

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 69 (1943)

Heft: 18

Artikel: L'usine hydro-électrique de Verbois, Genève

Autor: Leroy, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-52525>

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: 26.01.2026

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

L'usine hydro-électrique de Verbois, Genève

par R. LEROY, ingénieur principal au Service de l'Électricité des Services industriels de Genève.

I. Introduction, historique.

Le site de Verbois du cours genevois du Rhône, peu connu jusqu'il y a quelques années et auquel le fleuve seul apportait de temps à autre quelques changements locaux en étendant ses méandres, créant des bras secondaires et formant des îlots couverts de taillis, sans jamais modifier le caractère de pleine nature du pays, vient d'être complètement transformé, dans l'espace des cinq dernières années, par la construction de la grande Centrale genevoise à laquelle il a donné son nom (fig. 1, 2, 3).

Les lignes qui suivent sont destinées à faire connaître aux lecteurs du *Bulletin technique* l'effort accompli par les Services industriels de Genève et par l'industrie de la Suisse romande, pour doter la communauté genevoise et aussi l'industrie suisse de l'importante source d'énergie que constitue cette usine.

L'idée d'utiliser la chute disponible sur le Rhône, entre l'usine de Chèvres et la région de la Plaine, est loin d'être récente. Le premier projet de construction d'une usine hydro-électrique sur ce tronçon du cours du Rhône, a été élaboré en 1897 déjà, soit peu après la mise en service de l'usine de Chèvres. La première demande de concession remonte à cette époque. Mais c'est en 1907 seulement que fut établi un projet d'usine-barrage équipée de douze groupes, avec débit total de 300 m³/seconde, implantée dans la région de l'embouchure de La London et qui servit de base à l'octroi, le 9 octobre 1909, par le Grand Conseil, de la concession pour l'utilisation de la chute disponible entre Chèvres et le pont de La Plaine.

La construction de l'usine thermique de secours de Genève, qui permit de fournir les apponts d'énergie nécessaires, puis la période de la guerre 1914-1918, conduisirent à suspendre les études d'une usine sur le Rhône jusqu'en 1918, époque à laquelle un projet fut élaboré mais n'eut pas de suite, du fait de l'énorme renchérissement causé par la guerre et du fait que l'on reconnut la nécessité de relier le réseau de Genève avec les réseaux suisses comportant des bassins d'accumulation. Un contrat fut passé avec la S. A. l'Energie de l'Ouest Suisse, ce qui permit un nouveau développement de la consommation d'énergie à Genève, développement qui contribua à la reprise des études d'une nouvelle usine.

Entre-temps, un fait nouveau modifia les données générales du problème : l'abandon à la Société des Forces motrices de Chancy-Pougny d'une partie de la chute, soit le tronçon de fleuve compris entre le pont de La Plaine et un point situé à 1070 m. à l'amont, au lieu dit Vers Cinge où se fixe dès lors la limite de concession aval des Services industriels.

Jusque-là, les projets admettaient le maintien de l'usine de Chèvres et la construction d'une usine d'aval dite à basse chute. En 1919, l'idée fut proposée de construire une usine dite à haute chute, utilisant, après désaffection de l'usine de Chèvres, toute la chute disponible entre Genève et Vers Cinge (fig. 4).

Après toutes les études d'usines basse chute, qui suivirent les progrès de la construction des machines en prévoyant un nombre de machines toujours plus réduit pour les mêmes

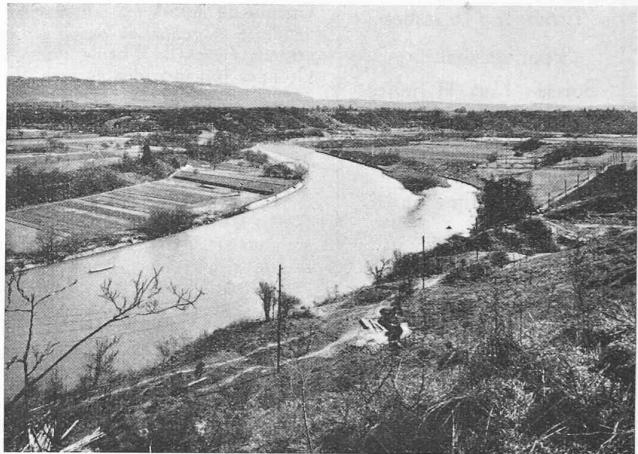


Fig. 1. — Emplacement de l'usine vu de l'amont.

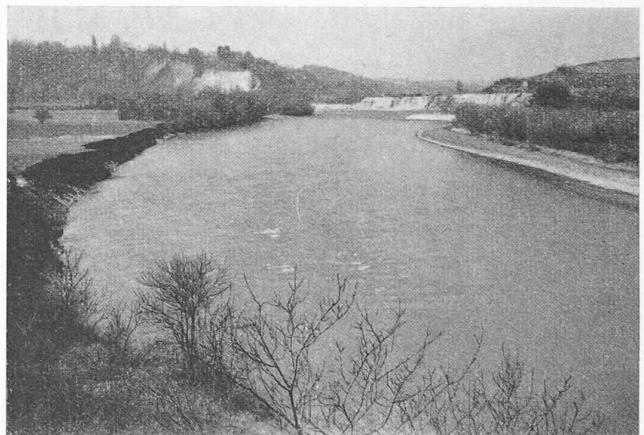


Fig. 2. — Cours primitif du Rhône à l'aval de l'usine.

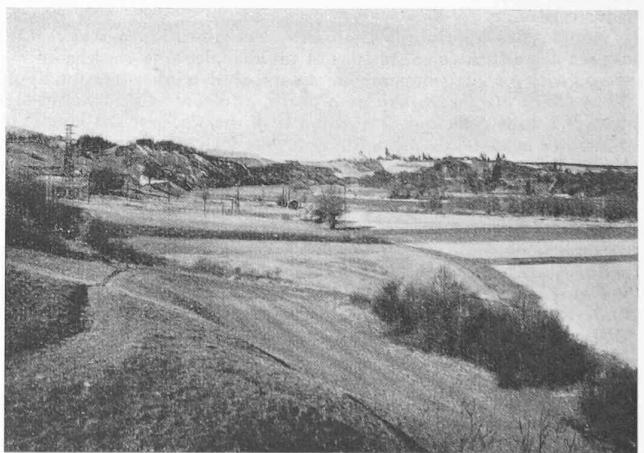


Fig. 3. — Emplacement de l'usine vu de l'aval (rive droite).

USINE DE VERBOIS

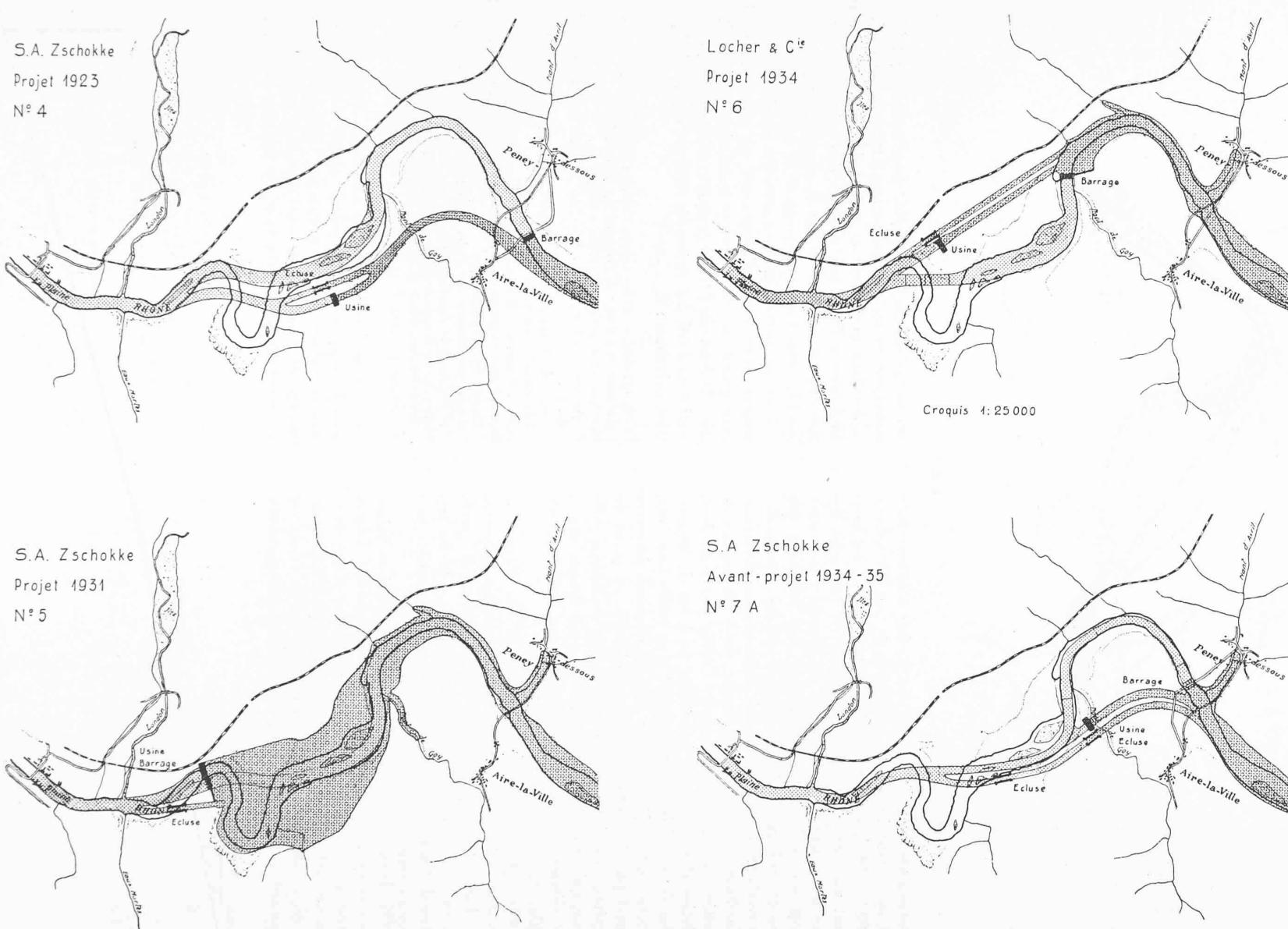


Fig. 5. — Projets divers étudiés de 1923 à 1934.

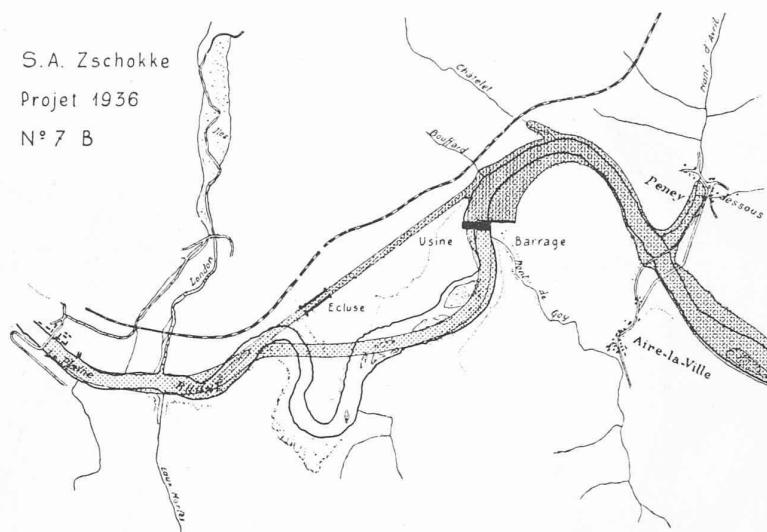


Fig. 6.

débits totaux absorbés, on en vint aux projets à haute chute de 1923, admettant 4 machines absorbant en tout $400 \text{ m}^3/\text{sec}$.

De 1923 à 1934, diverses études sont réalisées ; les unes prévoyant une usine-barrage pour laquelle le bâtiment des machines est placé en prolongation du barrage ; les autres prévoyant une usine-canal, comportant un bâtiment des machines et un barrage séparés souvent par une grande distance et reliés par un canal d'aménée. L'un des projets situait une usine-barrage aux Prés de Bonne, dans l'étranglement de la vallée existant entre Russin et Cartigny et conduisait à la création d'un vaste lac de retenue de 1 km de largeur. Le niveau de ce lac devait être abaissé d'un mètre tout l'été, ce qui aurait mis à découvert de grandes étendues de terres et n'aurait pas été sans graves inconvénients au point de vue hygiénique. D'autre part, les chasses de dessablement de la retenue, qu'il est nécessaire de faire presque chaque année, auraient nécessité, avec un tel lac, un trop long arrêt de l'usine (fig. 5).

Une usine-canal, étudiée ensuite dans le but d'éviter le lac de retenue, se révéla devoir être trop coûteuse, présenter certains inconvénients techniques et nécessiter un arrêt presque aussi long de l'usine lors des chasses, cela du fait que le canal d'aménée est dérivé du bief de retenue à une cote nécessairement élevée.

En 1934, deux suggestions sont faites aux Services industriels, provenant l'une de M. Jules Calame, ingénieur, l'autre de l'entreprise Zschokke, et prévoyant toutes deux, avec quelques variantes, l'implantation de l'usine plus à l'amont, dans la région de Verbois, où la vallée est encore étroite et le lac amont moins important. Ces projets envisageaient

une usine-barrage à 4 groupes, absorbant en tout $400 \text{ m}^3/\text{sec}$, utilisant en un seul palier toute la chute disponible entre la Jonction et Verbois et prévoyant une vaste correction du Rhône à l'aval par coupure des méandres et approfondissement du lit dans le but de gagner la chute restante disponible entre l'usine projetée et la limite de concession.

Pour permettre une comparaison précise de ces derniers projets avec ceux d'usine-canal et celui d'usine-barrage avec grand lac, les Services industriels chargèrent l'entreprise Zschokke de l'étude complète de son projet. Cette étude, remise en 1936, fut présentée avec les caractéristiques générales suivantes :

Débit maximum utilisé dans l'usine : $400 \text{ m}^3/\text{sec}$.
Puissance installée : 3 groupes de 22 000 kW.

Retenue maximum à la cote : 368,60 m.

Pente du canal de fuite : $1,15\%$, réalisée par approfondissement du lit.

Barrage situé sur la rive gauche et usine sur la rive droite, l'ensemble encadré de deux digues.

Bâches d'aménée d'eau sans vannes d'entrée.

Barrage avec vannes de fond levantes, écran formant chambre des treuils de ces vannes.

Vannes supérieures du type clapet à commande par treuils disposés dans le haut des piles.

Radier, avec cuvettes d'amortissement.

Toute liberté était laissée pour le choix du tracé d'un canal de navigation proposé toutefois sur la rive droite (fig. 6).

Ce projet réunissait les avantages économiques d'une usine-barrage utilisant la chute en un seul palier ; les facilités d'exploitation et avantages techniques d'une usine-barrage sur une usine à canal d'aménée et barrage éloigné ; la sécurité de la construction, du fait des conditions géolo-

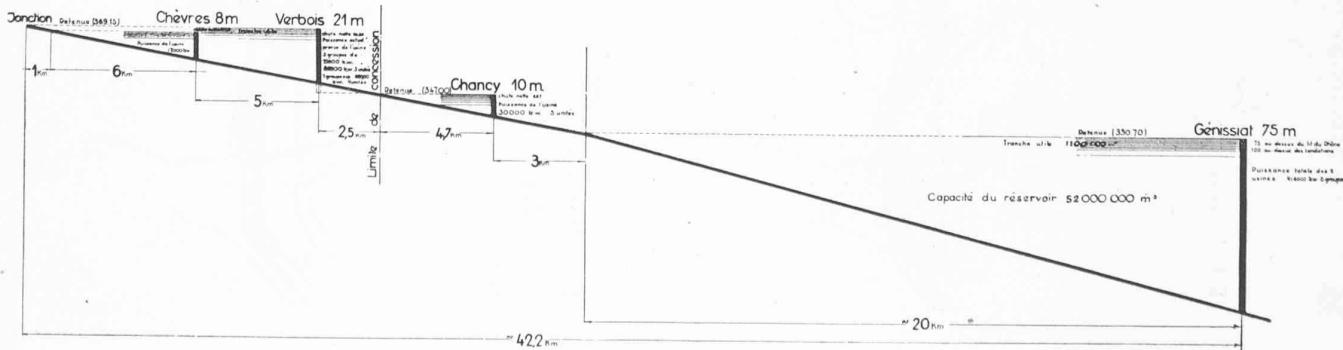


Fig. 4. — Profil en long général du Rhône.

giques favorables à l'exécution des fondations et à la constitution du bassin de retenue, déterminée par le choix du site.

Les considérations suivantes relatives à la situation du Service de l'Électricité en ce qui concerne son approvisionnement en énergie, firent ressortir l'opportunité de la construction.

Le développement des applications de l'électricité a progressé constamment, comme le montrent les chiffres du tableau ci-dessous.

Année	Energie en MkWh		Puissance max. en kW
	Chèvres	EOS	
1900	31,11	—	31,11
1905	34,06	—	34,06
1910	33,52	—	33,52
1915	37,11	—	37,11
1920	50,87	—	50,87
1925	49,51	5,33	54,84
1930	78,09	25,87	103,96*
1935	84,28	17,26	101,54*
1937	81,49	46,73	128,22*
1942	94,19	69,70	163,89
			33 000

Dès 1933, on estimait que, pour ne pas entraver le développement de la vente de l'énergie électrique, la décision relative à la nouvelle usine ne pouvait être indéfiniment renvoyée. Le moment où la dépense occasionnée par l'achat d'énergie au dehors du canton atteindrait le montant des dépenses supplémentaires nécessitées par la construction nouvelle était prévu pour une date non éloignée. D'autre part, la proportion entre la production «sur place» et celle à grande distance devenait de plus en plus défavorable. Du point de vue de la sécurité de service, l'existence d'une source puissante à faible distance de l'agglomération était préférable au transport à grande distance de plus de la moitié de l'énergie nécessaire au réseau.

En 1936, les organes d'exploitation de l'usine de Chèvres avaient constaté que celle-ci, malgré les perfectionnements apportés à maintes reprises à ses installations, ne pourrait plus assurer son service pendant longtemps sans subir des modifications coûteuses. Les dispositions générales adoptées à Chèvres en 1893 n'étaient pas de nature à faciliter le service. Le Service de l'Électricité ne disposait donc en 1937, pour la production d'énergie, que d'une usine ancienne et d'un appoint provenant d'usines éloignées et livré aux termes d'un contrat échéant en 1941. Ces conditions n'étaient pas une base de production suffisamment sûre pour le développement de la vente d'énergie.

Le projet d'usine-barrage était à ce moment assez éclairci pour servir de point de départ à l'établissement des plans d'exécution. Le marché du travail à Genève était très précaire et tous les travaux pouvant soulager le chômage devaient être encouragés. Les ouvrages de génie civil et l'essentiel des équipements mécaniques et électriques pouvaient être exécutés par la main-d'œuvre locale.

La réalisation du projet apparaissait facilitée par des possibilités de vente des excédents d'énergie et par la possibilité d'effectuer à bon compte les emprunts nécessaires, étant donné que le loyer de l'argent avait baissé.

M. l'ingénieur Boissonnas, alors président du Conseil d'administration des Services industriels, jugea donc le moment venu de proposer aux autorités de ne plus renvoyer la construction de l'usine. Il prit en mains l'étude financière, entreprit les consultations d'experts et d'autorités et chargea le soussigné des études relatives à la production et à l'utilisation de l'énergie, des études préliminaires et devis de la partie électrique, de la surveillance des travaux préparatoires et enfin de la préparation de la proposition officielle de construire, que les Services industriels remirent aux autorités municipales et cantonales en juillet 1937.

II. Etudes et travaux préparatoires,

Le projet Zschokke 1936 étant basé sur des données insuffisantes en ce qui concerne la nature des terrains et la configuration des lieux, il fallait, pour épauler la proposition de construire, confirmer ces données par diverses recherches, levés topographiques précis, levés de profils du fleuve et sondages des terrains en de nombreux points caractéristiques des futures fondations.

Ces études préliminaires ont mis à disposition des ingénieurs : les courbes des consommations d'énergie probable des réseaux et de l'énergie disponible pour vente au dehors du canton ou pour exportation ; les possibilités d'utilisation dans le cadre des conventions, de certaines tranches d'eau du lac de retenue ou même du lac Léman ; des renseignements sur les charriages d'alluvions de l'Arve par le Rhône ; des données sur l'efficacité des chasses sur le Rhône, rassemblées au cours de la longue exploitation de l'ancienne usine de Chèvres ; tous les documents utiles relatifs aux débits du fleuve ; des levés topographiques précis, avec équidistances de 1 m, de la région occupée par la future usine ; des levés de profils nombreux des 5 km de lit du fleuve occupés par les futurs travaux, soit de profils distants en moyenne de 30 à 50 m exécutés avec coup de sonde tous les 2 m ; enfin une documentation importante sur la nature des terrains et du sous-sol, fournie par une trentaine de sondages profonds et une centaine de sondages en tranchées.

Ces sondages ont été exécutés par l'entreprise Zschokke, sous la direction de M. Joukowsky, géologue des Services industriels ; ils ont consisté tout d'abord en un certain nombre de forages tubés, descendus pour reconnaître la nature et la perméabilité de la couche d'alluvions, la cote du rocher ou mollasse et l'épaisseur des bancs de mollasse et de marne, dont la présence alternée est un fait connu et qu'il fallait situer en profondeur et en nature aux divers points essentiels des ouvrages (fig. 7).

Pour l'exécution de ces sondages, on se servit de tubes d'un diamètre de 25 cm, d'un trépan, d'une petite benne preneuse ou d'une pompe à gravier. Des échantillons ou carottes furent prélevés dans la mollasse ou la marne par un outillage adéquat, pour mieux donner la constitution des matériaux en place. Certains de ces sondages furent poussés jusqu'à une profondeur de 30 m. L'un d'eux, exécuté à l'emplacement prévu pour l'extrémité du mur aval rive gauche n'atteignit le rocher qu'environ 6 m plus bas que dans les sondages voisins, décelant ainsi la présence d'un abaissement important du rocher. Cette constatation permit, lors des études définitives, de fixer la position extrême admissible des ouvrages d'aval du barrage.

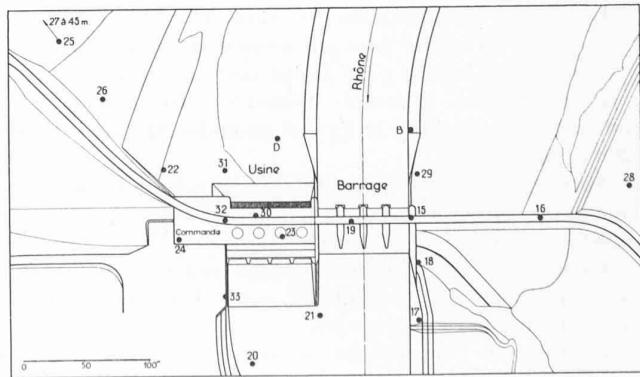


Fig. 7. — Plan de situation des sondages principaux.

Sur la rive gauche, les terrains alluvionnaires rencontrés se montrèrent perméables et les sondages indiquèrent la présence d'une nappe d'eau phréatique. L'importance et la nature de cette nappe devaient être déterminées, car le projet Zschokke prévoyait l'exécution des fondations du barrage en fouilles ouvertes, uniquement protégées côté fleuve par une paroi de palplanches. On procéda donc à l'élargissement du forage sous forme de puits blindé et l'on exécuta des essais de pompage de la nappe en question. Ces essais montrèrent qu'il n'y avait pas lieu de modifier le mode de construction envisagé pour le barrage.

Lors des crues du Rhône, le débit de la nappe augmentait avec les niveaux du fleuve et la perméabilité des graviers était peu variable, résultats qui eurent une influence sur le choix du mode d'exécution des digues et de leur pénétration dans les versants.

La nature de l'eau, sa température, l'importance et la stabilité du débit suggérèrent d'utiliser plus tard l'eau de cette nappe pour le refroidissement des crapaudines des turbines et de l'huile des transformateurs.

Les cotes observées dans le rocher en divers points montrèrent la présence générale d'un banc supérieur de mollasse gréuse ou marneuse par place, puis de bancs de marne grise ou bariolée, d'épaisseur variable, donnant à admettre pour ces bancs une forme lenticulaire ; enfin du banc inférieur de mollasse à une cote convenant parfaitement pour y asseoir les fondations des ouvrages principaux.

Il était important pour la suite des études d'être orienté sur les charges que pouvait admettre le rocher en place. On descendit donc sur la rive droite un forage plus important, de 1 m. de diamètre, jusqu'au niveau du rocher. Au moyen d'une colonne de fer recevant à sa partie inférieure successivement des plaques d'appuis de 150, 300, 600, 1000 cm² et surmontée d'une plateforme pouvant être chargée de gueuses de fonte, on procéda à toute une série d'essais de l'élasticité et du tassement du rocher en place ; les déformations étant mesurées à l'orifice du puits au moyen de deux fleximètres et en tenant compte de l'élasticité de la colonne elle-même.

On peut résumer comme suit les résultats de ces essais : Le grès étant comprimé jusqu'à une pression de 30 kg/cm², les tassements ne dépassèrent pas 5 à 6 mm. Pour la marne, on observa des tassements de 10 à 11 mm. Le grès se comporta comme un terrain semi-élastique, qui se déforme instantanément et ne présente après délestage qu'une déformation permanente de 28 à 35 % du tassement maximum ; tandis que la marne se comporte comme un sol plastique qui continue pendant un temps assez long à se déformer sous charge constante et qui, après délestage, garde une déformation permanente de l'ordre de 40 à 70 %, suivant la charge à laquelle elle a été soumise.

Le module d'élasticité du grès varia de

30 à 40 kg/cm² pour une pression de 5 kg/cm²

75 à 90 kg/cm² pour une pression de 20 kg/cm²

Pour la marne, le module d'élasticité resta pratiquement constant, soit de 15 à 25 kg/cm² pour des pressions de 0 à 20 kg/cm².

Après ces essais, le puits fut approfondi et terminé par une petite galerie horizontale qui permit d'observer directement la constitution du rocher.

L'étude de l'ensemble des données ci-dessus montra que le projet 1936 était exécutable, sans changement notable dans la situation des ouvrages.

Pendant que l'on procéda à ces travaux techniques, des pourparlers s'amorçaient en vue du financement de l'entreprise et de l'établissement de projets de contrats d'exporta-

tion des excédents d'énergie et la discussion de la proposition de construire, faite par les Services industriels, commençait à l'intérieur du Conseil municipal de Genève et du Grand Conseil.

Le but de cet article étant de faire connaître le problème purement technique de la construction de l'usine, nous nous bornerons à citer les dates des principales décisions prises par les autorités municipales et cantonales : le 3 décembre 1937, vote du Conseil municipal, approuvant la construction et autorisant les Services industriels à émettre un premier emprunt de 20 millions de francs ; le 4 décembre 1937, vote du Grand Conseil.

Le Service fédéral des Eaux avait en outre donné son approbation de l'opportunité de construire.

Les Services industriels étant ainsi autorisés à entreprendre les travaux, le choix des organes chargés des études et de la direction des travaux se fit comme suit, sous les auspices des autorités cantonales et après consultation d'un collège d'experts :

1. Surveillance générale des études :

Maître de l'œuvre : *Services industriels de Genève*. Pour eux, leur président M. Boissonnas, ingénieur, secondé par leur secrétaire général, M. Comisetti, Dr en droit, et par M. R. Leroy, ingénieur E. P. Z.

2. Etudes du Génie civil (usine, barrage, correction du Rhône) et des équipements mécaniques principaux ; mandataire des Services industriels :

Société générale pour l'Industrie électrique, avec, comme directeur des études et travaux, M. Esselborn, ingénieur E. P. Z.

3. Etudes d'ensemble, études de disposition des locaux, études des équipements électriques et équipements auxiliaires ; mandataire des Services industriels :

Service de l'Electricité de Genève ; pour ce service, M. Robert Leroy, ingénieur, chargé de la direction de cette partie des études et travaux.

Certains travaux connexes, tels que la construction des voies d'accès, la reconstruction du pont de Peney, furent étudiés par des bureaux d'ingénieurs en collaboration avec les Services industriels et le *Département des Travaux publics* du canton de Genève.

Dès le début enfin, on créa une commission composée de représentants des Conseils d'administration et de direction des Services industriels, de la direction du Service de l'Électricité et de représentants des mandataires, commission à caractère consultatif destinée à assurer la liaison entre les parties techniques et les parties administratives des diverses instances ci-dessus.

Le mandataire pour les travaux de génie civil fut en outre autorisé à s'ajointre, à titre de Conseil, pour l'étude du barrage, la *Société Motor Columbus*.

Cette organisation mise sur pied, les Services industriels remirent à leur mandataire toute la documentation réunie par les études préparatoires et les bases nécessaires pour commencer les études définitives de génie civil, cependant que le soussigné procédait aux études de disposition des équipements et de détermination des caractéristiques générales et proposait, en modification au projet de 1936, l'adoption d'un débit absorbé par l'usine entière de 500 m³/sec au lieu de 400 et de 4 groupes hydro-électriques au lieu de 3.

Ces caractéristiques assuraient les avantages : d'une fourniturer supplémentaire d'énergie en utilisant les débits d'été

ou des débits momentanés tirés du Léman ou de la retenue, cela à un prix inférieur à celui d'énergie achetée au dehors ; d'une combinaison possible avec les usines à bassin de montagne ; d'une grande souplesse et sécurité d'exploitation ; d'une plus grande facilité d'entretien.

Le passage des pointes d'hiver, au moyen d'eau momentanément accumulée, est en outre possible jusque dans un avenir plus reculé.

Ces avantages n'étant toutefois réalisables que dans l'avenir, après développement de la consommation des réseaux, la décision fut prise de prévoir la place du quatrième groupe mais de ne pas installer les machines pour le moment.

Restaient à déterminer l'orientation exacte et définitive et la place respective des éléments de l'ouvrage, ainsi que la chute maximum réalisable. Le niveau maximum de retenue de Verbois restait également à fixer ; il le fut provisoirement et jusqu'à confirmation par les essais de mise en retenue, aux cotes de 369,15 m aux faibles débits du Rhône et de 367,60 aux grands débits. Cet abaissement aux époques de grands débits est nécessaire si l'on veut éviter un reflux de l'Arve par le remous de Verbois, reflux qui aurait pour conséquence un engravement dangereux de la Jonction, pouvant nécessiter des dragages coûteux.

On décida de vérifier les données admises dans le projet de 1936 pour l'orientation de l'usine, la disposition relative de la salle des machines et du barrage, l'écoulement du fleuve à l'aval, par des essais sur modèles réduits, dont fut chargé le *Laboratoire de recherches hydrauliques de l'Ecole polytechnique fédérale*, sous la direction de M. le professeur Meyer-Peter.

Ces essais ont été décrits dans le *Bulletin technique* du 1er juillet 1939. Nous rappelons sommairement les données du problème, les résultats des études auxquelles ils ont conduit et la répercussion qu'ils eurent sur le projet de barrage.

L'étude de l'usine devait tenir compte du fait que les eaux du Rhône proviennent en partie du Léman, qui fournit une eau décantée, et en partie de l'Arve, dont le régime est torrentiel et qui fournit des eaux charriant des matériaux solides en quantités et proportions très variables, suivant les époques de l'année et les débits. Les matériaux amenés par l'Arve se déposent en grande partie dans la retenue de l'usine, d'où ils doivent être évacués périodiquement par des « chasses » pour éviter l'engravement rapide et une perte de chute par extension du remous. Les essais sur modèle devaient donc déterminer les conditions d'évacuation de ces matériaux dans le canal de fuite, lors des chasses ou des crues.

Les débits totaux Rhône et Arve réunis varient en années sèches de 140 à 500 m³/sec. et en années moyennes de 200 à 650 m³/sec. Les débits extrêmes sont 120 m³/sec. et 1200 m³/sec. Les essais avaient comme second but de vérifier les conditions d'écoulement de ces débits au travers des ouvrages de retenue sans qu'il y ait production d'affouillement à l'aval. Ils devaient du même coup déterminer la direction générale à donner au canal de fuite à la sortie du barrage, pour éviter les érosions, par conséquent fixer le site sur le fleuve. A certaines époques de l'année, le fleuve transporte des quantités énormes de corps flottants ou de glace. Une nouvelle question posée aux expérimentateurs du modèle fut la meilleure canalisation possible de ces matériaux vers les pertuis du barrage.

