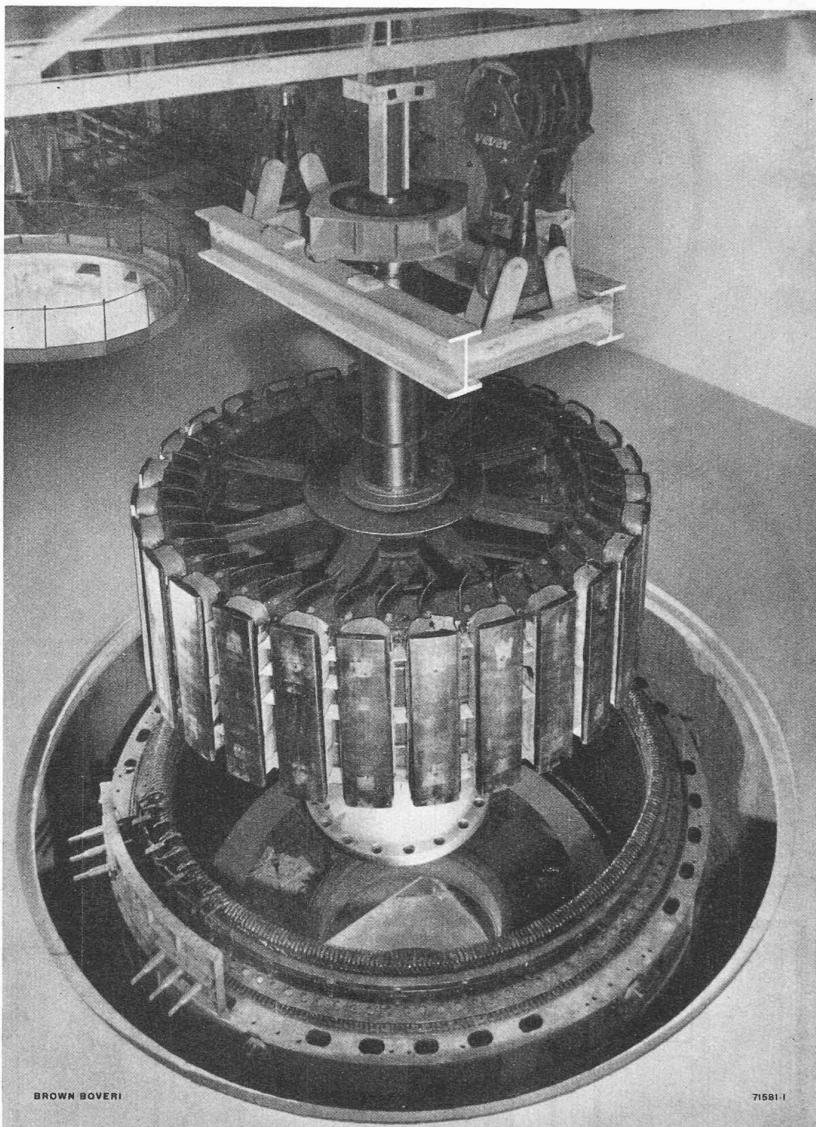


Fig. 47. — Mise en place du rotor de l'un des alternateurs.

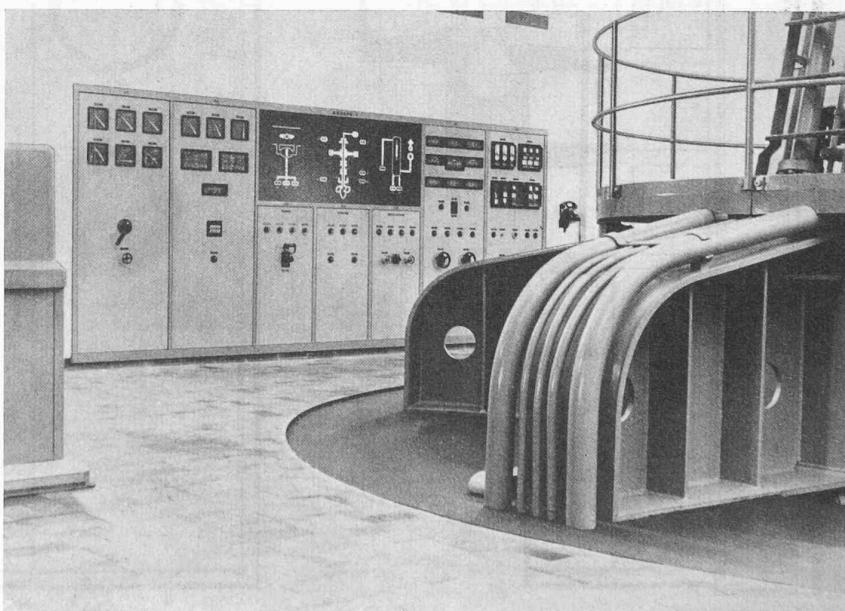


Photo J. P. Meystre

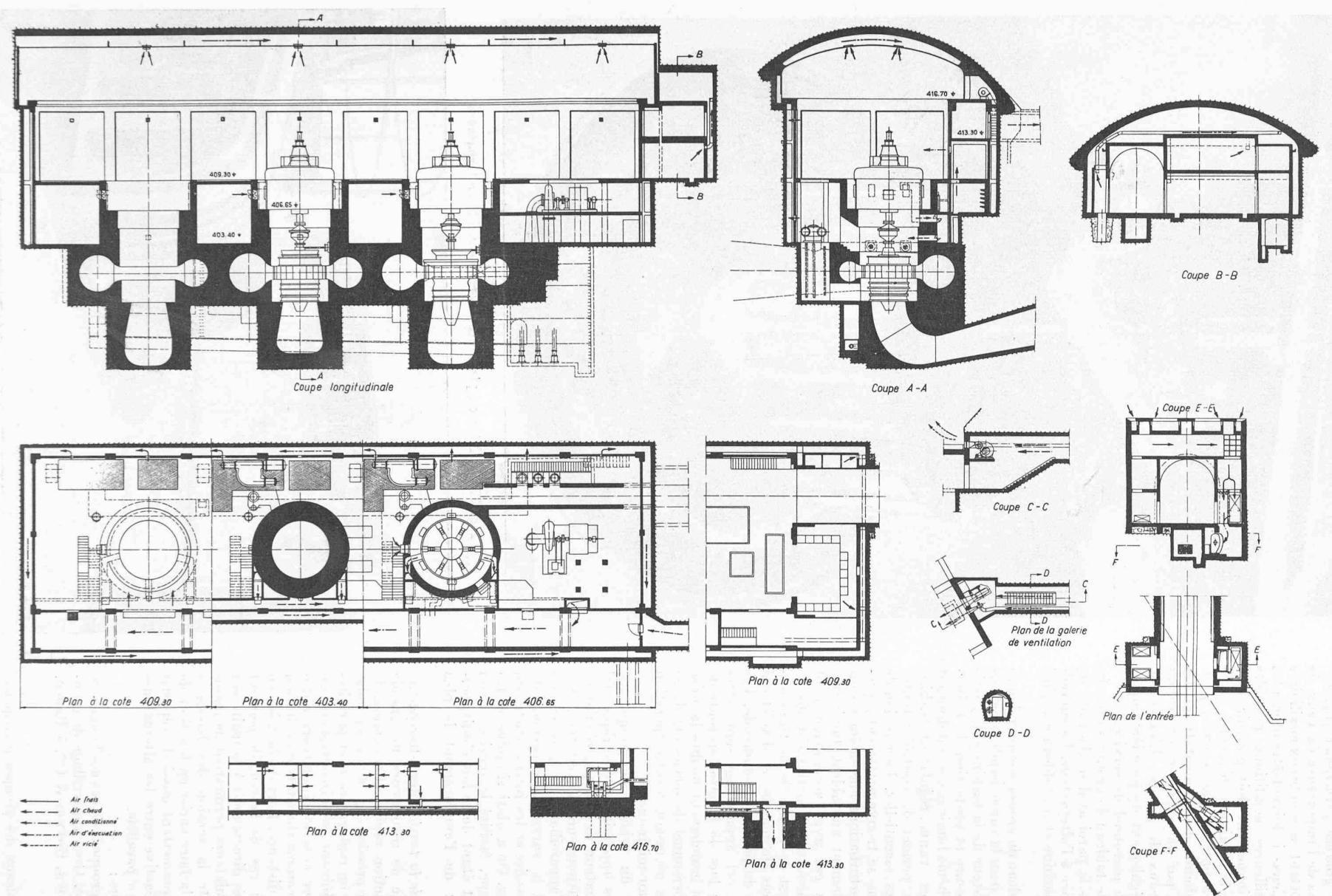


Fig. 49 a. — Installations de ventilation et de climatisation de la centrale souterraine. — Schéma des circuits.

L'air nécessaire à la centrale, aspiré de l'extérieur au portique d'entrée, est conditionné et convenablement réparti dans la partie inférieure de la cavité. Il est repris à la voûte pour être évacué par une galerie supérieure qui débouche à la station de pompage. Les différences de température considérables qui peuvent se produire, alors que la température de l'usine reste pratiquement constante, obligent à climatiser.

Transformateurs principaux (fig. 51 et 52)

Caractéristiques principales. — Pour pouvoir régler la tension des lignes à 135 kV, on peut faire varier la tension des alternateurs de 8800 à 11 200 V. L'énergie produite par chacun des deux alternateurs installés pour la première étape est transmise par l'intermédiaire d'un groupe transformateur de 29 400 kVA composé de trois unités monophasées couplées en triangle/étoile et dont les caractéristiques sont :

Puissance continue	9 800 kVA
Rapport de transformation à vide	11 200/160 000 : $\sqrt{3}$
Poids, sans huile	env. 19 000 kg
» avec huile	env. 23 300 kg
Encombrement, longueur	3 000 mm
» largeur	2 300 mm
» hauteur (avec bornes)	5 100 mm

Ces transformateurs d'extérieur sont refroidis par circulation de l'huile. A chaque cuve sont fixés deux réfrigérants comportant à leur partie supérieure un groupe moto-pompe silencieux.

