

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 65 (1939)  
**Heft:** 13

**Artikel:** La construction de l'Usine de Verbois-Genève  
**Autor:** Bolens, F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-50002>

### **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:** 10.04.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

### ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs

Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 10 francs

Etranger : 12 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

Pour les abonnements  
s'adresser à la librairie  
F. Rouge & C<sup>ie</sup>, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. —

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président: R. NEESER, ingénieur, à Genève; Vice-président: M. IMER, à Genève; secrétaire: J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres: *Fribourg*: MM. L. HERTLING, architecte; A. ROSSIER, ingénieur; *Vaud*: MM. F. CHENAUX, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; EPITAUX, architecte; E. JOST, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; *Genève*: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. ODIER, architecte; CH. WEIBEL, architecte; *Neuchâtel*: MM. J. BÉGUIN, architecte; R. GUYE, ingénieur; A. MÉAN, ingénieur cantonal; *Valais*: M. J. DUBUIS, ingénieur, à Sion.

RÉDACTION: D. BONNARD, ingénieur, 80, Avenue de France, LAUSANNE.

### ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,  
largeur 47 mm :  
20 centimes.

Rabais pour annonces  
répétées.

Tarif spécial  
pour fractions de pages.

Fermege des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE  
A. DOMMER, ingénieur, président; G. EPITAUX, architecte; M. IMER; A. STUCKY, ingénieur.

SOMMAIRE: *La construction de l'Usine du Verbois-Genève*, par F. BOLENS, ingénieur, à Genève. — *Les étapes de l'architecture du XIX<sup>e</sup> siècle en Suisse*, par EDMOND VIRIEUX, architecte cantonal, à Lausanne. — *Aux titulaires suisses de brevets italiens*. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes: Groupe professionnel des architectes pour les relations internationales*. — *Association amicale des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne*. — NÉCROLOGIE: H.-W. Stréel. — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT.

## La construction de l'Usine du Verbois-Genève,<sup>1</sup>

par M. F. BOLENS, ingénieur,  
sous-directeur de la *Société générale pour l'industrie électrique*,  
à Genève.

### I. Introduction.

La concession de l'Usine du Verbois sur le Rhône a été accordée en 1909 à la Ville de Genève. L'Usine de Chèvres était à peine achevée qu'un premier projet pour l'aménagement du palier Chèvres-Pont de la Plaine était établi en 1897. Puis, au cours des années, notamment en 1907, 1918, 1923, 1929, des solutions successives apparaissent; l'année 1934 en voit surgir quatre différentes. Pour finir, l'avant-projet dressé en 1936 par la société Conrad Zschokke est retenu par les *Services Industriels de Genève* pour servir de base à la réalisation. L'examen de l'ensemble de ces projets permet deux constatations intéressantes:

La première est l'évolution, permise par les progrès de la technique, qui s'est produite dans la puissance des groupes: dans le projet de 1907, le débit aménagé de 300 m<sup>3</sup>/sec. était réparti entre 12 turbines, soit un débit de 25 m<sup>3</sup>/sec. par turbine. Les projets de 1918 prévoyaient l'utilisation de 400 m<sup>3</sup>/sec. avec 7 turbines, soit près de 60 m<sup>3</sup>/sec. par turbine. Puis, les diverses études présen-

tées de 1923 à 1936 envisageaient généralement un débit de 400 m<sup>3</sup>/sec. avec quatre turbines, soit 100 m<sup>3</sup>/sec. par turbine. Enfin le projet d'exécution dressé en 1938 par la *Société générale pour l'Industrie électrique*, mandataire des *Services Industriels de Genève*, comporte quatre groupes, dont trois à réaliser en première étape, construits chacun pour un débit de 127,5 m<sup>3</sup>/sec.

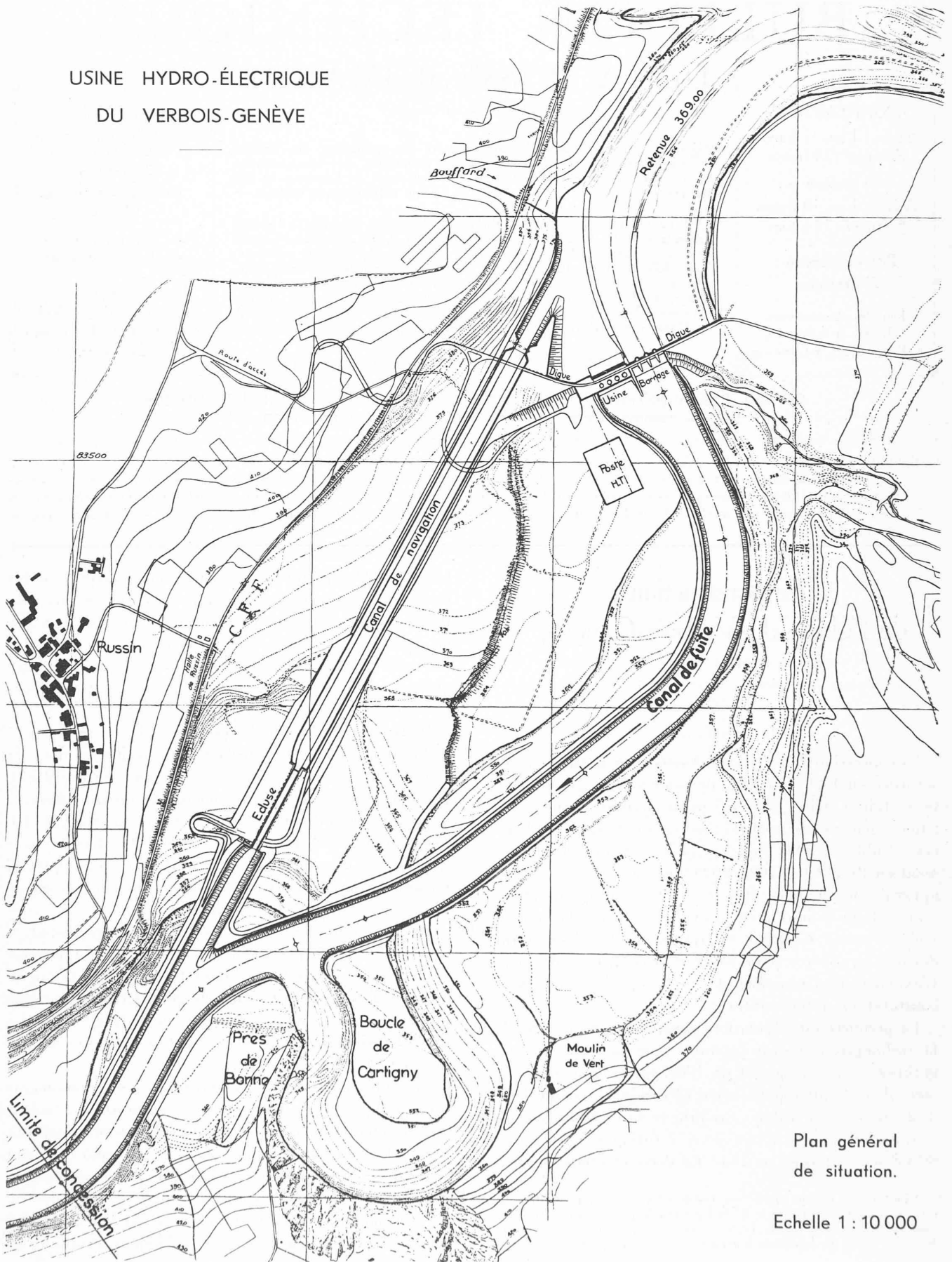
Dans un second ordre d'idées, le nombre et la diversité des projets présentés permettent de toucher du doigt la complexité des questions à résoudre dans un pareil cas. Il a fallu choisir entre un aménagement à deux paliers — qui maintiendrait l'usine de Chèvres et ne créerait une nouvelle accumulation qu'à partir de cette dernière centrale — et un aménagement à un seul palier qui, en noyant l'usine de Chèvres, utiliserait toute la chute disponible dès l'aval de la Coulouvrenière.