Etant donné l'étendue de variation des débits passant par le barrage ou par l'usine, selon la charge des réseaux électriques, la meilleure répartition des débits non utilisés, entre les vannes de fond et les vannes supérieures, dans le même but d'éviter les érosions aval, autrement dit la fixation des dimensions définitives des vannes et pertuis, de même qu'un

projet de règlement de manœuvre, pouvaient aussi être déterminés approximativement par les essais.

Les résultats des essais sur modèle concernant ces divers points, montrèrent que seules des modifications de forme du bassin amortisseur, d'inclinaison du parement aval de l'écran du barrage, de la dimension des vannes supérieures, étaient à apporter au projet, tandis que le site de l'usine pouvait rester sensiblement le même et que la disposition relative des éléments de barrage et salle des machines pouvait rester inchangée.

En outre, le choix d'une pente légèrement plus réduite pour le canal de fuite se montra permis, sans risque de provoquer des dépôts de matériaux en cours de crues ou de chasses.

Sur la base des courbes de fréquence des débits du fleuve, des propositions et essais ci-dessus et d'une préconsultation de constructeurs de turbines et de vannes, les caractéristiques définitives de l'usine furent fixées comme suit (fig. 8) :

Débit total utilisable par les groupes hydro-électriques :

510 m³/sec environ en fin de construction ; provisoirement : 384 m³/sec.

Puissance installée possible : 88 000 kW, soit 122 000 CV sur l'arbre des turbines, dont 94 500 équipés.

Energie annuelle disponible : environ 350 à 400 millions de kWh, selon les caractéristiques hydrologiques de l'année.

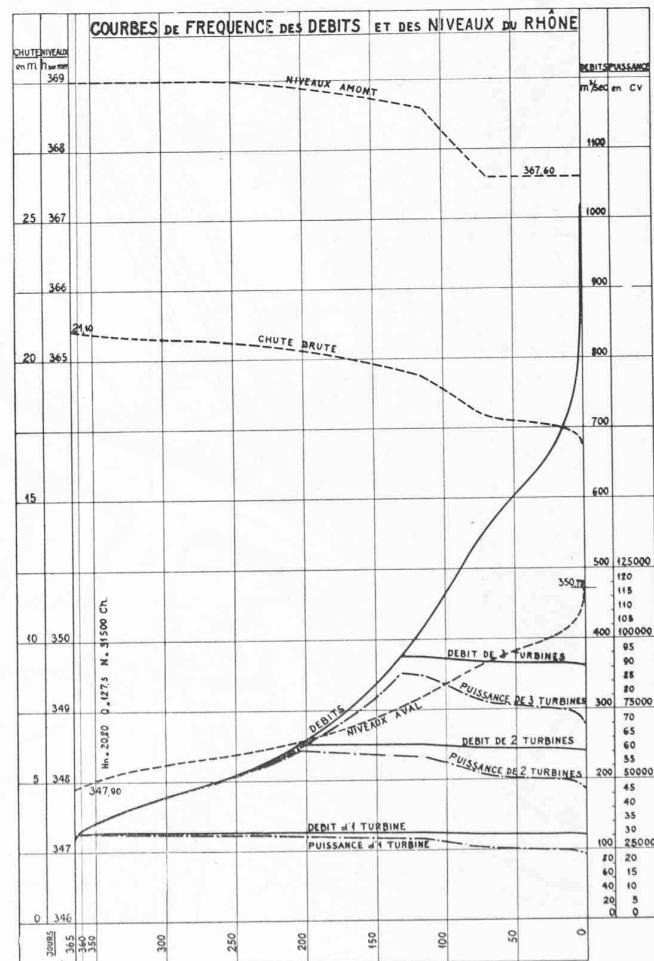


Fig. 8. — Courbes caractéristiques.

[USINE HYDRO-ÉLECTRIQUE DE VERBOIS

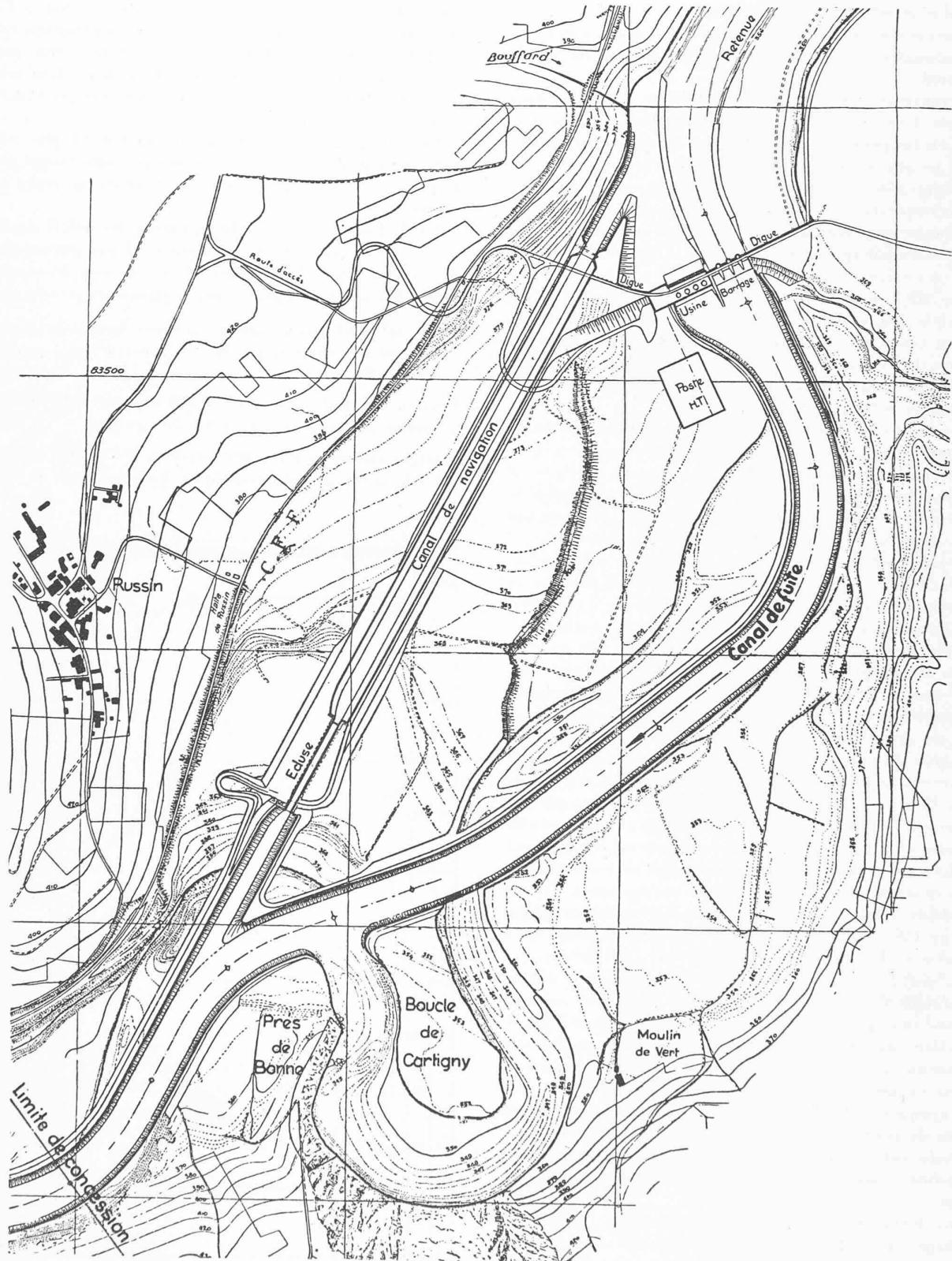


Fig. 9. — Plan général de situation. Echelle 1 : 10 000

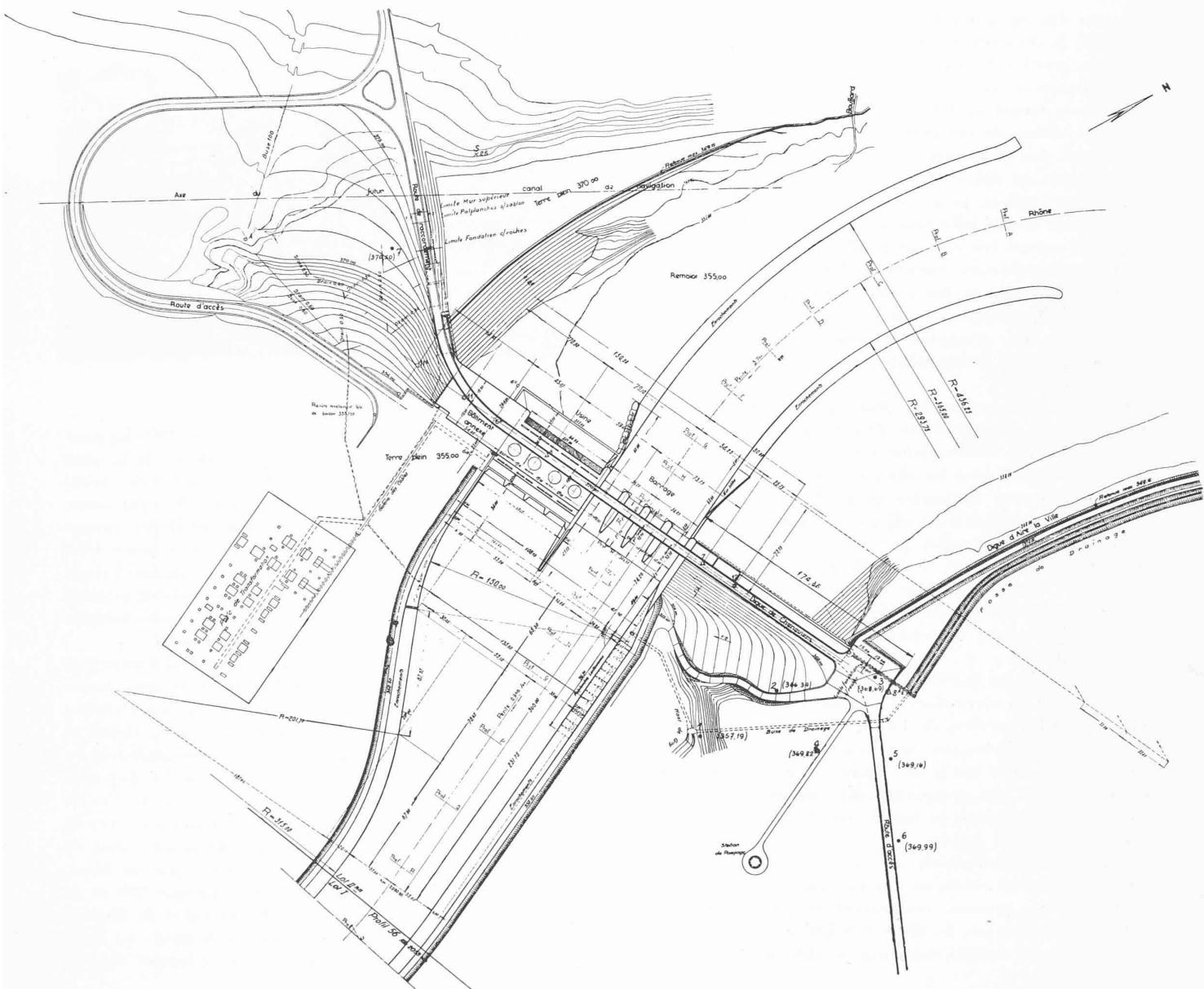


Fig. 10. — Plan des ouvrages. Echelle 1 : 4000.

Ouvrages principaux constitués par (fig. 9 et 10) :

1. Une *digue terre-plein rive droite*, susceptible d'être utilisée pour recevoir l'amorce d'un *canal de navigation* situé entièrement sur la rive droite du Rhône.
2. Le bâtiment de l'*usine* proprement dite, avec locaux de commande et d'exploitation, hall de montage de transformateurs, hall de montage des groupes hydro-électriques, salle des machines prévue pour installation de 4 groupes hydro-électriques à axe vertical de 31 500 CV, 136 Tpm absorbant 128 m³/sec chacun ; dont 3 installés au début ; avec alternateurs de 22 000 kW, 18 000 V triphasés.
3. Le *barrage* à quatre pertuis de 14 m d'ouverture, avec chacun une vanne de fond type secteur et une vanne supérieure type clapet, capable d'évacuer 600 m³/sec par pertuis, soit lorsque l'*usine* est en pleine marche, un débit global de 2800 m³/sec, correspondant au double des plus grands débits observés.

4. Une *digue rive gauche*, venant s'ancrer dans les terrains du plateau d'Aire-la-Ville.
5. Une *digue de protection* avec canal de drainage longeant ce plateau.

Le tout arasé à une cote de 370,50 m et parcouru par une route de raccordement des deux rives, passant sur les digues, sur le barrage et le toit de l'*usine* ; cote d'arasement permettant une retenue maximum à 369,15 m, que les calculs du remous de l'*usine* laissent prévoir comme admissible sans entraîner de travaux coûteux à l'amont.

Les corrections du Rhône aval comportent la coupure des presqu'îles de Russin et des Prés de Bonne, ainsi qu'un approfondissement du Rhône tel que la pente du lit soit ramenée à 0,95 %₀₀. Dans ces conditions, la chute disponible à l'*usine* varie entre les valeurs indiquées au graphique, soit de 20,80 m aux faibles débits du Rhône, à 17 m aux débits de crue.

Ces caractéristiques d'ensemble fixées, les études plus

poussées des équipements mécaniques et électriques détermineront la disposition des locaux et leurs dimensions.

Il fut possible en particulier, en modification du projet 1936, de disposer la station de distribution 18 000 V dans les évidements laissés au-dessus des ouvrages d'entrée de l'eau dans les bâches de turbines.

Pendant que les dispositions générales ci-dessus se fixaient, on préparait un cahier des charges général, les cahiers des charges particuliers, pour les fournitures principales dont la construction devait influencer les premiers travaux de génie-civil ; on passait les commandes des équipements, tels que turbines, alternateurs, vannes de fond ; on procédait à la rédaction des cahiers des charges particuliers des travaux de génie-civil principaux, puis à la mise en soumission, à la constitution des groupements d'entreprises et enfin aux adjudications aux groupements jugés les plus aptes à mener les travaux à chef.

Pour la construction des gros équipements mécaniques influençant le génie civil, on fixa le choix sur les *Ateliers des Charmilles* à Genève pour les turbines, les *Ateliers de Sécheron* à Genève pour les alternateurs, les *Ateliers Zschokke* à Döttingen pour les vannes de fond ; tandis que les travaux de génie civil étaient adjugés : 1) pour l'usine-barrage, à un groupement constitué par la *S. A. Conrad Zschokke*, la *S. A. Ed. Cuénod*, la *S. A. V. Olivet* et l'entreprise *Erdigt*, sous forme d'un consortium qui prit le nom de *ZOCER*. 2) pour les corrections du Rhône, à l'entreprise *ERDIGT*, une association des entreprises *Rubin*, *Dionisotti*, *Induni*, *Gini* et *Thorens*.

Toute la mise en marche des travaux se fit entre le début de 1938 pour les corrections du Rhône et la fin de la même année pour les travaux de l'usine et les gros équipements. Il fallut immédiatement créer entièrement d'importantes voies d'accès, l'une sur la rive droite, — destinée aux transports lourds et qui comportait entre autres la construction d'un pont franchissant la voie ferrée de Genève-France, — l'autre sur la rive gauche.

Les Services industriels créèrent également de toutes pièces un puissant réseau de distribution d'énergie électrique haute et basse tension, comportant en particulier 12 stations transformatrices de 100 à 800 kW installés, de même qu'un réseau de distribution d'eau potable sur tous les chantiers.

III. Ouvrages principaux de génie civil.

Par ouvrages principaux de génie civil nous entendons ceux destinés à créer la chute sur le Rhône et ceux recevant les équipements transformant l'énergie de cette chute en énergie électrique. Ces travaux sont :

A. — Correction du Rhône :

Les corrections du Rhône à l'aval de l'usine ont pour but d'utiliser au mieux la chute restant disponible entre l'usine et la limite de concession. Elles comportent tout d'abord une rectification du cours du fleuve avec fermeture de bras secondaires et coupure de deux grands méandres de Cartigny et Prés de Bonne, et enfin un abaissement général du lit du fleuve pour en diminuer la pente jusqu'à la valeur de 0,95 % déterminée par les essais sur modèle. L'ensemble de ces travaux crée à Verbois un gain de chute de 4,40 m. qui, ajouté à l'élévation du plan d'eau amont de 16,40 m fixe la chute totale à l'usine à 20,80 m.

Les berges nouvellement créées par ces corrections, sont protégées contre les érosions par des enrochements prove-

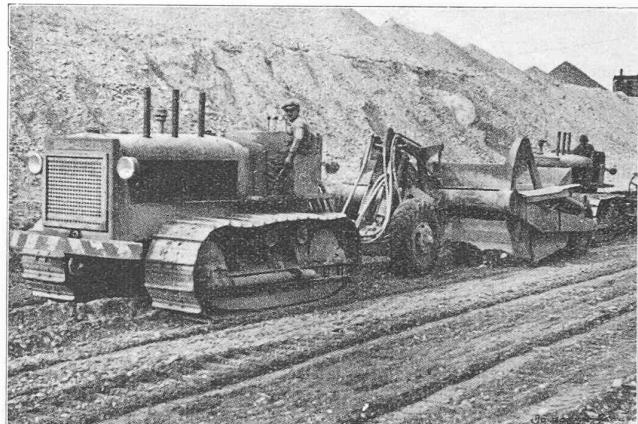


Fig. 11. — « Scraper ».

nant du Jura et du Salève, en blocs allant de 1000 kg pour le cordon de pied des berges, à quelques dizaines de kg pour le haut des berges. L'épaisseur d'enrochements est de l'ordre de 1 m en moyenne ce qui représente environ 15 t par mètre courant de berge. Le profil libre normal du Rhône corrigé comporte 70 m de plafond et 2 berges de 10 m avec pente 1 : 2.

Au-dessus des berges et tout au long des deux rives, règne une berme d'une largeur suffisante pour le passage de camions pouvant avoir à transporter rapidement des enrochements en des points quelconques subissant des érosions.

L'exécution des coupures des presqu'îles a été faite au moyen d'engins spéciaux ou scrapers (fig. 11), sorte de large benne sur roues dont le fond, muni d'une arête formant soc, s'abaisse jusqu'à pénétrer dans le sol, de telle sorte qu'en tirant ce véhicule au moyen d'un puissant tracteur, les matériaux du sol sont arrachés et viennent remplir la benne. Un dispositif permet la commande d'ouverture ou fermeture de l'engin du poste du conducteur de tracteur. Le véhicule sert ensuite au transport puis à l'épandage des matériaux aux lieux de dépôts. Dans un terrain sec ne comportant pas de blocs, l'engin permet d'extraire, transporter à quelque 200 m et épandre environ 35 m³ par heure. La présence de blocs a nécessité un passage préliminaire au scarificateur, ou sorte de charrue à socs mobiles pénétrant profondément dans le terrain pour en extraire les blocs.

La bande de terre du tracé futur du Rhône au travers des presqu'îles ayant été abaissée jusqu'au niveau des eaux, des pompes furent mises en service pour permettre de poursuivre l'abaissement avec les mêmes engins, des digues étant laissées provisoirement à l'amont et à l'aval des tronçons de futur lit pour empêcher l'irruption des eaux (fig. 12).

La cote de plafond étant atteinte, on procéda au réglage de la forme définitive de la section en exécutant les berges au moyen de pelles mécaniques montées en draguelines. Puis on procéda, au moyen d'une pelle équipée avec grapin, à la pose des enrochements de protection. Les bermes furent immédiatement amorcées et servirent au passage des pelles.

Avant même de procéder à ces coupures des presqu'îles, on entreprenait avec 2 dragues l'abaissement général d'aval en amont des parties du fleuve devant former le futur canal de fuite. Les matériaux extraits par passes successives sur des bandes de largeur partielle du lit, étaient déposés à l'amont des bras secondaires du fleuve où ils formèrent des digues reliant entre elles et aux anciennes berges les quelques îles de la région. Peu à peu, le fleuve s'abaissant, les futures berges se créèrent de place en place de même que les bermes correspondantes et des enrochements purent être déposés



Fig. 12. — Exécution à sec des coupures des presqu'îles.

aux points où le fleuve tentait de reprendre son ancien cours.

Durant tous ces travaux, des pelles mécaniques équipées en draguelines procédaient depuis les bermes à l'extraction au voisinage immédiat des berges et au réglage sous l'eau et hors de l'eau de ces berges en vue de la pose des enrochements.

En divers points la présence de bancs de poudingue rendit le travail des engins difficile et conduisit à l'emploi de mines pour désagréger ces bancs. Les charges étaient placées dans des tubes de fer préalablement enfouis dans le lit du fleuve.

Dès le moment où les régions précédant et suivant les coupures des presqu'îles furent draguées à une cote voisine du fond définitif, on prépara la destruction des digues laissées comme fermeture amont et aval de ces coupures. Les digues d'aval furent minées sur toute leur longueur. On laissa, par arrêt du pompage, monter les eaux dans les tronçons exécutés à sec, puis on procéda à la destruction de la digue aval des Prés de Bonne, immédiatement suivie de l'ouverture à la pelle mécanique d'une brèche dans la digue amont. Les eaux du Rhône en se précipitant dans la brèche étendirent celle-ci par érosion à toute la largeur du lit. La même opération s'exécuta à la coupure du méandre de Cartigny, mais cette fois-ci on procéda à l'ouverture d'amont par une forte charge d'explosif (fig. 13). Le fleuve prit alors rapidement son nouveau cours en emportant les matériaux désagrégés des digues, cependant que le courant diminuait suffisamment dans les anciens méandres pour permettre la fermeture de ces derniers par l'amont au moyen de digues d'enrochements et graviers. Les matériaux emportés par le fleuve étaient recueillis à l'aval par dragage et surtout par une grande draguine fixe aménagée à la limite de concession et dont le rôle fut tout au long des travaux d'entretenir dans le Rhône un creux retenant à cet endroit les matériaux afin d'éviter leur transport dans le bief aval (fig. 14).

Actuellement ces corrections du Rhône sont terminées. La pente de 0,95 % du lit a été réalisée, le lit a été réglé à de petites inégalités de 10 cm près ; toutes les berges sont garnies de leurs enrochements et le passage d'une première saison de crues (modérées il est vrai) après l'achèvement, n'a fait apparaître aucune défectuosité ; ce fait laisse entrevoir que les dispositions prises et l'exécution des travaux se montreront judicieuses par la suite.

Dans le but de régulariser le thalweg du lit du Rhône dans la retenue, on a procédé à une *correction à l'amont* dans la

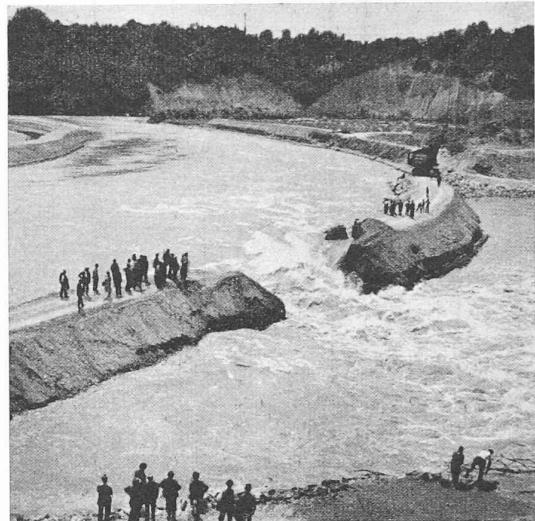


Fig. 13. — Ouverture de la digue amont de Cartigny.

région de l'Île du Nord. Du fait de l'élargissement que subit à cet endroit le Rhône en retenue, des dépôts de matériaux se formeront. Une diminution de l'efficacité des futures chasses de dessablement, une propagation vers l'amont des dépôts, un remous supplémentaire et finalement une perte de chute en résulteront. En obligeant le fleuve à suivre un thalweg régulier lors des chasses on assurera l'efficacité de celles-ci en cet endroit. Ce résultat est obtenu par construction de digues à l'amont et à l'aval de l'île du Nord, côté rive gauche. C'est dans ce même but de canaliser le fleuve au cours des chasses que l'on a construit directement à l'amont du barrage des digues d'enrochements prolongeant vers l'amont la ligne des culées du barrage.

B. — Construction de l'usine, du barrage et des digues :

Les caractéristiques générales des groupes hydro-électriques, les limites de variation des débits du Rhône et des considérations d'exploitation de l'usine et de distribution de son énergie ont fixé les dispositions d'ensemble de l'usine, du barrage et des digues données par les divers plans ci-contre et dont les principales sont (fig. 15, 16, 17, 18) :

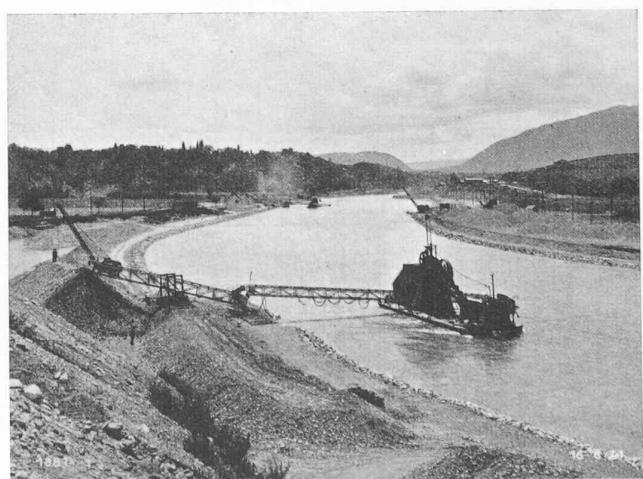


Fig. 14. — Vue d'ensemble des travaux de correction du Rhône.
(A comparer à fig. 2.)

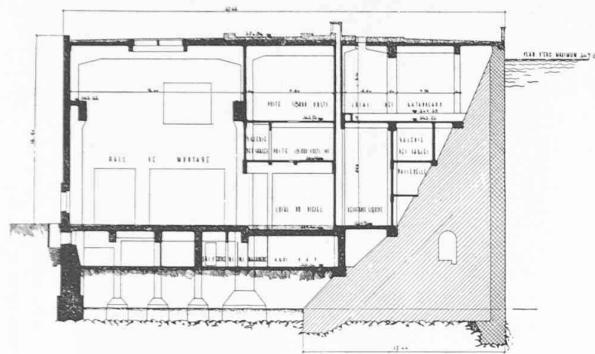


Fig. 15. — Coupe de la digue et des locaux de service.
Echelle 1 : 600.

USINE DE VERBOIS

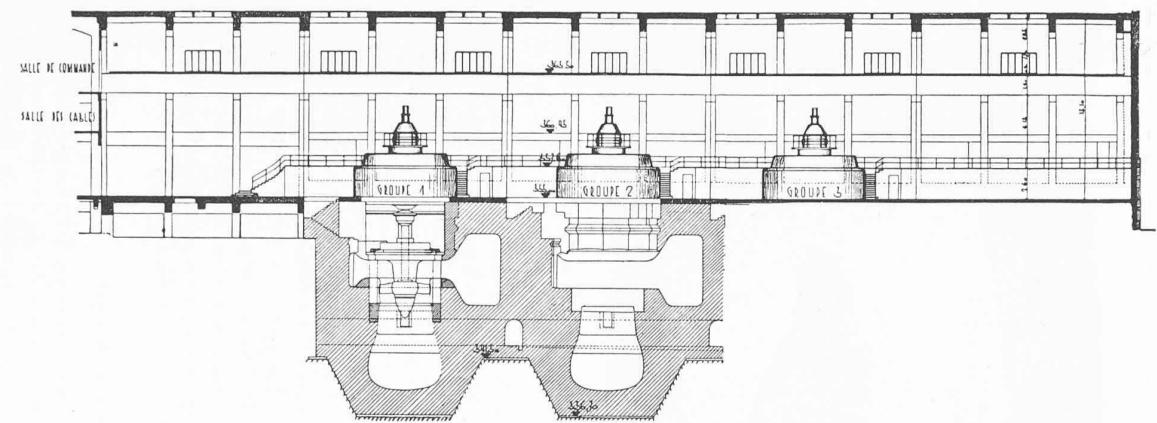


Fig. 16. — Coupe-élévation de la salle des machines. Echelle 1 : 600.

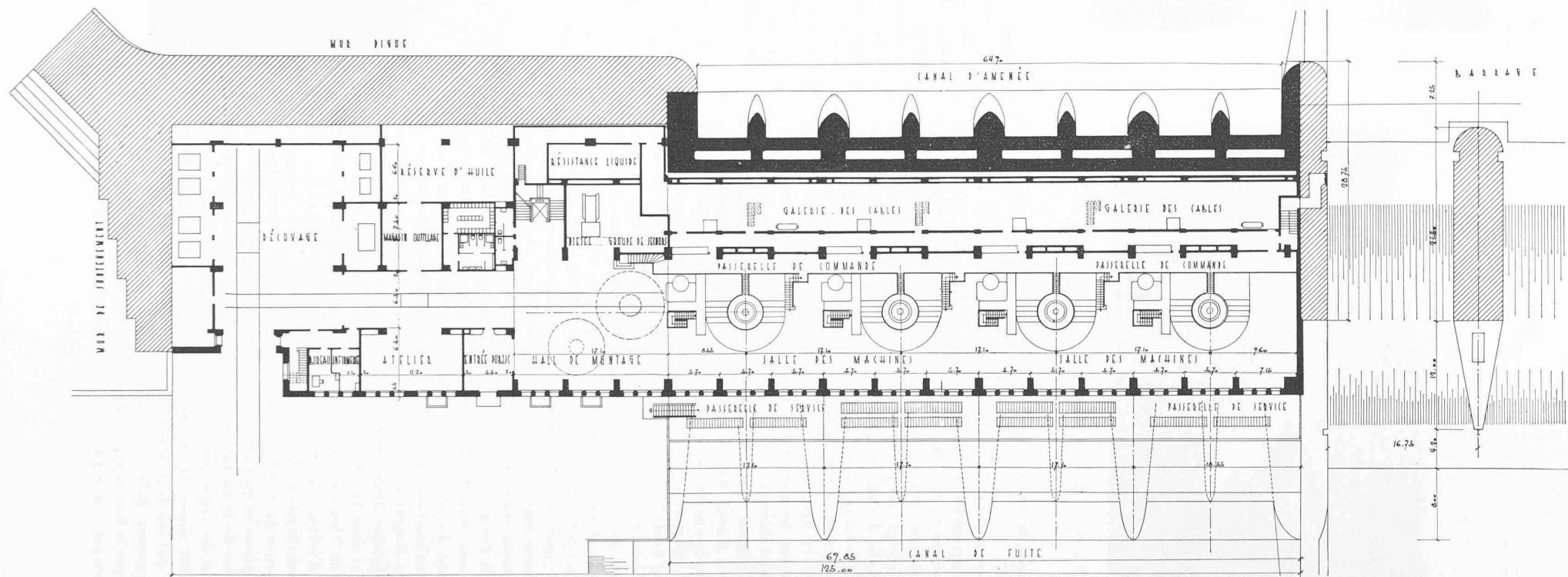


Fig. 17. — Plan de la salle des machines et locaux de service. Echelle 1 : 600.