Construction. — Les transformateurs sont du type cuirassé à tôles radiales.

Le circuit magnétique se compose d'un noyau central unique avec tôles disposées radialement et de culasses multiples en forme d' \square disposées sur tout le pourtour.

Les enroulements sont formés de bobines cylindriques en cuivre isolé au papier. L'enroulement à haute tension est disposé entre les deux moitiés de l'enroulement à basse tension et ses extrémités sont isolées au moyen de brides rabattues en papier imprégné d'huile.

La cuve est ronde et épouse étroitement la forme cylindrique de la partie active.

Les isolateurs à haute tension sont du type « condensateur »

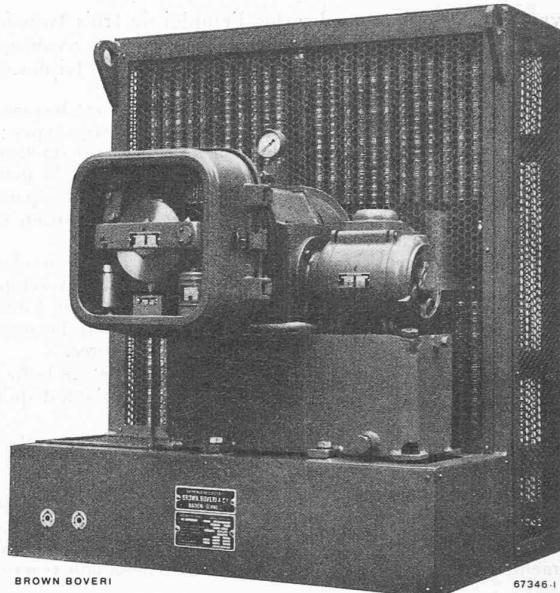


Fig. 50. — Régulateur de tension de grande puissance de l'un des alternateurs.

et sont protégés contre les intempéries par une gaine en porcelaine. L'espace entre cette gaine et l'isolateur lui-même est rempli par une masse isolante. Les bornes à basse tension sont en porcelaine.

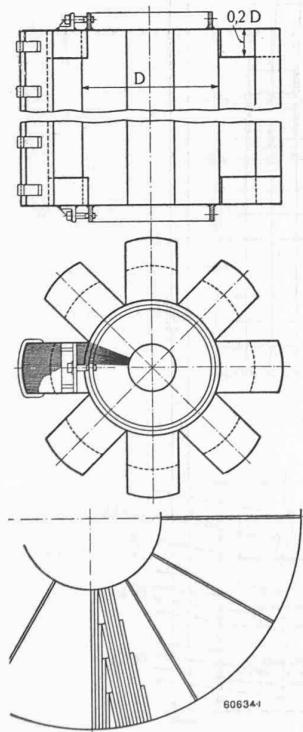


Fig. 52. — Circuit magnétique d'un transformateur monophasé du type cuirassé avec tôles disposées radialement.

Bien que formant un tout très compact, les différentes parties d'un transformateur de ce genre sont efficacement refroidies et facilement accessibles.

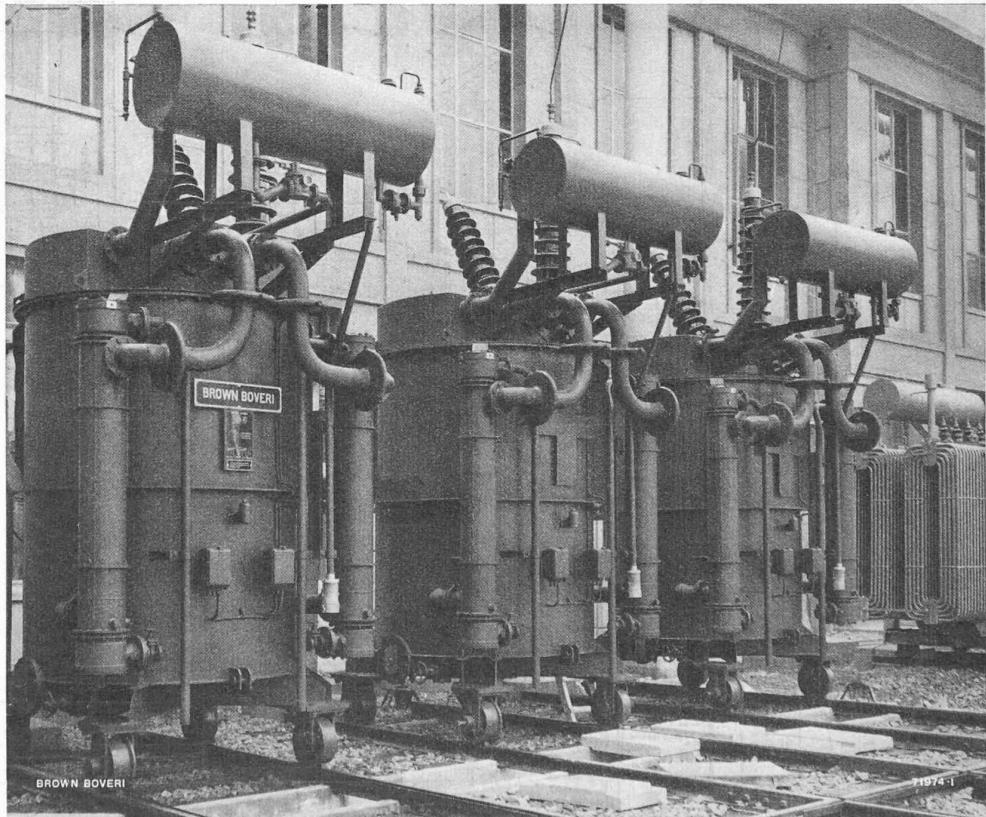


Fig. 51. — Groupe de transformateurs à 135 kV refroidis par circulation d'huile dans des réfrigérants à eau, au poste extérieur de la centrale de Lavay.

Ce groupe, dont la puissance nominale est de 29 400 kVA, se compose de trois transformateurs monophasés élevant la tension de 11 200 à 160 000 V. Ces transformateurs modernes, avec tôles du circuit magnétique disposées radialement et isolation au papier, peuvent être transportés complètement montés, ce qui simplifie beaucoup les travaux de montage. Leurs petites dimensions et leur faible poids permettent de réduire notablement le coût de la tour de démontage et du pont roulant.

Il vaut la peine de rappeler que l'emploi de trois transformateurs monophasés à tôles radiales présente les avantages suivants par rapport à la construction courante triphasée :

- 1° La hauteur des bras horizontaux de la culasse est beaucoup plus faible que dans les transformateurs d'autres types ; il en résulte une importante réduction de la hauteur du transformateur, d'où facilité de transport et économie de poids.
- 2° La longueur moyenne du circuit magnétique est plus petite, d'où économie sur le poids du fer actif et diminution des pertes dans le fer.
- 3° La forme de la cuve serrant d'assez près la forme circulaire du circuit magnétique, il y a peu d'espaces libres remplis d'huile et il en résulte une diminution du poids de l'huile.
- 4° Le ronflement des transformateurs en service est beaucoup plus faible que pour les transformateurs ordinaires.
- 5° L'emploi de transformateurs monophasés permet de tenir en réserve sans gros frais une unité monophasée n'ayant qu'un tiers de la puissance d'un groupe.
- 6° L'encombrement des transformateurs monophasés est tel qu'ils peuvent facilement être transportés avec leur partie active toute montée.
- 7° Le montage sur place et la mise en service sont très simples et rapides puisque ces transformateurs arrivent à destination complètement montés. Les travaux de révision sont également très faciles en raison de la simplicité de la construction.

Il faut reconnaître que, dans le cas qui nous occupe, le prix de trois transformateurs monophasés est plus élevé que celui d'un transformateur triphasé. Cependant, en tenant compte de l'économie réalisée sur la construction du pont roulant et de la tour de décuvage, il se révèle que la solution avec transformateurs monophasés est, en réalité, la plus économique. Un autre facteur qui joue un rôle important dans l'adoption de cette solution est que la révision d'un groupe de trois transformateurs peut se faire sans mise hors service prolongée. Il suffit, en effet, de remplacer l'élément monophasé à réviser par l'un quelconque des éléments d'un autre groupe hors service ou par un élément de réserve.

Transformateurs à 10/60 kV

Ces transformateurs existaient dans l'ancienne centrale du Bois-Noir. Leurs caractéristiques principales étaient : Triphasés 8000 kVA/6300/130 700 V avec dispositif de réglage sous charge.