Puis il a fallu comparer les solutions à usine canal — c'est-à-dire celles prévoyant l'implantation du barrage et de l'usine en des lieux différents, et l'alimentation de l'usine au moyen d'un canal de plus ou moins grande longueur — avec des solutions usine-barrage dans lesquelles l'usine est construite à côté du barrage et prolonge en quelque sorte ce dernier.

Ce sont surtout des considérations d'ordre économique qui ont fait retenir un aménagement à un seul palier, des considérations techniques et d'exploitation qui ont fait écarter les solutions à usine-canal, et c'est enfin l'élément sécurité — déterminant pour les conditions géologiques nécessaires aux fondations des ouvrages et à la constitution du bassin d'accumulation — qui est venu s'ajouter aux arguments économiques et techniques lorsqu'il s'est

<sup>1</sup> Le texte du présent article est l'adaptation, pour la publication, de celui de la conférence faite par M. F. Bolens, à Genève, devant la Classe de l'industrie et du commerce de la *Société des Arts* et la Section genevoise de la *Société suisse des ingénieurs et des architectes*, le 8 mai 1939.

USINE HYDRO-ÉLECTRIQUE  
DU VERBOIS-GENÈVE



Plan général  
de situation.

Echelle 1 : 10 000

agi de fixer le site de l'usine-barrage. Il a été également largement tenu compte, dans le choix du projet, de l'incidence de la question des chasses.

## II. Description de l'usine.

La chute brute existant entre l'usine de la Coulouvrenière et l'extrémité aval du secteur concédé qui rejoint aux environs de l'embouchure de la London le début de la retenue de Chancy-Pougny, est en eaux moyennes d'environ 22,50 m. L'usine du Verbois sera construite à 2,400 km. environ à l'amont de l'extrémité aval de la concession, ce qui entraîne, si l'on veut tirer tout le parti possible de la chute utilisable en ce point, la création d'un canal de fuite important (fig. 1). Pour disposer à l'emplacement de l'usine d'une chute aussi haute que possible, il a fallu, puisque le niveau de la retenue amont était fixé, chercher à abaisser au maximum le niveau du fleuve à l'aval du barrage. C'est ce qui a été obtenu en admettant pour le canal de fuite, qui doit se raccorder au lit naturel du Rhône à l'extrémité de la concession, une pente et une longueur aussi faibles que possible. La détermination de cette pente minimum, qui dépend de plusieurs éléments, a fait l'objet d'essais sur modèle réduit. Quant au raccourcissement de la longueur du

canal de fuite, il a été obtenu tout simplement en coupant les méandres du cours naturel du fleuve et principalement ceux de la boucle de Cartigny et de la boucle des Prés de Bonne. On a gagné ainsi, entre le développement du tracé naturel du Rhône et celui du canal de fuite, une longueur de près de 1250 m., auxquels correspond, avec la pente de 0,96 ‰ admise pour le dit canal de fuite, un gain de hauteur de chute de 1,20 m. A première vue, c'est évidemment peu de chose, mais ces 1,20 m. de chute représentent tout de même, pour chaque année d'exploitation et jusqu'au moment où on désaffectera l'usine du Verbois, une disponibilité d'énergie d'environ 18 millions de kwh, c'est-à-dire une possibilité de recette annuelle de l'ordre de 300 000 fr.

On a donc été amené à approfondir de plusieurs mètres le lit naturel du fleuve à l'aval du barrage, de sorte qu'en définitive, la chute maximum de 20,80 m. disponible à l'usine du Verbois est représentée par une surélévation d'environ 16,40 m. du plan d'eau actuel à l'amont du barrage et par un abaissement d'environ 4,40 m. du plan d'eau actuel à l'aval de cet ouvrage. L'importance des terrassements nécessités par la construction de ce canal de fuite est de l'ordre de 1 200 000 m<sup>3</sup>.

La figure 2 est un plan général du barrage et de l'usine.

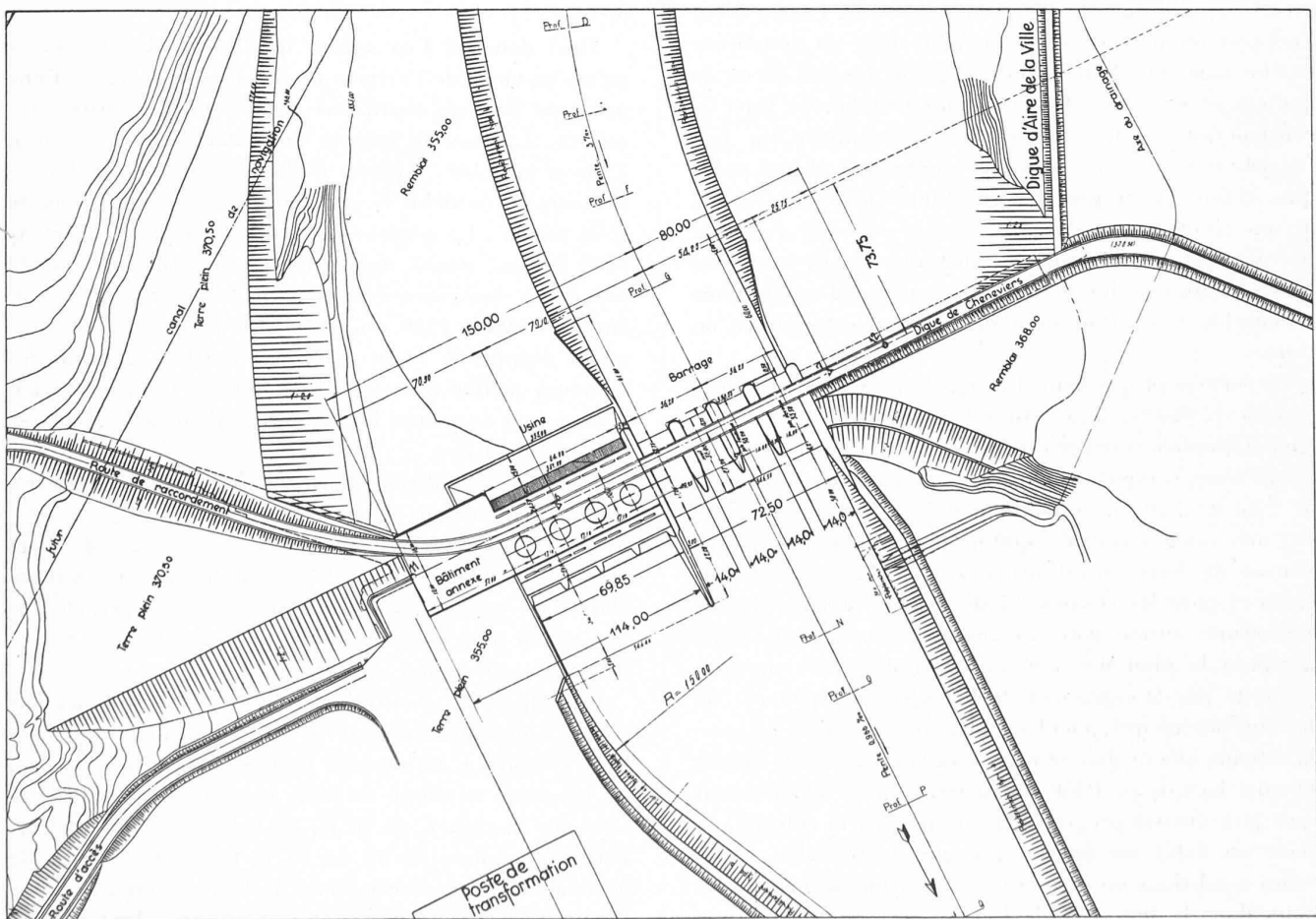


Fig. 2. — Plan général de l'usine et du barrage. — Echelle 1 : 3000.