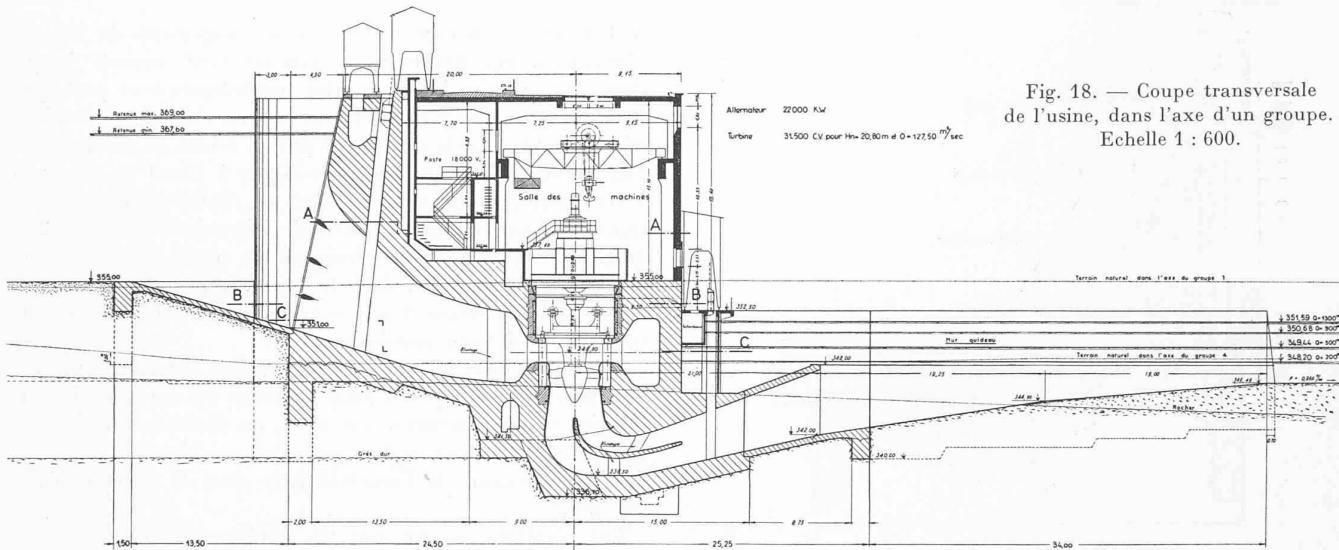


Fig. 18. — Coupe transversale de l'usine, dans l'axe d'un groupe.
Echelle 1 : 600.

1. Pour l'usine : Le sol de la salle des machines est situé à la cote 355 de la terrasse environnante d'aval. Les alternateurs sont entièrement disposés au-dessus de ce sol. Les organes de réglage de la turbine, invisibles de la salle des machines, sont disposés dans le cuvelage reliant la turbine à l'anneau de fondation de l'alternateur. Le régulateur automatique de la turbine est placé à côté de l'alternateur. La pivoterie du groupe et les excitatrices sont placées au-dessus du stator. La passerelle de commande des groupes avec les tableaux de mise en service et surveillance sont situés à la cote 357.60 du haut du stator. La salle des machines, relativement basse, comporte des fenêtres de petites dimensions disposées au bas de la façade, entre les colonnes supportant les chemins de roulement des ponts de 80 t; ces colonnes forment avec les grandes poutres de la toiture plate de l'usine des cadres apparents dans la salle des machines. La façade est constituée d'un mur en plots de ciment à l'intérieur et de blocs de granit à l'extérieur avec ancrage des blocs dans le mur de plots et garnissage au mortier entre les plots et le granit. La dalle de toiture en béton armé de 40 cm est percée de verrières Luxfer légèrement surélevées. La toiture est couverte par du béton léger pour donner les pentes générales et par un revêtement de carton bitumé et d'asphalte posé à chaud, une feuille de plomb de $\frac{1}{10}$ mm, une couche de sable et finalement par des dalles de béton légèrement armé de treillis. Les joints de dilatation de la toiture sont garnis par une feuille de cuivre repliée dans le joint du béton et recouverte par le revêtement d'asphalte. Les locaux de la station de couplage et distribution 18 000 V occupent tout le volume libre au-dessus des bâches d'entrée des turbines jusqu'à la toiture. Les grilles d'entrée sont placées tout à l'amont des avant-becs des chambres d'eau, avec cote de pied à 355 et sont surmontées de la voie de roulement des dégrilleurs et du portique amont, d'un canal d'évacuation vers l'aval des détritus enlevés devant les grilles, avec vannettes de prise d'eau dans les rainures des batardeaux amont. Ces batardeaux ferment les chambres d'eau entre les grilles et le masque en béton armé formant écran étanche entre la retenue et les locaux.

Le hall de montage des groupes, l'atelier de réparation, le service d'huile, les locaux sanitaires, les locaux pour machines et appareils de services auxiliaires, le local de la résistance hydraulique d'essais des groupes, le hall de décuvage des grands transformateurs, sont tous disposés au niveau de la salle des machines. Le sous-sol comprend un local-abri DA,

divers locaux d'entrepôt et une galerie de câbles. Une cage d'escalier principale avec ascenseur-monte-chargé, relie entre eux tous les étages et le sous-sol. Des escaliers de service donnent accès à la toiture et aux dégrilleurs et portiques.

La salle des commandes électriques et tableaux, la salle de répartition de câbles, le local de batterie d'accumulateurs, les bureaux d'exploitation, sont placés dans l'espace compris entre la salle des machines et le hall de décuvage.

Les massifs de béton entourant les bâches spirales des turbines constituent l'infrastructure du bâtiment, ancrée dans le rocher et comportent dans leur masse, outre les chambres d'aménée d'eau, des puisards recueillant les eaux de fuites, des galeries de visite, les tubes d'aspiration des turbines avec leurs rainures à batardeaux aval surmontées en façade de l'usine d'une passerelle, où circule le portique de manutention de ces batardeaux. Toute l'infrastructure et la superstructure sont divisées en blocs séparés par des joints de dilatation constitués en carton bitumé et obturés à l'amont par un dispositif comportant d'une part une gaine de cuivre scellée dans les deux massifs et remplie d'asphalte, d'autre part une règle en béton armé appuyée sur le joint par la pression amont.

2. Pour le barrage : Trois piles de 5 m d'épaisseur séparent les vides des passes de 14 m et 2 culées raccordent le barrage d'une part au bâtiment de l'usine, d'autre part au mur digue rive gauche. Les piles sont revêtues de blocs de granit pour les parties noyées (fig. 19). Le radier général, qui est à la cote d'entrée de 350 m et à la cote de sortie de 346,50 m, comprend des parafoilles amont et aval, un bassin amortisseur avec revêtement en blocs de granit. Un drainage est ménagé derrière le parafoille amont et relié à des puits d'observation situés dans les arrière-becs de deux piles ; les arrière-becs étant de plus aménagés pour recevoir, si nécessaire, des batardeaux provisoires en vue de réparation importante aux vannes et aux radiers. Un mur en aile aval raccorde la culée rive gauche aux berges d'enrochements. Un mur en aile amont améliore la pénétration dans les passes des matériaux charriés lors des chasses. Les ouvertures inférieures du barrage ont 4,20 m de hauteur et 14 m de largeur et sont fermées par des vannes secteurs avec batardeaux amont. Un écran en béton armé surmonte ces ouvertures et forme poutre de liaison des piles et culées, avec parement aval incliné pour recevoir la nappe d'eau déversant des vannes supérieures ; des évidements intérieurs abritant d'une part la

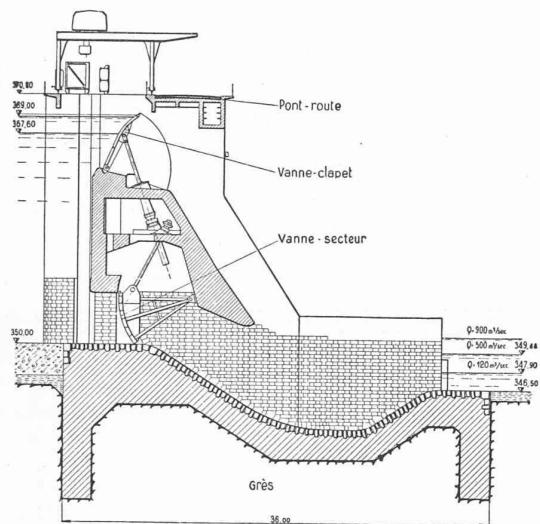


Fig. 19. — Coupe transversale du barrage. Echelle 1 : 600.

vanne secteur et d'autre part les chambres de treuils et un couloir de service relié à l'usine et à un escalier d'accès à la route supérieure. Les ouvertures supérieures ont 14 m de largeur et sont fermées par des vannes clapets et des batardeaux amont. Le pont-route reliant les culées et les piles à leur partie supérieure comporte une nervure amont supportant l'un des rails de roulement du portique à batardeaux (le second rail étant porté par une poutre en béton armé disposée à l'amont des piles) et une nervure aval portant latéralement une galerie de câbles et de canalisations diverses ; ce pont-route avec chaussée de 5 m et trottoir aval de 1 m.

L'ensemble du barrage est exécuté en deux blocs séparés par des joints de dilatation réalisés de la même manière que pour l'usine et prévus dans l'axe de la pile médiane et dans les culées.

3. Pour les digues : La construction est faite en murs massifs de 15 m de largeur à la base et 1 m au faîte, hauteur de 25 m au-dessus des fondations, en plusieurs blocs de 19 m de longueur séparés par des joints de dilatation obturés à l'amont par des dispositions analogues à celles prises pour l'usine et le barrage. Le parafouille amont est ancré dans le

rocher avec drainage arrière et aménagement de tuyaux d'injection, ces drainages et tuyaux sont amenés jusque dans une galerie de visite. Ces murs-digues sont prolongés pour la rive gauche par un mur en tranchée de profondeur décroissante, pour la rive droite par un rideau de palplanches. Des remblais épaulent les murs-digues à l'aval et rejoignent à leur partie supérieure la route, les câbles et les canalisations. Une petite digue en terre de 1 km de longueur et 2 m de hauteur avec canal de drainage est construite le long du plateau d'Aire-la-Ville, dans le but d'empêcher les terrains de ce plateau, situés à une cote légèrement inférieure à la retenue, de devenir marécageux.

Nous résumons ici quelques indications relatives aux dispositions générales prises pour l'*ancrage des ouvrages* dans le terrain, et empruntons à cet effet, au *Bulletin technique* de juillet 1939 les deux figures ci-contre, qui donnent une idée de l'encastrement de l'usine-barrage dans le banc rocheux (fig. 20).

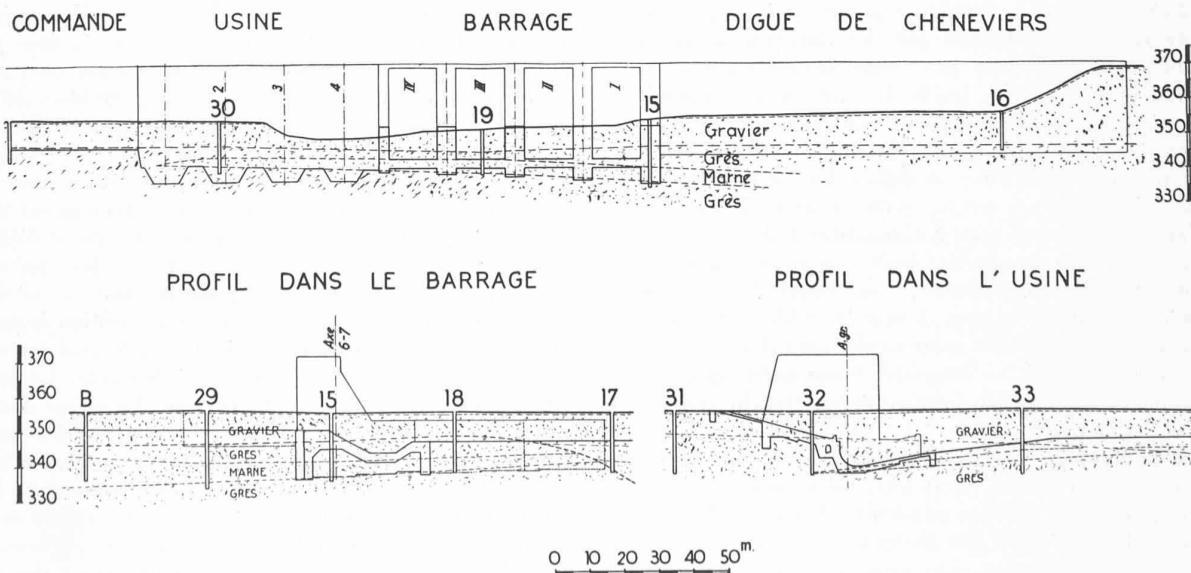
Les résultats fournis par les sondages pour la cote du rocher et sa constitution aux divers points des ouvrages, ont permis de fixer le mode de construction en fouilles ouvertes et de déterminer les cotes d'ancrage telles qu'elles ressortent des plans.

D'une façon générale, à l'ouverture des fouilles, on put se rendre compte que toutes les parties d'ouvrages très chargées et toutes celles devant empêcher l'infiltration de l'eau d'amont, pouvaient être ancrées dans le grès dur et étanche. C'est le cas pour les piles et parafoilles amont et aval du barrage. Pour l'usine, du fait même des hauteurs nécessaires pour la construction des tubes d'aspiration, puisards et parafoilles, on a été amené à fonder sur le bon rocher.

Par contre, sous les bâches d'entrée de l'usine et sous le radier du barrage, on a dû fonder sur la marne dure, qui est cependant, de l'avis des géologues, un terrain de fondation très sûr, étant donné qu'il se trouve à l'abri de l'eau et emprisonné entre des massifs de béton et des radiers en béton armé.

C. Exécution des travaux de l'usine, du barrage et des digues :

Une partie de l'année 1939 fut réservée aux installations de chantier, bureaux, magasins, atelier-forgé, centrale des compresseurs, station de triage-concassage et de fabrication



du béton, stations d'alimentation en énergie électrique, construction de passerelles de service pour le battage des enceintes de palplanches.

Les premières enceintes de palplanches furent celles battues au milieu de l'ancien lit, en deux rangs concentriques de profils crénelés et destinées à la construction de la pile III du barrage, et sur lesquelles devait venir s'appuyer la grande enceinte rive gauche. Malgré le choix de cette double enceinte et du fait de la forte pression des eaux et des terrains constituant le lit du fleuve, du fait surtout que le banc supérieur de mollasse se présentait complètement fissuré et laissait pénétrer l'eau jusqu'à la marne sous-jacente, il se produisit d'importants refoulements du banc de marne vers l'intérieur de l'enceinte (fig. 21). De gros travaux d'étagage des palplanches furent nécessaires, jusqu'au moment où l'on eut excavé jusqu'au bon rocher, procédé aux ancrages en fers estimés nécessaires pour cette pile clef, bétonné la fondation jusqu'à la hauteur du banc de rocher supérieur.

On commença ensuite le battage des enceintes de la première phase. L'enceinte de la rive gauche, destinée à la construction de trois passes du barrage, fut appuyée sur la pile III et épaulée par des remblais, mais laissée ouverte côté terre ; elle fut exécutée en profils crénelés à l'amont et profils plats à l'aval. L'enceinte rive droite, devant recevoir la moitié de la salle des machines, la passe 4 du barrage et les locaux de service, fut établie hors du fleuve en une suite de cellules de palplanches plates remplies de gravier, implantées le long de la berge, puis de retours en un rang de palplanches (fig. 22). Le retour d'amont fut, de plus, épaulé par un remblai pour pouvoir résister aux crues. Un goulet de 45 m était réservé entre les deux enceintes, pour le passage du fleuve, les deux côtés de ce goulet étant ainsi convenablement constitués, vu les risques d'érosion et étant donné la profondeur des fouilles voisines, par l'enceinte très robuste de la pile III et par la ligne des cellules également très stable de la rive droite (fig. 23).

Entre les divers modes connus de distribution des matériaux et en particulier du béton, on choisit celui utilisant des grues pivotantes à bras mobile, et des trains de bennes ouvrantes sur wagonnets tirés par locotracteurs au mazout, et circulant sur des passerelles ; ces mêmes grues servant d'ailleurs à la mise en place des palplanches, à la suspension et au déplacement des marteaux pneumatiques et des marteaux trépideurs, utilisés pour le battage des palplanches.

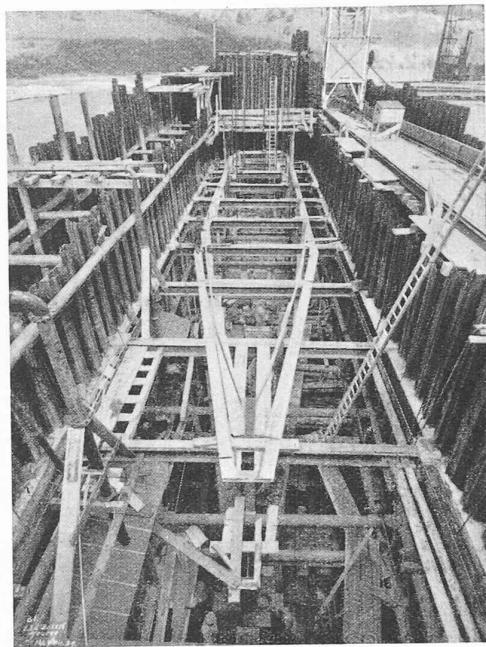


Fig. 21. — Enceinte de la pile III et son étayage.

Pour assurer cette importante circulation d'engins et aussi la communication générale entre les diverses parties du chantier, on construisit un grand pont de service reliant les deux rives du fleuve et permettant l'accès aux diverses passerelles¹.

L'étape des installations de chantier était ainsi franchie et la première phase de construction pouvait commencer au milieu de 1939 :

L'enceinte rive gauche, implantée dans le fleuve, contenait une grande masse d'eau qu'il fallut extraire par pompage, les pompes nécessaires étant ensuite destinées à éliminer les eaux provenant de la nappe souterraine. On entreprit dans les deux enceintes rive gauche et rive droite l'ex-

¹ Ce pont, réalisé en grands fers profilés entretoisés, fut monté entièrement sur terre ferme, puis halé au moyen de treuils et câbles par-dessus le fleuve, dans lequel on avait préalablement foncé des piles en béton, surmontées de galets sur lesquels put glisser le tablier du pont.

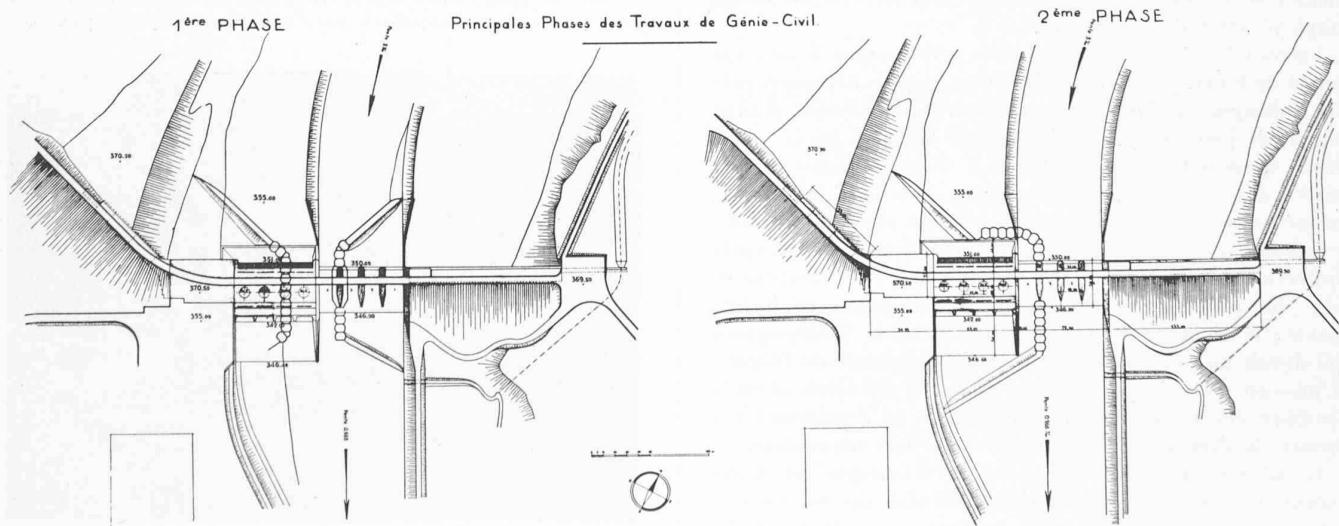


Fig. 22. — Plan des phases des travaux de génie civil.

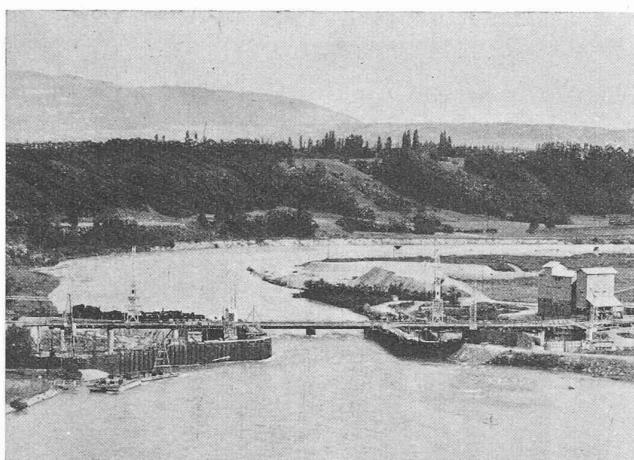


Fig. 23. — Ensemble du chantier vu de l'amont, 1^{re} phase.

traction des graviers, au moyen de pelles mécaniques et camions circulant sur des rampes. Le sous-sol rocheux atteint se présente sous une apparence très irrégulière, avec de nombreuses formes d'érosion par les eaux, décelant l'existence d'un ancien lit du Rhône post-glacier. Le banc rocheux supérieur, attaqué au pistolet pneumatique et à la mine, faisait place par endroits à des bancs de marne griseuse dont l'extraction fut assez difficile pendant les périodes humides. L'enlèvement des matériaux déliés continua de se faire à la pelle mécanique et camions, puis, la profondeur des fouilles augmentant, à la main et au moyen des bennes reprises par les grues et les trains de wagonnets.

Sur le chantier du barrage, la construction de la pile III avait, entre-temps, atteint une hauteur suffisante pour permettre l'arrachage d'un côté de son enceinte particulière. Cela permit de procéder aux excavations complètes au droit des radiers des passes 3, 2, 1 successivement, puis plus profondément jusqu'à l'intérieur du bon rocher, au droit de la pile II, des parafoilles amont et aval, puis de la pile I et de la culée rive gauche.

Au fur et à mesure de l'achèvement des fouilles, la mise en place des drains, des tuyaux d'injection des parafoilles, puis de la couche de fond de béton, enfin du ferraillage des radiers et des piles, put se faire dans une passe après l'autre. Le bétonnage des piles se fit en redans, dans le but d'augmenter la résistance à la poussée due à la retenue ; le dosage employé était de 250 kg/m³.

Partout le béton fut travaillé au pervibrateur à air comprimé de 8 cm, par couches de 40 cm, particulièrement près des coffrages et dans les armatures. Les coffrages étaient remplacés pour les parties inférieures des piles par les parements de granit montés au fur et à mesure comme un mur autour des armatures. Dans les radiers, coulés à 300 kg/m³, on ménagea avec des coffrages de tôle des rainures destinées à recevoir les queues des blocs de granit devant constituer la protection des bassins amortisseurs (fig. 24). Puis vint le montage des coffrages de l'écran et de son parement incliné d'aval ; le montage du blindage amont de la vanne-secteur qui devait former coffrage de la partie inférieure de l'écran ; la mise en place du puissant ferraillage de cet écran et de la chambre des treuils, travail difficile vu la complexité des formes, la dimension et le nombre des fers nécessaires.

Le bétonnage à l'intérieur de ces armatures fut d'une exécution délicate étant donné la difficulté, du fait du resserrement des fers, d'employer partout le pervibrateur. Le dosage employé fut de 350 kg/m³ (fig. 25, 26).

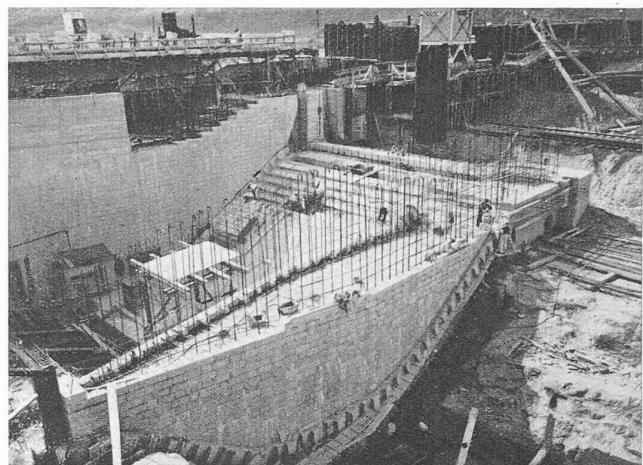


Fig. 24. — Bétonnage du radier et des piles du barrage.

Dès décoffrage de la passe 3, on put procéder à la pose des blindages latéraux de la vanne-secteur et au montage de cette dernière. Les mêmes travaux se répétèrent pour les autres passes ; le montage de la vanne de la passe 1 ne pouvant toutefois plus se faire avant la mise en eau du barrage¹.

Le premier tronçon du mur de la digue rive gauche venait pendant ce temps se souder à la culée du barrage, avec interposition d'un joint de dilatation, réalisé par collage, contre le massif exécuté, d'une feuille de carton bitumé, contre laquelle on coulait directement le béton du massif en cours d'exécution. Pour l'ancreage des murs de digue, on se contenta de décaper et nettoyer le banc de rocher avant bétonnage, sauf au droit des parafoilles où le bon rocher fut recherché. À part les parafoilles, aucune partie de ces murs n'a été armée. La pervibration fut employée, surtout près des coffrages du parement amont, pour augmenter l'étanchéité du béton. Les coffrages ont été réalisés avec des panneaux utilisés en rangées et réemployés à diverses hauteurs du mur.

On construisit encore, avant mise en eau du barrage, les murs en aile amont et aval, les fondations du dernier étant ancrées dans le bon rocher comme celles de la culée à laquelle il fait suite. Comme on le présumait à la suite des sondages du début, on trouva que le rocher allait en s'abaissant vers

¹ Il fallait procéder à cette mise en eau, à cause de l'approche des crues du fleuve, pour le passage desquelles le goulet laissé libre était jugé trop exigu.

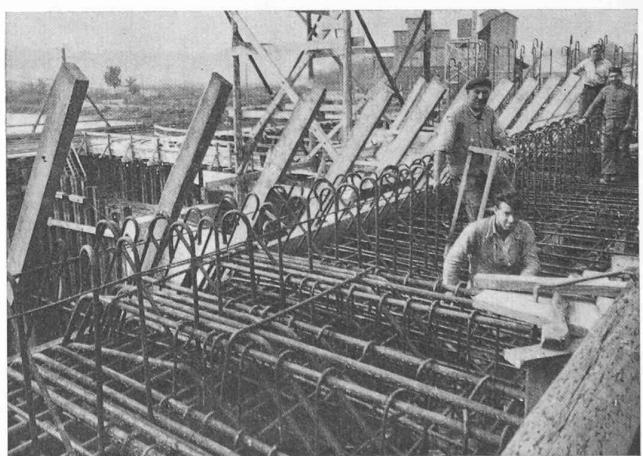


Fig. 25. — Ferraillage du plancher de la chambre des treuils.

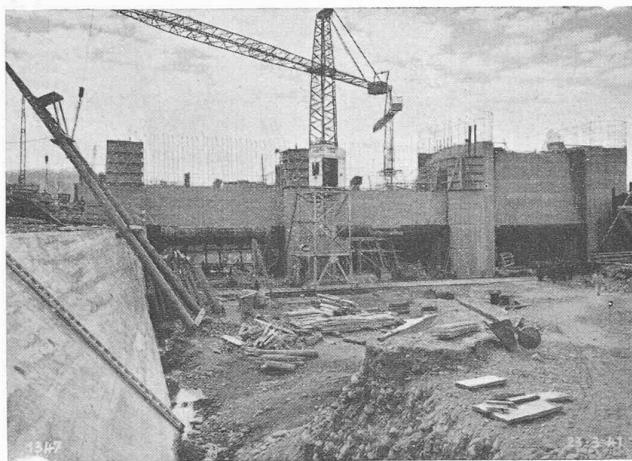


Fig. 26. — Chantier du barrage vu du mur en aile amont.

l'aval de ce mur en aile. La fouille à ciel ouvert à une telle profondeur devenant d'une exécution difficile, on préféra réaliser le dernier tronçon de fondation au moyen d'un caisson à air comprimé, construit en béton armé (fig. 27).

Vu les délais, l'achèvement de ce fonçage et le bétonnage intérieur du caisson durent se faire après mise en eau du barrage¹.

Sur le chantier de l'usine, le bon rocher étant atteint à la fin de l'été 1939, dans toute la région des fouilles destinées à recevoir les fondations des groupes 1 et 2, on poursuivit l'extraction au marteau pneumatique et à la mine jusqu'à la cote la plus basse de tous les ouvrages, soit la cote 335, qui se trouve au droit de l'un des puisards de la salle des machines. La profondeur des fouilles en dessous des cellules de palplanches limitant l'enceinte rive droite côté Rhône, était d'environ 12 m sous le pied des palplanches ; la crainte de voir se produire les mêmes refoulements du banc de marne qu'à la pile III, fit prendre la décision de construire un véritable mur de soutènement pour soutenir le massif rocheux portant les cellules de palplanches. Un éboulement important qui s'était produit à l'aval du groupe 2 démontra la justesse de ces craintes².

La mise en place du béton d'étanchéité au groupe 1 put commencer en février 1940 et les ferraillages, bétonnage du radier du tube d'aspiration puis la mise en place du coffrage du tube d'aspiration et de ses blindages de nervures purent s'effectuer (fig. 28). Les coffrages étaient construits par éléments sur le plancher de montage de la scierie et comportaient de solides charpentes et des cadres destinés à recevoir un lite-lage jointif très précis, qui, une fois soigneusement raboté, devait présenter des surfaces externes absolument lisses. Les éléments de coffrages furent reliés par des assemblages à coins et huilés sur toute leur surface de façon à pouvoir être desserrés après prise du béton et décoffrés sans dégâts aux fins d'utilisation pour les 3 autres groupes.

La mise en place des fers, le bétonnage avec dosage de 300 kg/m³ avec pervibration contre les coffrages, ne présenta pas de difficultés. Après montage du blindage supérieur du tube d'aspiration et exécution du massif soutenant la bâche spirale, débuta le montage du coffrage de cette dernière. Ce

¹ On procéda, à l'intérieur de ce caisson, à l'extraction du rocher à surface supérieure très fortement inclinée, jusqu'à ce que tout le couteau du caisson reposât sur ce rocher.

² Le mur de soutènement en question, achevé en mars 1940, fut exécuté dans une situation telle que lors de la mise en place du béton de l'infrastructure du groupe 2, il vint s'enrober dans le massif définitif.

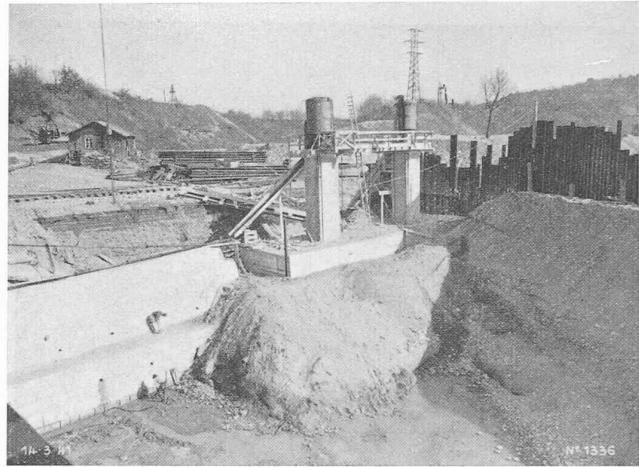


Fig. 27 — Caisson de fondation du mur en aile aval.

coffrage (fig. 29), construit de la même façon que celui du tube d'aspiration, put comme celui-ci servir successivement aux 4 groupes et après décoffrage les surfaces des chambres d'eau se présentèrent de façon impeccable (fig. 30) et ne nécessitèrent que très peu de retouches. La couche très dense du béton se formant contre les coffrages ne devait, en effet, recevoir aucun enduit et présenter la plus grande étanchéité possible.

Le tube d'aspiration du groupe 2 fut terminé alors que s'exécutait le bétonnage de la bâche spirale 4. Pendant que l'on procédait à la mise en place des importants ferraillages et bétonnages de l'infrastructure de la salle des machines, on exécutait aussi les fondations des locaux de service, du mur de digue à l'amont de ces locaux et du mur de soutènement en retour de la façade ouest (fig. 31).