La transformation de ces appareils permit de leur donner les caractéristiques suivantes :

Puissance constante à toutes les prises 7500 kVA

Rapport de transformation à pleine charge et

$\cos \phi = 0,8$ $10\ 000 \pm 10 \times 120/62\ 500$ V

Couplage triangle/étoile avec neutre sorti

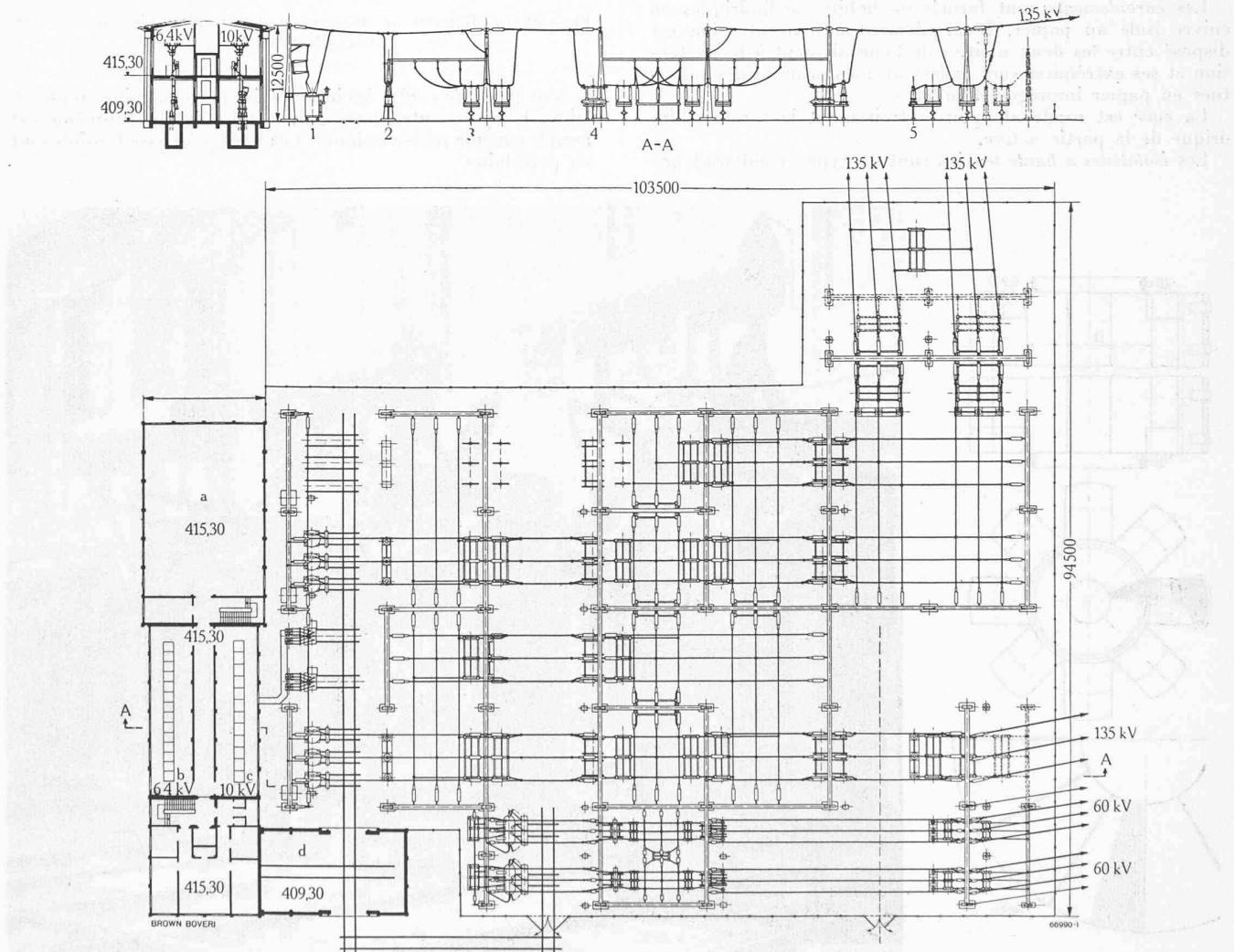


Fig. 53. — Vue en plan et coupe du poste extérieur à haute tension.

Ce poste est adjacent au bâtiment contenant l'appareillage à 10 et à 6,4 kV, également visible sur la figure.

- | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--|
| 1 = transformateurs principaux | 4 = disjoncteurs pneumatiques | b = poste de distribution à 6,4 kV |
| 2 = transformateurs d'intensité | 5 = transformateurs de tension | c = poste de distribution à 10 kV |
| 3 = sectionneurs | a = salle de commande | d = atelier et tour de démontage des transformateurs |

L'appareillage complet à haute tension des postes intérieur et extérieur comprend des disjoncteurs pneumatiques aussi bien en plein air qu'à l'intérieur.

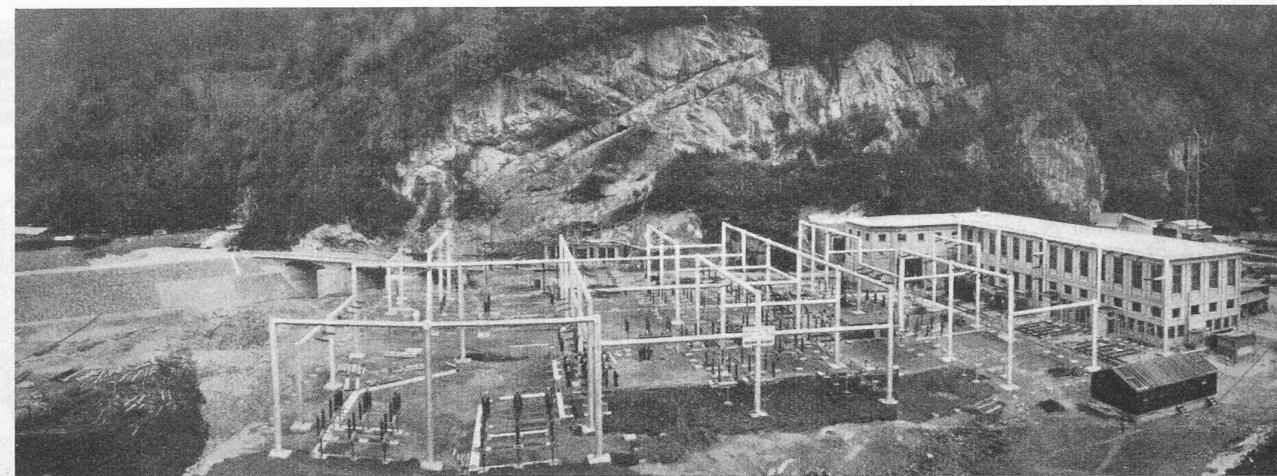


Fig. 54. — Vue générale du poste de transformation extérieur en construction.

Fréquence : 50 pér/sec

La modification comportait le remplacement des enroulements haute et basse tension. Pour utiliser l'espace disponible et certains éléments anciens, les enroulements nouveaux sont en aluminium.

La modification s'est effectuée, pour les deux transformateurs, dans la tour de décuvage de Lavey. Elle n'a pu être entreprise qu'après la mise hors service de l'usine du Bois-Noir et la mise en route du poste à très haute tension.

Constructeur : S. A. BROWN BOVERI & Cie, à Baden.

Transformateurs 10/6,4 kV

L'étude du schéma faite au début de cette note a précisé les conditions à remplir pour ce type d'appareils.

Il s'agit de deux transformateurs triphasés, à gradins et à bain d'huile, pour montage extérieur, refroidissement naturel par cuve à radiateurs tubulaires adossés, enroulements en cuivre, récipient d'expansion d'huile avec appareils de protection système Buchholz et dessicateur d'air, avec accessoires : galets de roulement, vannes, niveaux, thermomètre avec indicateur d'alarme, etc., etc.

Puissance nominale en service continu. 5000 kVA
Rapport de transformation à vide

$8800 + 12 \times 200$ V/6500 V

Couplage : triangle/étoile, neutre sorti, isolé pour la pleine tension.

L'insérateur de prises, à treize positions, est monté à même le transformateur et raccordé à l'enroulement à gradins des transformateurs.

Le dispositif de commande est monté dans une armoire fixée au châssis du transformateur.

L'appareillage et les instruments pour la commande à distance par boutons-poussoirs ou automatique ainsi que tout ce qui a trait à la protection sont installés au poste de commande du bâtiment extérieur.

Commandé le 30 janvier 1947.

Fournisseur : S. A. DES ATELIERS DE SÉCHERON, à Genève.

Poste extérieur 135 et 60 kV (fig. 53, 54 et 55)

Les conditions d'exploitation extrêmement sévères ont conduit, on l'a vu plus haut, à adopter pour le poste en plein air un schéma électrique relativement compliqué. On a pu, néanmoins, grâce à une disposition judicieuse et à la construction même des appareils, réaliser une installation offrant une sécurité absolue et d'exploitation facile.

Le poste est du type « étalé ». Il nécessite un espace relativement étendu, mais présente l'avantage d'une clarté très appréciable.

Tous les appareils sont placés sur des supports assez élevés pour qu'ils restent au-dessus du niveau de la neige en hiver et pour permettre de circuler sans danger dans l'installation.

Les sectionneurs sont pourvus de deux colonnes pivotantes

par pôle. Ils ont l'avantage de comporter un minimum d'éléments isolants et de pouvoir être commandés facilement à distance. Les points de contact des couteaux sont bien protégés et assurent un fonctionnement parfait des sectionneurs dans les conditions météorologiques les plus dures : brouillard, givre, neige, glace. La plupart des sectionneurs sont commandés à distance au moyen d'air comprimé, mais ils peuvent être aussi manœuvrés à la main à l'aide d'un levier. Seuls, certains sectionneurs manœuvrés très rarement, tels ceux des transformateurs de tension ou ceux de mise à la terre des lignes, sont munis uniquement de commandes à main par tringlage.

Les transformateurs de tension et d'intensité sont du type « isolateur ». Ils ont une puissance nominale très élevée avec une très grande précision de mesure, tout en ayant des poids et des dimensions relativement faibles.

Les disjoncteurs sont du type pneumatique de la nouvelle série de Brown Boveri & Cie S. A. Ces appareils sont basés sur le principe de la coupure multiple. Ils se distinguent, avant tout des modèles précédents, par leur construction extrêmement simple, ne prévoyant qu'un nombre restreint de pièces en mouvement qui, toutes, travaillent en étant soumises à des sollicitations très faibles. Par suite, ces disjoncteurs, dont les contacts peuvent être facilement revisés, fonctionnent avec une sécurité de service extrêmement grande et présentent en outre les avantages habituels inhérents aux disjoncteurs pneumatiques, tels que suppression du danger d'incendie, vitesse de coupure élevée, pouvoir de coupure très grand, coupure absolument sûre de longues lignes à haute tension et de transformateurs travaillant à vide. De plus, ces disjoncteurs pourront être très facilement complétés par un dispositif simple et peu coûteux, permettant le réenclenchement rapide si plus tard les conditions d'exploitation du réseau l'exigent. Les disjoncteurs à 135 kV ont un pouvoir de coupure de 2500 MVA et ceux à 60 kV, de 1000 MVA. Leur temps de coupure est de 0,06 seconde.