La vallée est fermée par une série d'ouvrages se succédant à partir de la rive gauche dans l'ordre suivant : *digue de Cheneviers, barrage, usine, digue rive droite*. L'ensemble de ces quatre ouvrages est arrasé à la cote 370,50, c'est-à-dire à 1,50 m. au-dessus du niveau le plus élevé de la retenue, fixé à 369, la digue de Cheneviers s'abaissant cependant légèrement du côté de la rive pour se raccorder plus naturellement au plateau d'Aire-la-Ville. Ces ouvrages seront surmontés d'une chaussée qui traversera le fleuve en passant sur le toit de l'usine, et reliera les deux routes d'accès construites en 1938, l'une sur la rive droite, à partir de la route cantonale Satigny-Russin, et l'autre sur la rive gauche, à partir de l'actuel Pont de Peney. Ces deux routes d'accès sont utilisées, pendant la période des travaux, pour l'approvisionnement des chantiers. Le développement en crête de ces quatre ouvrages successifs est d'environ 450 m.

Le poste de transformation à l'air libre est situé sur la rive droite, à l'aval de l'usine et élèvera la tension de 18 000 V à 125 000 V pour le raccordement de l'usine du Verbois au réseau d'EOS. L'alimentation de la ville de Genève se fera directement à la tension de production de 18 000 V et à partir du local d'appareillage 18 000 V situé dans le bâtiment de l'usine.

Examinons d'un peu plus près ces divers ouvrages :

La *digue de Cheneviers*, d'environ 135 m. de longueur, prend appui d'un côté sur le barrage et de l'autre vient s'adosser au plateau d'Aire-la-Ville. Elle est constituée par un mur massif en béton atteignant jusqu'à 25 m. de hauteur et épaulée à l'aval par un remblai. Ce type de construction peut, à première vue, sembler un peu bâtarde ; il a été arrêté après de nombreuses études parce que, d'une façon générale, il donne plus de sécurité qu'une simple digue en terre, comme celle qui avait été prévue dans l'avant-projet, et surtout — et ici la hantise d'une guerre reprend ses droits — parce qu'il serait moins vulnérable aux attaques aériennes que cette digue en terre.

Le *barrage* proprement dit (fig. 3), prévu sur la moitié gauche du fleuve, comporte 4 ouvertures de 14 m. chacune. Chaque ouverture est fermée par un écran évidé en béton armé, complété à sa partie inférieure par une vanne de fond de 4,20 m. de hauteur et à sa partie supérieure par une vanne clapet de 4,00 m. de hauteur. Les quatre vannes de fond seront utilisées pour l'évacuation des crues et pour les chasses, tandis que les vannes clapets supérieures auront pour mission de maintenir automatiquement le plan d'eau amont aux différents niveaux prescrits par le règlement de barrage. Ce règlement de barrage prévoit que, pour les débits inférieurs à 200 m<sup>3</sup>/sec., la retenue amont doit être au maximum à la cote 369,00 et que, lorsque le débit augmente, le plan d'eau amont doit être abaissé progressivement jusqu'à la cote 367,60 pour un débit du fleuve supérieur à 560 m<sup>3</sup>/sec. ; de telles conditions ont été admises afin que le niveau des eaux dans la traversée de Genève reste compatible, en temps de crue, avec celui des points de sortie des égoûts

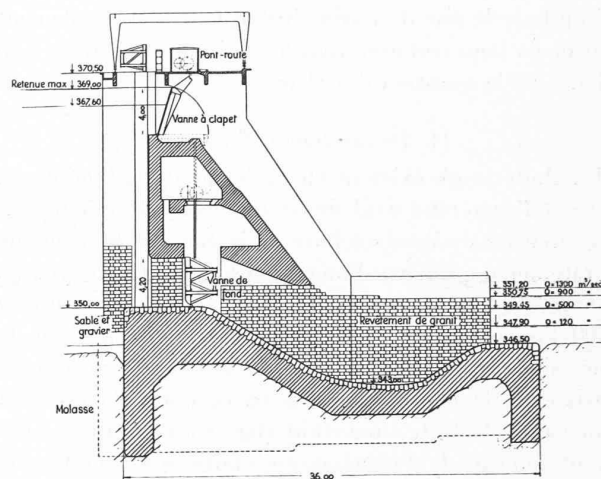


Fig. 3. — Barrage. Coupe transversale dans une ouverture. Echelle 1 : 600.

dans le Rhône et, d'une façon plus générale, avec la bonne conservation des constructions et des ouvrages riverains pendant les périodes de hautes eaux.

Chaque passe du barrage du Verbois, avec une vanne de fond levée et vanne clapet abaissée, peut évacuer, sous le niveau minimum de retenue de 367,60 à maintenir pendant le passage des crues, un débit d'environ 640 m<sup>3</sup>/sec.

Ainsi donc, si l'on admet que la malchance veuille qu'au moment de l'arrivée d'une crue, les vannes d'une passe du barrage soient hors service et que l'usine soit arrêtée, 3 passes du barrage pourraient évacuer environ 1900 m<sup>3</sup>/sec. Avec 4 passes du barrage ouvertes et l'usine en marche, ce débit évacué pourrait atteindre près de 2800 m<sup>3</sup>/sec. Le premier de ces deux chiffres, celui de 1900 m<sup>3</sup>/sec. donne déjà tous apaisements, puisque la plus forte crue constatée pendant les trente ans s'écoulant de 1905 à 1936 a été de 1320 m<sup>3</sup>/sec. en 1914, et qu'au surplus il serait toujours possible, pendant les quelques heures de crue maximum, de fermer, partiellement tout au moins, les vannes du Pont de la Machine, à la sortie du lac.

Le radier du barrage, ainsi que les faces latérales des piles, seront revêtus de granit.

Les mécanismes de manœuvre des vannes de fond seront logés à l'intérieur de l'écran du barrage. Les vannes clapets et les vannes de fond pourront, en périodes de réparation, être mises à l'abri des eaux par des batardeaux d'exploitation appropriés (fig. 3).

Du côté de la rive droite, le barrage est prolongé par l'usine, construite à cheval sur l'actuel lit du fleuve et sur la rive droite. C'est un long bâtiment de près de 114 m. de longueur et divisé en trois parties : la première, la salle des machines, de 70 m. de longueur, la seconde le bâtiment annexe, de 32 m., et la troisième, la salle de décuage des transformateurs, de 12 m. environ.

La salle des machines abritera 4 groupes, dont 3 seulement seront construits en première étape (fig. 4). Chacun

de ces groupes est constitué par une turbine Kaplan à axe vertical, pouvant développer une puissance maximum de 31 500 CV, sous une chute nette de 20,80 m. et un débit de  $127,5 \text{ m}^3/\text{sec.}$ , et par un alternateur de 27 500 KVA, tournant à 136,4 tours/min. et produisant du courant triphasé 50 périodes à 18 000 volts. Le poids de chaque turbine est de l'ordre de 400 tonnes et le rendement maximum garanti de ces machines doit atteindre dans le cas le plus favorable 90,5 %; la pièce la plus lourde manutentionnée pendant le montage pèsera environ 110 tonnes. L'alternateur, lui, est un peu plus léger que la turbine, puisqu'il n'atteindra que 295 tonnes environ. Par contre, le poids de la pièce la plus lourde devant être transportée pendant le montage est de l'ordre de 146 tonnes. Cet alternateur sera en construction entièrement soudée, avec stator en deux pièces et rotor en une seule pièce. Son arbre aura un diamètre maximum de 750 mm., et présentera une partie creuse centrale de 320 mm. de diamètre pour permettre le passage des organes de commande de la roue Kaplan.