La superstructure de la salle des machines comportait essentiellement l'exécution des cadres formés par les piliers supportant les chemins de roulement des ponts roulants et par les poutres nervures de la toiture. Le bétonnage des piliers armés se fit en coffrages jointifs de 4 m de hauteur munis de portes pour coulage en couches de 1,50 m environ et pervibration. Le coulage des poutres de grande section se fit en 2 fois avec reprise dans la zone neutre. Le dosage employé était de 350 kg/m³. Les joints de dilatation se firent dans les grands massifs de la même façon que pour le barrage : tandis que les joints se faisaient au plâtre lorsqu'ils

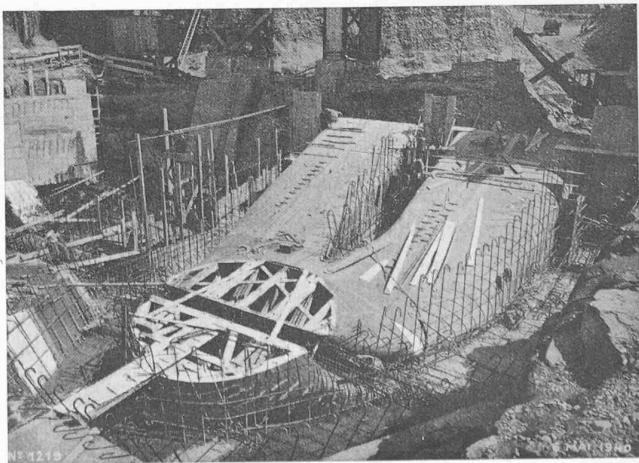


Fig. 28. — Coffrage du tube d'aspiration du groupe I.

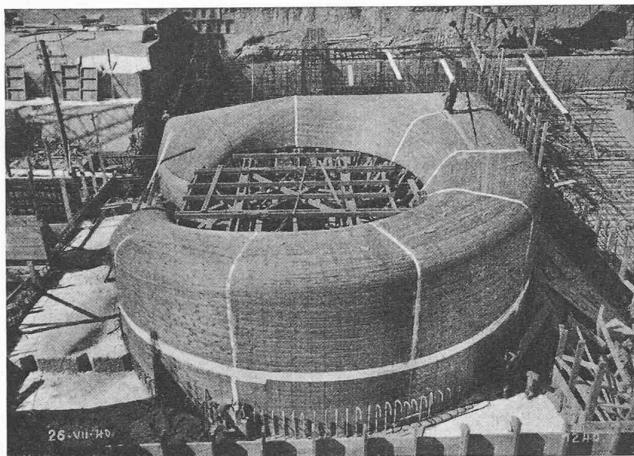


Fig. 29. — Coffrage de la bâche spirale du groupe I.

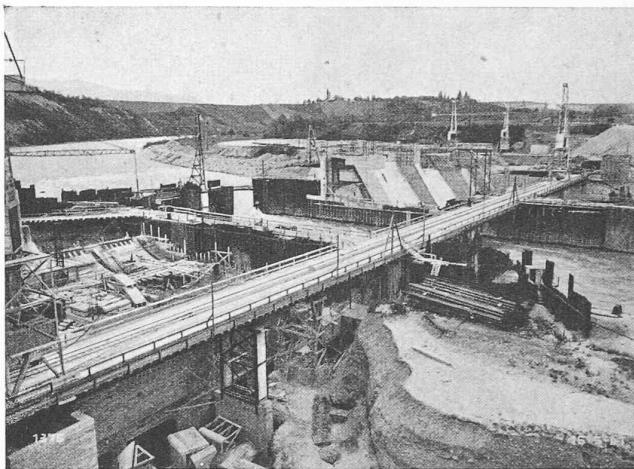


Fig. 32. — Ensemble du chantier à la fin de la première phase.

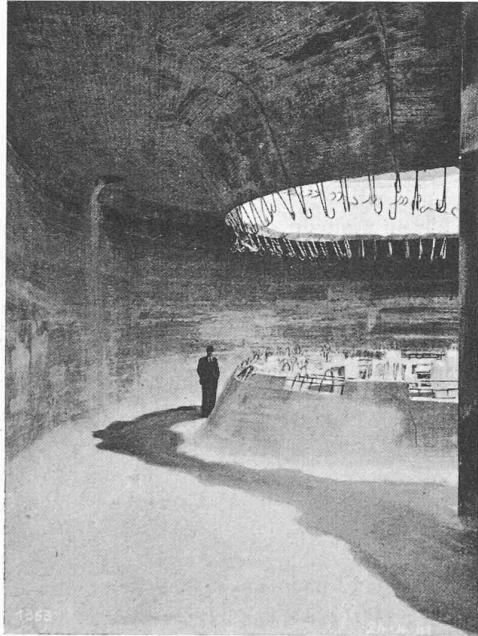


Fig. 30. — Intérieur de la bâche spirale après le décoffrage.

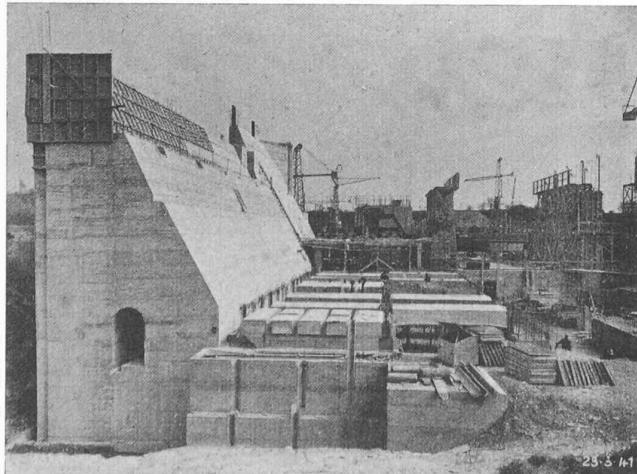


Fig. 31. — Mur de digue amont des locaux de service.

passaient par l'axe d'un pilier ou d'une poutre. La libération ultérieure des joints ainsi exécutés se fit par sciage.

Les travaux du chantier de l'usine étaient à ce stade lorsque le moment fut venu, en janvier 1941, de passer à la deuxième étape de construction des ouvrages.

Cette deuxième étape de construction débuta en avril 1941 par l'enlèvement des palplanches d'aval de l'enceinte rive gauche et la mise en eau du barrage, les vannes déjà en place restant ouvertes, suspendues par des dispositifs provisoires, les treuils n'étant pas encore montés. On arracha ensuite les palplanches d'amont et le Rhône commença à passer par le barrage.

En même temps, on battait des cellules de palplanches¹ à l'amont du goulet dans lequel passait jusque là le fleuve et peu à peu tout le débit fut assuré par les trois passes terminées du barrage (fig. 32, 33; 34). Simultanément on battait les palplanches joignant l'aval de la pile III à la rive droite pour fermer cette grande enceinte à l'aval. Lors de la vidange de l'ancien goulet, le fond se montra complètement débarrassé de son ancien lit de gravier ; le rocher étant mis à nu par le passage des gros débits. On put commencer l'extraction de ce rocher et

¹ La photographie 33 montre des cellules en cours de battage, destinées à devenir la paroi amont du batardeau rive droite agrandi pour recevoir les groupes 3 et 4, la passe 4 du barrage et le mur guideau aval.

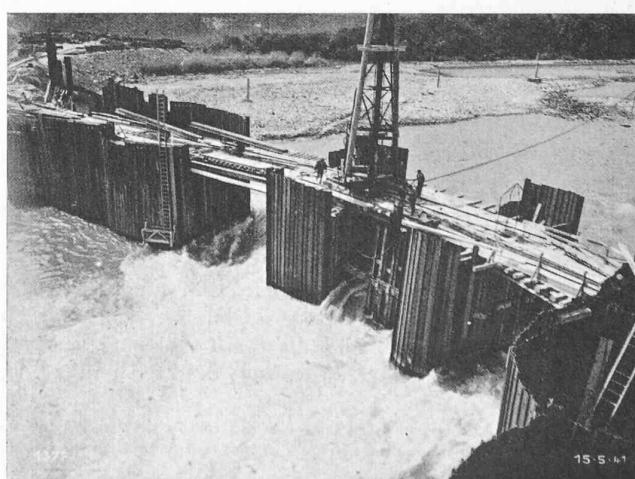


Fig. 33. — Fermeture du goulet de 45 m ; passage de la phase I à la phase II.

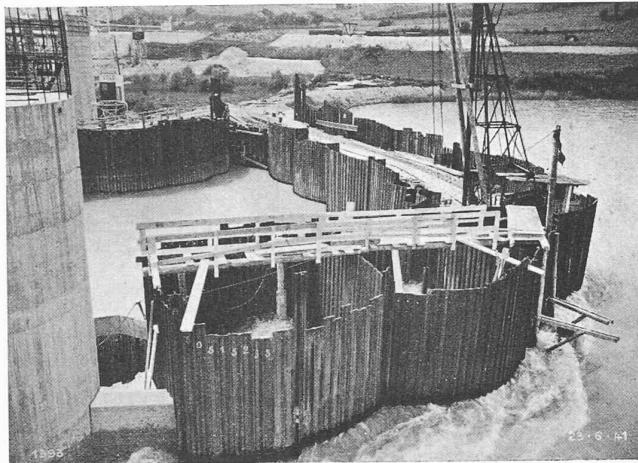


Fig. 34. — Achèvement de la fermeture du goulet de 45 m.

l'enlèvement des anciennes cellules rive droite. Tout le travail de ferraillage, coffrage et bétonnage déjà exécuté deux fois dans la première phase, put être renouvelé pour la deuxième, soit pour les groupes 3 et 4, en réutilisant les coffrages simplement réparés.

La partie de la superstructure formant l'ouvrage d'entrée des groupes 1 et 2, se construisait alors et comprenait les piles de séparation entre les chambres d'eau; les chambres d'entrée d'eau elles-mêmes furent exécutées également avec des éléments de coffrage fabriqués soigneusement à la scierie du chantier. Les glissières de rainures à batardeaux furent montées d'avance dans les coffrages des chambres d'eau et scellées lors du bétonnage de ces dernières.

Une partie importante de l'ouvrage d'entrée est le masque amont, soit le mur de séparation entre la partie supérieure des rainures à batardeaux et les locaux. Ce mur, soumis à des différences importantes de température entre son parement amont (température de l'eau) et son parement aval (voisinage des gaines d'air chaud des alternateurs) fut, de crainte de tensions internes exagérées, exécuté en faible épaisseur (environ 1 m) étant donné ses dimensions. Il fut fortement armé et exécuté avec un dosage de 350 kg/m³ de ciment spécial coulé en couches de 1 m et soigneusement vibré. Après décoffrage de ce masque on procéda à un essai d'étanchéité en remplissant d'eau les rainures à batardeaux préalablement

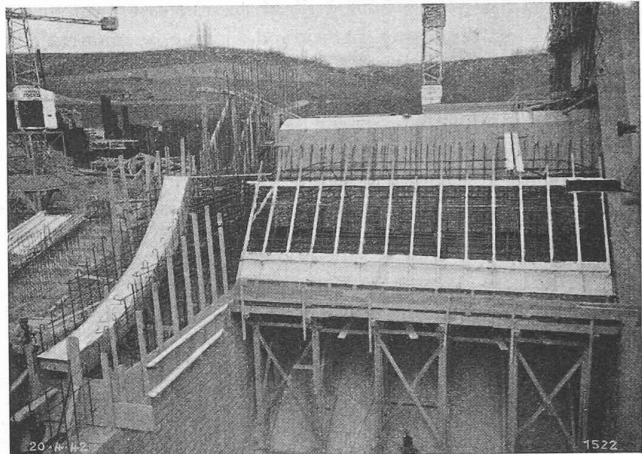


Fig. 35. — Coffrage et ferraillage du parement aval de l'écran du barrage.

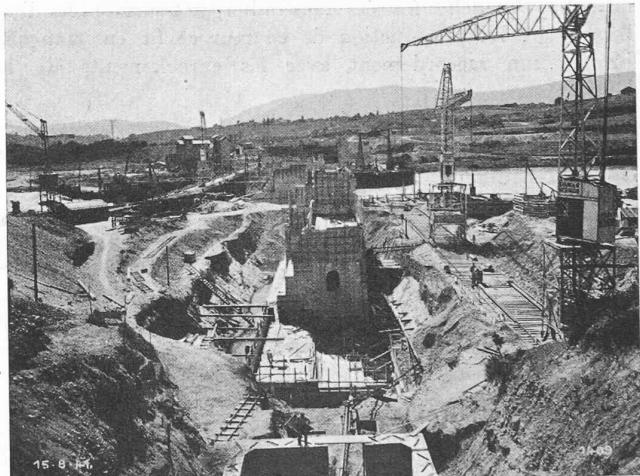


Fig. 36. — Construction du mur de digue, rive gauche.
Au premier plan : caisse de havage.

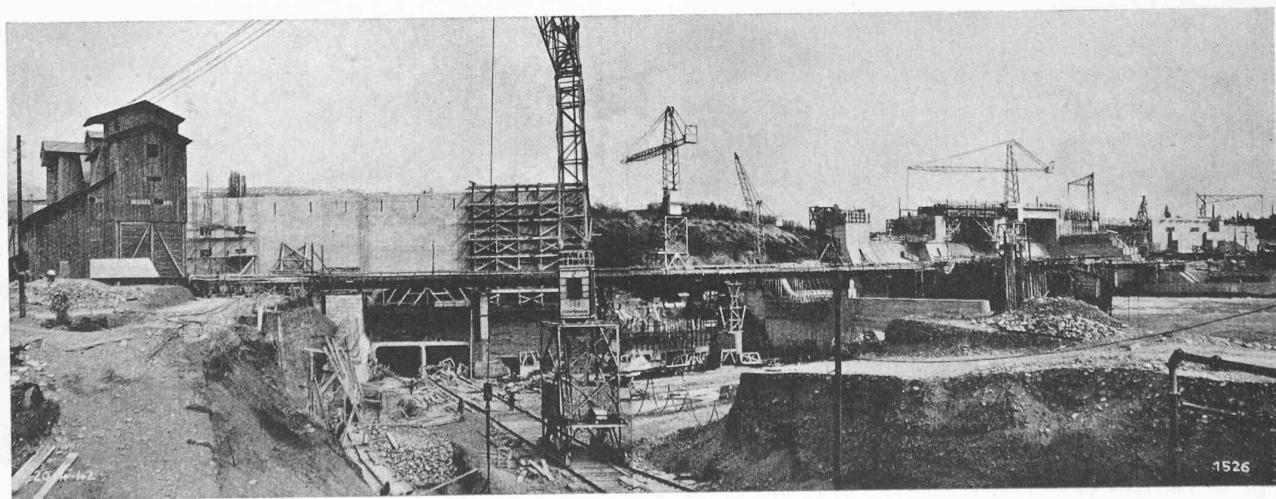


Fig. 37. — Vue générale d'aval du chantier au début de la seconde phase.

fermées au-dessus des bâches d'entrée. Cet essai, qui correspondait à un essai sous pression définitive, se montra concluant.

La toiture, les planchers ont été exécutés en béton armé à 300 kg/m³. Le plancher de la salle de commande a été exécuté en dalles de petite dimension coulées sur coffrage et séparées par des bandes de cellotex, de façon à permettre des transformations ultérieures dans la disposition des tableaux (fig. 37, 38).

Ce gros œuvre terminé et une paroi provisoire en bois ayant été placée pour fermer la salle des machines côté goulet du Rhône, on put procéder au montage des ponts roulants du local de décuvage, puis de ceux de la salle des machines. Enfin les premières pièces de la turbine 1 purent être mises en montage.

Au barrage s'exécutaient alors les coffrages, ferraillage et bétonnage du pont route en commençant par la rive gauche, tandis que l'on construisait le radier de la passe 4 et la culée gauche (fig. 35).

Pour la construction des fondations de la partie aval du mur en aile rive gauche, l'emploi de caissons étant trop onéreux, on préféra fonder ce mur sur une base formée de cellules de palplanches foncées dans la berge et surmontées d'un bétonnage. La construction de ce mur se fit en tronçons jusqu'à son raccordement avec les enrochements de la berge.

Sur la digue rive gauche continuait la construction des derniers massifs ; celui s'encastrant dans le versant de la vallée étant fondé sur un caisson à l'air libre, en béton armé, ou caisse de havage, disposition adoptée pour éviter l'exécution d'une tranchée trop profonde. Ce caisson fut descendu jusqu'au rocher où il fut bétonné après exécution d'un para-fouille amont. Pour augmenter la longueur de contournement de ce mur par les eaux de la retenue on construisit encore jusqu'à 55 m à l'intérieur du versant, un mur de 2 m d'épaisseur, en fouille étroite fortement étayée et de profondeur décroissante (fig. 36).

Sur la rive droite se fit un travail analogue, mais dans un terrain plus difficile parce que contenant une couche épaisse de sable fluant dans lequel le fonçage de la caisse de havage fut plus délicat. La présence de ce sable et de couches argi-

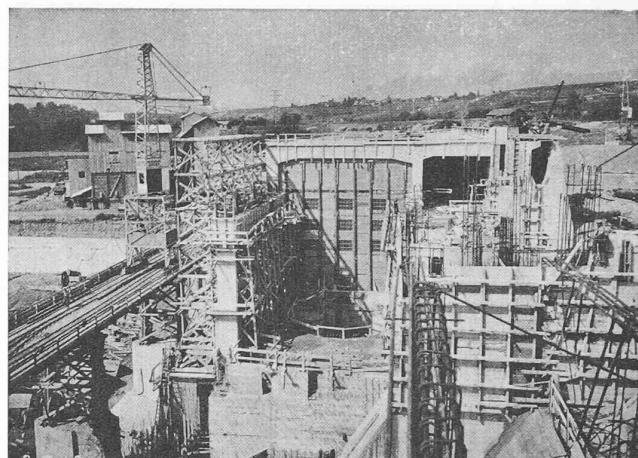


Fig. 38. — Chantier de la salle des machines et ouvrages d'entrée, vu du barrage.

leuses molles obligea de poursuivre la construction de l'écran au moyen de palplanches¹.

La construction des superstructures, dalle de toiture, gaines de sortie d'air, voies de roulement des engins sur l'ouvrage d'entrée et le barrage, route, étanchéité de la toiture, canalisations, ne comporta pas de difficulté particulière.

Etant donné toutefois que les remblais devant épauler la digue rive gauche n'avaient pas été exécutés assez tôt pour recevoir la route et les canalisations et que d'autre part les tassements d'un tel remblai seront sensibles pendant longtemps, on disposa toutes les canalisations, en particulier les deux grandes conduites d'éternit d'eau de réfrigération, sur des consoles de béton armé ancrées au sommet du mur de digue. Au-dessus de ces conduites, sur des dallettes de béton armé supportées par ces mêmes consoles, purent être tirés les câbles haute tension de transport de courant vers Genève, le tout étant enrobé de sable au moment de l'exécution du remblai.

¹ Il fut même difficile de réaliser la construction de cellules de palplanches telle qu'envisagée, avec extraction des matériaux et bétonnage intérieur, car la poussée de ces terres fit complètement dévier les palplanches en cours de fonçage.



Fig. 39. — Vue générale de l'amont au début de la mise en eau.
(A comparer à fig. 23 et 1.)

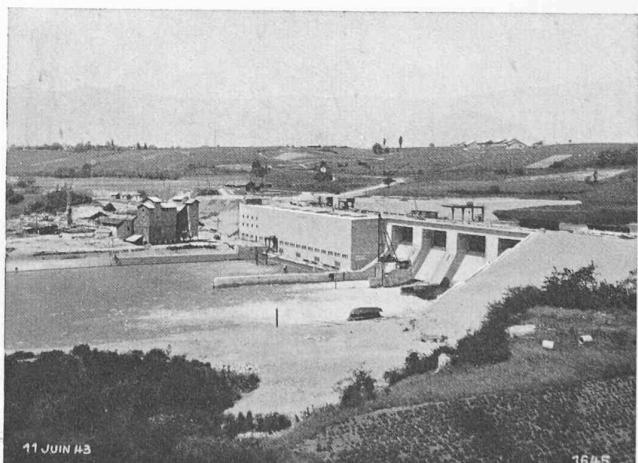


Fig. 40. — Vue générale de l'aval, rive gauche.

Vinrent ensuite tous les travaux de scellement de la turbine 1, le montage de la turbine 2 et celui des grandes grilles, les montages d'équipements électriques et mécaniques, la mise en place des blindages latéraux des vannes clapets, rainures à batardeaux et leurs réglages, tous travaux nécessitant encore la présence de nombreux ouvriers du bâtiment.

D'importants travaux de génie civil, exécutés toutefois hors du mandat général, furent réalisés par des entreprises autres que ZOCER. Ce fut le cas de la construction de la station de pompage, de la station transformatrice extérieure et de la grande galerie souterraine qui relie celle-ci à l'usine.

Enfin la mise en eau du bief amont en décembre 1942 et la mise en marche de la première machine marquèrent la fin des ouvrages importants ayant trait au génie civil (fig. 39, 40).

Le gros œuvre achevé, on vit les grandes grues quitter le chantier, la passerelle de service fut démantelée et retirée, et actuellement l'usine à béton est en cours de démontage, de sorte que l'usine de Verbois se présente déjà sous son apparence générale définitive.

Il est utile de donner ici quelques chiffres relatifs aux quantités de matériaux mis en œuvre dans l'ensemble de l'ouvrage :

Cube total de béton	131 000 m ³
Poids total de ciment	37 500 t
Dosage moyen de ciment	290 kg/m ³
Poids des fers à béton	3300 t
Cube de graviers extraits dans les corrections du Rhône.	1 300 000 m ³
Poids des enrochements employés	70 000 t

Des essais d'éprouvettes de béton faits en cours de travaux donnèrent les résultats suivants, par exemple pour les bétons dosés à 300 kg.

Les essais à 7 jours donnèrent une moyenne pour la résistance à la compression de : 215 kg/cm².

Les essais à 28 jours donnèrent : 255 kg/cm².

Les essais à 90 jours donnèrent : 325 kg/cm².

IV. Equipements mécaniques.

Avant sa pénétration dans les bâches spirales des turbines, l'eau de la retenue passe au travers des grilles destinées à retenir les corps flottants qui sont susceptibles de détériorer la turbine, ou de s'accumuler sur ses organes et occasionner ainsi une baisse de rendement. La hauteur totale des grilles est de 20 m et leur longueur de 65 m. L'écartement des barreaux est de 88 mm de vide, leur épaisseur est de 12 mm et leur hauteur de 120 mm. La partie supérieure des grilles s'appuie sur le faîte de l'ouvrage d'entrée et, par cela même, se trouve obturée. La hauteur libre n'est donc en réalité que d'environ 15 m.

Une partie de cette hauteur peut être obstruée par les corps flottants, ce qui charge anormalement les barreaux et oblige de les soutenir en trois points de leur hauteur par des poutres transversales en fers profilés. Pour éviter la perte de chute due à la présence de ces poutres, celles-ci sont entourées de pièces de bois d'un profil épousant la direction des filets liquides.

Ces grilles ont été exécutées à Genève par les *Ateliers genevois de constructions métalliques*, en panneaux de 1 m de largeur et 6 m, respectivement 14 m de hauteur, entièrement soudés.

Le nettoyage des grilles s'opère à Verbois avec deux râteaux dégrilleurs de construction Jonneret à Genève, et dont le dimensionnement est tel que les grilles puissent être tenues libres, quel que soit l'apport des matériaux, et sans arrêter l'usine. Chaque dégrilleur peut nettoyer les grilles sur toute leur longueur.

Ces engins comportent les organes de translation, nécessitant un moteur de 10 CV, les organes de levage du chariot dégrilleur et les organes de commande automatique du chariot, avec moteur de 32 CV. Un appareil de levage de 3 tonnes est adapté au dégrilleur avec grabin servant à retirer les gros corps flottants. La commande des dégrilleurs se fait par boutons-poussoirs, d'une cabine donnant vue sur la face des grilles. Il est possible d'assurer l'automaticité d'une opération ou la commande à volonté d'une manœuvre.

L'évacuation des détritus se fait par un canal aménagé dans la partie supérieure de l'ouvrage d'entrée. L'eau nécessaire à l'entraînement de ces détritus vers l'aval est tirée de vannettes disposées dans l'écran séparant le canal des détritus des rainures à batardeaux qui sont toujours en communication avec la retenue. Ces vannettes permettent du même coup d'évacuer les corps flottants qui ont pu se rassembler dans les rainures à batardeaux¹.

La fermeture des chambres d'eau des turbines, qui se fait dans certaines usines au moyen de vannes, est réalisée à Verbois simplement au moyen de batardeaux. A l'amont, les batardeaux, composés d'éléments en tôle avec remplissage de béton, ont été prévus avec galets de roulement spécialement étudiés pour permettre une mise en place même avec turbine en charge, cela pour le cas où une avarie des organes de la turbine empêcherait la fermeture de cette dernière. Ils glissent sur des glissières à inclinaison de 1 : 10, et doivent pouvoir supporter une pression de 21 m d'eau.

L'étanchéité entre panneaux et entre panneaux et seuil est assurée par des poutres de chêne. Le joint de l'arête supérieure et les joints latéraux sont prévus en tôle formant ressort.

Ces batardeaux sont manutentionnés par une grue-portique et palonnier avec accrochage automatique sous l'eau. La vitesse de levage est de 1 m/min ; la vitesse de translation du portique est de 10 m/min. Les batardeaux sortis de leurs rainures sont placés dans un dépôt sous la toiture.

A l'aval, les batardeaux sont mis en place en eau calme ; ils sont construits sans galets. Ils ont à soutenir une pression de 12 m d'eau. Les batardeaux enlevés, leurs rainures sont garnies de cadres guide-eau en tôle afin d'éviter dans le canal d'aspiration toute encoche ou saillie.

Le portique aval est prévu pour des vitesses analogues à celles du portique amont.

Au barrage, des batardeaux amont en tôle rivée de 14 m de portée sont munis de galets de roulement ; l'étanchéité est assurée de la même façon que pour les batardeaux de l'usine.

Ces batardeaux comportent des vannettes accouplées au dispositif d'accrochage et s'ouvrant avant levage pour laisser pénétrer l'eau entre le batardeau et la vanne secteur, cela pour égaliser la pression et réduire l'effort d'arrachage du batardeau.

Un portique de mise en place de ces batardeaux sert aussi au montage des vannes clapets et à la mise en place des batardeaux de ces dernières ; il comporte, à cet effet, un mouvement transversal du chariot ; la vitesse de levage est de 1 m/min. Le mouvement transversal se fait à la vitesse de 2 m/min. La vitesse de translation du portique est de 10 m/min.

Tous les portiques ont été construits par les *Ateliers Jonneret*, à Genève. La construction des batardeaux a été répartie entre les *Ateliers genevois de constructions métalliques*, les *Ateliers de construction de Vevey* et les *Ateliers Giovanola*, à Monthevy.

¹ Pendant les périodes d'abaissement important de la cote de retenue (opérations de chasses) on alimente le canal au moyen d'une pompe.

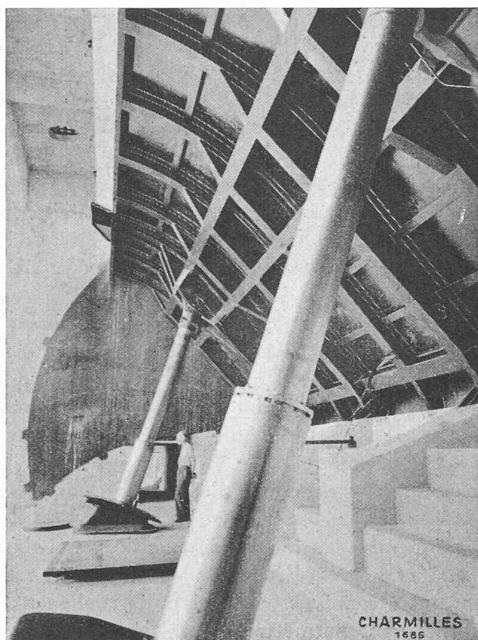


Fig. 41. — Vanne-clapet vue de dessous.

L'équipement de *vannes* du barrage comprend : Les vannes de fond, du type secteur, construites par les Ateliers Zschokke, à Döttingen ; la largeur de leur tablier est de 14 m ; elles sont sollicitées par une pression de 19 m d'eau. Le joint horizontal inférieur se fait sur un seuil plan en acier, affleurant la surface de granit du radier. Les joints latéraux et horizontal supérieur sont réalisés par des tôles formant ressort, s'appuyant sur des blindages latéraux scellés dans les piles et sur un blindage supérieur scellé dans l'écran.

Le tablier de la vanne est en tôle rivée, supportée par une ossature en fers profilés, composée de 6 fermes en forme de secteur, dont les sommets portent les paliers d'appui contre le

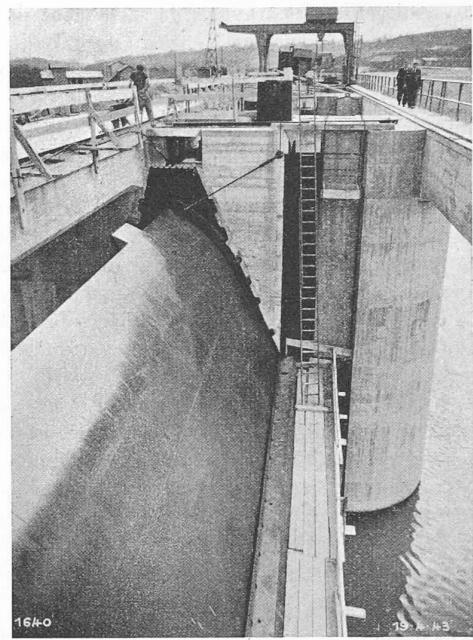


Fig. 42. — Vanne-clapet vue de dessus.
Dans le fond, portique à batardeaux du barrage.

masque incliné aval de l'écran de béton. La commande est assurée par deux treuils construction Charmilles à vis tournante pénétrant dans un écrou solidaire de la vanne. Les deux treuils d'une vanne sont mûs par un seul moteur de 5 CV, débrayable pour commande manuelle de secours. Ces treuils peuvent être commandés soit de la chambre des treuils du barrage, soit de la salle de commande. Des limitateurs d'effort, fins de course et indicateurs de position sont prévus sur ces vannes.

Les vannes-clapets, construites par les Ateliers de constructions métalliques, ont 14 m de largeur sur 4,50 m de hauteur ; elles sont de construction soudée en tôle au cuivre, sur nervures en profilés reliés par une poutre horizontale supportant les tourillons d'appui des vis de commande. L'extrémité inférieure de chacune des 6 nervures que comprend une vanne, porte un palier, l'ensemble des six paliers formant l'axe de pivotement de la vanne. Le joint horizontal sur le pied de la vanne, qui se présente sous une forme cylindrique, est assuré par un cuir fixé sur tôle formant ressort. Les joints latéraux sont exécutés de la même façon et glissent sur des blindages en tôle, dans lesquels sont placés des corps de chauffe destinés à maintenir libres de glace les joints latéraux (fig. 41, 42).

Des corps de chauffe sont aussi installés dans le moyeu pour éviter la glace au joint horizontal.

La commande de chacune des vannes-clapets est assurée par deux treuils à vis coulissante et écrou. Ces vis se meuvent longitudinalement dans un carter rempli d'huile. Les deux treuils sont mus par un seul moteur de 25 CV avec vis tangente, frein automatique et débrayage pour commande de secours par manivelle. Des fins de course, indicateurs de position, sont prévus sur les vannes (fig. 43).

Les treuils sont commandés par boutons-poussoirs de la chambre des treuils ou de la salle de commande ; ils peuvent en outre être commandés automatiquement à distance pour réglage du niveau de la retenue.

Le dispositif de commande comporte, en principe, un flotteur placé dans une chambre d'eau alimentée par une vanne, dont le débit est fonction du niveau amont, dispositif

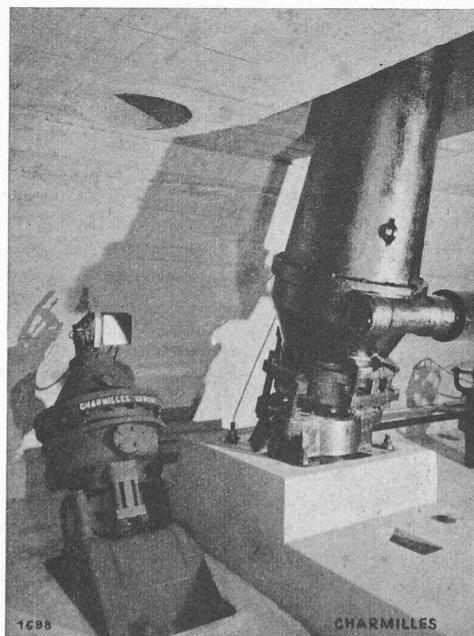


Fig. 43. — Treuils de commande des vannes-clapets (à droite), des vannes-secteurs (à gauche).

muni d'un asservissement électrique avec les vannes elles-mêmes et qui permet le choix du niveau auquel doit s'opérer le réglage.

Toute l'installation en question est placée dans un évidement du mur-digue, à l'amont de la salle de commande.