Poste de distribution intérieur à 10 et 6,4 kV

Cette partie de l'installation est caractérisée par des tensions d'exploitation relativement faibles. Par contre, les intensités de service et de court-circuit y sont importantes. Il en résulte que les efforts électrodynamiques entre conducteurs atteignent des valeurs élevées, ce qui conduit à prévoir des isolateurs et des armatures renforcées.

La figure 56 montre la place occupée par l'appareillage à 6,4 et à 10 kV. Une disposition claire sur deux étages, sans cloisonnement de cellules, a pu être réalisée grâce à l'emploi d'appareils sans huile. On a pu, de cette façon, construire un bâtiment de dimensions et de prix relativement réduits, grâce à l'absence des cloisonnements, des canaux et des cuves pour l'écoulement de l'huile qui auraient été nécessaires en employant des appareils ordinaires avec huile.

Les disjoncteurs (fig. 57) à 10 et à 6,4 kV sont du type pneumatique qui réunit, pour des installations intérieures, les qualités de sécurité requises, telles que suppression du danger d'incendie et d'explosion, rapidité de coupure et de manœuvre, simplicité et propreté. Ces disjoncteurs sont montés sur des plaques de protection, séparant nettement le côté haute tension de l'appareillage basse tension et des organes de commande à air comprimé. On peut ainsi sans danger, pendant le service, s'approcher des soupapes et des électroaimants pour en faire le contrôle. En outre, les disjoncteurs peuvent être aisément et rapidement mis en place ou enlevés depuis le couloir central et transportés à l'aide d'un chariot unique pour toute l'installation. Tous les disjoncteurs à 10 kV ont un pouvoir de coupure de 800 MVA, tandis que pour ceux à 6,4 kV, ce pouvoir est de 200 MVA.

Les transformateurs d'intensité sont du type traversée à plusieurs noyaux et assurent la liaison entre le local des disjoncteurs et celui des départs de câbles.

Les transformateurs de tension (fig. 58) sont isolés à l'air comprimé et présentent l'avantage de pouvoir être montés dans n'importe quelle position et de comporter un isolant incombustible.

Les sectionneurs sont tripolaires et ont des contacts largement dimensionnés pour l'intensité maximum qui les parcourt. Ils peuvent, en outre, supporter mécaniquement et thermiquement les courants de court-circuit les plus élevés de l'installation sans réaction anormale. Tous sont commandés pneumatiquement et leur manœuvre peut se faire, soit du couloir de service à l'aide de valves, soit de la salle de commande. Ces valves, de même que les boîtes d'extrémité des câbles de mesure et de commande, les barrettes de bornes et la valve principale d'air comprimé sont placées dans des armoires de commande installées dans le couloir de service. La face avant de ces armoires porte le schéma et les boutons-poussoirs destinés à la commande sur place. Ces armoires avec leurs schémas facilitent grandement le service.

Les isolateurs sont fixés par des pièces mécaniques, sans scellement, et présentent une résistance mécanique en rap-

port avec les efforts qu'ils ont à supporter. Les barres collectrices et les connexions sont en cuivre. Leur section a été choisie, compte tenu du courant de service maximum et des efforts mécaniques qui s'exercent entre conducteurs au moment des courts-circuits.

Dispositifs de protection et de synchronisation automatique

Chaque alternateur principal est muni des dispositifs de protection suivants :

- 1^o protection contre les surcharges ;
- 2^o protection contre les courts-circuits sur le côté 10 kV ;
- 3^o protection contre les surtensions ;
- 4^o protection différentielle contre les défauts d'isolement entre phases, englobant les circuits entre l'usine et le bâtiment extérieur ;
- 5^o protection contre les défauts à la terre sur le circuit statique ;

- 6^o protection contre les défauts à la terre sur le circuit rotorique ;
- 7^o protection contre les échauffements locaux à l'aide d'éléments de résistance placés dans le fer statique, dans les paliers et les canaux de ventilation ;
- 8^o protection contre l'incendie par un dispositif d'extinction à injection de CO₂, système Sifrag.

La désexcitation rapide de chaque alternateur est assurée par deux interrupteurs, l'un à commande électropneumatique, avec résistance de décharge, insérée dans le circuit principal de l'excitation, et l'autre placé dans le circuit shunt de l'excitatrice auxiliaire. Les transformateurs principaux et les transformateurs réglables comportent chacun les dispositifs de protection suivants :

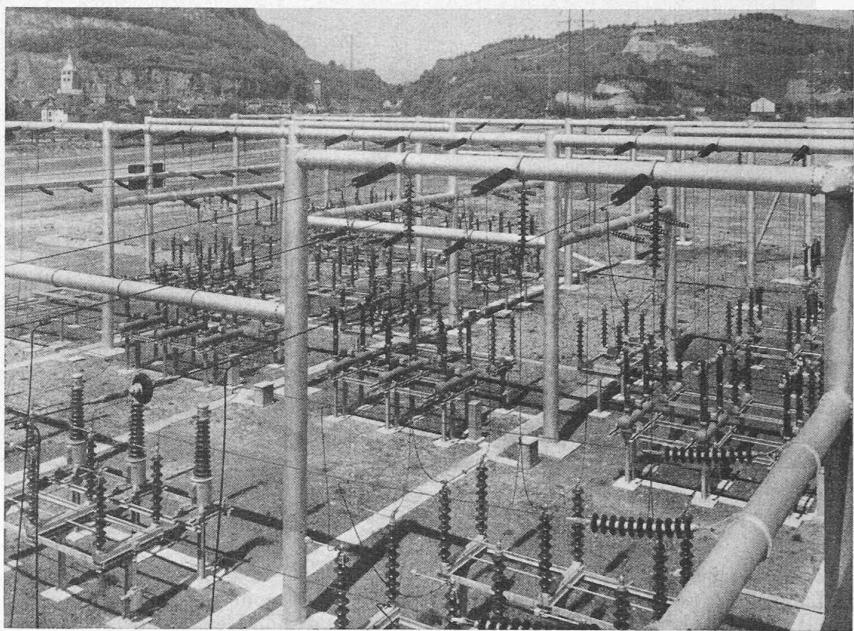


Photo J. P. Meystre

Fig. 55. — Vue du poste extérieur de transformation.

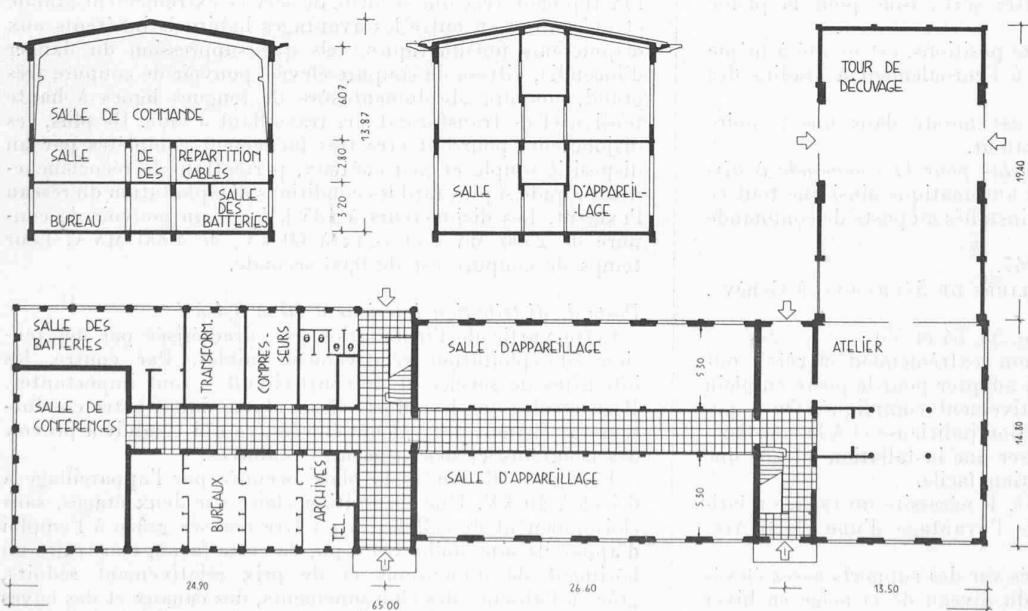


Fig. 56. — Bâtiment extérieur de la centrale. — Plan et coupes.

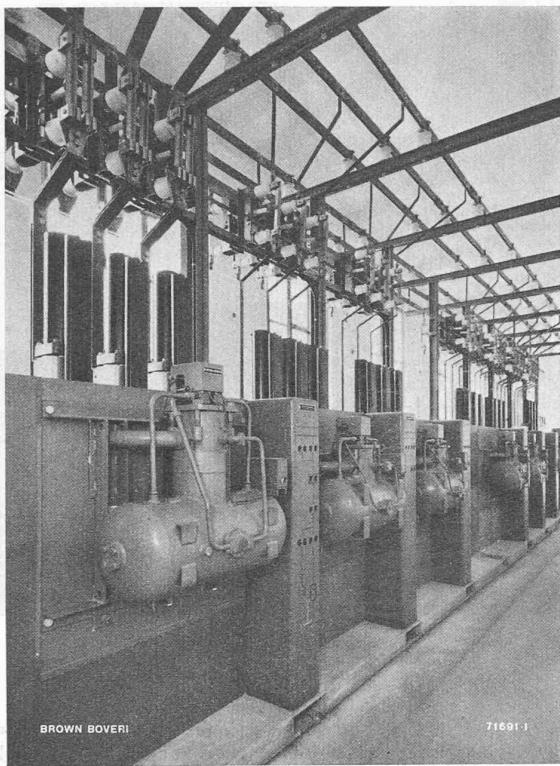


Fig. 57. — Disjoncteur pneumatique tripolaire dans l'installation de distribution à 10 kV de l'usine de Lavey, vu du côté du couloir de service.