La manutention des pièces des groupes, soit pendant le montage, soit pendant leur entretien, s'opérera à l'aide de deux ponts roulants de 80 tonnes chacun, pouvant être jumelés, et munis en outre chacun d'un treuil auxiliaire de 10 tonnes.

L'appareillage 18 000 volts est logé dans la partie amont de l'usine, à l'intérieur de l'ouvrage d'entrée, et c'est de ce local que partent directement les lignes d'alimentation pour la Ville de Genève, dont il a été question plus haut.

Le bâtiment annexe comprend un atelier au rez-de-chaussée, des locaux pour les câbles au premier étage et enfin, au deuxième étage, des bureaux et la salle et les tableaux de commande avec vue directe sur la salle des machines.

La fermeture de la vallée sur la rive droite, réalisée en partie par le bâtiment de l'usine, sera complétée par une

digue du même type que celui admis pour la digue de Cheneviers. Cette digue rive droite, qui pourra atteindre une hauteur maximum de 24 m., s'étendra sur une longueur d'environ 90 m. et sera prolongée sur une cinquantaine de mètres par un rideau de palplanches descendant jusqu'au sol imperméable et surmonté, sur une hauteur de 5 m., par un noyau en argile. L'ensemble de cette disposition a pour but d'assurer l'étanchéité de la rive droite en opposant un obstacle à l'infiltration des eaux et en obligeant ces dernières à effectuer un long trajet de contournement pendant lequel elles perdront leur force de pénétration.

L'emplacement d'un canal de navigation a été prévu; son tracé, situé sur la rive droite, part de la région des Prés de Bonne, où une écluse sera aménagée, et débouche dans la retenue à 200 m. environ à l'amont du barrage. Pour le construire, il n'y aura pas besoin d'éventrer le mur en béton de la digue rive droite, puisque ce canal passera presque entièrement au-dessus du rideau de palplanches dont il vient d'être parlé, dont seule la partie supérieure devra être découpée.

Les travaux d'aménagement du Verbois comporteront encore de petits travaux de correction du Rhône dans la région de l'île du Nord, à l'amont du Pont de Peney, c'est-à-dire à environ 2,5 km., à l'amont du barrage, travaux destinés à mieux canaliser les flots pendant les périodes de chasse et à augmenter ainsi l'efficacité des dites chasses. Il faudra également déplacer le Pont de Peney qui sera noyé par l'accumulation à réaliser, le niveau de la retenue devant atteindre sensiblement celui de son tablier. Le pont actuel sera donc démoli et remplacé par un ouvrage qui sera implanté environ 160 m. plus à l'amont et qui sera suffisamment surélevé pour permettre, sous ses arches, le passage des bateaux, le jour heureux où Genève sera enfin et effectivement reliée à la mer par la voie fluviale.

### III. Etudes spéciales préliminaires.

Il convient de faire ici une large place aux recherches particulières auxquelles il a été préalablement procédé en vue de pouvoir s'engager en toute sécurité dans la voie de la réalisation. Ce n'est d'ailleurs que depuis quelques années, quinze ou vingt ans au maximum, que l'on recon-  
nait aux études préliminaires de cette nature leur impor-

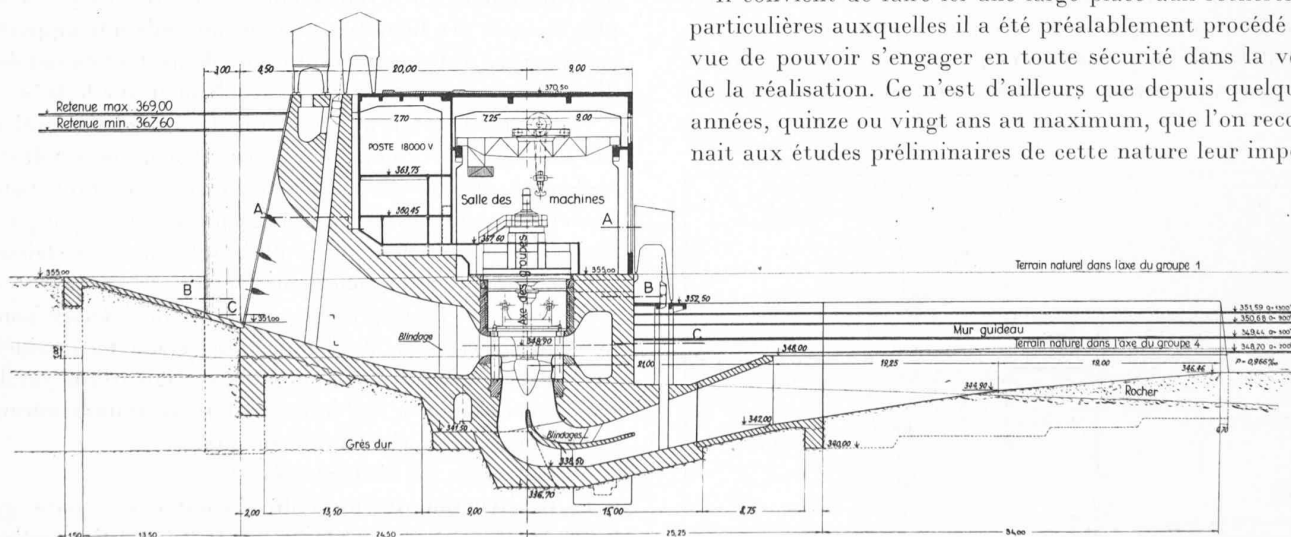


Fig. 4. — Salle des machines. Coupe transversale. — Echelle 1 : 600.

tance réelle et que l'on y consacre le temps et l'argent nécessaires.

Une première catégorie de ces études doit fournir les assurances relatives à l'établissement, à la construction de l'usine : ce sont les *études géologiques*. Une deuxième catégorie donnera des indications sur la tenue des ouvrages en période d'exploitation : ce sont les *essais sur modèles réduits*.

a) *Les études géologiques.*

Pour ausculter le sous-sol, on a utilisé au Verbois la méthode la plus simple, mais aussi la plus sûre, celle des *sondages*. La figure 5 montre la situation en plan de ces derniers. Ils ont été implantés aux points névralgiques des ouvrages : une première série a permis de dresser un profil géologique selon l'axe du barrage, jusqu'à l'extrémité de la digue de Cheneviers ; une seconde série se superpose au tracé du mur en aile de la rive gauche et donne l'allure générale des couches dans le sens de la vallée ; une autre série de sondages est voisine de l'implantation de la digue rive droite.

Ces divers sondages ont été poussés à des profondeurs très variables, s'échelonnant entre 10 et 28 m. et atteignent généralement de 13 à 18 m. Ils ont traversé tout d'abord une couche de sable, de gravier et de gros boulets, recouverte parfois d'un dépôt de limon ou d'humus, puis ont atteint une assise compacte, étanche, celle de la molasse du plateau genevois constituée par des couches alternés de *marnes dures gréseuses* avec des *roches gréseuses*.