Les *ponts roulants*, au nombre de deux de 80 tonnes pour la salle des machines, et deux de 40 tonnes pour la salle de décuvage des transformateurs, ont été construits par les *Ateliers de constructions mécaniques de Vevey*. Ils sont du type à deux poutres pleines en profilés et tôle rivés.

Les ponts de 80 t accouplés par un palonnier permettent le montage de la turbine avec son arbre et son couvercle (110 t) ou la mise en place du rotor de l'alternateur tout monté (150 t). Pour réduire la hauteur de la salle des machines, les ponts ont été étudiés de façon à permettre à la partie supérieure de l'arbre de la turbine ou de l'alternateur, de pénétrer dans leur position haute entre les ponts. La pièce de suspension des arbres sur le palonnier est conçue de façon à assurer, pendant le montage du groupe, la verticalité des arbres.

La portée des ponts de 80 t est de 13,40 m, la charge d'essai de 96 t ; la course du crochet est de 19 m, ce qui permet d'atteindre le niveau des parties basses de la turbine placée dans sa fosse.

Les treuils des ponts sont prévus pour deux vitesses, l'une de 1 m/min, l'autre de 6 m/min. La vitesse de translation des ponts est de 15 m/min, celle des chariots de 8 m/min.

Les ponts de 40 t sont de construction analogue. Leur portée est de 12,20 m, la charge d'essai de 48 t, la vitesse de translation de 15 m/min, celle des chariots de 8 m/min. Les vitesses de levage sont de 1 m/min et de 6 m/min, la hauteur de levage de 10,5 m.

Un *chariot électrique* sur voie ferrée permet d'effectuer le transport des pièces lourdes entre le local de décuvage (sous ponts de 40 t) et le hall de montage des machines (sous ponts de 80 t).

Les eaux de fuite et de drainage des fondations de la salle des ma-

chines, passant par des galeries de visite ménagées sous les bâches spirales, de même que les eaux de vidange des bâches spirales et tube d'aspiration, sont conduites dans deux *puisards* généraux, reliés entre eux par une canalisation de secours. Ces puisards sont équipés chacun d'une pompe d'épuisement de 75 CV et d'une pompe des eaux de fuite de 23 CV à mise en marche automatique. Un système de vannes, manœuvrées du fond des puisards, permet la vidange de chaque chambre d'eau.

V. Groupes hydro-électriques.

Les groupes électrogènes de Verbois, provisoirement au nombre de trois, sont du type à axe vertical à 3 paliers-guides et pivoterie disposée au-dessus de l'alternateur, excitatrices

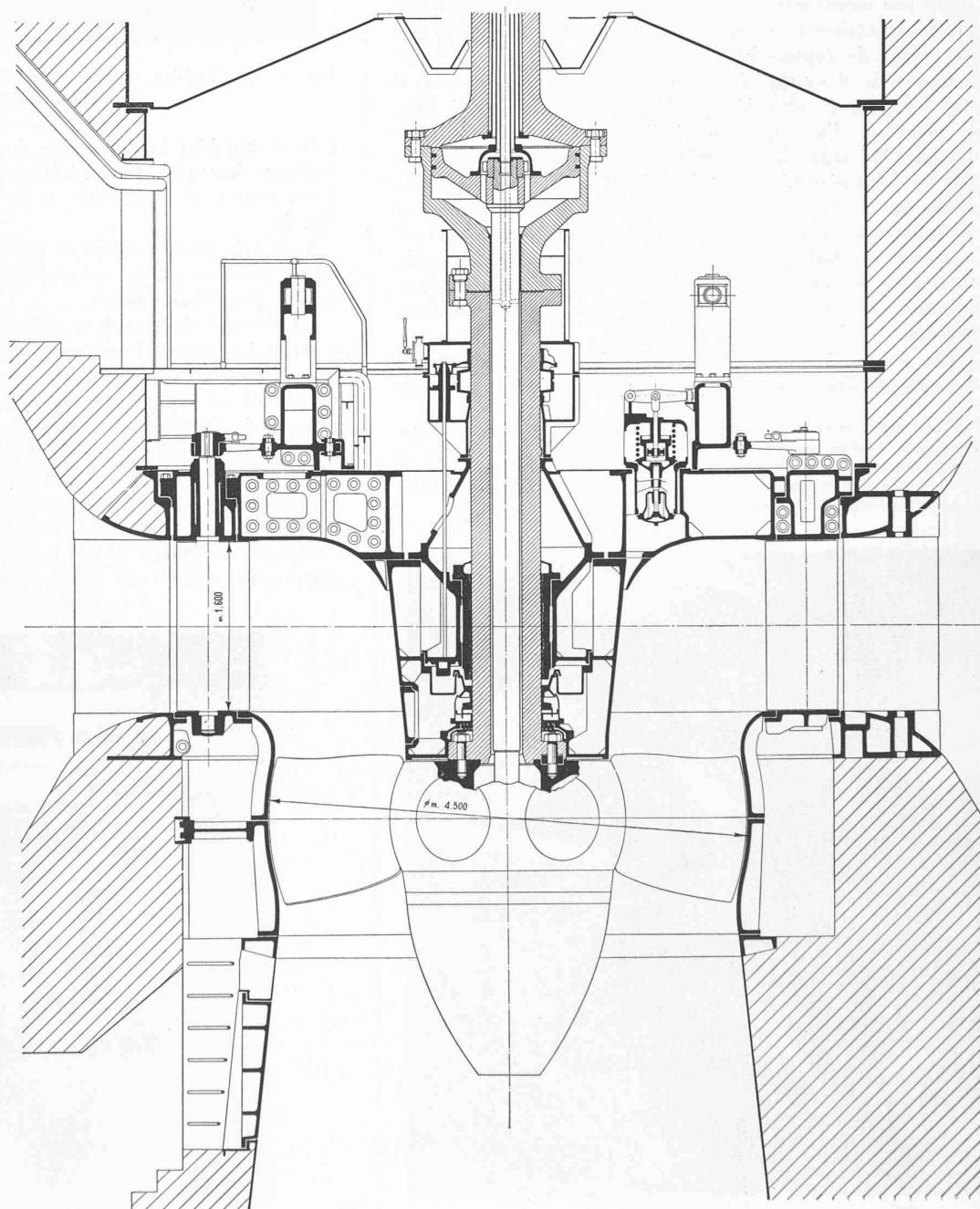


Fig. 44. — Coupe de la turbine. Echelle 1 : 60.

placées au-dessus de cette pivoterie. Une idée sommaire de l'importance de ces machines est donnée par le poids total, d'environ 700 t, et leur hauteur totale de 18 m.

A. La turbine Kaplan-Charmilles.

La turbine type *Kaplan-Charmilles* développe 31 500 CV à 136,4 tours par minute sous la chute maximum de 20,80 m ; la construction ressort du plan ci-contre et les parties essentielles sont :

Le cercle d'entretoises dont les 12 pales verticales repartent sur la fondation la charge des parties supérieures du groupe (fig. 44) ; le distributeur mobile ou organe de fermeture, comprenant 24 pales mobiles ; le couvercle, c'est-à-dire la partie assurant la fermeture supérieure de l'espace occupé par l'eau dans la turbine (fig. 45) ; le palier-guide inférieur du groupe, disposé dans le couvercle ; le cercle de vannage, qui reçoit son mouvement des servomoteurs et le transmet aux aubes directrices au moyen de leviers doubles accouplés par un boulon de rupture¹ ; le servomoteur du distributeur, composé de deux cylindres ; la roue Kaplan, comprenant 6 aubes mobiles commandées par le servomoteur disposé dans le manchon d'accouplement à l'alternateur² (fig. 46, 47). L'étanchéité entre le couvercle et la roue mobile est assurée par le « joint-plan » horizontal, qui est réalisé par des anneaux concentriques en charbon et dont le fonctionnement est contrôlable à distance, d'une part au moyen d'un flotteur mesurant les fuites, d'autre part au moyen d'une sonde thermique mesurant sa température et d'un thermostat agissant sur les organes de sécurité en cas d'échauffement brusque.

Des pompes à engrenages assurent la circulation de l'huile de graissage des paliers. Des soupapes d'entrée d'air permet-

¹ La rupture de cette pièce libère de la commande toute aube éventuellement gênée dans son mouvement.

² Ce servomoteur reçoit l'huile sous pression variable, par l'intermédiaire de deux tubes concentriques placés dans l'arbre creux de l'alternateur et alimentés par le chapeau de réglage situé en haut du groupe.

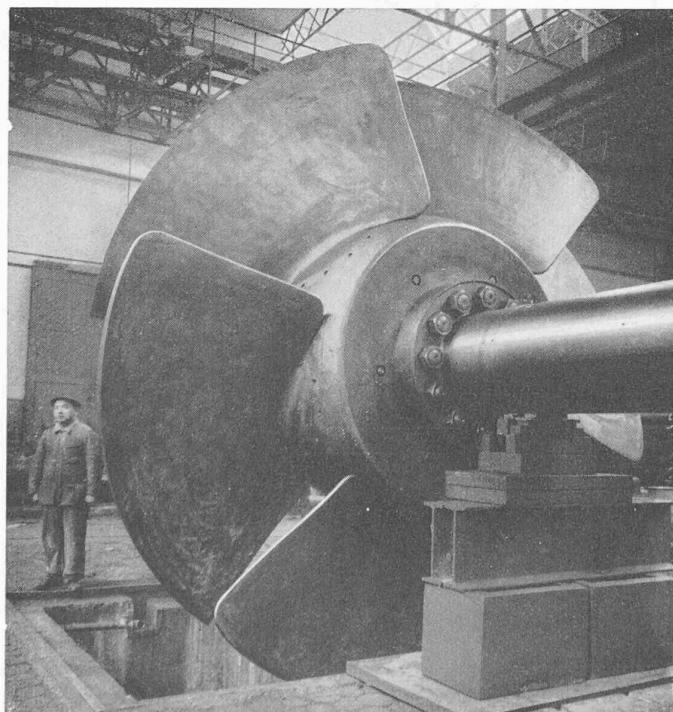


Fig. 46. — Roue Kaplan à l'équilibrage en atelier.

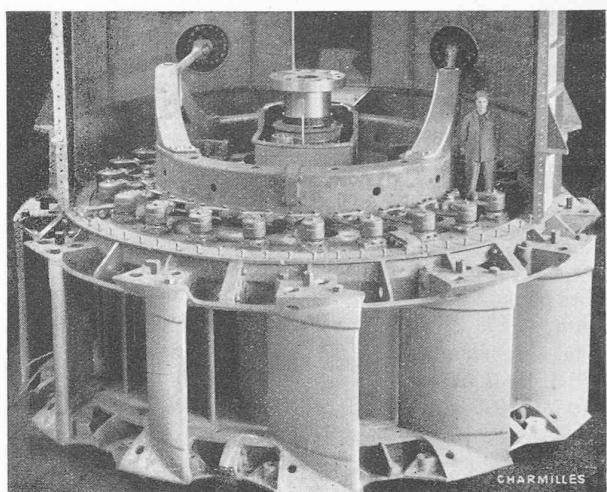


Fig. 45. — Turbine montée en atelier avec, au premier plan, le cercle d'entretoises.

tent de combler la dépression dans l'aspirateur en cas de décharge brusque, afin d'éviter un retour de la colonne d'eau dont le choc pourrait avoir des conséquences graves (fig. 48).

Vu le très grand nombre de points à graisser sur une semblable machine (125), un graissage automatique centralisé à haute pression est prévu.

La pivoterie du groupe est constituée par un palier Mitchel à patins à supports élastiques plongeant dans un bain d'huile refroidi par de l'eau traversant un serpentin ; cette pivoterie est capable de supporter toute la partie tournante de la turbine et de l'alternateur ainsi que la pression statique de l'eau sur la turbine, soit un effort total de 560 t environ.

L'aspirateur en béton permet la récupération en pleine charge et sous la chute maximum d'une puissance d'environ 10 000 CV, soit le tiers de la puissance du groupe. Ce chiffre souligne l'importance de cet organe qui doit être construit exactement d'après les données de l'hydraulicien. Il est

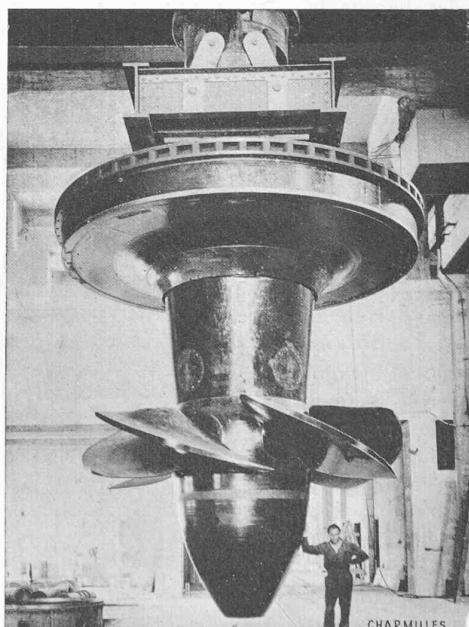


Fig. 47. — Roue Kaplan et son couvercle suspendus au pont roulant.

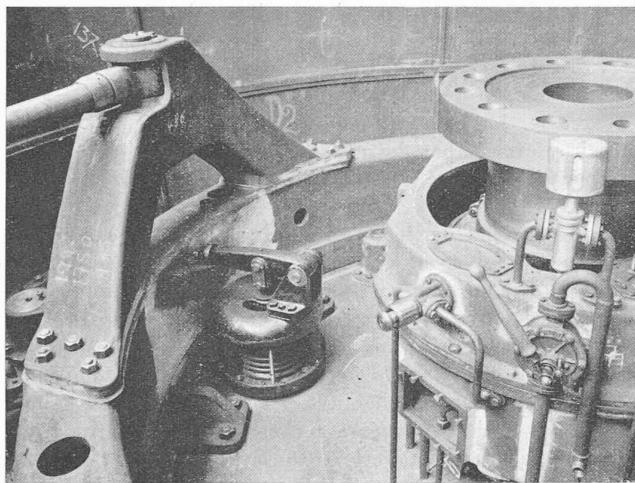


Fig. 48. — Intérieur du cuvelage de la turbine avec accouplement, carter des pompes, limiteur de vitesse, soupape d'entrée d'air et cercle de vannage.

blindé dans sa partie supérieure où la vitesse moyenne axiale passe de 10,35 m/sec à 5,30 m/sec pour diminuer graduellement vers la sortie et arriver à 1,65 m/sec. La masse d'eau sortant de l'aspirateur à cette vitesse représente une perte d'énergie de 0,66 % en pleine charge.

Le réglage de la turbine est assuré par un régulateur automatique accéléro-tachymétrique à pression d'huile, de construction entièrement fermée, disposé à côté du groupe.

La quantité d'huile nécessaire pour le réglage est de 7000 litres. Cette huile est répartie dans l'accumulateur à pression d'air et d'huile, dans le caisson du régulateur placé au niveau de la salle des alternateurs et dans un réservoir se trouvant dans le couvercle de la turbine. Ce dernier réservoir sert, d'une part, comme réfrigérant, et, d'autre part, pour recueillir les fuites provenant du carter des pompes situées au-dessus du palier de la turbine. Le niveau de ce réservoir est maintenu constant au moyen d'un dispositif automatique chargé de remonter l'huile au caisson du régulateur qui est muni d'un réfrigérant.

Une pompe à commande électrique à grande vitesse assure la pression d'huile pour le démarrage et en cas d'insuffisance de la pompe entraînée mécaniquement par l'arbre de la turbine. Ce groupe moto-pompe électrique d'une puissance de 27 C.V., tournant à 3000 tours, fournit l'huile à la pression de 16 atmosphères ; il est mis automatiquement hors circuit lorsque la vitesse du groupe est suffisante pour permettre l'alimentation par la pompe mécanique.

L'accumulateur d'huile à air sous pression, d'une capacité totale de 5000 litres — moitié huile, moitié air — sert de tampon pour régulariser la quantité d'huile nécessaire au régulateur, car les pompes lors de grands mouvements de réglage seraient insuffisantes pour couvrir le débit indispensable. En cas de défaillance des pompes, l'accumulateur permet l'alimentation du circuit pendant un certain temps et assure la fermeture de la turbine lorsque la pression d'huile risque de devenir insuffisante.

Un dispositif dit de pompage intermittent permet aux pompes de n'absorber que l'énergie nécessaire pour maintenir l'huile à son niveau normal dans l'accumulateur. A cet effet, une soupape manométrique placée sous l'influence de la pression de l'accumulateur commande la mise en pression du circuit des pompes en chargeant le ressort de la soupape de sûreté. Un second dispositif manométrique commande l'enclenchement du groupe moto-pompe lorsque la pompe

mécanique, par suite de grosses perturbations d'un réglage, devient insuffisante pour alimenter l'accumulateur.

Une troisième pompe, dite pompe de sécurité, et dont la mise en pression est commandée par un tachymètre limiteur de vitesse — vitesse de déclenchement 150 % de la vitesse normale — injecte dans le circuit de réglage une pression de 30 atmosphères pour assurer, en cas d'emballement du groupe, sa fermeture avec toute la sécurité voulue. Cette pompe est commandée mécaniquement par l'arbre de la turbine et lors de son fonctionnement l'accumulateur est automatiquement isolé du circuit de réglage par le jeu de soupapes appropriées.

Le servomoteur de commande des pales de la roue peut exercer sur celles-ci un effort de 245 000 kg à la pression de 16 atmosphères. Il est à double effet et sa cylindrée est de 310 litres. En cas d'emballement et sous l'effet de la pression de la pompe de sécurité, il est capable de développer une poussée de 460 000 kg pour assurer la fermeture de la roue.

Les deux *servomoteurs de commande des aubes directrices* placés dans le cuvelage de la turbine sont également à double effet et peuvent exercer à la pression de 16 atmosphères un effort de 63 000 kg et 118 000 kg en cas de fonctionnement de la pompe d'emballement ; leur cylindrée totale est de 196 litres.

Le régulateur-pilote muni d'un détecteur accéléro-tachymètre est entraîné par un moteur asynchrone alimenté au moyen d'un alternateur pilote spécial à aimants permanents placé au sommet du groupe. Ce moteur asynchrone est capable d'assurer encore un couple suffisant lorsque sa tension d'alimentation à la fréquence normale descend jusqu'à 20 % de sa valeur de régime. Entraînant le régulateur-pilote avec un couple constant, sa vitesse est ainsi rigoureusement proportionnelle à celle du groupe et son démarrage est assuré dès les premiers tours de la turbine.

En cas de défaillance de la tension d'alimentation, un relais à minimum de tension branché en parallèle sur le circuit du moteur provoque en cas de baisse anormale de la tension de la génératrice-pilote — au-dessous de 20 % — la fermeture du régulateur.

Un limiteur d'emballement déclenchant à 135 % de la vitesse normale du groupe, assure par le jeu de la pression d'huile la fermeture de la turbine.

Tous les instruments pour le contrôle de la circulation d'huile de graissage, du contrôle de la température et de la pression d'huile, agissent sur un relais de sécurité qui provoque également la fermeture du groupe.

Les vérins de *freinage* sont alimentés par l'huile sous pression du circuit de réglage, par l'intermédiaire d'une soupape appropriée placée sur le tableau de groupe et commandée manuellement. Toutefois, un organe tachymétrique spécial ne permet la mise en pression des vérins que lorsque la vitesse du groupe est suffisamment basse.

Afin de pouvoir fonctionner à toutes les charges, avec le rendement maximum possible, la *position des pales de la roue* est constamment assujettie à celle des aubes directrices, au moyen d'une came appropriée. Pour tenir compte également de l'influence des différentes chutes sous lesquelles doit travailler la turbine, il a été prévu un jeu de 4 cames différentes dont le profil est fonction de la chute et qui tour à tour peuvent être insérées dans la commande¹.

¹ L'asservissement entre le distributeur de la turbine et le régulateur est réalisé par un système de chaînes et tringlages, relié aux tiges de piston des servomoteurs du distributeur. L'asservissement entre la roue Kaplan et le régulateur se fait sur le piston du servomoteur de la roue, par une transmission constituée d'une tringle rigide disposée dans l'arbre de l'alternateur et tournée avec lui, et d'un ruban d'acier maintenu tendu par des contre-poids et disposé sur la partie fixe de l'alternateur ; la liaison entre la partie tournante de cette transmission et sa partie fixe se faisant par un levier placé dans le chapeau de réglage.

B. L'alternateur Sécheron.

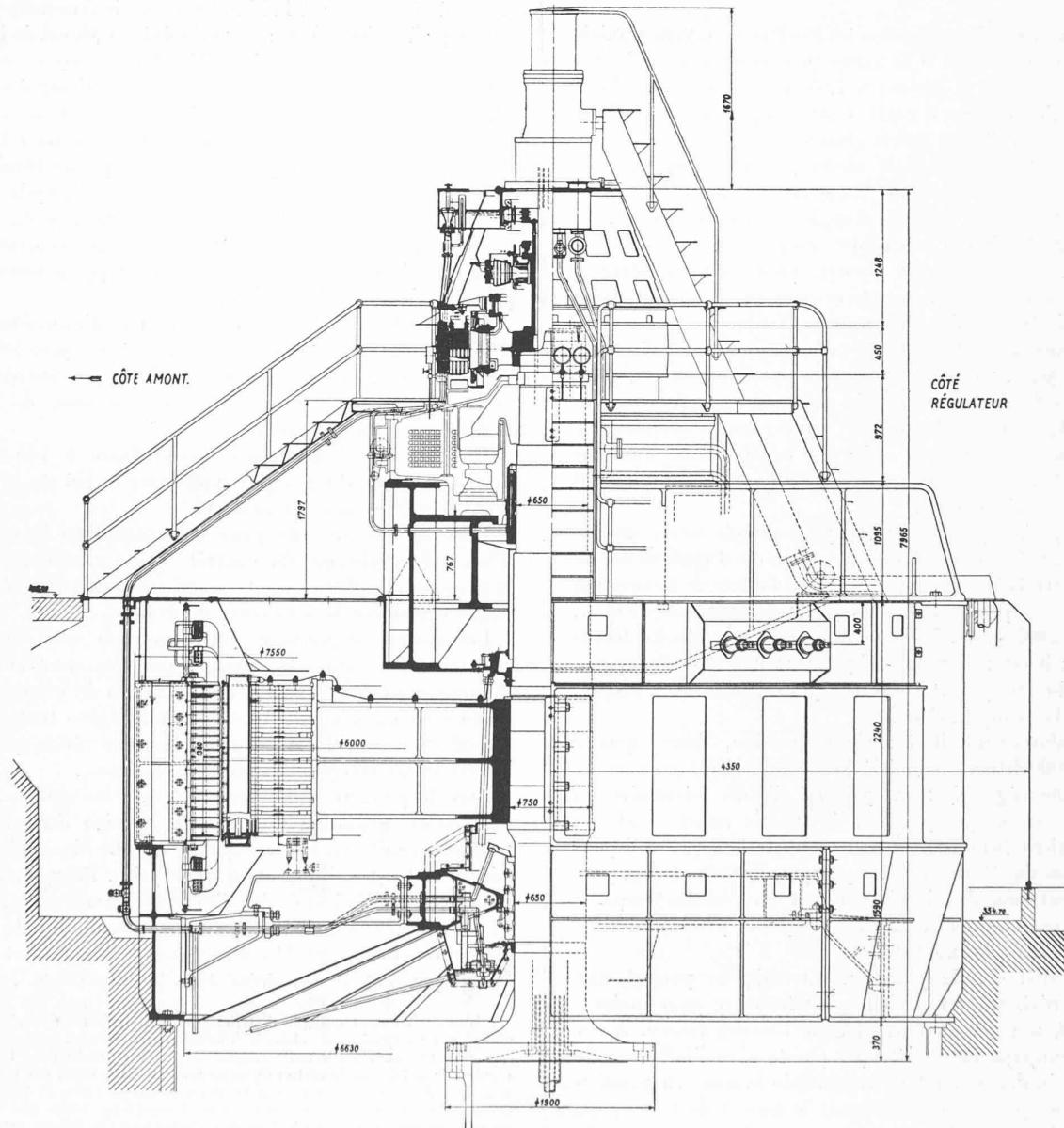
L'alternateur Sécheron, de 27 500 kVA courant triphasé 50 périodes par seconde, 18 000 volts, comporte un moment de giration 3100 t m². Son poids total est de 300 t. Le rotor à lui seul pèse 145 t. Dans la construction des parties actives de la machine entrent environ 17,3 t de cuivre et 33 t de tôles dynamo. Le poids de l'arbre est de 17 t. Les dimensions et le mode de construction de la machine ressortent du plan ci-contre (fig. 49).

La stator comporte aux deux extrémités d'un diamètre des parties renforcées supportant le pont supérieur et la pivoterie, et reportant par conséquent sur la fondation la plus grande partie du poids de la partie tournante du groupe.

La construction tant du stator que du rotor est entièrement exécutée par soudure à l'arc électrique. Le découpage des grosses tôles, directement aux formes et dimensions a été fait au chalumeau coupeur au gabarit. Pour le stator, le montage et la soudure des pièces ainsi préparées ont pu être exécutés de façon à éviter l'alésage au tour de la carcasse

du stator. Le centrage exact des empilages de tôles est obtenu par fixation très précise de leurs clavettes supports sur les nervures de la carcasse. Cette fixation est faite après centrage au moyen d'un gabarit tournant installé au centre de la carcasse. La hauteur de l'empilage est de 1,38 m. Les encoches fermées par des cales de bois dur sont au nombre de 3 par pôle et phase ; leurs dimensions sont de 125 × 23 mm. (fig. 50, 51).

Les enroulements haute tension 18 000 V comportent 3 bobines par pôle et phase à conducteurs divisés et permuts pour réduire les pertes supplémentaires. Chaque phase comporte deux demi-enroulements en parallèle séparés par une légère isolation permettant l'emploi des dispositifs de protection décrits dans l'équipement de la salle de commande. L'isolation des bobines contre le fer a fait l'objet d'essais et études destinés à rechercher les matières accusant une variation des pertes ($tg\delta$) la plus régulière possible en fonction de la tension, sans inflexion, signe de début d'ionisation. Il fallait trouver un compromis entre les matières les plus isolantes mais plus cassantes à froid et présentant



une inflexion dans la courbe des pertes, matières à utiliser pour des tensions inférieures à celles correspondant à ce point, et des matières plus molles ne présentant pas de point d'infexion dans leur courbe, même pour des tensions sensiblement plus hautes que nécessaire, une limite étant fixée par le fait que la matière ne doit pas couler même en marche prolongée en surcharge. On s'est finalement arrêté à la seconde méthode d'isolation.

Quelques particularités de la construction du *rotor* de la machine sont à relever dans le mode d'exécution de la jante formant une partie du circuit magnétique des pôles. Cette jante est constituée d'anneaux indépendants du croisillon et simplement clavetée sur l'extrémité des bras de ce dernier. De la sorte, aucun effort dû à la force centrifuge n'est transmis de la jante aux bras ; ceux-ci ne subissent ainsi qu'une flexion due à la transmission du couple de l'arbre à la jante et un autre effort de flexion dû au poids de la jante et des pôles. Tout le système est ainsi accessible au calcul simple, ce qui joint aux avantages de la construction soudée, c'est-à-dire, grande homogénéité dans la qualité des matériaux, celui de l'élimination d'hypothèses dans le calcul.

La jante elle-même supporte tout l'effort centrifuge, mais là également le calcul mécanique est bien déterminé. La fabrication des anneaux de la jante mérite quelques mots de description. L'ensemble se compose de 6 paquets d'anneaux en tôle épaisse de 4 cm, chaque paquet comprenant 5 anneaux. Un anneau est constitué de 9 secteurs soudés (fig. 52). Dans l'assemblage en paquets, les soudures des secteurs sont disposées alternées de telle sorte qu'une section soumise à traction ne comporte qu'une seule soudure. Les essais furent faits dans le but de déterminer le mode d'exécution de ces soudures nécessitant le moins de manutention de ces grands anneaux, très lourds et déformables. Une solution qui évitait le retournement des pièces consistait à exécuter les soudures en V d'un même côté de l'anneau reposant sur un anneau précédent. On réalisait du même coup la soudure des anneaux

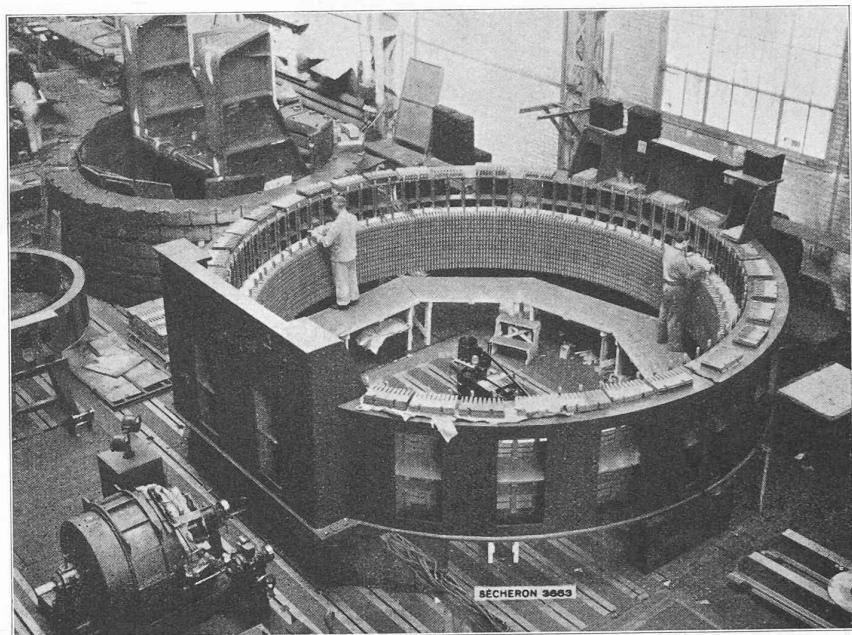


Fig. 50. — Empilage du stator de l'alternateur dans les ateliers.

entre eux. Cette méthode fit apparaître à l'examen macrographique des débuts de fissures et dut être abandonnée. Elle aurait nécessité, et encore sans résultat certain, un recuit de ces grandes pièces qui eut été très difficile à exécuter. On préféra faire les soudures des segments en X en retournant l'anneau au moyen d'un dispositif ad hoc. Les déformations furent très minimes en considération des dimensions des pièces, puisque deux anneaux mis en présence ne présentaient que des méplats de 1 mm.

L'assemblage en paquets se fit ensuite par tiges ajustées et rivées.

Par mesure de sécurité, toutes les soudures furent examinées aux rayons Röntgen et 500 m de film furent exécutés à cet effet.

La partie active du rotor comprend les 44 pôles, qui sont du type lamellé, et dont les tôles forment à leur base, après empilage, la clavette support du pôle qui s'introduit dans une rainure ménagée dans le pourtour de la jante. Les ép-

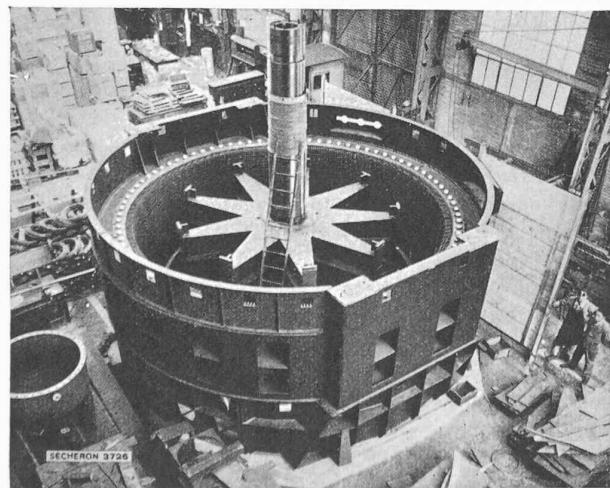


Fig. 51. — Stator de l'alternateur avant mise en place des enroulements.

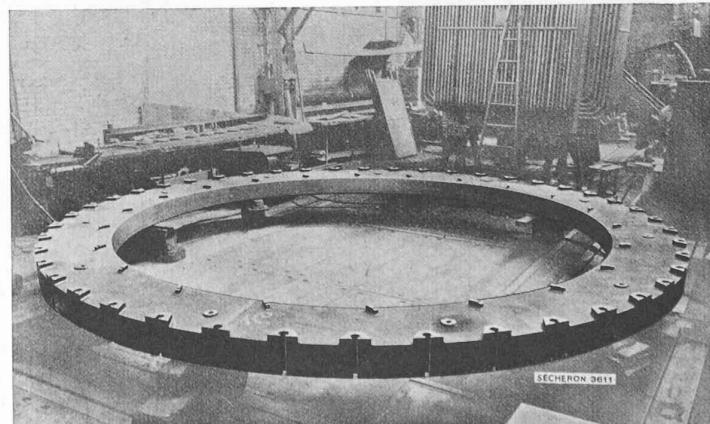


Fig. 52. — Anneaux constituant la jante du rotor.