La plaque de protection sépare nettement les organes de commande des parties à haute tension. Le service est facilité par les schémas peints sur les armoires dans lesquelles sont placées la valve principale d'air comprimé et les boutons-poussoirs pour la commande sur place des disjoncteurs et des sectionneurs.

- 1^o protection contre les surcharges ;
- 2^o protection contre les courts-circuits ;
- 3^o protection différentielle contre les défauts d'isolement entre phases englobant les câbles entre bâtiment extérieur et transformateurs ;
- 4^o protection Buchholz ;
- 5^o protection contre les surélévations de la température de l'huile à l'aide de thermomètres à contact.

Les lignes aériennes à 135 kV sont protégées contre les courts-circuits par des relais rapides de distance tandis que celles à 60 et à 6,4 kV le sont par des relais à maximum d'intensité.

Les mises en parallèle se font à l'aide d'un *synchroniseur rapide*. Cet appareil agit sur le régulateur de vitesse du groupe pour réaliser l'égalisation des fréquences et provoque l'enclenchement exactement au moment voulu, dès la première coïncidence de phases. Il fonctionne donc rapidement, avec une sûreté complète, même lorsque la tension et la fréquence s'écartent des valeurs nominales, après une perturbation par exemple, et ménage les machines en supprimant les à-coups. Sa rapidité est particulièrement précieuse lors de l'apparition de défauts dans le réseau parce qu'elle contribue à rétablir le service normal dans un délai très court.

Fournisseur : S. A. BROWN BOVERI & Cie, à Baden.

Tableaux et services auxiliaires

Tableaux (fig. 59)

La dissociation géographique des différentes parties de la centrale, entre la salle des machines souterraine et le bâtiment de l'appareillage à l'extérieur, fait saisir d'emblée la nécessité du fractionnement du poste de commande en deux éléments : l'un placé dans la centrale souterraine, l'autre dans le bâti-

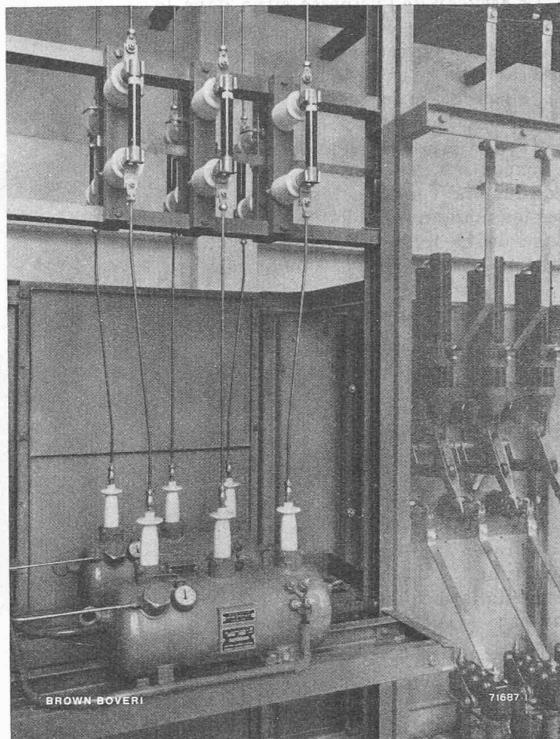


Fig. 58. — Transformateur de tension à air comprimé dans l'installation de distribution à 10 kV.

Grâce à une soupape de retenue, la pression d'air à l'intérieur de ces transformateurs est maintenue, même si l'arrivée d'air comprimé est interrompue. La consommation d'air de ces appareils est pratiquement négligeable.

ment à l'extérieur. Il était essentiel que ce partage n'entraîne pas des difficultés d'exploitation par un fractionnement irrational du responsabilités du service ; il fallait au contraire profiter de cette séparation pour séparer les responsabilités générales de l'exploitation des opérations internes proprement dites. Ces principes établis, les lignes générales suivantes ont été tirées :

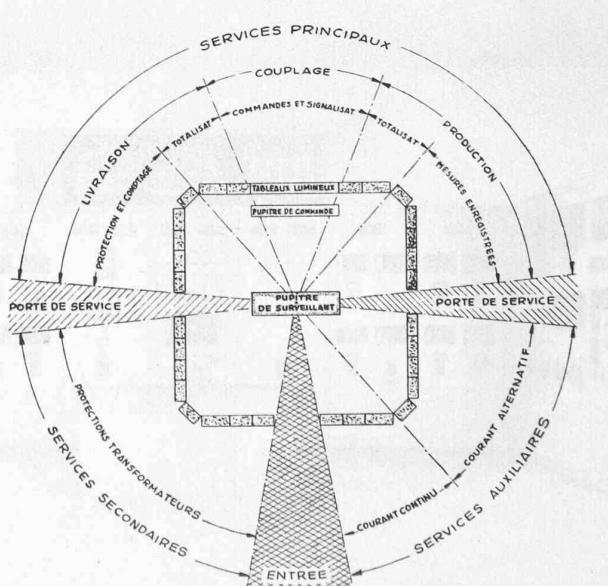


Fig. 59. — Diagramme de la salle de commande de l'usine de Lavey.

a) Le cerveau de l'usine se situe dans la salle de commande (fig. 60). C'est là le point de contact de l'usine avec l'extérieur, que ce soit avec le réseau du S. E. L., à Lausanne, ou avec d'autres réseaux faisant partie de l'interconnexion. C'est de là que s'effectuent toutes les opérations qui assurent l'exécution des consignes. Du pupitre de commande vont se faire directement toutes les manœuvres relatives aux départs (réglage de la tension, commande de disjoncteurs, sectionneurs, la synchronisation, etc.), celles relatives aux groupes, sauf ce qui a été prévu sous « Tableau de groupe ».

b) A la centrale souterraine sont réservées :

les opérations de mise en route et de surveillance des groupes principaux, les services internes de la salle des machines, y compris le groupe auxiliaire hydraulique et le groupe de secours Diesel, la charge des batteries d'accumulateurs assurant l'alimentation en courant continu.

Les installations ont, de ce fait, été les suivantes :

Dans le bâtiment extérieur (fig. 61) : 1^o la salle de commande, avec pupitre de commande et tableau lumineux ; 2^o la salle de répartition des câbles ; 3^o la salle de la batterie d'accumulateurs, source de courant continu pour tout l'extérieur.

Dans la centrale souterraine : 4^o le poste de commande pour les services internes (fig. 62) avec : un tableau lumineux simplifié, répétant les éléments essentiels du schéma lumineux principal, un enregistreur inscrivant les données hydrauliques les plus importantes, niveaux, position des vannes du barrage, etc. ; 5^o les tableaux de groupe, avec schéma lumineux ; 6^o la salle de la batterie d'accumulateurs pour le courant continu des services internes de la salle des machines ; 7^o un poste redresseur central pour la charge des deux batteries.

Il est aisément de se rendre compte, par ce qui précède, que toutes les opérations d'un caractère général partent de la salle de commande.

Au personnel de la centrale souterraine est dévolue la tâche d'exécution (par ex. mise en route d'un groupe, qu'il



Fig. 60. — Salle de commande. — Vue générale.

soit principal ou auxiliaire). Ce personnel a cependant, sous les yeux, une image de ce qui se passe sur le plan général. Il peut donc exécuter avec intelligence les prescriptions reçues.

Voici, brièvement résumées, les caractéristiques de ces diverses parties :

1. *Salle de commande.* Le personnel de service peut contrôler, par un tour d'horizon complet, il est vrai, tous les secteurs qui lui incombent.

Devant lui :

Le schéma lumineux lui permet de prendre instantanément connaissance de la situation du moment.

Le pupitre de commande va lui permettre de faire toutes les opérations, tout en les suivant sur le schéma lumineux.

Au-dessous du schéma, au centre, l'enregistreur hydraulique avec, à droite et à gauche, les panneaux concernant la synchronisation ; la production : mesure, enregistrement, indicateurs et appareils de protection ; le contrôle de l'heure et de la fréquence ; les départs à 135 kV avec un équipement analogue ; les départs à 60 et 6,4 kV.

Derrière lui :

Les services auxiliaires généraux sont accessibles.

2. *Salle de répartition des câbles.* Elle est située sous le poste de commande. C'est là qu'aboutissent tous les câbles de commande et de signalisation. Sur le châssis sont montés toutes les jonctions, coupe-circuit, relais de signalisation, etc. Tout l'appareillage n'exigeant pas une surveillance continue ou des manœuvres fréquentes est monté dans le répartiteur afin de simplifier les tableaux de la salle de commande.

3. *Les batteries d'accumulateurs.* L'éloignement des organes internes et du poste extérieur a obligé à prévoir la décentralisation de la source de courant continu, malgré la tension déjà élevée de 220 volts. Deux batteries identiques ont été installées : l'une dans le bâtiment extérieur, dans un local au-dessous du répartiteur ; l'autre dans la centrale souterraine (local annexe).

Caractéristique de chaque batterie : 220 V, 288 Amp/h.

Fournisseur : LECLANCHÉ & Cie, Yverdon.