Les indications fournies par ces sondages ont été interprétées par des géologues éminents, tout d'abord par *M. Joukowsky*, qui connaît chaque caillou du canton, puis par *M. Lugeon*, professeur à l'École d'ingénieurs de l'Université de Lausanne. Il a été ainsi possible d'établir un véritable plan du sous-sol de la région de l'usine et du barrage, qui a permis d'arrêter le type des fondations, leurs profondeurs approximatives, et qui a fourni également des renseignements précieux pour le choix des méthodes de construction. C'est grâce à la certitude que l'on a ainsi acquise de trouver à une profondeur relativement faible un terrain étanche que l'on a pu adopter le procédé d'exécution des fondations dit « à l'air libre » et

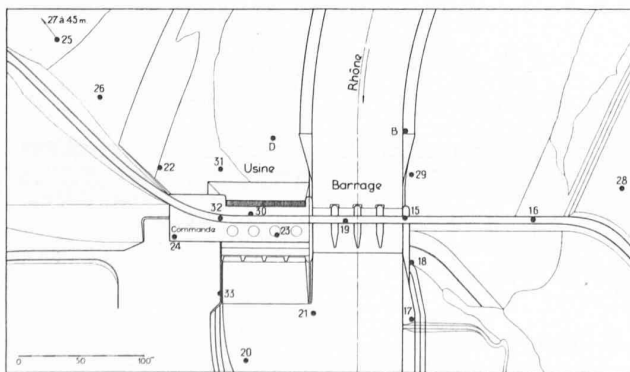


Fig. 5. — Plan de situation des sondages géologiques.

renoncer au procédé classique des caissons avec air comprimé, plus long et plus coûteux.

La figure 6 est une coupe en travers géologique de la vallée dans l'axe de l'usine et du barrage. On y trouve schématisées les diverses formations géologiques : d'abord la couche de sable et gravier dans laquelle le Rhône a creusé son lit et qui recouvre une première épaisseur de grès de hauteur variable. Puis, au-dessous, on constate une couche de marne dure de 3 à 4 m. d'épaisseur, et enfin on retombe sur le grès. En réalité la séparation entre le grès et les marnes n'apparaît pas aussi nettement que sur cette vue ; il y a en effet fort peu de différences entre une marne dure et gréseuse et un grès marneux. De plus, la stratification rencontrée n'est pas très régulière, et au lieu de couches successives bien marquées, on trouve plutôt une formation lenticulaire, ce qui signifie qu'au milieu d'une couche de grès, on peut parfaitement tomber sur une poche, sur une lentille, de marne dure, et inversement.

L'essentiel, c'est de savoir qu'à partir d'un niveau voisin de 347 on se trouvera dans un terrain compact et étanche.

Les coupes d'ouvrages qui sont indiquées sur cette figure 6 permettent de se rendre compte de la manière dont les constructions seront ancrées et reposeront sur les couches sûres.

En ce qui concerne le barrage, on remarque que les piles seront fondées dans la couche de grès, comme aussi les parafoilles amont et aval. La marne dure qui pourrait se rencontrer sous le radier du barrage, et qui constitue d'ailleurs un terrain de fondation qu'on aurait été heureux de rencontrer dans beaucoup de constructions d'usines, se trouvera donc en quelque sorte enchâssée et retenue de tous les côtés, par les piles et les parafoilles, et pourra dès lors être utilisée en toute tranquillité comme fondation du radier.

Pour l'usine, sur la rive droite, l'ensemble des fondations sera également défendu, à l'amont et à l'aval, par des parafoilles qui seront fondés sur le grès. La partie la plus chargée des fondations de l'usine, celle qui supporte les groupes, se trouvera tout naturellement, et du fait des dimensions nécessaires, reposer également sur le grès.

Les murs en béton qui constituent les digues latérales, sur la rive droite comme sur la rive gauche, descendront également jusque sur la couche compacte, tant pour s'asseoir sur un terrain suffisamment résistant que pour réaliser la fermeture étanche de la retenue, et ne laisser ainsi aucun interstice par lequel l'eau pourrait s'infiltrer.

On a profité de la présence des puits de sondage pour procéder à des essais de pompage des eaux souterraines. On a décelé en particulier une nappe phréatique sur la rive gauche dont le débit nécessitera certaines précautions pendant l'exécution des travaux.

b) *Les essais sur modèles réduits.*

La construction de l'usine du Verbois a posé toute une série de problèmes complexes, dont la solution relève difficilement des formules et des calculs théoriques, mais

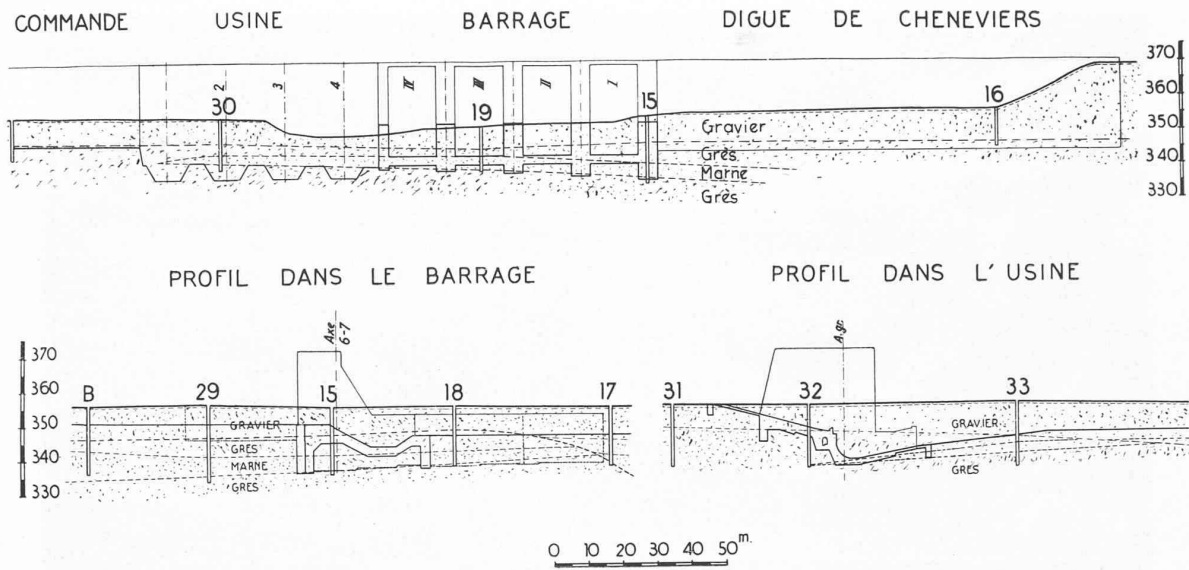


Fig. 6. — Coupes géologiques.

doit au contraire être recherchée par approximations successives, effectuées selon certaines lois et méthodes, sur un modèle réduit, c'est-à-dire sur une usine en miniature.

Les plus importants de ces problèmes étaient :

1. celui des chasses,
2. celui du raccordement du bief du Verbois à celui de Chancy-Pougny, au point de vue construction comme au point de vue exploitation,
3. celui des affouillements à l'aval du barrage.

Par « chasse » on entend simplement ici l'opération de vidange du bassin de la retenue, ayant pour but de vider rapidement l'accumulation, puis d'y faire passer un débit important afin d'en « chasser » les graviers et de procéder ainsi périodiquement à une opération de nettoyage pour éviter l'engrèvement de la retenue.

Ce problème des chasses n'est d'ailleurs pas nouveau pour les usines installées sur le Rhône à l'aval de Genève, celle de Chèvres et celle de Chancy-Pougny. L'Arve a, en effet, un régime très mouvementé et apporte à Genève, tous les produits d'érosion des terrains alpestres qu'elle traverse ; d'après les nombreuses études faites à ce sujet par des spécialistes éminents, cette rivière charrie à Genève en moyenne par an de 150 000 à 200 000 m<sup>3</sup> de matériaux solides et transporte annuellement une quantité de matériaux fins en suspension d'environ 1 600 000 m<sup>3</sup>.