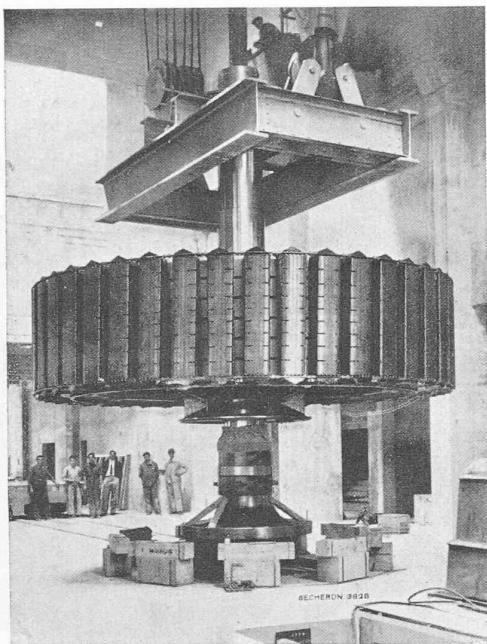


Fig. 53. — Rotor complètement monté.

nouissements polaires présentent une certaine obliquité par rapport aux rainures du stator ; ils sont munis d'amortisseurs constitués de barres rondes d'aluminium court-circuitées. Le bobinage inducteur est réalisé en cuivre plat sur champ isolé par des feuilles de presspan (fig. 53).

La tension d'excitation est de 400 V fournie par l'excitatrice principale qui est une machine compound à pôles auxiliaires, alimentée par une excitatrice pilote à 110 V. Le réglage se fait dans le champ de l'excitatrice principale.

L'exécution du *pont support* avait une grande importance au point de vue fonctionnement de l'ensemble du groupe. Cette pièce doit supporter avec une flexion minimum tout le poids de la partie tournante que lui transmet la crapaudine. La base recevant la crapaudine doit être très peu déformable pour que cette dernière ait une marche dépourvue de vibrations. Ces conditions ont imposé des études des déformations en charge de ces ponts-supports, ainsi que divers essais réa-

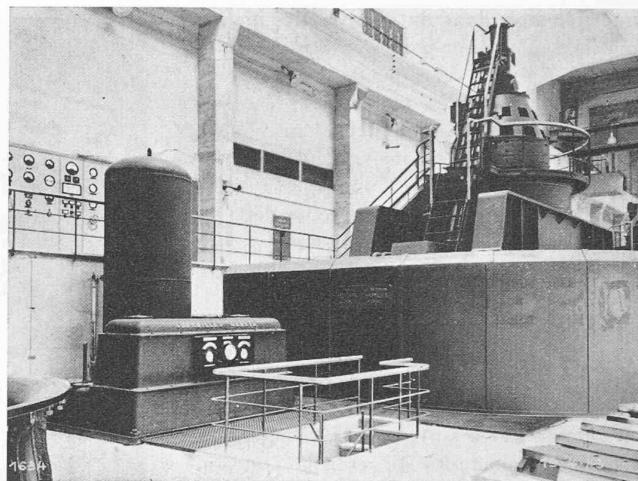


Fig. 55. — Vue d'ensemble de l'alternateur et du régulateur de la turbine, montés à Verbois.

lisés en ateliers du constructeur, essais qui ont fait l'objet d'un compte-rendu détaillé dans le *Bulletin Sécheron*, n° 14 de 1942, et qui ont consisté à charger simultanément 2 ponts assemblés en position inverse l'un sur l'autre et séparés par un jeu de 8 vérins. La charge réalisée a dépassé de 30 % la charge normale (fig. 54).

La différence de flèche du pont entre marche à vide et en charge normale est de 1,52 mm. La flèche maximum totale est de 3 mm. Ces essais ont montré que la sécurité des ponts supports soudés est largement assurée.

La machine est entourée d'une gaine en tôle destinée à rassembler l'air chaud et à l'évacuer vers des conduits aboutissant sur la toiture de l'usine. L'air frais est pris en façade de l'usine et son débit atteint 35 m³/sec. Dans le circuit d'air est installé le dispositif d'extinction d'incendie, système Siebenmann, construit par la maison *Sifrag*. Ces dispositifs existent dans nombre d'usines et il n'y a pas lieu d'en parler ici (fig. 55).

Le rendement à pleine charge d'un alternateur est de 97,3 % à cos. φ = 1.

La variation de tension entre marche à vide et marche à pleine charge est de 18 % à cos. φ = 1.

Ces machines ont subi avec succès en ateliers les essais d'isolation à 37 000 V, mesure des caractéristiques et essais d'emballage à 2,2 fois la vitesse normale.

VI. Equipements électriques.

Les équipements électriques principaux de l'usine sont répartis en trois installations, selon leur destination :

A. Station intérieure de couplage et distribution 18 000 V ayant pour but essentiel la distribution sur le réseau de Genève de l'énergie de Verbois.

B. Station extérieure de transformation 18 000 — 125 000 — 150 000 V et de raccordement aux réseaux suisses et étrangers.

C. Salle de commande et de centralisation des actions à distance dirigeant : l'utilisation du Rhône au moyen des vannes du barrage et du réglage des turbines ; la répartition de l'énergie de Verbois et des centrales interconnectées, par réglage des groupes hydro-électriques de l'usine et des transformateurs à gradins de la station extérieure.

Le schéma général des installations de l'usine est donné

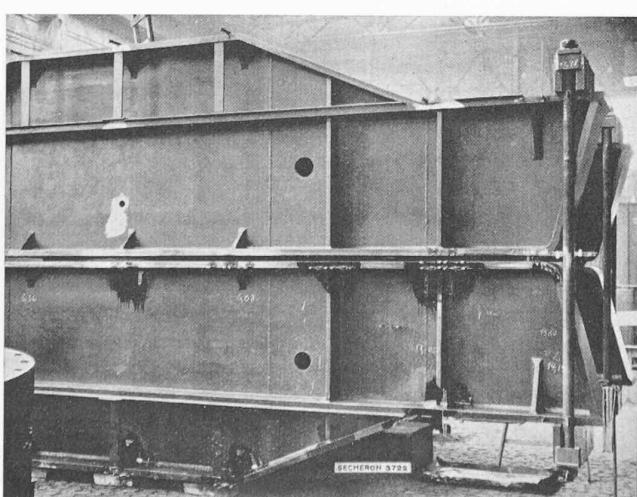


Fig. 54. — Essais de flexion des ponts supports du groupe.

plus loin, pour plus de simplicité, au moyen de la vue en élévation du schéma synoptique lumineux de la salle de commande (voir fig. 67).

A. Station 18 000 V de couplage et distribution.

La station 18 000 V de l'usine a été construite par l'Appareillage Gardy ; elle sert à la liaison des alternateurs de Verbois aux canalisations de raccordement au réseau primaire du Service de l'Électricité de Genève ; aux transformateurs servant à l'élévation de la tension pour le raccordement aux réseaux suisses et étrangers ; aux transformateurs de services auxiliaires et les installations de protection et d'essais.

Cet équipement électrique comporte deux jeux de barres omnibus principaux 18 000 V, formant boucle, un jeu de barres auxiliaires et d'essais, un certain nombre de circuits dont :

- 4 d'alternateurs, de 27 500 kVA, dont 3 équipés.
- 2 de transformateurs de 25 000 kVA, tous équipés.
- 13 de départs souterrains de 8000 kVA, dont 7 équipés.
- 2 de transformateurs auxiliaires de 600 kVA.
- 2 de mise à la terre du point neutre 18 000 V de 2500 kVA.
- 1 de résistance hydraulique de 22 000 kW.
- 1 de transformateur d'essais de câbles 1350 kVA.
- 2 de couplage en parallèle des barres, dont un de mise en parallèle du jeu de barres d'essais avec les jeux de barres principaux, et un de mise en parallèle des jeux de barres principaux entre eux.
- 2 de mesure, essais spéciaux protections.

L'installation permet les opérations suivantes :

Alimenter le réseau de Genève par des alternateurs quelconques, les autres alimentant, sans liaison en parallèle, les transformateurs élévateurs ;

alimenter indépendamment deux parties distinctes du réseau de Genève par des alternateurs quelconques, les transformateurs élévateurs étant tous ou séparément en parallèle avec l'une ou l'autre de ces parties ;

alimenter tous les réseaux en parallèle par les mêmes machines ;

passer d'un des services ci-dessus à un autre avec un minimum de manœuvres, sans interruption de fourniture, même avec toute la puissance de l'usine placée sur un des services.

Mettre en parallèle l'usine de Verbois avec les autres usines de Genève, de Suisse ou de l'étranger au moyen des disjoncteurs de couplage.

Mettre en service l'usine par étapes et autoriser un arrêt total, pour entretien ou transformation, d'une tranche complète de la station en relation avec un des groupes hydroélectriques, tout en maintenant le service complet des réseaux au moyen des autres groupes.

Réaliser une grande stabilité de service, une grande facilité d'exploitation et la continuité des services auxiliaires.

Assurer une protection générale du réseau de Genève contre les interruptions de services dues aux mises à la terre accidentelles sur les lignes et installations 18 000 V, par l'emploi de deux bobines d'extinction avec transformateur de point neutre.

Faire des essais sur une résistance liquide de l'un quelconque des alternateurs de Verbois, ou de machines des autres usines genevoises ou étrangères par l'intermédiaire des lignes 18 000 V ou des transformateurs, et du jeu de barres auxiliaires.

Faire des essais des câbles des lignes souterraines au moyen d'un transformateur monophasé 40 000 V réglable, en utilisant les barres auxiliaires comme barres d'essais.

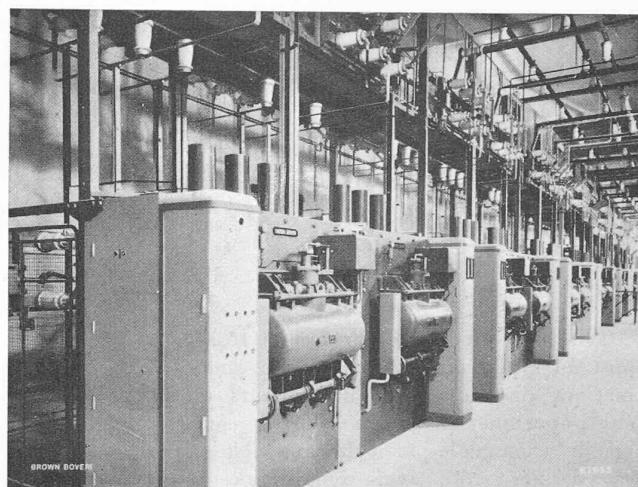


Fig. 59. — Couloir principal de commande de la station 18 000 V, disjoncteurs à air comprimé et colonnes de manœuvre.

Ces conditions ont conduit à choisir les *caractéristiques et dispositions* suivantes des installations :

Chaque circuit 18 kV peut être branché au moyen de son disjoncteur et de trois sectionneurs à l'un ou l'autre des trois systèmes de barres. Des transformateurs de tension sont prévus de chaque côté du disjoncteur pour permettre la synchronisation ; cela en particulier pour les disjoncteurs de couplage.

Des sectionneurs de barres divisent la station en quatre tranches comprenant chacune un circuit d'alternateur, des circuits de lignes, un circuit de transformateur principal ou auxiliaire ; chacune de ces tranches réalisant en quelque sorte l'équipement d'une centrale indépendante.

Les barres collectrices de la boucle 18 000 V sont en cuivre et prévues pour une intensité correspondant à la puissance totale possible de l'usine.

Tous les isolateurs sont en porcelaine blanche, d'un type fort, résistant aux efforts dynamiques dus aux court-circuits.

La résistance mécanique des barres, isolateurs, connexions et charpentes, tient compte également des possibilités de couplage de l'usine de Verbois avec les grandes centrales suisses et étrangères.

Les barres auxiliaires sont également en cuivre et sont dimensionnées pour la puissance d'un alternateur ; les isolateurs sont du type 24 000 V pouvant supporter, au cours des essais de câbles, l'application momentanée de la tension d'essai de 40 000 V. Des sectionneurs unipolaires permettent de relier les têtes de câbles des lignes et transformateurs à ces barres d'essais.

L'appareillage des circuits 18 000 V dérivés des barres est dimensionné pour les intensités de 2500 A pour le circuit de couplage principal.

1000 A pour les circuits d'alternateurs, transformateurs, résistance hydraulique.

400 A pour les circuits de départs et transformateurs auxiliaires et d'essais.

Les circuits 18 kV d'alternateurs sont reliés aux machines par des barres disposées dans des caniveaux (fig. 56, 57).

Les circuits 18 kV de transformateurs principaux, ceux des transformateurs auxiliaires, d'essais, de point neutre, celui de la résistance hydraulique, sont reliés aux appareils correspondants par câbles haute tension.

Les circuits 18 kV des lignes souterraines sont reliés directement aux extrémités de câbles (fig. 58).

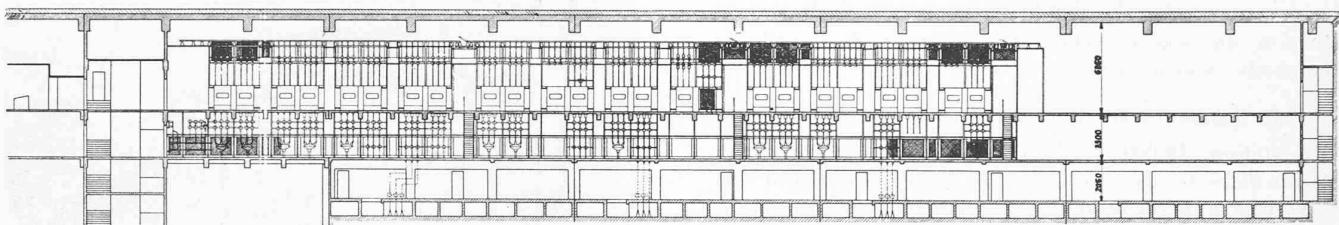


Fig. 56. — Coupe-élévation de la station de 18 000 V.

Tous les sectionneurs des circuits 18 kV sont du type Gardy, à commande pneumatique du couloir des disjoncteurs ou électro-pneumatique de la salle de commande (commande par levier amovible en cas de nécessité), avec signalisation de position à la salle de commande et sur les colonnes de manœuvre.

Les disjoncteurs sont du type *Brown Boveri*, 24 000 V 1000 A 750 000 kVA, à air comprimé avec réservoir individuel, à commande pneumatique du couloir de manœuvre et électro-pneumatique de la salle de commande. Le disjoncteur de couplage principal est du type 2500 A. Ces disjoncteurs sont mis en place au moyen d'un chariot (fig. 59).

Les colonnes de manœuvre sont disposées à côté des disjoncteurs et forment avec les parties mécaniques et pneumatiques de ces derniers, un véritable tableau de manœuvre et signalisation, disposé tout au long du couloir principal de la station 18 000 V, couloir qui est directement accessible de la salle de commande. Ces colonnes groupent les soupapes électro-pneumatiques de commande des sectionneurs, toute la filerie de commande, mesure, signalisation, ainsi que les vannes d'air comprimé, deux ampèremètres, un schéma à signes lumineux de position des sectionneurs et disjoncteurs, ainsi que les boutons-poussoirs de commande des sectionneurs.

Dans les cellules H. T., la filerie de signalisation est réalisée en câble sous caoutchouc ; celle de mesure, relais et commande en fil de cuivre isolé. La tuyauterie d'air est exécutée dans les cellules en tube d'aluminium. La liaison entre les colonnes de manœuvre et le répartiteur de la salle de commande est exécutée en câble de cuivre isolé au papier imprégné, sous plomb.

Les transformateurs de tension et d'intensité, de construction *Moser-Glaser*, sont d'un type sec à air, aucun appareil à huile n'ayant été admis dans les locaux de cette sta-

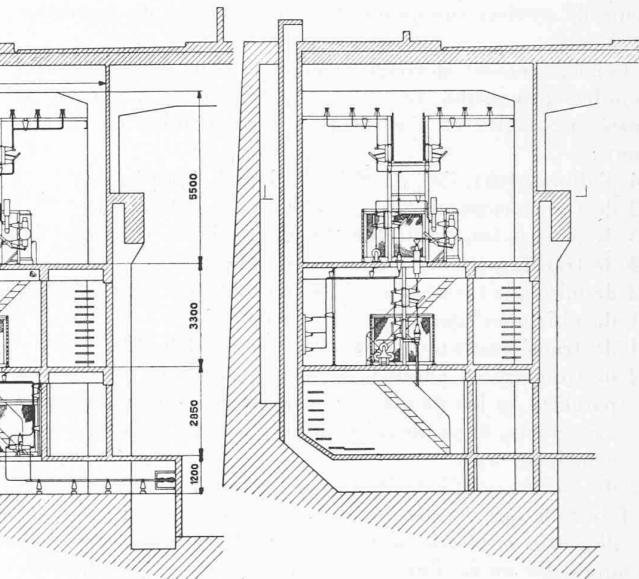


Fig. 57. — Coupe en travers d'un circuit 18 000 V d'alternateur.

Fig. 58. — Coupe en travers d'un circuit 18 000 V de ligne.

tion, qui sont contigus à la salle des machines et à la salle de commande, et où tout incendie d'huile aurait des conséquences très graves.

Les transformateurs de tension sont du type à colonnes horizontales et enroulements H. T. fixés sur isolateurs en porcelaine, protégés par des fusibles à haut pouvoir de coupe Gardy. Les transformateurs d'intensité sont du type traversée résistant aux mêmes intensités de court-circuit que les barres.

Les cellules H. T. sont séparées des couloirs par des grilles. Des dispositions sont prises pour permettre l'introduction de cloisons isolantes pour séparer l'appareillage d'une cellule en révision des parties voisines sous tension.

Les équipements de la station 18 000 V ont été installés à l'amont de la salle des machines, où l'on dispose d'un vide de 81 m de longueur, 11,40 m de hauteur et 7 m de profondeur, divisé en trois étages.

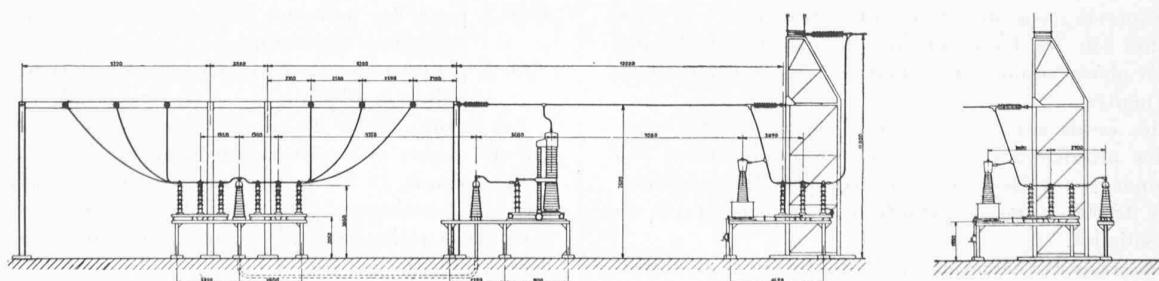


Fig. 60. — Coupe en travers de la station 125 000 V.

Le premier étage, placé au niveau de la passerelle de commande des groupes, renferme : un couloir de service en relation avec cette passerelle ; une galerie des câbles de puissance ; les cellules d'arrivée des câbles de lignes et de transformateurs ; les cellules d'arrivée des connexions 18 000 V en barres des alternateurs.

Le deuxième étage est placé au niveau de la salle de répartition des câbles de commande et contient une galerie des câbles de commande, mesure, signalisation du poste 18 000 V, aboutissant dans la salle de répartition ; les cellules des extrémités de câbles et des connexions 18 000 V d'alternateurs ; les transformateurs de mesure ; les barres collectrices auxiliaires et d'essais et leur appareillage.

Le troisième étage est placé au niveau de la salle de commande et renferme tous les disjoncteurs des circuits 18 kV avec leurs panneaux de commande ; les transformateurs de mesure ; les sectionneurs de circuits ; le double jeu de barres collectrices principales 18 000 V en boucle et ses sectionneurs.

Un couloir de visite transversal de 0,90 m de largeur est prévu tous les deux circuits et un couloir transversal de 2 m de largeur est prévu sous chacun des sectionneurs de la boucle 18 000 V.

Les trois étages sont reliés entre eux par des escaliers répartis sur toute la longueur du poste.

Les charpentes métalliques supportant l'appareillage ne contribuent pas à la résistance des planchers. Les rayonnages des galeries de câbles sont établis en planche d'éternit pour les câbles de mesure, commande, signalisation ; ils sont construits en fer, à claire voie (échelles) pour les câbles de transport d'énergie .

B. Station extérieure de transformation 18 — 125 — 150 kV et de raccordement aux réseaux haute tension.

La station extérieure 18 — 125 — 150 kV de l'usine de Verbois est destinée à assurer la liaison de l'usine et en particulier de son poste de distribution à 18 000 V avec les réseaux à haute tension suisses à 125 000 V et français à 150 000 V, dans le but d'assurer la livraison des excédents d'énergie de Verbois, la réception d'énergie de secours et le transit d'énergie entre la Suisse et la France.

La capacité de transformation du poste a été fixée à 50 000 kVA à réaliser dans tous les sens, étant entendu que les écarts de tension sont :

de 17 000 à 19 000 V sur les barres 18 000 V de Verbois
111 000 à 140 000 V à l'arrivée des lignes 125 kV
140 000 à 160 000 V à l'arrivée de la ligne 150 kV.

Le schéma général est rappelé au schéma synoptique et la construction ressort des vues en coupe ci-contre.

La partie 125 000 V de la station comprend deux jeux de barres, sectionnés chacun en leur milieu par un sectionneur

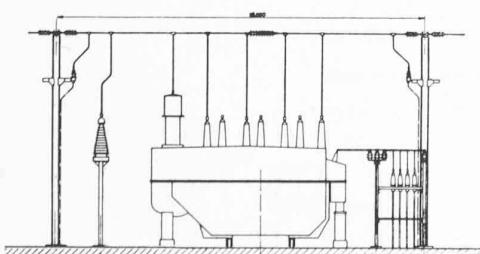


Fig. 62. — Installation du transformateur dans la station extérieure.

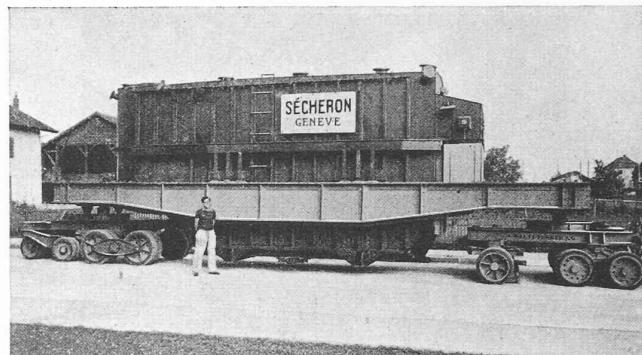


Fig. 61. — Transport sur route du transformateur 25 000 kVA.

tripolaire avec couteaux de mise à terre de chaque côté. Les circuits des lignes 125 kV, au nombre de trois, dont un de réserve, sont équipés chacun pour une puissance de 50 000 kVA. Les circuits de transformateurs, au nombre de deux, sont équipés pour 25 000 kVA. Il doit être possible, au moyen d'une seule ligne, d'alimenter les deux transformateurs (fig. 60).

Un sixième circuit pourra ultérieurement être utilisé pour une extension en transformateurs ou pour créer un circuit de disjoncteurs de couplage entre les deux jeux de barres.

Chaque circuit 125 kV est équipé de deux sectionneurs de branchement aux barres ; d'un groupe de disjoncteurs type 130 kV convecteur 1 800 000 kVA de puissance de coupure, à commande électrique, renfermant dans leurs bases les transformateurs d'intensité au rapport 200/5 A et 100/5 A ; d'un sectionneur de départ à commande mécanique, ceux des circuits de lignes étant munis de couteaux de mise à la terre ; d'un groupe de trois transformateurs de tension monophasés $\frac{122 000}{\sqrt{3}} \frac{110}{\sqrt{3}}$ montés en étoile/étoile, neutres à la terre.

Cet appareillage est monté sur châssis en fers profilés simples d'environ 2 m de hauteur au-dessus du sol, pour permettre la visite en service de tous les isolateurs et mécanismes.

Le matériel nécessaire à la construction de la station 125 kV de Verbois, soit appareillage H. T., châssis, charpentes, provient de la station de Chèvres.

Les deux transformateurs à trois enroulements 18/125/150 kV, construction Sécheron, ont une puissance de 25 000 kVA chacun, disponible sur chaque enroulement ; ils sont du type à bain d'huile à refroidissement de l'huile dans des réfrigérants à eau adossés à la cuve (fig. 61).

Ils sont munis d'un réglage à gradins sous charge sur l'enroulement 18 kV et sur l'enroulement 125 kV. Les enroulements sont connectés en étoile côté 125 et 150 kV et en triangle côté 18 kV. Leur poids en ordre de marche est de 160 t dont 57 t d'huile (fig. 63).

La liaison électrique de ces transformateurs à la station 18 000 V intérieure de l'usine se fait pour chacun d'eux au moyen de 4 câbles $3 \times 150 \text{ mm}^2$ aboutissant à la station extérieure sur sectionneurs à commande mécanique disposés à proximité immédiate des bornes des transformateurs.

La liaison des transformateurs à la station 125 000 V se fait par câbles souterrains à huile et connexions aériennes transversales. La borne neutre de l'enroulement 125 kV est reliée en permanence à la terre (fig. 62).

La liaison des transformateurs à la station 150 000 V se fait par connexions aériennes. La borne neutre de l'enroulement 150 kV est reliée en permanence à la terre.

La partie 150 000 V de la station comporte un seul jeu

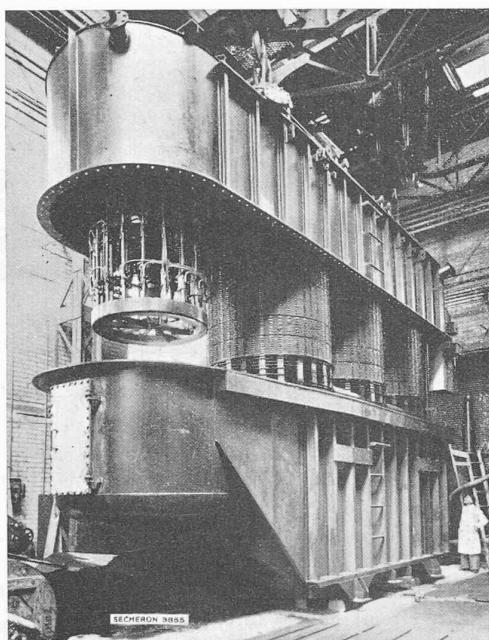


Fig. 63. — Transformateur 25 000 kVA sorti de sa cuve.

de barres. Chacun des deux circuits 150 kV de transformateur, prévu pour une puissance de 25 000 kVA est équipé d'un groupe de 3 disjoncteurs unipolaires à grand pouvoir de coupure du type Brown Boveri à air comprimé, à commande électro-pneumatique de la salle de commande et de la station même (fig. 64) ; de 2 sectionneurs tripolaires à commande mécanique avec contacts de signalisation, sectionneurs disposés de chaque côté du disjoncteur ; de 3 transformateurs d'intensité au rapport 200-100/5 placés sur les bases des pôles des disjoncteurs ; de 3 transformateurs de tension monophasés $\frac{150\ 000}{\sqrt{3}} \frac{110}{\sqrt{3}}$ montés en étoile/étoile, neutres à la terre.

Il est prévu dans les barres 150 000 V un sectionneur avec couteaux de mise à terre de chaque côté.

Il y a provisoirement une seule ligne 150 000 V, mais la place est réservée pour une seconde ligne¹.

L'équipement de ligne comporte 3 transformateurs de tension monophasés au rapport $\frac{150\,000}{\sqrt{3}} \frac{110}{\sqrt{3}}$ V montés en étoile, neutres à la terre; 3 transformateurs d'intensité au rap-

¹ Tant qu'une seule ligne sera utilisée, il n'y aura pas de disjoncteur sur le circuit correspondant ; la protection de la ligne étant provisoirement assurée par des disjoncteurs, au point d'arrivée en France et par les disjoncteurs 150 kV de transformateurs de Verbois.

La disposition choisie à Verbois pour ce départ 150 kV permet l'installation ultérieure d'un disjoncteur.

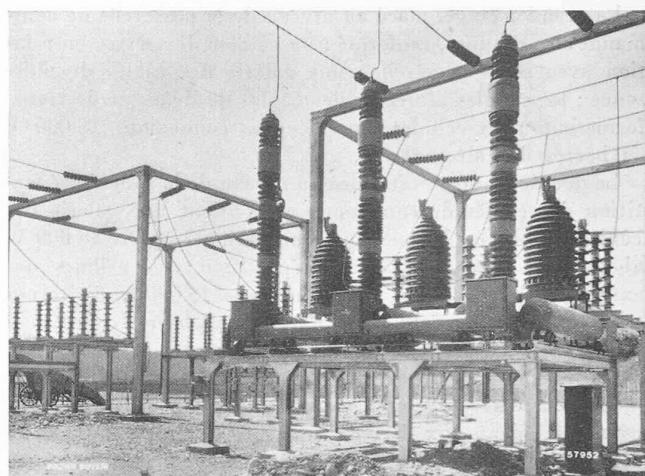


Fig. 64. — Disjoncteur 150 000 V à air comprimé en place dans la station extérieure.

port 200-100/5 A ; un sectionneur entre les barres et le groupe de transformateurs de mesure ; 1 sectionneur avec couteaux de mise à terre entre le groupe de mesure et la ligne aérienne 150 000 V.

Les disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs de mesure, sont montés sur des châssis, selon disposition de la station 125 kV. Les charpentes de la station 150 kV sont en fers profilés simples sans construction en treillis.

Un condensateur de liaison pour téléphonie HF avec la France et un circuit bouchon sont connectés sur la ligne 150 kV. Des appareils analogues sont installés sur l'une des lignes 125 kV pour assurer une télémétrie avec le réseau suisse (fig. 65).

Pour les deux parties 125 et 150 kV de la station transformatrice, les isolateurs sont du type Motor pour les sectionneurs et du type Langenthal pour les chaînes d'isolateurs. Ces dernières sont d'un modèle 9000 kg à la rupture pour les barres collectrices et d'un modèle 5000 kg pour les connexions.

Toutes les parties de porcelaine ou de grès des appareils haute tension sont de couleur brune.

Les tensions d'amorçage sous pluie pour l'appareillage sont :

côté 111-140 kV : 320 kV comme le matériel existant à Chèvres.

Les cuves des transformateurs 25 MVA, les charpentes métalliques et châssis-supports sont mis à la terre par conducteurs de cuivre reliés à un réseau très étendu de feuillard de cuivre nu, posé dans le sol. La résistance du réseau est inférieure à 4 ohm.

Les points neutres des transformateurs de tension et les

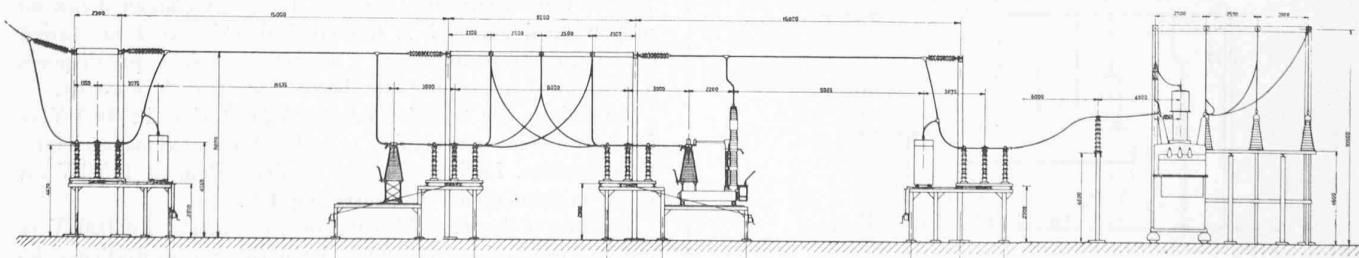


Fig. 65. — Coupe en travers de la station 150 000 V.

commandes mécaniques des sectionneurs sont reliés aux lignes de terre des châssis qui les supportent.