Un seul redresseur, placé à côté du local batterie dans la centrale souterraine, alimente les circuits de courant continu de commande, signalisation, alarme. Si le redresseur s'arrête, par interruption sur le courant alternatif par

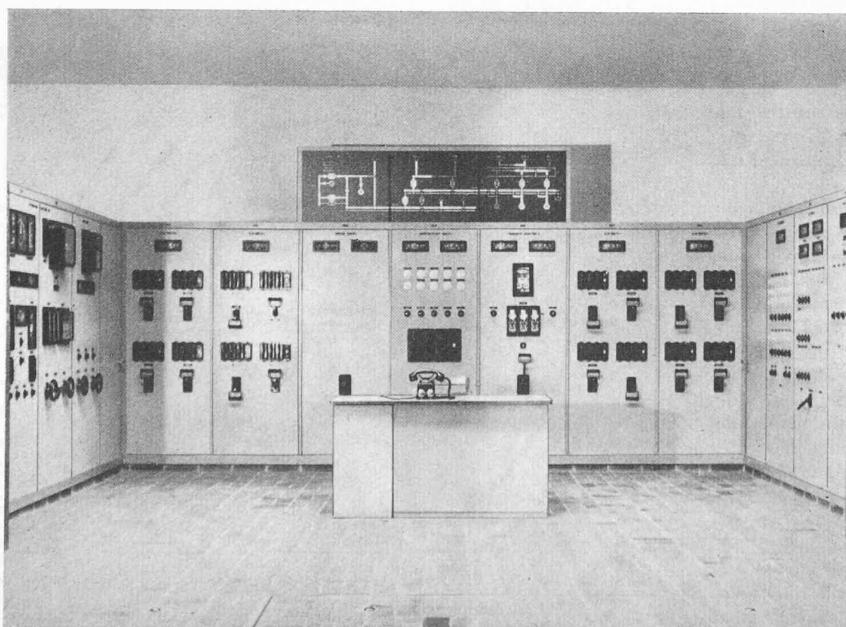


Photo J. P. Meystre
Fig. 62. — Centrale souterraine, poste de commande pour les services internes.

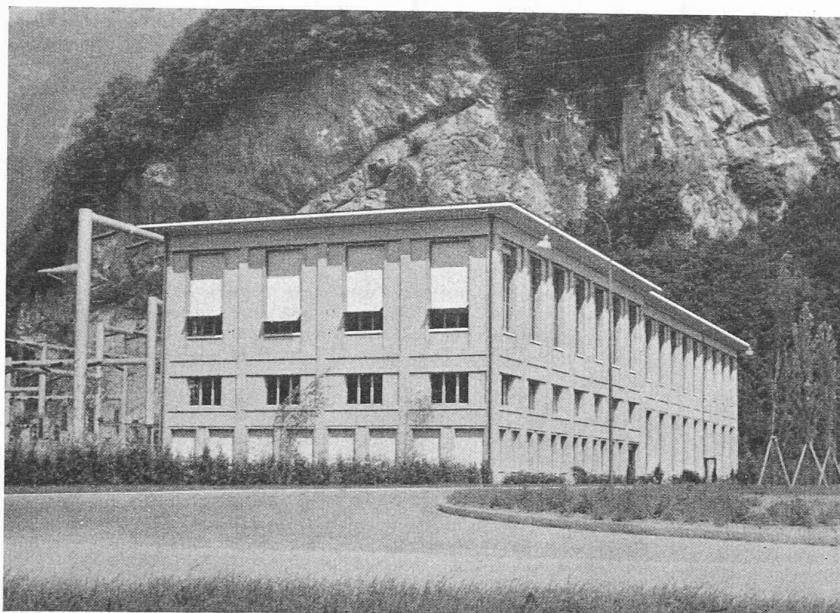


Fig. 61. — Bâtiment extérieur de la centrale.

Photo J. P. Meystre

exemple, la commutation de ces circuits s'effectue automatiquement sur les batteries.

4. *Le poste de commande de la centrale souterraine.* Il est placé à l'extrémité de la salle des machines, côté entrée. Il assure les services auxiliaires de celle-ci. Normalement, un transformateur 6400/380-220 volts l'alimente.

Le groupe auxiliaire hydroélectrique peut fournir également l'énergie nécessaire à la tension de 6,4 kV dont les panneaux, mesure, réglage, synchronisation et commande de ce groupe font partie de ce poste.

Le schéma général lumineux, mais simplifié, a déjà été mentionné plus haut comme l'enregistreur des mesures hydrauliques.

5. *Tableaux de groupe.* Voir plus haut sous « Tableaux des groupes principaux ».

Services auxiliaires

Sont à citer ici : l'*alternateur auxiliaire* (1300 kVA) accouplé à la turbine Francis mentionnée plus haut et installé au

sous-sol de la centrale (fourniture : ATELIERS DE CONSTRUCTION OERLIKON) ; les trois *transformateurs auxiliaires* (500 kVA, 6400/380 V) dont l'un se trouve au rez-de-chaussée de la centrale, les deux autres dans le bâtiment extérieur.

La mesure des grandeurs hydrauliques (fig. 64)

Lavey est une usine au fil de l'eau, elle ne possède pas d'accumulation ; on pourrait donc en inférer qu'aucune possibilité d'action du débit utilisé n'était nécessaire en fonction du débit du Rhône et qu'il fallait se borner à tirer du Rhône ce qui passait dans la rivière, ceci surtout pour la période où le débit disponible est inférieur à 200 m³/sec.

Ces considérations, valables pour une échelle des temps mesurés en jours ou semaines, ne le sont plus sur la base horaire. En effet, la retenue du barrage, à Evionnaz, n'est pas d'un volume négligeable, son niveau peut varier dans des limites relativement étendues. On peut donc utiliser cette variation pour augmenter, en période de basses eaux, la puissance produite pendant une courte durée et contribuer ainsi à couvrir certaines pointes journalières, par exemple la pointe de midi. Cela n'est possible qu'à la condition que, du poste de commande, on puisse constamment suivre les variations de la chute, niveaux et débits, et que l'on puisse les influencer directement.

Nous avons vu que, du poste de commande, il était possible d'effectuer toute manœuvre au barrage. L'installation de mesures adéquates, imposée d'ailleurs par la concession, donne les éléments voulus pour cela. Cet équipement est le suivant :

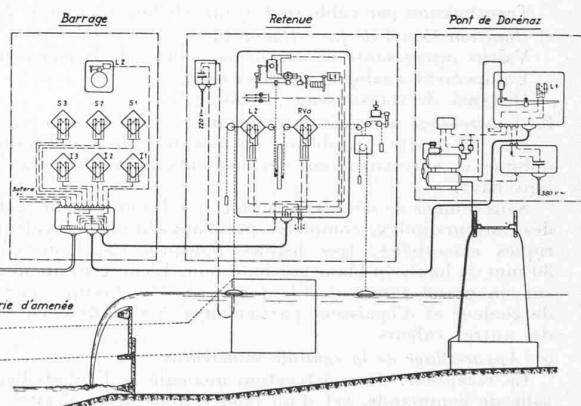
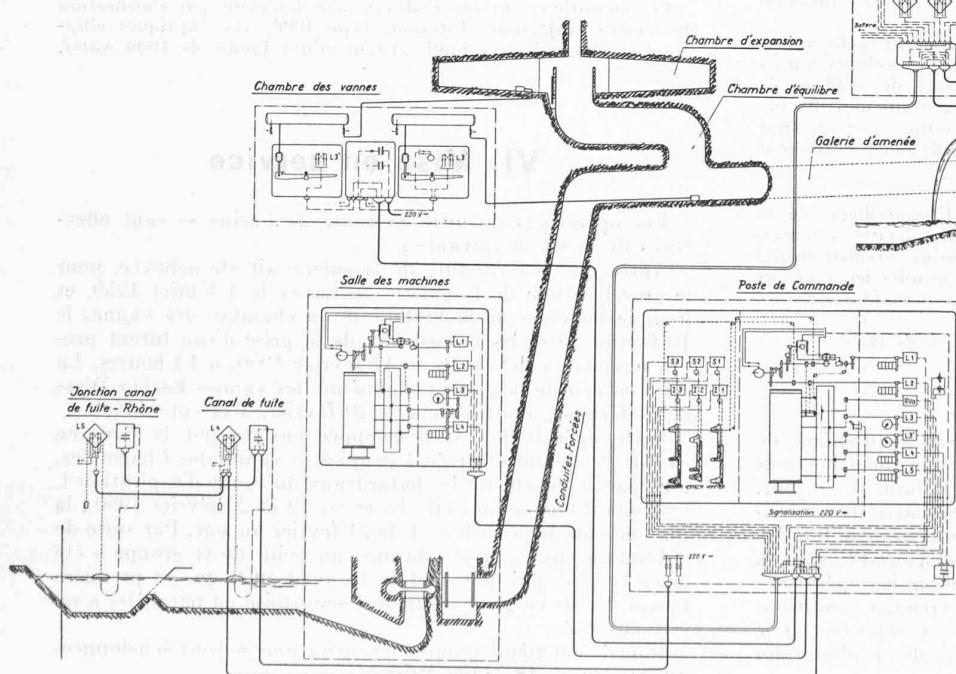


Fig. 64. — Schéma général des installations de télémesure des grandeurs hydrauliques.

- L1 = Poste du pont de Dorénez
- L2 = Poste de la Retenue
- L3 = Chambre d'équilibre
- L3' = Chambre d'expansion
- L4 = Poste du canal de fuite
- L5 = Poste jonction canal de fuite-Rhône
- S1 = Vantaill supérieur du pertuis N° 4
- S2 = Vantaill supérieur du pertuis N° 2
- S3 = Vantaill supérieur du pertuis N° 3
- I1 = Vantaill inférieur du pertuis N° 1
- I2 = Vantaill inférieur du pertuis N° 2
- I3 = Vantaill inférieur du pertuis N° 3
- RVa = Poste de la Retenue (dispositif A.C.M.V. de commande des vannes).



a) *Pont de Dorénaz*, en amont du remous d'Evionnaz, le *Poste de mesure L1* comprenant :

Un indicateur du débit, dispositif de mesure pneumatique du niveau d'eau, accessible dans une cabine de maçonnerie ; la mesure des variations de niveau est transformée en impulsions correspondant aux variations de débit selon une courbe d'étalonnage. La distance à l'usine est de 10 km environ ; la transmission est assurée par un câble de signalisation souterrain. Il est ainsi possible d'observer la régularisation de la retenue conformément au règlement du barrage.

On a aussi : une indication anticipée de la quantité d'eau, donc de l'énergie disponible.

b) *Retenue*. — *Poste de mesure L2*, à proximité du barrage.