Une bonne partie des matériaux solides, celle comprenant surtout les plus gros échantillons, est draguée dans l'Arve avant sa jonction avec le Rhône ; celle qui n'est pas absorbée par les poches de dragage se dépose dans la retenue de Chèvres et le fera plus tard dans celle du Verbois. A ce dépôt s'ajoute celui d'une certaine quantité de matériaux fins, par suite de la tranquillisation du courant dans le bassin d'accumulation. Il ne faut pas seulement faire passer ces dépôts au travers du barrage à

l'aide d'un courant violent, il faut encore éviter qu'ils se déposent à l'aval de l'usine, car il en résulterait une surélévation du plan d'eau qui absorberait une partie de la chute si chèrement acquise. Et c'est ainsi qu'apparaît le problème de la pente minimum à donner au canal de fuite.

Il est difficile de résoudre une telle question théoriquement ; toute une série d'éléments divers, et reposant sur l'observation directe, entre en jeu. Il en est de même de l'étude des affouillements à l'aval du barrage, affouillements créés par la nappe d'eau tourbillonnante qui passe à travers les vannes, et qui pourraient, s'ils atteignaient une certaine profondeur, mettre en péril la sécurité et la stabilité du barrage.

On a donc recours, depuis quelques années, pour l'étude de ces questions, aux essais sur modèle réduit, et pour l'usine du Verbois, c'est au *Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich* que l'on s'est adressé. Ces essais, qui ont été effectués de janvier à novembre 1938, ont été poursuivis sous l'experte direction de M. le professeur *Meyer-Peter*, directeur de ce laboratoire.

Il peut paraître téméraire à première vue de vouloir faire état des constatations relevées sur le jouet soigné que constitue un modèle à petite échelle de l'installation à réaliser pour dire ce qui se passera sur les ouvrages définitifs et pour en tirer des conclusions souvent lourdes de conséquences, et c'est évidemment là un des aspects délicats de ces études. Aussi les savants ont-ils commencé par mettre sur pied un certain nombre de principes, les lois de similitudes, qui établissent dans quelles conditions et de quelle manière on peut appliquer aux ouvrages définitifs les résultats acquis sur les modèles à échelle réduite. Ces lois, vérifiées par la pratique, fixent en particulier les rapports que doivent présenter entre elles les

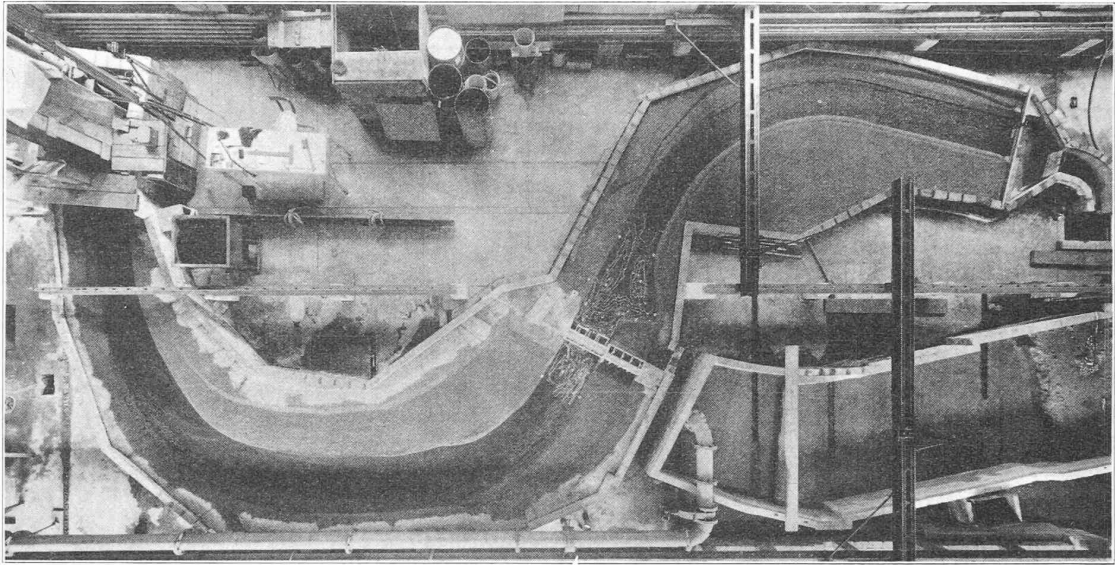


Fig. 7. — Modèle réduit au 1 : 100. Vue générale à vol d'oiseau.

différentes échelles à admettre pour les divers éléments entrant en ligne de compte (longueurs, débits, temps, diamètre des matériaux transportés, etc.).

C'est ainsi qu'en tenant compte de ce que les matériaux roulés étaient représentés, pour ces essais, non par des petits cailloux, mais par des déchets de briquettes de charbon, d'une granulométrie et d'une densité appropriées, le laboratoire de Zurich a admis en définitive pour la construction du modèle et pour les essais les échelles suivantes :

pour les longueurs, largeurs et hauteurs . . . . .	1 : 100
pour les volumes . . . . .	1 : 100 000 000
pour les débits liquides et solides . . . . .	1 : 100 000
pour les temps . . . . .	1 : 360
pour le diamètre des matériaux roulés	1 : 8

Pour étudier les problèmes généraux et notamment celui des chasses, il était nécessaire de disposer d'un modèle représentant à la fois le cours du fleuve sur une certaine longueur et l'obstacle, c'est-à-dire le barrage, que l'on se propose d'édifier sur son parcours. On a donc été amené à construire un modèle représentant l'usine et le barrage avec une section du fleuve de 1500 m. à l'amont et de 1000 m. à l'aval de l'usine (fig. 7 et 8). Grâce à l'échelle de 1 : 100 admise, cet ensemble a pu tenir dans un rectangle d'environ 17 m. sur 10 m. L'échelle des temps de 1 : 360 permet d'examiner en un jour ce qui se passera en réalité dans une année, et la représentation d'une chasse de 48 heures a pu ainsi se faire en 8 minutes.

Les essais de contrôle concernant les affouillements à l'aval du barrage ont été effectués sur un modèle partiel qui a été construit à l'échelle de 1 : 50, c'est-à-dire au double de l'échelle admise pour le modèle général.

Les essais proprement dits ont été précédés d'une suite de 9 essais préliminaires qui avaient pour but de déter-

miner les éléments du problème, notamment la nature et la rugosité du lit de la rivière et l'échantillonnage des matériaux charriés. Il s'agissait en effet tout d'abord de reproduire sur le modèle l'état d'équilibre existant actuellement dans le fleuve et de s'assurer que les matériaux charriés seraient transportés, lors des essais, dans des conditions semblables à celles constatées dans la nature. Pour cela, on a introduit à l'origine du modèle une certaine quantité de matériaux solides — en l'espèce des déchets de charbon — suivant une loi d'alimentation en fonction du temps, qui devait remplacer la loi de charriage du fleuve, et on a modifié la granulométrie des matériaux introduits ainsi que la rugosité des rives et du fond du fleuve jusqu'à ce qu'on arrive à des résultats comparables à ceux constatés dans la nature.

Une fois les conditions d'écoulement du fleuve reproduites dans le modèle, on a placé dans ce dernier le bar-

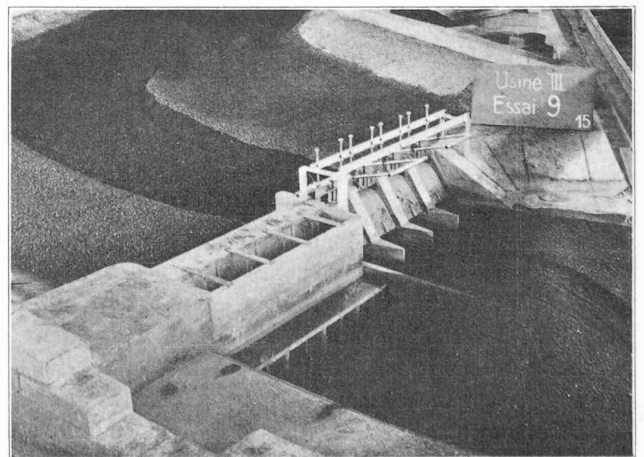


Fig. 8. — Modèle réduit au 1 : 100. Vue prise de l'aval de l'usine.

rage et l'usine et on a commencé les essais proprement dits.