Les sectionneurs de mise à terre qui sont montés sur isolateurs, ainsi que les points neutres 125 et 150 kV des transformateurs 25 MVA sont reliés à des électrodes indépendantes, au moyen de câbles isolés essayés à 15 kV.

Ces électrodes de terre sont constituées par des rails de chemin de fer soudés entre eux et placés dans des puits de 3,50 m de profondeur à l'intérieur desquels ils sont enterrés dans de la glaise ; elles sont reliées au réseau général de terre des charpentes.

Une barre de cuivre longeant la galerie des câbles relie le réseau de terre de la station extérieure au réseau de terre de l'usine (station 18 kV, alternateurs et salle de commande), de telle sorte qu'il ne puisse se produire de différence de potentiel dangereuse entre deux parties des câblages reliant ces diverses installations entre elles.

Tous les câbles de mesure, signalisation et commande, sont du type isolé au papier imprégné, sous plomb et jute asphaltés ; ils sont placés dans des demi-tuyaux d'éternit directement dans le sol et aboutissent dans la galerie de câbles qui les conduit jusqu'à la salle de commande. Les câbles 18 000 V reliant les transformateurs à la station de distribution de l'usine, empruntent aussi cette galerie qui renferme également les tuyauteries d'eau de refroidissement des transformateurs et leurs vannes ainsi qu'un poste de téléphone interne.

Les châssis et charpentes sont encastrés dans des socles en béton. Les transformateurs reposent sur des socles en béton par l'intermédiaire de rails disposés au niveau du sol ; ils sont transportés tout montés par voie ferrée sur radier en béton, entre le local de décuvage annexé à l'usine et la station extérieure. Le transport se fait au moyen d'un chariot électrique de hâlage à vis.

C. Salle des tableaux de commande, salle de répartition des câbles, tableaux de services auxiliaires et tableaux de groupes.

La salle de commande de l'usine de Verbois est conçue dans le but de réaliser la *centralisation* la plus complète possible de l'exploitation de toutes les parties de l'usine-barrage, soit des vannes du barrage, des groupes hydro-électriques, de la station de distribution et couplage 18 000 V, des services auxiliaires, du groupe de secours, de la résistance hydraulique d'essais, de la station de pompage d'eau de réfrigération, de la station extérieure 125 000-150 000 V ; les manœuvres de mise en marche des turbines et la commande des sectionneurs de la station 125-150 kV étant seules exceptées de cette centralisation.

La *situation* de la salle de commande dans l'usine a été choisie de façon à réaliser :

1. Une vue directe de cette salle sur les installations où se trouvent des équipements non manœuvrables à distance, condition réalisée en situant la salle de commande à l'extrême rive droite de la salle des machines, au deuxième étage, d'où l'on domine les groupes hydro-électriques et leurs tableaux de mise en marche et d'où l'on a, par les fenêtres en façade, une vue sur la station extérieure.

2. Un accès rapide aux installations où des interventions fréquentes sont nécessaires, condition réalisée du fait que le couloir principal de manœuvre du poste 18 kV se trouve sur le même palier que la salle de commande et du fait que celle-ci est placée entre l'escalier principal avec ascenseur pour l'accès à la salle des machines et l'escalier de service pour la liaison aux locaux d'exploitation, aux grilles, au barrage et à la station de pompage par la route sur toiture, enfin à la station extérieure.

3. Un accès rapide à la salle de commande par le chef d'usine, obtenu en plaçant le bureau de ce dernier en façade à côté de cette salle.

4. La réduction au minimum de la longueur des câblages et filerie, réalisée en réservant, sous toute la surface de la salle de commande une grande salle de répartition des câbles, où se distribuent les câbles des services auxiliaires et où se groupent, sur des châssis répartiteurs les câblages de commande, mesure et signalisation ainsi que tous les relais auxiliaires du tableau lumineux.

La *répartition des équipements* dans la salle de commande et la salle des câbles est faite comme suit (fig. 66) :

1. Les appareils servant à la commande des groupes hydro-électriques et des stations haute tension, soit les appareils de commande proprement dite, de réglage, de mesure directe, de signalisation de position et d'état, de communication, d'alarme.

2. Les appareils servant au contrôle d'exploitation, soit les appareils de protection, d'enregistrement des caractéristiques de marche, de comptage de l'énergie.

3. Les appareils de commande, de contrôle et de distribution du courant électrique aux services auxiliaires.

4. Les appareils de commande et de contrôle du barrage, ceux de contrôle des biefs amont et aval du Rhône.

Les tableaux sont disposés de façon à délimiter un espace rectangulaire de 22 m sur 9,70 m formant la partie active de la salle de commande, qui prend jour d'une part sur la façade, d'autre part dans la salle des machines, enfin sur la toiture au moyen de dalles de verre. Côté intérieur de ce rectangle sont disposées les places des surveillants avec les téléphones et tous les tableaux et pupitres fréquemment contrôlés tandis que les tableaux contrôlés périodiquement sont disposés dans un second rang et tournés vers l'extérieur de la salle.

De l'escalier principal, l'entrée dans la salle de commande se fait par une porte ménagée au milieu d'un grand côté de la partie active du local.

La partie active de la salle de commande est séparée de la toiture par un plafond en verre opale diffusant la lumière du jour provenant des dalles de verre de la toiture, éclairage qui est complété par des sources lumineuses artificielles disposées entre la verrière et la toiture.

Les tableaux délimitant cette partie de la salle sont surmontés de parois légères jusqu'au niveau d'une corniche en plâtre formant raccord avec la verrière. Les châssis des tableaux supportent seulement les parois verticales légères, tandis que la verrière et la corniche sont entièrement suspendues aux poutres de la toiture par des dispositifs amortisseurs de vibrations et sans contact avec les tableaux. En effet, une route passe sur la dalle supérieure et toutes les dispositions doivent être prises pour éviter la transmission de vibrations de la toiture à la verrière et aux tableaux. Il faut aussi éviter la transmission aux appareils des vibrations apportées par l'ossature du bâtiment et les planchers (vibrations dues aux machines, aux transformateurs, au passage de l'eau dans les grilles, bâches et turbines). Les tableaux reposent donc sur les planchers par l'intermédiaire de plaques de liège.

L'appareillage nécessaire à la commande, à la mesure en lecture directe, à la signalisation de position et d'état de tension, au réglage de l'usine et des stations haute tension, c'est-à-dire tous les dispositifs qui nécessitent un contrôle permanent, sont rassemblés sur un grand *tableau synoptique avec pupitre de commande*.

Le tableau synoptique porte un schéma lumineux renfermant tous les appareils représentatifs de l'état de branchement, de charge de la haute tension et de position des vannes de turbines et gradins de transformateurs. Le pupitre

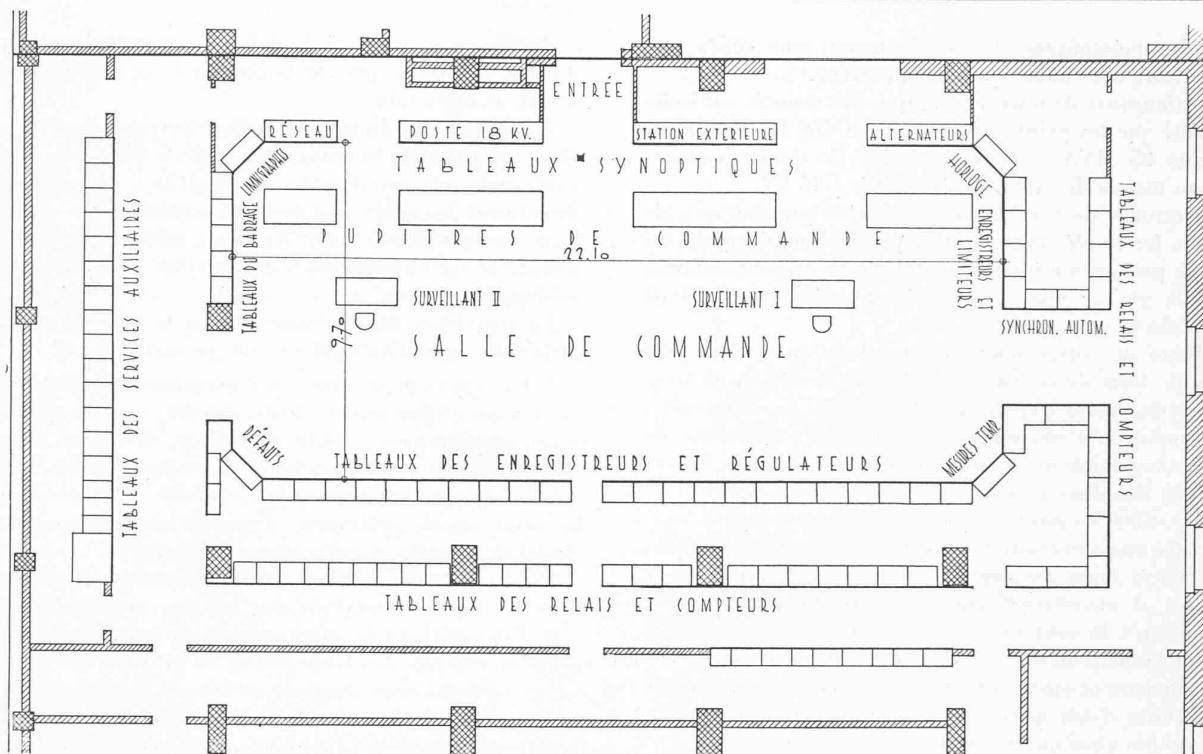


Fig. 66. — Plan de la salle de commande.

porte un schéma non lumineux renfermant tous les appareils de commande et réglage de l'usine et des stations, sauf la mise en marche des turbines et sauf la commande des sectionneurs de la station extérieure, qui se fait sur place.

Contrairement à l'habitude qui prévoit l'exécution de tels tableaux sous forme ramassée, ce qui conduit dans le cas d'installations complexes à des schémas peu clairs, le tableau synoptique de Verbois a une disposition disséquée en ses éléments principaux, correspondant chacun à une des grandes installations qui composent l'ensemble de l'équipement électrique de l'usine :

Salle des machines
Station 125-150 kV
Station 18 kV
Réseaux raccordés.

L'élément « Salle des machines » est séparé du suivant « Station 125-150 kV » par une large baie donnant vue sur la salle des machines. De la sorte, il est possible d'avoir vue sur les groupes hydro-électriques, leurs tableaux et régulateurs, où se font les mises en marche, pendant la préparation de manœuvres au pupitre du tableau synoptique correspondant. De même la vue existe sur la station extérieure par une fenêtre en façade, sans nécessiter de grands déplacements de l'homme exécutant une manœuvre au pupitre « Station extérieure » (fig. 67).

La porte d'entrée principale sépare les éléments « Station 125-150 kV » et « Station 18 kV ». Ce dernier élément et son

pupitre de commande sont de la sorte à côté de l'accès le plus direct au couloir de manœuvre des appareils haute tension de la station 18 kV.

Les pupitres sont placés en avant des tableaux synoptiques correspondants.

Chacun des quatre éléments du tableau synoptique comporte, chaque fois reproduit, le schéma des barres 18 000 V considéré pour chacun des éléments comme le centre de répartition des circuits haute tension qui le composent (fig. 68).

Les quatre éléments peuvent être allumés séparément.

Les dispositifs adoptés pour le réglage de l'usine comprennent :

Un réglage de tension des alternateurs.

Un réglage de puissance-fréquence-stabilisation de l'usine : (dans l'avenir).

Un réglage de facteur de puissance-tension des transformateurs.

Le *réglage de tension* des alternateurs se fait en fonction de la puissance absorbée par le réseau 18 000 V, de Genève, avec compoundage en fonction de la charge du transport Verbois-Genève. Le réglage peut se faire aussi par mesure de la tension en un point central du réseau au moyen de câbles pilotes.

Un rhéostat permet d'ajuster le point de réglage entre + 5 % et - 5 % en modifiant la tension d'équilibre d'un régulateur à 4 secteurs, dont chacun est en série avec le rhéostat d'ajustage de l'un des alternateurs.

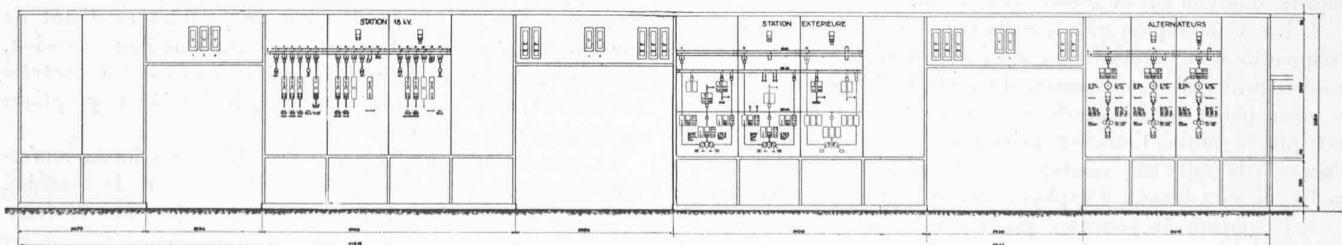


Fig. 67. — Vue en élévation du tableau synoptique.

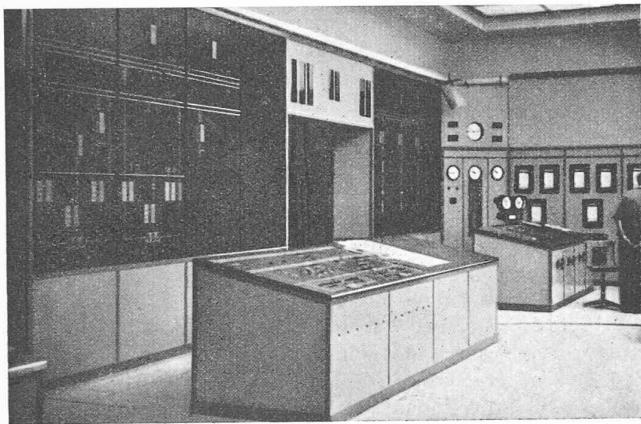


Fig. 68. — Vue partielle de la salle de commande.

Le réglage est assuré par des régulateurs rapides, de grande puissance type BBC, compensé, corrigeant l'excitation en fonction du réactif fourni par chaque alternateur (fig. 69).

Pendant les années sèches, les réseaux 125 et 150 kV pourront avoir à participer à l'alimentation du réseau de Genève. En cas de déclenchement brusque de ces sources, le réglage des alternateurs de Verbois sera tel que ces machines assurent automatiquement la fourniture totale ; la capacité en eau du bief amont permettant d'absorber momentanément l'eau nécessaire.

La possibilité d'appliquer un *réglage puissance-fréquence et stabilisation* est réservée sur les régulateurs, en vue d'assurer ultérieurement la répartition automatique des fournitures entre Verbois, les centrales de la Suisse romande et les centrales françaises.

Le *réglage facteur de puissance-tension* des échanges entre les réseaux 125-150 kV et 18 kV se fait sur les transformateurs de 25 000 kVA, à 3 enroulements, de la station extérieure, par gradins montés sur les côtés 18 kV et 125 kV, commandés par boutons-pousoirs ou automatiquement par des régulateurs Simplex-Sécheron.

L'étendue de réglage côté 18 kV, entre marche à vide des transformateurs et marche à pleine charge, est comprise dans les limites de 17 000 à 19 000 V. Côté 125 kV, l'étendue de réglage est de 110 900 à 139 400 V. Côté 150 kV, l'étendue de réglage est de 140 000 V à 160 000 V pour 25 000 kVA à $\cos. \varphi = 0,85$.

Les régulateurs de tension des alternateurs sont disposés dans la salle des câbles au-dessous des tableaux d'alternateurs de la salle de commande. Les commandes à distance de ces régulateurs sont placées sur les pupitres, avec tous les commutateurs du réglage, du limiteur d'ouverture des turbines, les transmetteurs d'ordres, etc.

Les volants du réglage du facteur de puissance sont placés sur les faces avant des pupitres. Les boutons-pousoirs de commande des gradins et les commutateurs « main-automatique » sont placés sur le pupitre.

L'appareillage de *synchronisation* permet de réaliser la mise en parallèle à la main, semi-automatique, complètement automatique, de chacun des alternateurs avec tous les transformateurs 25 MVA, départs 18 kV, couplages 18 kV, circuits 125 et 150 kV de transformateurs et de lignes ; il comprend :

Un dispositif de synchronisation rapide du type BBC comportant :

Un déphaseur et un synchroniseur agissant sur les régulateurs des turbines. Les commutateurs de synchronisation sont montés dans les schémas du pupitre, près des commutateurs de commande des disjoncteurs.

En plus de ce matériel de mise en phase automatique, l'installation comporte des synchronoscopes et fréquencemètres, voltmètres de mise en phase disposés au-dessus des appareils de contrôle du temps.

La commande des commutateurs de synchronisation se fait au moyen d'une clef unique libérable seulement en position ouverte des contacteurs afin que deux contacteurs ne puissent être enclenchés simultanément. De plus l'enclenchement des contacteurs de synchronisation est signalé par l'allumage des voltmètres de mise en phase lumineux.

Le contrôle du temps se fait en divers points de l'usine par *horloges secondaires* électriques commandées par une *horloge-mère* à balancier battant la seconde. Des contacts assurent également la marche des instruments de contrôle de fréquence, ainsi que la marche des enregistreurs et des instruments totalisateurs.

Les instruments de contrôle de fréquence comportent deux cadrans placés de chaque côté de l'*horloge-mère* ; l'un indique l'heure synchrone de l'usine et l'autre indique, en secondes, l'écart positif ou négatif entre l'heure synchrone et l'heure normale. L'instrument donnant l'écart est muni d'un dispositif permettant d'actionner un signal lorsque l'écart de fréquence dépasse une certaine limite. Ce même dispositif pourra être utilisé pour actionner plus tard un réglage automatique de fréquence.

Les parties du tableau synoptique situées au-dessus des baies de ce tableau portent des instruments généraux.

Les *instruments de mesure* des circuits sont insérés dans le schéma synoptique. Ces instruments sont du type à cadran lumineux à colonne d'ombre, rectangulaire, avec échelle verticale.

Les ampèremètres sont à 3 échelles pour les alternateurs, les transformateurs et les lignes 125 et 150 kV, et à 2 échelles pour les lignes 18 kV.

Les voltmètres sont combinés avec les fréquencemètres et commandés par commutateurs de voltmètres placés sur les pupitres.

Les circuits des alternateurs et transformateurs comportent des wattmètres et des phasemètres à lecture directe avec indication de $\cos. \varphi$ avant et arrière.

La disposition des *appareils représentatifs* dans les schémas reproduit la position relative des appareils haute tension dans les circuits, ainsi que la position des circuits les uns par rapport aux autres.

Cette représentation est réalisée sur le tableau synoptique

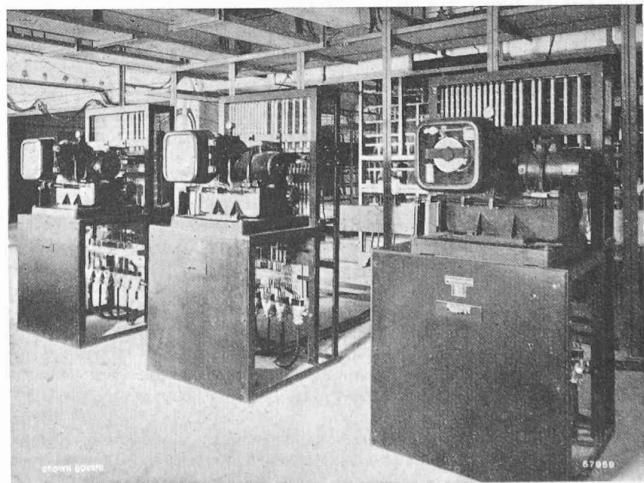


Fig. 69. — Régulateurs automatiques des alternateurs.

comme suit : barres et connexions par des bandes lumineuses, allumé couleur (hors tension), vacillant (préliminaire), allumé blanc (sous tension) ; objets importants (alternateurs, turbines, transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs) par des signes lumineux.

Les objets dont la position ou l'état sont à signaler sont représentés : pour les sectionneurs principaux, sectionneurs de terre et disjoncteurs : par des images lumineuses de couleur fixe (déclenché), vacillante (manque de concordance ou préparation), blanc (enclenché) ; pour les gradins des transformateurs, par chiffres lumineux ; pour l'ouverture du distributeur et de la roue des turbines, pour le limiteur d'ouverture des régulateurs : par instruments lumineux à colonne d'ombre commandés par des émetteurs disposés sur les transformateurs et machines. Les disjoncteurs commutateurs d'excitation sont aussi signalisés.

Une signalisation du fonctionnement des relais de protection divers, du dispositif d'extinction d'incendie et des défauts de circulation d'huile ou d'eau, ainsi que la signalisation de position des régulateurs et des transmetteurs d'ordres, est faite par apparition de textes lumineux sur les panneaux du tableau synoptique en même temps que fonctionne un signal acoustique.

La représentation est faite *sur le pupitre de commande* de façon simplifiée par un schéma peint dans lequel sont insérés : les commutateurs de commande à distance des soupapes électro-pneumatiques des sectionneurs et disjoncteurs 18 000 V, des soupapes des disjoncteurs 150 000 V, des moteurs des commandes à ressort des disjoncteurs 125 000 V, les boutons-poussoirs des gradins ; les commutateurs de voltmètres ; les commutateurs de synchronisation avec clef unique ; les boutons-poussoirs de commande à distance de la résistance hydraulique, les boutons-poussoirs et commutateurs de commande de l'excitation du réglage des alternateurs et des turbines, de l'arrêt rapide, de l'extinction d'incendie, de la mise en phase ; les transmetteurs d'ordres, avec leurs commutateurs d'appel. En un mot tous les accessoires de commande et de réglage, de synchronisation des objets représentés au tableau synoptique.

Pour les sectionneurs de la station extérieure, le commutateur du pupitre n'actionne pas de commande, mais simplement des lampes d'ordres disposées à la station extérieure¹.

Tous les dispositifs qui ne nécessitent qu'un contrôle périodique, sont rassemblés sur divers tableaux disposés de chaque côté du tableau synoptique ainsi que sur les tableaux formant la paroi opposée à la porte d'entrée.

Ces tableaux comprennent une série de panneaux « avant » portant les instruments enregistreurs, une série de panneaux « arrière » portant les relais et les compteurs ; une série de panneaux libres pour extensions ultérieures ; quatre panneaux obliques, placés dans les angles de la salle de commande et

¹ Les courants à disposition pour l'alimentation des tableaux synoptiques, pupitres et tableaux de groupes sont : courant continu 110 V à mise de courant pour les commandes électriques et électro-pneumatiques de déclenchement et enclenchement de disjoncteurs, mouvement des enregistreurs, alarme ; courant alternatif 220 V pour les indicateurs d'ouverture de la turbine ; courant alternatif 36 V à rupture de courant pour les transmetteurs d'ordre, signalisation des groupes hydro-électriques et des transformateurs ; 24 V alternatif pour les lampes du tableau lumineux ; 6 V alternatif pour les lampes des instruments à colonne d'ombre ; chacun des éléments de ces tableaux comporte une alimentation particulière en 220 V, 110 V et 36 V pouvant être mise séparément en et hors service.

Toute l'alimentation des circuits de commande, signalisation, réglage, alarme de la salle de commande, des stations haute tension et des tableaux de groupes de la salle des machines, se fait dans les répartiteurs de la salle des câbles.

portant les appareils d'alarme et mesure des températures, les appareils de contrôle de l'heure et de la fréquence, les limnigraphes, les enregistreurs de perturbations.

La protection générale par relais se fait :

Pour les alternateurs :

1. Contre les courts-circuits extérieurs, à l'aide de trois relais à maximum d'intensité alimentés par des transformateurs d'intensité insérés au point neutre de l'alternateur ; ces relais provoquent le déclenchement du disjoncteur 18 kV, la désexcitation de l'alternateur.

2. Contre les courts-circuits entre phases et les courts-circuits entre spires, à l'aide d'une protection différentielle réalisée par comparaison des courants de deux demi-enroulements du stator de l'alternateur, les deux courants passant en sens contraire dans un transformateur d'intensité à 2 barres primaires. Cette protection fonctionne pour des défauts graves et provoque le déclenchement du disjoncteur et la désexcitation de l'alternateur. Elle est complétée par une protection utilisant le fait qu'un défaut entraîne un déplacement des neutres des deux enroulements en parallèle ; protection supplémentaire réalisée par un transformateur d'intensité réunissant les deux neutres et alimentant un relais qui fait aussi déclencher le disjoncteur 18 000 V et le disjoncteur d'excitation.

3. Contre les terres à l'intérieur de la machine, à l'aide d'un relais directionnel alimenté par un transformateur d'intensité en couplage spécial et par un transformateur de mise à la terre. Cette protection ne doit pas provoquer le déclenchement du disjoncteur, l'alternateur pouvant fonctionner momentanément avec une terre sur une phase, mais alarmer en vue d'une mise hors service de la machine avant toute aggravation du défaut ou création d'une seconde terre, d'où court-circuit.

4. Contre les surcharges, faibles mais de longue durée, à l'aide de relais thermiques. Ceux-ci ne fonctionnent pas pour de courtes surcharges non dangereuses ; ils provoquent le déclenchement du disjoncteur 18 kV et la désexcitation.

5. Contre l'emballement, ou contre des élévations exagérées de tension, réalisée par un relais à maximum de tension provoquant le déclenchement du disjoncteur, la désexcitation et la fermeture de la turbine sur marche à vide.

6. Contre les mises à terre du rotor, au moyen d'un dispositif de contrôle à courant alternatif signalant le défaut avant création d'une seconde terre. Cette protection ne provoque pas de déclenchement du disjoncteur.

7. Contre tous défauts permanents, au cas où les autres dispositifs n'auraient pas agi, réalisée par un limiteur d'intensité abaissant l'excitation de l'alternateur ; protection agissant avec un certain retard, donc seulement si le défaut est permanent ; cela pour permettre au moment de la perturbation, un renforcement de l'excitation pour le maintien de la marche en parallèle.

8. Contre les arrêts de circulation d'huile ou d'eau ou les échauffements locaux, réalisée par signalisations, sondes de mesures de températures.

9. Contre l'incendie, par un dispositif d'extinction d'incendie à injection de CO₂, système Siebenmann à fonctionnement automatique mais pouvant être commandé électriquement, soit du tableau de la machine, soit du pupitre de la salle de commande ; et mécaniquement au moyen d'un levier placé sur la passerelle de la salle des machines. Le fonctionnement de ce dispositif provoque l'alarme à 80° C puis à 100° C, l'ouverture du disjoncteur 18 kV de l'alternateur et la fermeture rapide de la turbine.

Pour les transformateurs de la station extérieure :

1. Contre les courts-circuits extérieurs, à l'aide de trois jeux de relais à maximum, placés sur les trois côtés 18 — 125 — 150 kV du transformateur, et agissant chacun sur le disjoncteur du circuit où se trouve le relais.

2. Contre les courts-circuits internes entre phases ou entre spires, au moyen de relais différentiels alimentés par les transformateurs d'insensité disposés sur les trois côtés du transformateur ; relais agissant par comparaison des courants et provoquant le déclenchement des trois disjoncteurs.

3. Contre les terres, côté 18 kV, provoquant uniquement une alarme et signalisation.

4. Contre les surcharges durables, par trois relais thermiques placés sur les trois côtés 18 — 125 — 150 kV et provoquant chacun le déclenchement du disjoncteur correspondant.

5. Contre les défauts internes en préparation, à l'aide de relais Buchholz placés sur les cuves principales et sur les cuves des insérateurs à gradins 18 kV et 125 kV et agissant en premier lieu sur l'alarme et la signalisation, en second lieu sur les disjoncteurs des trois tensions.

6. Contre les arrêts de circulation d'huile et d'eau et échauffements, réalisée par signalisations, installation de mesure de température.

Pour les transformateurs des services auxiliaires, les transformateurs de point neutre, le transformateur d'essais, par des relais à maximum directement insérés dans la haute tension et agissant sur le disjoncteur 18 kV.

Pour la résistance hydraulique, par des relais à maximum et un relais thermique agissant sur le disjoncteur 18 kV.

Pour les lignes 18 000 V Verbois-Genève :

1. Contre les courts-circuits sur les câbles, à l'aide d'une protection sélective par relais de distance rapides, disposés à l'usine de Verbois et à l'usine thermique, point d'arrivée des lignes à Genève, provoquant le déclenchement du disjoncteur et donnant une indication de distance.

2. Contre les surcharges durables, par des relais thermiques (un par départ), provoquant le déclenchement du disjoncteur.

3. Contre les terres, à l'aide de relais directionnels de terre actionnant des relais de signalisation, mais ne provoquant pas le déclenchement du disjoncteur. La comparaison des indications des relais de terre de Verbois avec ceux de l'usine thermique donne le départ défectueux. Les terres passagères se produisant sur les lignes, le réseau ou les barres de distribution, sont étouffées par des bobines d'extinction branchées sur des transformateurs de point neutre. Ces terres passagères sont signalées sur un ampèremètre enregistreur.

Pour les lignes 125 kV, contre les courts-circuits, par des relais de distance rapides. Ces relais provoquent le déclenchement des disjoncteurs de ligne.

Pour la ligne 150 kV, également par des relais de distance rapides. Comme il n'y a provisoirement pas de disjoncteur sur cette ligne, les relais de distance provoquent le déclenchement des disjoncteurs côté 150 kV des transformateurs 25 MVA pour isoler l'installation de la ligne 150 kV défective et permettre de maintenir le service des transformateurs entre Verbois et le réseau 125 kV.¹

¹ Pour le cas où des déclenchements trop fréquents se produiraient côté 150 kV des transformateurs, du fait par exemple de défauts passagers de la ligne, la possibilité a été réservée d'ajouter aux disjoncteurs à air comprimé des transformateurs les dispositifs permettant de réaliser le déclenchement et le réenclenchement rapide par phase avant décrochage des réseaux.

Tous les relais, y compris les relais Buchholz, agissent sur des barres de déclenchement en courant continu 110 V pour que le fonctionnement de la protection soit indépendant d'un manque de courant sur les services auxiliaires.

Pour donner toute sécurité de déclenchement, le manque éventuel de courant continu (rupture de fils, fusion de coupe-circuits) est signalé par une alarme.

Tous ces dispositifs de protection sont, d'une façon générale, disposés sur les panneaux des tableaux « arrière » de la salle de commande, étant donné qu'ils ne nécessitent pas un contrôle permanent.

Les installations de comptage de l'énergie comportent :

1. Pour chaque alternateur, un compteur d'énergie active, un compteur d'énergie réactive, un compteur d'énergie capacitive et, pour l'ensemble, un compteur totalisateur d'énergie active avec émetteurs actionnant une télémesure vers Genève.

2. Pour chaque transformateur à trois enroulements 18 — 125 — 150 kV : deux compteurs d'énergie livraison et réception, un compteur enregistreur de la puissance maximum livrée par l'usine, deux compteurs de pertes livraison et réception, deux compteurs totalisateurs de statistique livraison et réception, un relais de sens d'énergie. Côté 125 kV, deux compteurs d'énergie livraison et réception, un compteur enregistreur de la puissance maximum reçue, deux compteurs de pertes, un relais de sens d'énergie. Côté 150 kV, deux compteurs d'énergie livraison et réception, deux compteurs de pertes, un relais de sens d'énergie.

Cette installation de comptage enregistre séparément l'énergie fournie par chaque contractant, selon sa destination.

L'enregistrement des principales caractéristiques de fonctionnement étant le meilleur contrôle de l'exploitation de l'usine, de la charge des machines, transformateurs, lignes, des perturbations, défauts de toute nature, du fonctionnement des dispositifs de réglage et de protection, on a placé des enregistreurs sur toutes les sources d'énergie et sur tous les départs haute tension.

D'une façon générale on enregistre : la puissance, les VA réactifs, la tension et la fréquence.

La mesure des températures, l'alarme et la signalisation des échauffements dangereux et de l'arrêt des circulations d'eau et d'huile sont appliquées comme suit :

Sur les groupes hydro-électriques : le contrôle des températures se fait au joint plan de la turbine, aux trois paliers-guides, au pivot supérieur, dans trois points de l'enroulement de l'alternateur, en trois points du fer actif de l'alternateur, à l'entrée et à la sortie de l'air de ventilation de l'alternateur. L'alarme-température et la signalisation correspondante se font au joint plan, aux trois paliers-guides et au pivot. Une signalisation et alarme est en outre prévue pour le niveau d'huile du pivot, le niveau des fuites d'eau, les circulations d'eau du pivot et du régulateur, la circulation d'huile de graissage des paliers de la turbine et de l'alternateur, et pour le fonctionnement des tachymètres de sécurité.