Cet indicateur donne un renseignement particulièrement important : le niveau de la retenue qui, en hiver, doit être de façon générale maintenu aussi haut que possible, afin de travailler avec la chute la plus élevée. En été, il s'agit de suivre les niveaux prescrits par le règlement du barrage.

La télétransmission est faite au poste de commande et à la salle des machines ; comme la position des vannes est également figurée, il en résulte que le personnel de service peut voir, soit la hauteur libre d'un vantail, soit l'épaisseur de la lame déversante, point particulièrement important dans le cas d'évacuation de corps flottants ou de glaces.

La transmission s'effectue par câble, posé dans une gaine de la galerie souterraine. Longueur, environ 4 km.

c) *Chambre d'équilibre* : L3 et L3¹

Deux balances de pression, placées dans la chambre des vannes, enregistrent la pression, donc les niveaux, dans le répartiteur L3 et dans une des chambres d'expansion supérieure de la chambre d'équilibre.

La connaissance des valeurs ci-dessus est particulièrement intéressante. Elle donne directement avec la lecture L4 la chute brute sous laquelle travaillent les machines ; elles permettent donc une intervention au bon moment. Cette indication est particulièrement intéressante lors d'une mise en marche d'une machine. Le machiniste peut apprécier la rapidité maximum de prise de charge, tout en évitant les risques de rentrée d'air.

Indication transmise au poste de commande et à la centrale souterraine par câble souterrain.

d) *Canal de fuite L4*

Un indicateur de niveau à flotteur, avec transmetteur placé à l'origine du canal de fuite, donne les indications précédentes, la chute brute, transmise au poste de commande et à la centrale souterraine.

Transmission par câble souterrain. Distance, environ 2 × 100 m.

e) *Jonction Canal de fuite-Rhône L5*

Valeur intéressante en vertu des clauses de la concession.

Équipement analogue au précédent.

Distance de transmission : 1000 m.

f) *Appareillage au poste de commande*

Fixé au centre du tableau, un récepteur de grandes dimensions indique et enregistre tous les éléments dont il est fait mention plus haut.

Sans donner de détails, précisons que les indicateurs comportent des curseurs-index, complétés par l'apparition des valeurs numériques essentielles, très lisibles puisqu'il s'agit de chiffres de 30 mm de haut, en blanc sur fond noir. L'enregistrement s'effectue sur un grand tambour. Chaque courbe se marque par un trait de couleur et d'épaisseur particulières et se différencie nettement des autres valeurs.

g) *Appareillage de la centrale souterraine*

Ce récepteur, de construction analogue à l'appareillage de la salle de commande, est d'un modèle plus petit, destiné à renseigner le personnel de la salle des machines. Certains enregistrements ont été laissés de côté parce que non indispensables ici, ceci par économie et pour éviter toute indication non absolument nécessaire.

Commande passée le 9 avril 1948.

Constructeur : FRANÇOIS RITTMAYER S. A., à Zoug.

Divers.

L'éclairage

Pour Lavey, avec sa centrale souterraine, le problème de l'éclairage se posait sur un plan autre que pour une usine dont l'activité, une partie du temps, se passe à la lumière du jour. Le personnel de service, en effet, passe une partie non négligeable de son existence, celle où il travaille, hors de la lumière naturelle. Il est donc non seulement indispensable que la lumière artificielle permette facilement toutes les opérations de surveillance et d'entretien, mais qu'elle crée des conditions d'habitabilité favorables. Cette condition est obtenue par le genre de lumière et par un choix judicieux des couleurs des parois, machines et appareils.

Une condition supplémentaire doit être remplie. Il faut que la lumière souligne les qualités architecturales de l'ouvrage, qu'il ce soit dans la salle des machines, où la voûte éclairée indirectement donne une juste proportion à ce vaste espace, ou en caissons à la salle du tableau dont les bandes lumineuses du plafond accentuent le dessin des tableaux eux-mêmes.

De façon générale, il a été fait un très large emploi de l'éclairage par tubes fluorescents. Nous nous bornons à mentionner les exemples suivants :

Centrale souterraine

L'éclairage général de l'usine est complètement indirect. Il atteint une valeur de 60-70 lux au sol. Il est obtenu par une série de tubes fluorescents posés le long du chemin de roulement du pont roulant. De chaque côté de celui-ci et sur toute la longueur de l'usine sont disposées en parallèle deux gouttières fixées obliquement à 45° et contenant : l'une des tubes TL 40/33 et l'autre des tubes TL 100 watts blancs.

Un éclairage direct complémentaire de 30-40 lux environ, décroissant en même temps, est réalisé au moyen d'une série de seize appliques verticales fixées contre les murs de la centrale et espacées de 7 m les unes des autres. Elles contiennent chacune quatre tubes TL 40 W/33. En outre, quatre lampes à incandescence de 60 W sont fixées dans chaque armature et fonctionnent comme lumière de secours sur courant alternatif ou continu.

Salle des machines

Poste de commande adjacent à la précédente ; il faut cependant un éclairage complémentaire. Celui-ci est réalisé par un caisson lumineux, encastré dans le plafond, caisson de 500 cm × 90 cm, contenant douze tubes luminescents TL 40 W, répartis sur trois rangs.

Bâtiment extérieur. — *Poste de commande*

Le plafond de cette salle comporte des caissons latéraux, dans lesquels sont montés deux rangées de tubes luminescents de 40 W, au total 64 tubes.

Un caisson central souligne l'axe longitudinal, avec six tubes de 65 W.

Tous les caissons sont munis de grilles écran telles que les lames apparaissent également lumineuses pour un observateur placé dans la salle.

On obtient ainsi un éclairage de 60 lux dans le plan vertical, sur les panneaux des instruments.

Poste extérieur à très haute tension

De très grandes dimensions, ce poste ne doit être éclairé qu'exceptionnellement. Dans ces cas, il est nécessaire qu'une visibilité suffisante soit obtenue pour effectuer les manœuvres voulues avec la même sécurité qu'à la lumière du jour. Il ne pouvait être question d'établir des installations d'éclairage à proximité des installations à très haute tension. Il fallait, dans toute la mesure du possible, que les sources lumineuses soient en marge ou en dehors du poste.

Ces conditions ont été réalisées complètement par l'utilisation de quatre projecteurs Infranor, type 1000, avec optiques elliptiques à cinq miroirs, munis chacun d'une lampe de 1000 watts.

VI. Mise en service

Les opérations de mise en route de l'usine se sont effectuées de la façon suivante :

Après que la fermeture de la galerie ait été achevée, pour le gros bouchon de la galerie de Lavey le 4 février 1950, et pour le bouchon de la bretelle de la chambre des vannes le 10 février 1950, les batardeaux de la prise d'eau furent progressivement enlevés dès le 17 février 1950, à 13 heures. La mise en eau de la galerie elle-même, les vannes Escher-Wyss étant fermées, était achevé le 20 février, à la cote 444,0.

Cette opération s'est développée ensuite par la mise en eau de la conduite forcée I jusqu'à la vanne des Charmilles, puis par l'enlèvement des batardeaux du coude d'aspiration I. Ces opérations se sont effectuées les 19 et 20 février 1950 ; la mise en eau de la turbine I, le 21 février au soir. Par suite de différentes circonstances, la mise au point de ce groupe a été assez longue, puisque c'est le 14 avril 1950 que la première fourniture de ce groupe sur le réseau (mise en parallèle) a pu être effectuée.

Pour le deuxième groupe, les opérations se sont échelonnées du 20 juin au 18 juillet 1950.

La galerie est, dès ce moment-là, restée constamment en eau ; l'examen des terrains de la rive droite, traversés par elle, n'a signalé aucune venue d'eau particulière jusqu'à maintenant. On peut donc en inférer que l'étanchéité de cet ouvrage est satisfaisante.

Au cours de 1950, tous les travaux ont pu être terminés et mis successivement en service. A part les mises au point et les essais inhérents à des travaux de cette envergure, où de nombreuses innovations sont introduites et doivent être adaptées à des conditions très particulières, les équipements se sont bien comportés et un service régulier a pu être assuré.

Les essais de rendement sont en cours. Ils n'ont été possibles que par la mise au point de dispositifs d'essais nouveaux.

VII. Coût des travaux

Bien que certains travaux de finitions, aménagements extérieurs et essais restent à effectuer, le coût probable de l'ensemble de l'aménagement de Lavey peut être résumé par le tableau ci-dessous :

Barrage, prise d'eau et correction du	
Rhône	Fr. 17 683 131.20
Galerie d'aménée	» 17 998 658.90
Chambre d'équilibre et conduite forcée	» 7 285 985.80
Usine souterraine	» 5 488 123.—
Canal de fuite	» 4 936 930.30
Bâtiments extérieurs	» 2 339 507.75
Aménagements extérieurs	» 1 581 145.20
Partie mécanique	» 6 180 000.—
Partie électrique	» 7 961 062.30
Terrains, droits de concession, indemnités, honoraires, assurances, intérêts intercalaires, etc.	» 6 752 417.10
Total	Fr. 78 206 961.55

Ce total dépasse d'environ 27,5 % les prévisions de 1945. L'augmentation des dépenses est due en premier lieu à l'augmentation générale des prix de la fourniture, à l'augmentation de la main-d'œuvre. Des difficultés particulières survenues au cours des travaux de génie civil, à la prise d'eau, dans la galerie (trias, rocher diaclasé, etc.), à l'usine, et les changements de programme qui en furent la conséquence ont également joué un rôle non négligeable.

VIII. Production d'énergie et considérations finales

L'évolution rapide de la consommation sur le plan suisse, au cours de la guerre et de l'avant-guerre, soit depuis 1937, a été fortement marquée par la situation générale. Cette augmentation exceptionnelle des besoins, alliée à des années hydrologiquement déficitaires, ont entraîné les restrictions d'utilisation heureusement disparues aujourd'hui. Les nombreux aménagements d'usines existantes mis à part, Lavey est la première grande réalisation d'après guerre. Entreprise dès que les restrictions du ciment et des fers l'ont rendue possible, la construction en a été effectuée dans les délais les plus réduits.