Une première série de 8 essais a été consacrée à l'étude des chasses et du passage des matériaux transportés à travers le barrage et dans le canal de fuite. On n'a pas manqué de tenir compte dans ces essais de l'influence du remous du bief de Chancy-Pougny pour déterminer le niveau auquel devra être tenu ce bief pendant les périodes de chasse.

Cette première série d'essais a permis d'améliorer les caractéristiques générales de l'aménagement, notamment en réduisant la pente du canal de fuite de 1,25 ‰ à 0,96 ‰, et a donné également des indications précieuses au sujet de la coordination du bief du Verbois et de celui de Chancy-Pougny pendant les périodes de chasse.

La question des chasses tirée au clair, on a abordé dans une nouvelle série d'essais, qui a comporté 27 essais, le délicat problème des *affouillements* à l'aval du barrage. La figure 9 donne le profil du radier du barrage. En l'examinant, on se rend compte facilement du rôle de bassin d'amortisseur d'énergie joué par ce radier sur lequel viennent converger et se combattre les nappes d'écoulement provenant de la vanne supérieure et de la vanne inférieure. Selon la façon dont l'énergie de l'eau aura été amortie dans ce bassin, la force de cette nappe tourbillonnante sera plus ou moins diminuée et les dégâts, c'est-à-dire les affouillements, qu'elle créera à l'aval du barrage seront plus ou moins importants. Par ailleurs, et comme il est évident que les matériaux provenant des affouillements doivent se déposer quelque part, l'importance des bancs de gravier qui se forment devant la sortie des turbines dépend de la profondeur des affouillements. La question de ces dépôts est donc liée à celle des affouillements et la solution de l'ensemble de ce problème dépend en définitive de la forme qui sera donnée au radier du barrage pour amortir le plus possible l'énergie des nappes d'eau passant au travers des vannes.

Le tracé I de la figure 9 est celui du radier de l'avant-projet. C'est d'après ce profil que le modèle a été construit et que les premiers essais ont été effectués. Pour un débit

de 900 m<sup>3</sup>/sec. passant par le barrage, à raison de 340 m<sup>3</sup>/sec. par les vannes clapets et de 560 m<sup>3</sup>/sec. par les vannes de fond, on a constaté des affouillements d'une profondeur moyenne de 7,80 m. et d'une profondeur maximum de 10 m. et, en contre-partie de ces affouillements, la formation d'un banc de sable d'une hauteur de 2,60 m. devant la sortie des turbines. Ces indications ont ainsi montré très nettement qu'il n'était pas possible de conserver ce profil de radier.

On a effectué dès lors 27 essais successifs en étudiant 14 profils différents, et on est arrivé à retenir provisoirement le profil VIII, indiqué à la figure 9. Par rapport au profil I initial, ce profil VIII comporte tout d'abord un approfondissement d'un mètre de la partie inférieure de la cuvette, puis une pente plus accentuée de sa paroi aval, et enfin un allongement de la longueur du seuil aval qui passe de 4,20 m. à 8 m. à partir de l'extrémité de la pile.

Avec ce profil VIII, on a constaté, toujours pour un débit de 900 m<sup>3</sup>/sec., des affouillements d'une profondeur moyenne de 3,50 m. et d'une profondeur maximum de 3,60 m. et un dépôt de gravier d'une hauteur de 70 cm. à la sortie des turbines.

Ces chiffres montrent clairement tous les avantages qui ont été retirés du changement de profil du radier puisque, avec le profil VIII, on se trouve, moyennant un supplément de dépenses relativement peu important, en face de résultats parfaitement admissibles.

Les figures 10 et 11 illustrent les essais correspondant aux deux profils I et VIII mentionnés ci-dessus et reportés sur la figure 9. Ces résultats ont du reste été contrôlés sur un modèle construit à l'échelle du 1 : 50.

On a profité de la présence de ce nouveau modèle pour rechercher si l'on pouvait encore améliorer les conditions d'anéantissement de l'énergie de l'eau dans le bassin amortisseur du radier en faisant varier l'importance relative des nappes passant par la vanne supérieure et par la vanne inférieure. Ces deux jets d'eau ont en effet, après s'être rencontrés et avoir lutté l'un contre l'autre dans la cuvette du radier, une résultante dont l'intensité et la direction dépendent de leurs importances respectives. On a été ainsi amené à constater qu'en augmentant de 50 cm. la hauteur de la vanne supérieure, ce qui a pour conséquence d'augmenter le débit passant par le clapet abaissé, l'amortissement de l'énergie des nappes dans le bassin du radier était amélioré de telle façon qu'il était possible de faire une économie de 3,80 m. dans la longueur du seuil aval du barrage.

Avant de conclure définitivement, on s'est encore demandé ce qui se passerait en cas d'écoulement asymétrique de la rivière à travers le barrage, c'est-à-dire au cas où certaines passes du barrage seraient fermées. On pouvait en effet craindre avec un tel écoulement la formation de tourbillons transversaux pouvant donner lieu à des affouillements graves. On a donc repris le modèle au 1 : 100 pour procéder à des essais d'ensemble avec écoulement asymétrique. Connaissant l'ordre de grandeur de l'exactitude des résultats acquis avec ce modèle au

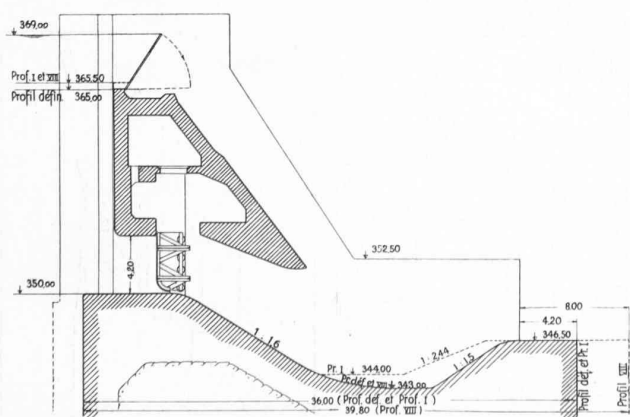


Fig. 9. — Radier du barrage. Profils d'essais.

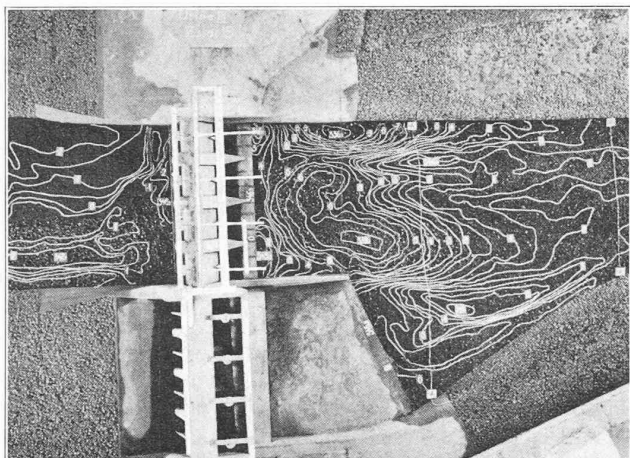


Fig. 10. — Modèle réduit au 1 : 100. Etat des lieux après essai avec profil du radier du barrage selon le tracé I de la fig. 9.

1 : 100, il n'a pas été nécessaire de procéder à des essais de vérification sur un modèle au 1 : 50. Les 8 essais complémentaires ainsi effectués ont fourni des résultats pleinement rassurants et ont permis d'établir le régime suivant lequel les vannes du barrage pourraient éventuellement être mises hors service pour réparation.