Sur les transformateurs de la station extérieure, la mesure des températures de l'huile se fait sur chacun des deux réfrigérants de chaque transformateur. L'alarme-température se fait au moyen d'un thermomètre à contact. L'alarme et la signalisation de circulation d'huile et d'eau est appliquée à chaque réfrigérant. L'alarme et la signalisation des niveaux d'huile est installée dans les cuves des transformateurs et des gradins 18 et 125 kV.

Les mesures de température des groupes hydro-électriques et des transformateurs sont contrôlées sur un des tableaux d'angle de la salle de commande, sur lequel sont disposés un

instrument indicateur et les plaquettes de boutons-poussoirs¹.

Les installations de mesure à distance des niveaux du Rhône doivent renseigner le personnel de la salle de commande sur les niveaux de l'eau dans le bief amont, dans le canal de fuite, à la limite de concession sur le Rhône aval, à la jonction de l'Arve au Rhône, où l'influence du remous de Verbois doit pouvoir être contrôlée, enfin sur l'Arve, à l'entrée de cette rivière en territoire suisse ; cette dernière indication étant nécessaire pour annoncer les crues. Les appareils récepteurs sont des enregistreurs, disposés dans la salle de commande sur le tableau oblique placé à gauche du tableau synoptique. L'indicateur du niveau amont est commandé du mécanisme de commande automatique des vannes-clapets. L'indicateur du niveau aval est à commande électrique à distance sur ligne privée. Les indications de ces deux limni-graphes sont répétées dans la galerie des treuils de vannes du barrage pour orienter le personnel manœuvrant les vannes de cette galerie. L'indicateur du niveau à la limite de concession et les indicateurs de la jonction et de l'Arve sont à commande électrique à distance.

Le système adopté est celui de la maison Gfeller.

Les indications des niveaux de l'Arve et du niveau aval de Verbois sont retransmises de Verbois à l'Usine de Chancy-Pougny.

Les liaisons téléphoniques sont assurées par un central automatique relié par deux lignes munies de translateurs, au réseau de l'administration des téléphones. Des téléphones sont répartis dans les locaux haute tension, la salle des machines, la salle de commande et les bureaux. Une installation téléphonique privée à courant local assure les communications de secours et une liaison directe de l'usine avec l'usine thermique de Genève par les câbles-pilotes.

Le tableau principal des services auxiliaires comporte : les disjoncteurs des transformateurs de services auxiliaires, les barres de distribution 380/220 V, un certain nombre de départs avec fusibles et interrupteurs, groupés en deux séries, commandant l'une les services auxiliaires pouvant admettre

¹ Pour l'alarme sont prévus divers signaux acoustiques pouvant être arrêtés tandis que le signal lumineux du tableau subsiste jusqu'à ce que la cause ayant provoqué l'alarme ait été écartée : clakson général de la salle de commande actionné par tous les circuits d'alarme y compris l'incendie d'alternateur ; signal acoustique pour l'alarme incendie d'alternateur constitué par des cloches dans la salle des machines ; clakson pour l'alarme-température, circulation d'huile et eau, niveau d'huile et eau de fuite dans la salle des machines. Le fonctionnement des disjoncteurs est annoncé par le clakson général de la salle de commande. Un ronfleur sert à l'appel au transmetteur d'ordres dans la salle des machines.

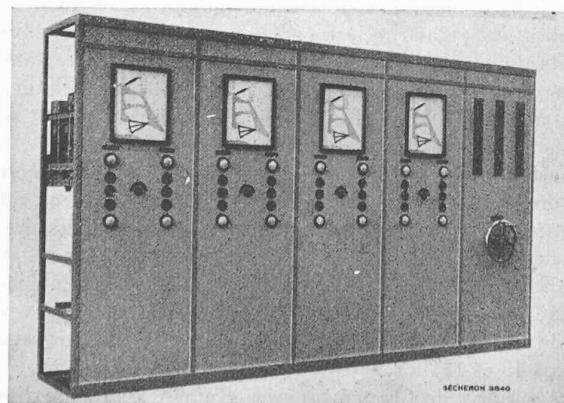


Fig. 70. — Tableau de commande du barrage.

une interruption de courant, l'autre les services auxiliaires indispensables, services décrits au chapitre VII. Sur ce même tableau principal est prévu le redresseur de charge de la batterie d'accumulateurs à courant continu 110 V et un tableau de distribution du courant continu destiné à la salle de commande et aux autres services, en particulier des départs continu pour éclairage de secours ; le tableau général comporte en outre un panneau de boutons de commande à distance de tout l'éclairage principal à courant alternatif, éclairage qui est alimenté par places depuis les batteries de coffrets.

Ce tableau comporte également les commandes de mise en marche du groupe de secours, ainsi que celles de mise en service de la station de pompage d'eau de réfrigération, avec signalisations et alarmes de niveau maximum et minimum.

Le tableau de commande du barrage comporte les boutons de commande des vannes-clapets et des vannes de fond, les lampes de signalisation de fonctionnement et des instruments indicateurs de position des vannes. Il comprend en outre un panneau supportant la commande mécanique de la chambre de réglage automatique du niveau amont, disposée dans l'épaisseur du mur de digue qui se trouve à l'amont de la salle de commande, ainsi que les potentiomètres d'asservissement (fig. 70).

Les tableaux de groupes ou de mise en marche des groupes hydro-électriques comportent chacun :

1. Un panneau de commande par huile sous pression de la turbine et de son régulateur, avec tous les instruments de contrôle de la position des aubes de la roue et du distributeur, les manomètres, indicateurs de vitesse, vannes de mise en marche, boutons-poussoirs de réglage, lampes de signalisation des tachymètres de sécurité, etc. De ces divers objets, seuls les indicateurs de position et de vitesse, les commandes du réglage de vitesse et du limiteur d'ouverture et la signalisation des tachymètres sont reportés à la salle de commande, étant entendu que la mise en marche des turbines ne se fait que de la salle des machines, selon instructions données par le transmetteur d'ordres ; le réglage en marche normale étant ensuite assuré de la salle de commande, le personnel de la salle des machines n'ayant plus qu'une surveillance périodique du graissage, des températures et des circulations d'eau à assurer (fig. 71).

2. Un panneau de signalisation par textes lumineux et de mesure de températures doublant les indications à la salle de commande et recevant le récepteur d'ordres.

3. Un panneau de surveillance de la marche et de l'état de charge de l'alternateur, portant un wattmètre, un fréquencemètre, un phasmètre, un volt-ampèremètre, un voltmètre

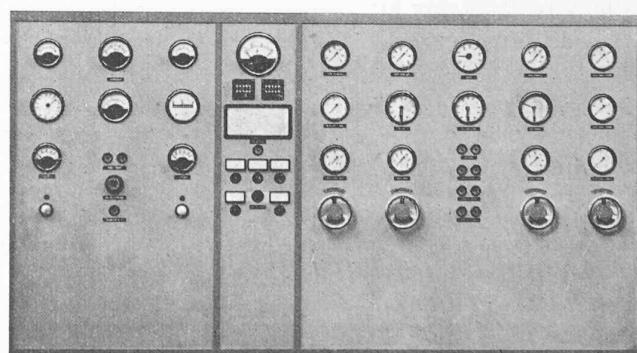


Fig. 71. — Tableaux de groupes.

et un ampèremètre d'excitation, ainsi que la commande du déclenchement du disjoncteur 18 kV et sa signalisation, la commande de la fermeture rapide de la turbine, la commande du dispositif d'extinction d'incendie, enfin le relais de minimum de tension du régulateur de la turbine.

Ce tableau ne permet aucun réglage ni mise en parallèle de l'alternateur, et n'est destiné qu'à un contrôle périodique ou à permettre une intervention rapide dans le cas de dérangement des commandes du pupitre général.

Le disjoncteur d'excitation principal et la résistance de désamorçage sont placés à proximité immédiate de l'alternateur dans le but de réduire au minimum la longueur des connexions entre l'excitatrice et l'alternateur.

Ces tableaux sont complétés par la présence de la cloche d'alarme-incendie, le clakson des défauts, un ronfleur d'appel aux transmetteurs d'ordres, de deux lampes de couleurs différentes disposées en avant de chaque tableau pour désigner le groupe appelé ou défectueux. Enfin une commande mécanique du dispositif d'extinction d'incendie a été prévue, ainsi qu'un téléphone à chaque groupe pour la liaison avec la salle de commande ou le barrage.

Les câbles de mesure, signalisation, commande et réglage disposés entre les tableaux de groupes et la salle des câbles ; entre tableaux de groupes et alternateurs, sont du type à conducteurs de cuivre à isolation au papier imprégné sous plomb et jute asphalté, non armé.

La filerie sur les groupes hydro-électriques est réalisée en câbles pyrotexax.

VII. Equipements auxiliaires.

Les services auxiliaires de l'usine sont alimentés par deux transformateurs de 600 kVA 18 000/380 V dont un de réserve, connectés aux barres omnibus 18 000 V par disjoncteurs à air comprimé protégés par relais directs, et reliés, côté basse tension, au tableau général de distribution décrit de façon plus précise avec les équipements de la salle de commande. De ce tableau partent des câbles alimentant un certain nombre de batteries de coffrets de distribution placées en divers points du barrage, de l'usine et de la station extérieure. Le tableau général, les câbles de distribution et les batteries de coffrets sont tous divisés en deux parties : services indispensables et services admettant une interruption. Ces deux services sont sectionnés dans les batteries de coffrets, mais tenus en parallèle par un disjoncteur de couplage entre elles des deux parties du tableau général. En cas de manque de tension, ce disjoncteur sépare les deux services. Le service indispensable est alors alimenté par une source de secours, constituée par

un groupe Diesel-alternateur de 200 kW 380/220 V, à démarrage automatique, en cas de manque de tension sur le tableau général de distribution des services auxiliaires.

Ce groupe Sulzer-Sécheron reste en permanence prêt au départ automatique ; dès branchement automatique sur les barres des services indispensables, le groupe peut être chargé. Il est périodiquement essayé pour contrôle de l'automatique et exercice du personnel au rétablissement à la main des services auxiliaires dès le moment du retour de la tension de l'usine.

Les équipements électriques auxiliaires comportent en outre une

batterie d'accumulateurs 115 V 700 A H, chargée par redresseur à vapeur de mercure et servant à alimenter les services décrits avec la salle de commande. Cette batterie est placée

dans un local muni d'une ventilation mécanique et situé sur l'étage de la salle de commande.

L'air comprimé nécessaire au fonctionnement des disjoncteurs 18 000 V et 150 000 V et à la commande pneumatique des sectionneurs 18 000 V est livré par une installation de 2 compresseurs à 24 kg/cm², chargeant deux réservoirs principaux. Ces réservoirs sont, pour sécurité supplémentaire, reliés au réservoir d'air des régulateurs des turbines. De ces réservoirs, une canalisation de distribution en boucle alimente des réservoirs locaux et toutes les dérivations aux réservoirs particuliers de disjoncteurs et aux vannes de distribution d'air dans les cellules d'appareillage H. T. Un réservoir spécial, destiné aux disjoncteurs 150 000 V de la station extérieure, est disposé dans un local continuellement en relation avec l'air extérieur, de telle façon que l'air comprimé s'y refroidisse et y dépose l'humidité en suspension, avant de pénétrer dans les conduites de jonction aux réservoirs de disjoncteurs.

Les compresseurs ci-dessus sont du type à refroidissement à air. L'air comprimé est également refroidi dans des réfrigérants dans l'air, avant d'être introduit dans les réservoirs. Sur ces derniers sont disposés des manomètres à contacts provoquant la mise en marche ou l'arrêt des compresseurs, selon la consommation d'air effectuée. Les canalisations d'air sont en aluminium.

Comme on l'a vu au chapitre II, l'existence d'une nappe d'eau souterraine sur la rive gauche fut constatée lors des travaux de sondage et l'emploi éventuel de l'eau de cette nappe fut envisagé pour le refroidissement des paliers des groupes et de l'huile des transformateurs.

En vue de réaliser le débit maximum, il importait de capter ces eaux reconnues aptes à cet emploi, dans une région de plus grande profondeur des graviers, soit dans la région présumée occupée par le bas-fond mollasse des environs du ruisseau du Goy. Il fallait cependant s'éloigner autant que possible du Rhône et du dit ruisseau, pour éviter l'introduction dans les eaux de réfrigération, d'eaux de provenance trop directe de ces cours d'eau. Or, les cotes profondes des graviers avaient été observées dans un sondage au confluent du ruisseau, de même que dans la région du pont de Peney. On décida d'exécuter un puits de recherche et de pompage sur le plateau d'Aire-la-Ville, aussi près que possible de l'usine, sur l'alignement de ces deux points profonds reconnus. Le sondage révéla la justesse de ce choix, car la cote du fond étanche des graviers remplissant la dite dépression mollassique fut trouvée la même qu'à Peney.

Les essais de pompage effectués pendant plusieurs saisons sèches permirent d'admettre que la nappe était, en tout temps, assez alimentée pour fournir les eaux des réfrigérants de toute l'usine. On utilisa donc le puits de sondage comme puits définitif, au-dessus duquel on érigea une

station de pompage complète, avec deux pompes de forage Sulzer de 35 CV (dont une de réserve), placées dans le fond du puits et entraînées au moyen d'arbres disposés dans la tubulure de refoulement, cette dernière étant suspendue à la base du moteur électrique Brown-Boveri installé au sol de la chambre des machines. Les parois de cette chambre comportent de robustes piliers de béton armé, soutenant un réservoir d'une contenance de 200 m³ d'eau, quantité suffisante pour assurer l'alimentation en eau de l'usine pendant une ou deux heures, en cas de panne de courant sur les pompes.

Ces dernières peuvent être commandées à distance, de la salle de commande de l'usine (tableau des services auxiliaires).

Le réservoir en question, entièrement en béton armé, est

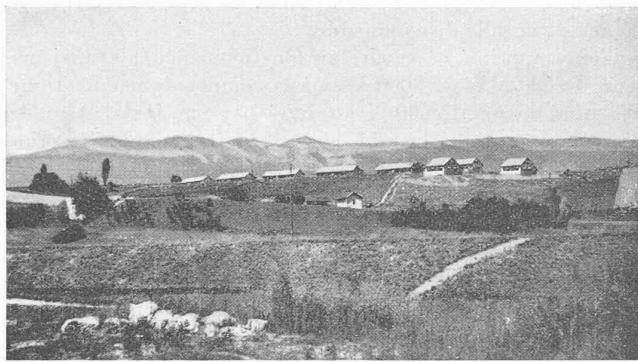


Fig. 72. — Logements du personnel.

du type cylindrique à fond bombé et parois minces, et cheminée centrale d'accès. Le raccordement du réservoir à l'usine est réalisé par deux canalisations en éternit (dont une de réserve), d'un diamètre de 250 mm, à joints Gibault, essayées après pose à 6 fois la pression de service et protégées à leur départ du réservoir par des vannes automatiques.

VIII. Travaux connexes.

En dehors des ouvrages principaux décrits plus haut, la construction de Verbois entraîna l'exécution de divers travaux importants qu'il est utile de mentionner brièvement :

Les accès à l'usine, réalisés par deux routes importantes, ont été construits dans la période des travaux préparatoires. Ces ouvrages, après utilisation pendant cinq ans avec un service intensif de gros roulage, se sont montrés bien conditionnés et lors des transports des charges maximum (transformateur de 100 t sur chariot spécial) aucun tassemement ne s'est produit tant le long de la route qu'au pont franchissant les voies ferrées des CFF.

Une autre partie des travaux connexes entrepris dès les débuts, en vue de combattre le chômage dans le bâtiment, fut celle de la construction des logements du personnel. Ce véritable petit village, dénommé plus tard « hameau de Verbois » de la commune de Russin, comprend 3 villas jumelles de 2 fois 4 pièces, 3 villas jumelles de 2 fois 5 pièces et 2 villas simples de 6 pièces pour les chef et sous-chef d'usine (fig. 72).

Ces maisons sont situées sur un coteau élevé d'où on jouit d'une vue étendue et qui n'est que rarement atteint par les brouillards longeant la vallée du Rhône. Ces constructions sont en plots creux et béton armé et couvertes en tuiles ; leur style rappelle celui des maisons campagnardes genevoises ; leur chauffage se fait au moyen d'une chaudière électrique par logement. Un garage et une petite dépendance, de même qu'un jardin, sont prévus avec chaque appartement.

Enfin, l'élévation considérable du niveau des eaux à l'amont de Verbois, a conduit à reconstruire plus haut et plus grand le pont de Peney. Le nouveau pont, qui a subi avec succès les essais de charge, est construit sur 4 piles et deux culées. Il est entièrement en béton armé. Son tablier constitue une seule poutre légèrement arquée à deux nervures reliées par des entretoises. La longueur de ce pont est de 193 m, la largeur de 7 m, plus 2 trottoirs de 1,50 m en encorbellement hors des nervures principales du tablier (fig. 73).

Les piles se composent de deux colonnes de béton armé

de section carrée, réunies à demi-hauteur par une poutre horizontale.

Le nouveau pont est relié d'une part au village de Peney, d'autre part au village d'Aire-la-Ville, par des routes à légère pente, d'une largeur de 6 m et bordées d'arbres.

Divers autres travaux ont été nécessaires le long du Rhône amont, du fait de la montée des eaux. Ils sont de relativement peu d'importance et il sortirait du cadre de cet article de les décrire.

IX. Mise en service.

Dès achèvement de la mise au point des organes de la turbine et de l'alternateur et essais de fonctionnement sans eau des dispositifs de réglage, de protection, de commande et signalisation, on procéda le 26 décembre 1942 à la mise en eau de la retenue, par fermeture progressive des vannes secteurs du barrage. Les débits du Rhône à ce moment de l'année étaient très faibles et l'on dut, pour ne pas diminuer trop fortement le débit restant dans le Rhône pour les usines d'aval, faire un emprunt de quelques heures au lac Léman.

Les batardeaux aval et amont de la turbine 1 avaient été préalablement enlevés, le distributeur et la roue Kaplan étant maintenus fermés pendant la montée du niveau amont.

Les murs-digues présentèrent en quelques points des inétanchéités du béton, constatables dans les galeries de visite. Des injections de ciment exécutées dans ces galeries arrêtèrent rapidement toutes venues d'eau. On put constater l'efficacité des injections, faites avant la mise en eau, sous les parafouilles amont, au moyen des tuyaux posés à cet effet au cours de la mise en place du béton des digues. Les drains ménagés à l'aval des parafouilles ne débitèrent que très peu d'eau. Quelques inétanchéités du béton constatées autour des parties scellées de la turbine furent également obturées sans difficulté.

En ce qui concerne les terrains de la retenue amont, au sujet desquels on avait émis des doutes quant à leur stabilité après montée des eaux, rien d'anormal ne s'est présenté à cette mise en eau à demi-retenue.

Il est intéressant de constater que la nappe souterraine de la rive gauche a subi, très peu de temps après, l'influence de l'augmentation du niveau amont, démontrant l'exactitude des déductions faites au cours des travaux de sondage, quant à la perméabilité des couches profondes des terrains de la rive gauche. Les puits d'observation aménagés autour de l'extrémité du mur de digue, montrèrent également les fluctuations de niveau correspondantes ; mais les débits de contournement de ces ouvrages restèrent dans des limites très faibles, seuls quelques drains inférieurs du mur en aile aval de la rive gauche ayant accentué leur débit.

Comme il fallait s'y attendre sur la base des résultats des sondages préliminaires exécutés sur la rive droite (terrains beaucoup plus étanches que sur la rive gauche), aucune variation de niveau n'a été constatée dans les puits d'observation et drainages.

Les niveaux atteints par le Rhône à l'aval de l'usine sont conformes à ceux donnés par les calculs de l'écoulement dans le fleuve corrigé à faible pente et conformes aux chiffres indiqués lors des essais sur modèle réduit.

Ces constatations faites et le groupe I étant prêt, on procéda à la mise en marche de la turbine, opération qui se fit sans aucune difficulté et ne nécessita que quelques retouches de détails. Etant donné que l'alternateur avait été monté en période très humide dans la salle des machines incomplètement fermée, on dut ensuite, pour sécher cette machine,

faire tourner le groupe pendant une semaine en court-circuit.

Puis vint la mise sous tension et divers essais des dispositifs de sécurité, arrêt rapide, coupure brusque d'une charge réalisée sur résistance hydraulique et enfin la mise en parallèle sur le réseau, le dimanche 17 janvier 1943. Une petite cérémonie de mise en service officielle de ce premier groupe de Verbois eut lieu le 21 janvier 1943. Le second groupe, dont le montage s'était poursuivi entre-temps, fut à son tour mis en service le 25 mars 1943.

L'usine de Verbois assura immédiatement un service ininterrompu à demi-chute, de 20 000 à 25 000 kW et à fin août 1943 l'énergie livrée atteignait environ 80 000 000 kWh.

La sécurité de marche des installations étant suffisamment démontrée, on procéda à l'arrêt de l'ancienne usine de Chèvres, le 10 mai 1943, et alors commença le démontage de l'équipement de cette première réalisation d'une usine au fil de l'eau que fut cette centrale.

A l'heure où paraît cet article, cette désaffectation est chose faite et il est possible de procéder bientôt à la mise en eau à chute totale à Verbois. Cette usine pourra dès ce moment fournir 44 000 kW en attendant la fin du montage du troisième groupe, qui aura lieu vraisemblablement au début de décembre 1943.

X. Coût des travaux.

Quoique certains travaux de montage, finitions, aménagements et essais restent à effectuer, on peut prévoir que le coût probable de la construction de l'usine atteindra les chiffres suivants :

Etudes, expertises	Fr. 1 500 000.—
Travaux préparatoires	» 720 000.—
Terrains	» 750 000.—
Voies d'accès	» 640 000.—
Corrections du Rhône aval et travaux dans la retenue	» 6 752 000.—
Génie civil, usine, barrage, digues	» 13 722 000.—
Aménagements de l'usine	» 500 000.—
Vannes du barrage	» 960 000.—
Grilles, dégrilleurs, batardeaux, portiques	» 1 077 000.—
Ponts roulants, équipements mécaniques divers, station de pompage	» 919 000.—
Turbines et accessoires, régulateurs, pompes	» 2 7500 00.—
Alternateurs et accessoires, excitatrices	» 2 700 000.—
Equipements électriques haute tension, salle de commande, station transformatrice extérieure	» 4 900 000.—
Liaison électrique de l'usine aux réseaux, extension de la station réceptrice de Genève	» 3 830 000.—
Pont de Peney et ses voies d'accès	» 920 000.—
Logements du personnel de l'usine	» 690 000.—
Démolition de l'usine de Chèvres	» 350 000.—
Frais d'emprunts, intérêts intercalaires	» 7 600 000.—
Coût global probable	Fr. 51 280 000.—

Ce total dépasse d'environ 40 % les prévisions de 1937. L'augmentation des dépenses est due en premier lieu à l'augmentation générale des prix de fourniture, à l'augmentation de la main d'œuvre, à des modifications de caractéristiques de certains équipements, aux changements de programmes occasionnés par le manque de matières premières, difficultés de transports, mobilisations, etc.

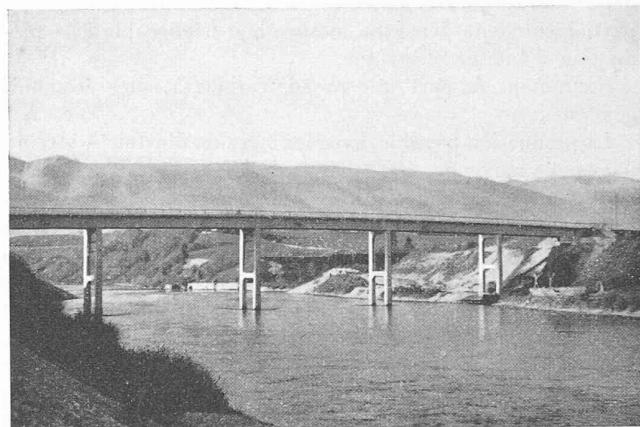


Fig. 73. — Nouveau pont de Peney.

XI. Incorporation de Verbois dans l'économie électrique suisse.

La construction de l'usine de Verbois étant sur le point de s'achever et la marche à demi-chute assurée pendant les $\frac{2}{3}$ d'une année ayant montré que les quantités d'énergie prévues peuvent être produites, il est intéressant d'examiner quelle sera l'influence de la mise en marche complète de cette usine sur l'ensemble de l'économie électrique suisse.

Comme nous l'avons montré au début de cet article, la décision de construire l'usine de Verbois a été précédée d'une ascension constante de l'emploi d'énergie électrique dans le canton de Genève. De 1910 à 1937 par exemple, elle a passé de 33 à 128 millions de kWh. La même progression figurée pour l'ensemble de la Suisse suit une courbe semblable, cependant plus inclinée par l'influence de la force motrice empruntée aux réseaux à caractère plus industriel que le réseau genevois. La consommation totale atteignait en Suisse, durant l'année hydrologique allant du 1^{er} octobre 1936 au 30 septembre 1937, environ 5200 millions de kWh, soit à peu près 40 fois celle de notre canton.

Pendant cette même période, les disponibilités des centrales électriques suisses ne suivaient pas une ligne parallèle à la demande d'énergie. L'accroissement des forces aménagées de 1927 à 1929 fut inférieur à celui de l'absorption. Il combla le retard dès 1930 pour dépasser la demande, mais subit un nouveau recul relatif à partir de 1937.

La période de 1937 à 1942 est très fortement touchée en ce qui concerne l'économie électrique suisse, par la situation européenne. Parmi les nombreux projets de construction d'usines, un seul est réalisé, celui de Verbois, décidé encore avant la guerre. Au début de 1938, Genève voit s'organiser le grand chantier sur le Rhône.

Les années hydrologiques 1939/40 et 1940/41 furent particulièrement abondantes en précipitations, ce qui permit de prendre aux cours d'eau plus d'énergie que la moyenne statistique ne laissait espérer. En 1941/42, l'absence de sources nouvelles, la sécheresse exceptionnelle et la très forte intensification des divers emplois de l'énergie, ont provoqué les restrictions d'emploi d'énergie que la première et la troisième causes ont renouvelées en 1942/43.

Pendant la guerre, la décision fut prise d'équiper le second palier du Grimsel et de mettre les installations d'Innertkirchen le plus rapidement possible en service. Depuis le

début de la guerre, deux seules grandes usines nouvelles participent donc dans une mesure non négligeable à la production d'énergie électrique.

Exammons la part que prend Verbois à cette économie générale :

La production possible, avec les 3 groupes installés, atteint, par année moyenne, 400 millions de kWh, dont 176 pendant les six mois d'hiver et 224 en été. Pendant les années très riches en eau, la production ne peut que faiblement dépasser ces valeurs et encore à condition que les mois d'avril et d'octobre soient particulièrement humides. Pour les années sèches, les chiffres correspondants sont de 350 millions de kWh dont 126 en hiver et 224 en été. L'influence d'un hiver sec se remarque dans le changement notable du rapport entre les valeurs d'hiver et d'été. Les mêmes grandeurs établies pour l'ensemble de la Suisse, présentent en 1942 les valeurs indiquées ci-dessous en ne comptant que la production des usines affectées à la distribution générale et au pompage des installations de récupération d'eau d'été, mais en exceptant les générateurs des Chemins de fer fédéraux.

En débit moyen, le total annuel atteint 8300 millions de kWh, dont 3700 en hiver et 4600 en été. L'usine de Verbois accroîtra cette disponibilité de 4,8 %.

En année sèche, 7050 millions de kWh peuvent être pro-

duits, dont 3150 en hiver et 3900 en été, auxquels Verbois ajoutera 4,95 %.

Enfin, dans les années particulièrement avantageuses quant aux régimes des eaux, Verbois complètera de 4,35 % les disponibilités suisses, qui s'élèvent en 1942, sans Verbois, à 9200 millions de kWh.

Le canton de Genève ne dispose pas de haute chute d'eau. De ses deux seuls cours d'eau, le Rhône est aujourd'hui complètement aménagé, et l'Arve cède à quelques petites usines son débit d'été. L'étiage de l'Arve est en effet si minime que la faible chute qu'elle présente sur le territoire du canton ne peut pas être rationnellement équipée. Grâce à l'initiative prise par les Services industriels de Genève, à la suite des circonstances favorables qui se présentèrent en 1937, Genève, qui fut la première ville en Suisse à construire une puissante usine à basse chute, a précédé aussi la réalisation du programme général de construction d'usines hydroélectriques.

En apportant sur le marché du travail le capital investi dans la main d'œuvre et les fournitures si nombreuses et diverses d'un ouvrage de cette envergure, en augmentant notre richesse nationale par l'apport nouveau de quelques centaines de millions de kWh, Genève a accompli une œuvre dont l'intérêt économique dépasse le territoire cantonal.

La construction à Genève

par F. GAMPERT, architecte.

La construction dans toute la partie urbaine est caractérisée par des immeubles locatifs à multiples étages. Cet usage a, dans la ville ancienne, des raisons historiques ; il s'explique par la nécessité de construire en hauteur au temps où la ville était ceinturée de remparts. Même après la démolition des fortifications cet usage s'est conservé. Les quartiers réguliers qui ont été créés sur les emplacements devenus libres pour l'extension de la cité comportent généralement des maisons de quatre à cinq étages. Sur les deux rives du lac, les immeubles locatifs s'étendent jusqu'aux parcs publics qui délimitent la zone urbaine et le passage de la ville à la campagne se fait sans transition. Seul le quartier des Tranchées fait exception avec des immeubles plus bas et des hôtels particuliers.

Ce qui était autrefois une nécessité est devenu un usage, encouragé par les constructeurs et spéculateurs, qui ont tout intérêt à aménager le plus grand nombre de logements sur le plus petit espace possible. Le système si répandu dans la plupart des villes suisses des petits immeubles de deux à trois étages avec terrasse ou petit jardin, et celui des maisons familiales contigües n'a jamais été en faveur à Genève ; il existe seulement dans la ville de Carouge, dont le caractère architectural est très différent de celui de Genève, et le long de la route de Chêne.

La crise immobilière.

Actuellement la construction d'immeubles traverse une crise si grave qu'on ne peut pas parler de ralentissement, mais bien d'un arrêt complet de toute activité. Depuis le début de la guerre, il n'a pas été construit un seul immeuble locatif dans la ville. Cette crise n'est pas seulement le fait de la guerre mondiale. Les causes doivent être recherchées dans la politique immobilière pratiquée dans la période de prospérité qui a atteint son plein épanouissement vers 1930.

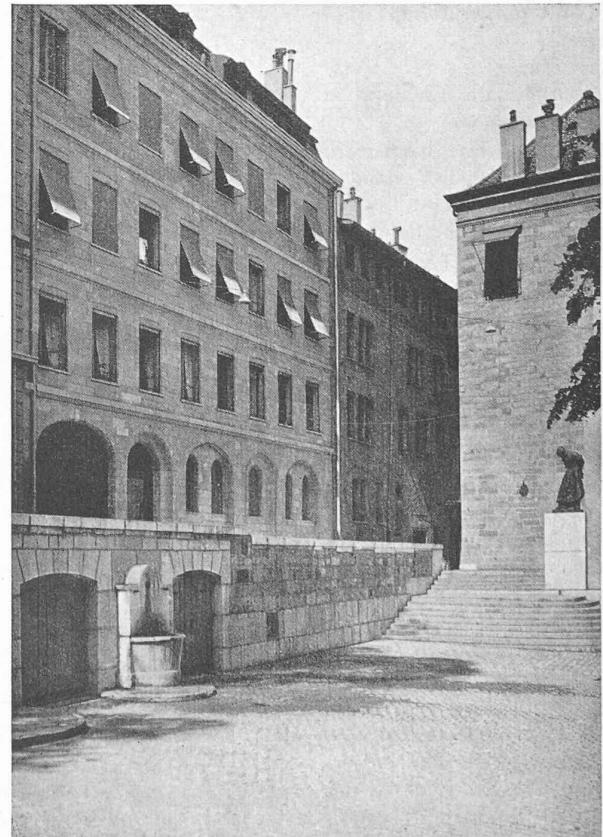


Fig. 1. — Immeuble rue du Soleil-Levant 6, propriété de la ville.

Architecte : Vetterli.