L'apport d'énergie calculé était le suivant :

Equipement total

	Eté Mai à septembre mio kWh	Hiver Octobre à avril mio kWh	Total
(3 groupes)	210	116	326
Première étape	152	116	268
(2 groupes)			

Bien que la fourniture d'énergie n'ait été que partielle, Lavey a produit, en 1950, 149 792 400 kWh.

Pour 1951, les résultats à ce jour sont les suivants :

Janvier	13 999 300 kWh
Février	12 152 200 »
Mars	14 599 800 »
Avril	18 487 400 »
Mai	28 132 700 »
Juin	24 736 600 »
Au 26 juillet à 24 h.	19 734 100 »

Total de la fourniture au 27 juillet 131 851 100 kWh

La plus grande fourniture journalière a été enregistrée le 22 mai 1951, avec 1 138 700 kWh ; la pointe maximum 50 000 kW.

Les valeurs ci-dessus dépassent nettement, pour les quatre mois d'hiver, celles prévues : 59,2 millions de kWh au lieu de 54 millions. Pour les mois d'été, les conditions hydrologiques exceptionnelles n'ayant pas permis le placement de tous les excédents disponibles, la production de l'usine est restée un peu au-dessous de ses possibilités réelles.

Il vaut la peine de souligner que, le 21 août 1951, l'usine de Lavey, depuis sa mise en route, avait produit plus de 300 000 000 kW.

Il est ainsi possible de constater l'apport substantiel que constitue Lavey sur le plan local, régional et suisse ; il est particulièrement réjouissant de souligner l'accroissement substantiel que constitue la production de Lavey de l'hiver 1950/51, soit 115,8 millions de kWh, si on la compare aux possibilités correspondantes du Bois-Noir qui se montaient à 42 millions de kWh, et ceci avec une production d'octobre incomplète.

* * *

L'apparition d'un projet d'aménagement hydroélectrique crée toujours, dans le public, des réactions diverses. Tout en étant persuadé de la nécessité de couvrir les besoins vitaux de l'économie, on craint souvent un enlaidissement du paysage et une évolution malheureuse de l'aspect de certains sites. Ces sentiments sont exprimés par les interventions de la Ligue suisse pour la protection de la nature, par exemple.

Ces préoccupations légitimes n'ont pas été négligées à Lavey et il faut relever d'ailleurs que certains travaux d'ingénieurs présentent une réelle beauté et s'intègrent heureusement dans le paysage modifié par eux.

Nous sommes persuadés que c'est le cas à Lavey. Les photographies du présent ouvrage permettent de constater que la région du barrage, par exemple, n'aura rien perdu par la présence de cet ouvrage aux lignes calmes (fig. 31).

La plaine de Lavey, elle aussi, a certainement gagné par la création du canal de fuite, aux berges majestueuses, et par les constructions extérieures qui ont remplacé certaines zones plus ou moins marécageuses (fig. 65).

L'usine souterraine est également une création qui apporte un enrichissement.

Indépendamment de cela, les autorités lausannoises, toujours soucieuses de donner à l'art une place légitime, ont chargé le peintre Pizzotti de rappeler, par deux œuvres, les travaux de Lavey. Placées toutes deux dans le bâtiment extérieur, elles ornent, l'une la salle des commissions, l'autre le haut de l'escalier principal conduisant au tableau de commande.

Près de l'entrée de l'usine, une œuvre sculpturale de Milo Martin, choisie à la suite d'un concours, symbolisera l'usine elle-même et l'asservissement de la force du Rhône.

Sur le plan technique, relevons que Lavey est la première usine souterraine à basse chute construite dans notre pays. Si la construction d'usines souterraines n'est pas nouvelle — on en trouve en effet de nombreux exemples en Suède et en Italie — il vaut la peine de souligner l'élément nouveau que constitue l'exécution souterraine de l'ensemble des ouvrages : prise d'eau, galerie, chambre d'équilibre, conduites forcées, usine, pour un aménagement au fil de l'eau à basse chute et pour un très gros débit. Il en est résulté la résolution de nombreux problèmes spéciaux et un apport technique substantiel.

Et ceci est valable aussi bien pour les techniques du génie civil que pour les problèmes d'équipement mécanique et électrique.

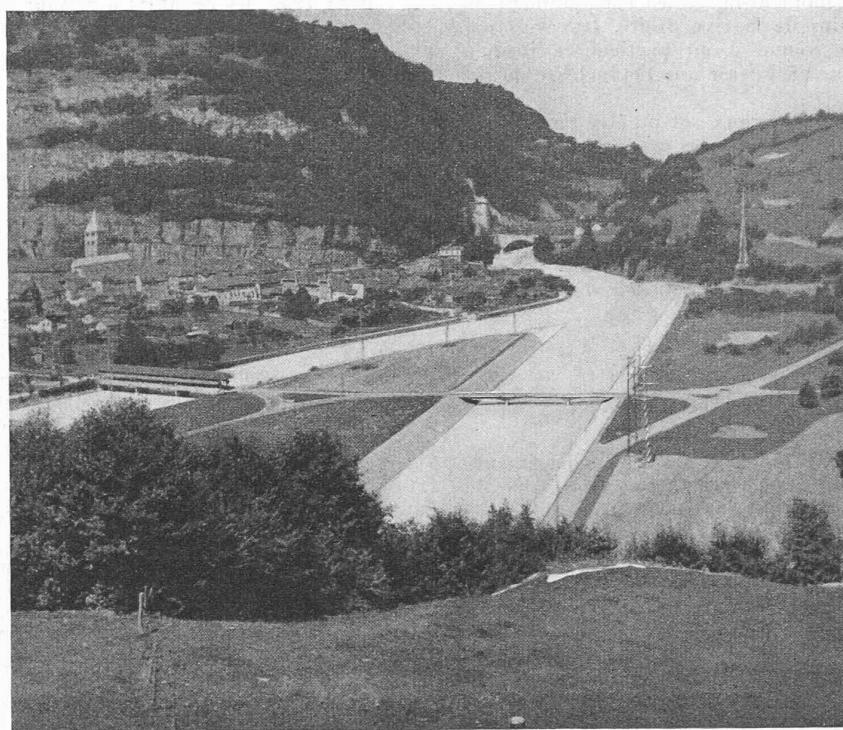


Photo J. P. Meystre

Fig. 65. — Le canal de fuite et sa jonction au Rhône.

L'EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL DE L'AMÉNAGEMENT DE LAVEY

par MAURICE EBNER, ingénieur-conseil

Nous vivons à l'âge des réalisations rapides. Selon la remarque d'un écrivain contemporain, la vitesse est un vice nouveau, invention du XX^e siècle. La révolution qui s'ensuit est d'immense portée.

Sur le plan de la construction, des entreprises toujours mieux équipées permettent d'envisager des réalisations de plus en plus vastes dans des délais d'exécution de plus en plus réduits. Au fur et à mesure de cette progression, les moyens mis en œuvre se développent et la valeur de l'équipement immobilisé par une entreprise sur un chantier donné représente, par rapport à la valeur de la construction réalisée, une fraction toujours plus importante. Seules peuvent subsister aujourd'hui comme entreprises, celles disposant d'un outillage puissant et de spécialistes éprouvés, celles efficacement organisées sur le plan industriel.

La nécessité de devoir disposer de moyens techniques accrus a suscité les consortiums d'entreprises, les plus grandes d'entre elles n'hésitant pas à se grouper pour mettre en commun leur expérience et leurs moyens d'action, pour multiplier leur puissance et diviser leurs risques.

L'aménagement hydroélectrique de Lavey est l'une des premières réalisations d'après guerre en Suisse, l'une des premières où l'on voit à l'œuvre les machines les plus récentes, où l'on met au point les techniques nouvelles conçues en fonction des outils nouveaux à disposition.

Lavey permet de se rendre compte des limites d'application : tel procédé compatible en roche compacte ne l'est plus en roche diaclasée, tel moyen efficace sur une courte distance présente des inconvénients majeurs dès que la longueur du trajet s'accroît.

Lavey est caractérisé par les dimensions inusitées de sa

galerie d'aménée et de sa chambre d'équilibre. La première établie pour un débit de 200 m³ par seconde, a un diamètre de 7,75 mètres, la vitesse moyenne de l'eau étant de 4,25 mètres par seconde. La seconde, fonction de la hauteur de chute, de la longueur et de la section de la galerie d'aménée, de la vitesse et des variations admissibles des niveaux de l'eau, oblige, pour assurer la stabilité du réglage de la vitesse et de la fréquence, des dimensions horizontales considérables, de l'ordre de 1750 m² au voisinage des niveaux dynamiques.

Rappelons que la chambre d'équilibre a pour but principal de protéger la galerie d'aménée et les conduites forcées contre les variations de pression, dites coup de bâlier d'onde, consécutives aux variations du débit des turbines (mise en marche, augmentation ou diminution de puissance, marche automatique ou arrêt).

Accessoirement, elle joue un rôle régulateur en recevant ou restituant les différences de débit qui existent momentanément, en régime de transition, entre la galerie d'aménée et les turbines du fait de l'inertie des grosses masses d'eau en mouvement (oscillations en masse).

La protection de la galerie d'aménée est d'autant meilleure que la section de la chambre d'équilibre est plus grande car la fraction de l'onde dirigée suivant l'axe de la galerie devient négligeable vis-à-vis de celle réfléchie par le plan d'eau libre de la chambre. Mais en augmentant la section de la chambre on augmente en même temps la valeur de la période des oscillations en masse. A chaque variation du régime d'écoulement succède par conséquent une série d'oscillations de longue durée qui nuisent à la stabilité de réglage.

Ces considérations ont toute leur importance pour une usine à basse chute dérivant un débit considérable au travers