Les résultats acquis par de tels essais sont si précieux et donnent une telle sécurité, qu'ils constituent une étape indispensable des études d'un aménagement hydraulique.

#### IV. Les travaux.

Le principe adopté pour la construction de l'usine du Verbois est celui d'exécution par grandes fouilles à l'air libre à l'intérieur de batardeaux, laissant ainsi de côté le procédé de construction par caissons avec emploi d'air comprimé.

Les travaux de l'usine et du barrage du Verbois comportent deux phases principales (fig. 12). La première phase, qui est en cours d'exécution, comprend un batardeau sur la rive droite pour la construction des deux premiers groupes de l'usine, et un batardeau sur la rive gauche pour la construction des trois premières passes du barrage. Entre ces deux batardeaux reste un espace libre de 40 m. environ pour le passage du fleuve.

Cette première phase a commencé par la construction de la pile III à l'intérieur d'un batardeau spécial dont chaque paroi est constituée par une double rangée de palplanches, avec des entretoisements en béton et des étançonnements entre parois à l'intérieur de l'enceinte. Afin de dégager autant que possible la passe devant rester libre pour l'écoulement du fleuve, ce batardeau sera enlevé aussitôt que la maçonnerie de la pile III aura atteint le niveau des hautes eaux. A partir de cet enlèvement, le batardeau de la rive gauche se raccordera directement sur la pile III qui constituera dès lors un point d'appui bien établi au milieu de la rivière ; il sera fermé, côté rive, de façon à protéger la fouille des infiltrations

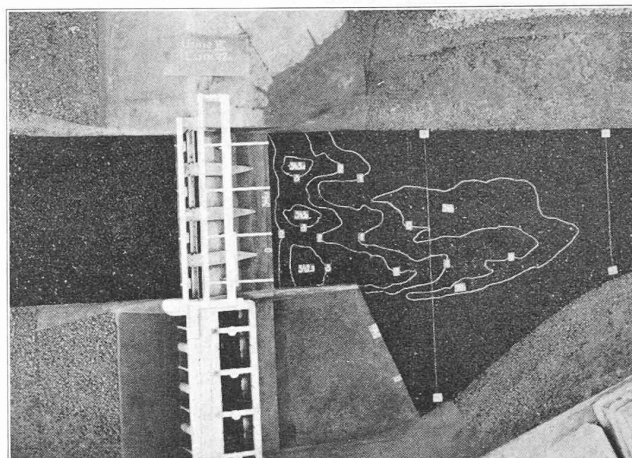


Fig. 11. — Modèle réduit au 1 : 100. — Etat des lieux après essai avec profil du radier du barrage selon le tracé VIII de la fig. 9.

de la nappe phréatique dont les sondages ont révélé la présence dans cette région.

Après l'achèvement des trois premières passes du barrage et des deux premiers groupes de l'usine, on démolira le batardeau de la rive gauche de façon à permettre le passage du fleuve à travers de ces trois ouvertures de 14 m. de largeur chacune, puis on commencera la deuxième phase en construisant un nouveau batardeau sur la rive droite, se raccordant à la pile III et englobant en quelque sorte le batardeau rive droite de la première phase. Une fois cette nouvelle enceinte en place, on démolira le batardeau rive droite de la première phase et on pourra ainsi procéder à la construction des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> groupes de l'usine et de la quatrième passe du barrage.

Dès l'achèvement de ces travaux, ce dernier grand batardeau sera enlevé et les ouvrages se présenteront alors sous leur aspect définitif.

Comment seront réalisés les batardeaux de l'usine du Verbois ?

Il faut tout d'abord que leur hauteur soit suffisante pour que les fosses de travail soient à l'abri des inondations, tout au moins jusqu'à un certain débit du fleuve

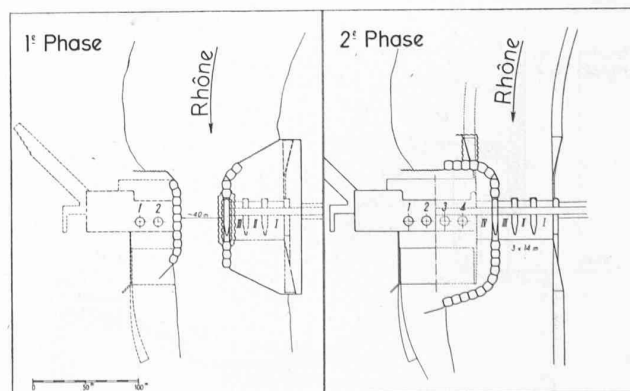


Fig. 12. — Schéma des phases de construction.

qui, pour le chantier du Verbois, a été fixé à 1200 m<sup>3</sup>/sec. Dans ces conditions, l'arête supérieure des batardeaux sera arasée à une cote variant de 355,00 à l'aval à 356,50 et 357,50 à l'amont, ce qui constitue une revanche de 2,50 à 5 m. par rapport au niveau moyen des eaux actuelles.

Les batardeaux seront constitués par des palplanches métalliques du type Lackawanna, soit plates, soit en forme de Z (fig. 13), et d'un type très robuste, puisque le profil en Z pèse 197 kg. au m<sup>2</sup>.

Dans les endroits peu exposés, tels que les parois aval des enceintes, ou pour isoler le batardeau rive gauche de la première phase de la nappe phréatique, on battra simplement un rideau de palplanches plates.

Dans les endroits un peu plus exposés, c'est-à-dire par exemple sur les ailes amont des batardeaux, on se contentera toujours d'un simple rideau de palplanches, étayé bien entendu par du remblai, mais en utilisant cette fois le profil en Z, en tracé chevronné.

Enfin, dans les parties qui seront exposées à un courant violent, les batardeaux seront réalisés par des sortes de cellules constituées par deux parois de palplanches espacées de 6 à 8 m. et raidies par des cloisons transversales en palplanches. Ces cellules seront elles-mêmes remplies de gravier, de façon à leur donner la stabilité voulue.

Toutes les palplanches, à quelque type qu'elles appartiennent, seront enfoncées à l'aide de sonnettes ou de marteaux trépideurs jusqu'à ce qu'elles arrivent sur le terrain dur et étanche. Elles seront généralement tenues

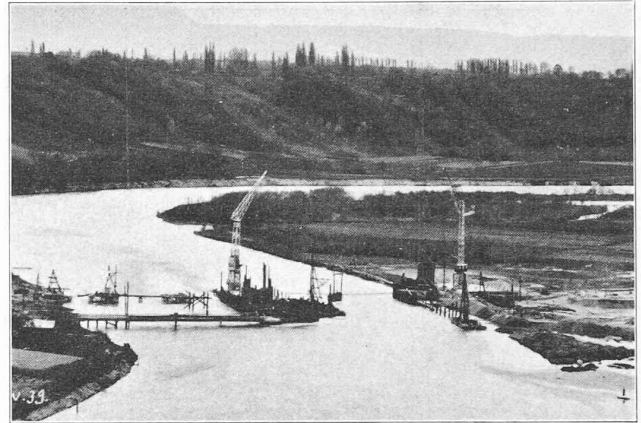


Fig. 14. — Vue du chantier de l'usine-barrage, prise de l'amont, en avril 1939. Construction du batardeau de la pile III et du premier batardeau de la rive droite.

au-dessus de ce terrain par la couche de gravier qu'elles devront traverser, de sorte que l'ancrage dans le rocher ou la marne dure pourra être relativement peu important puisqu'il aura surtout pour but d'assurer l'étanchéité.

Cependant, il est possible que, dans certains cas, cette couche de gravier ait disparu, par exemple pour le batardeau de la seconde phase qui devra être implanté dans une partie de la rivière où, pendant la première phase, le courant violent du fleuve aura peut-être enlevé la couche de gravier. Dans ce cas, le batardeau sera réalisé comme indiqué sur la coupe située à l'angle inférieur gauche de

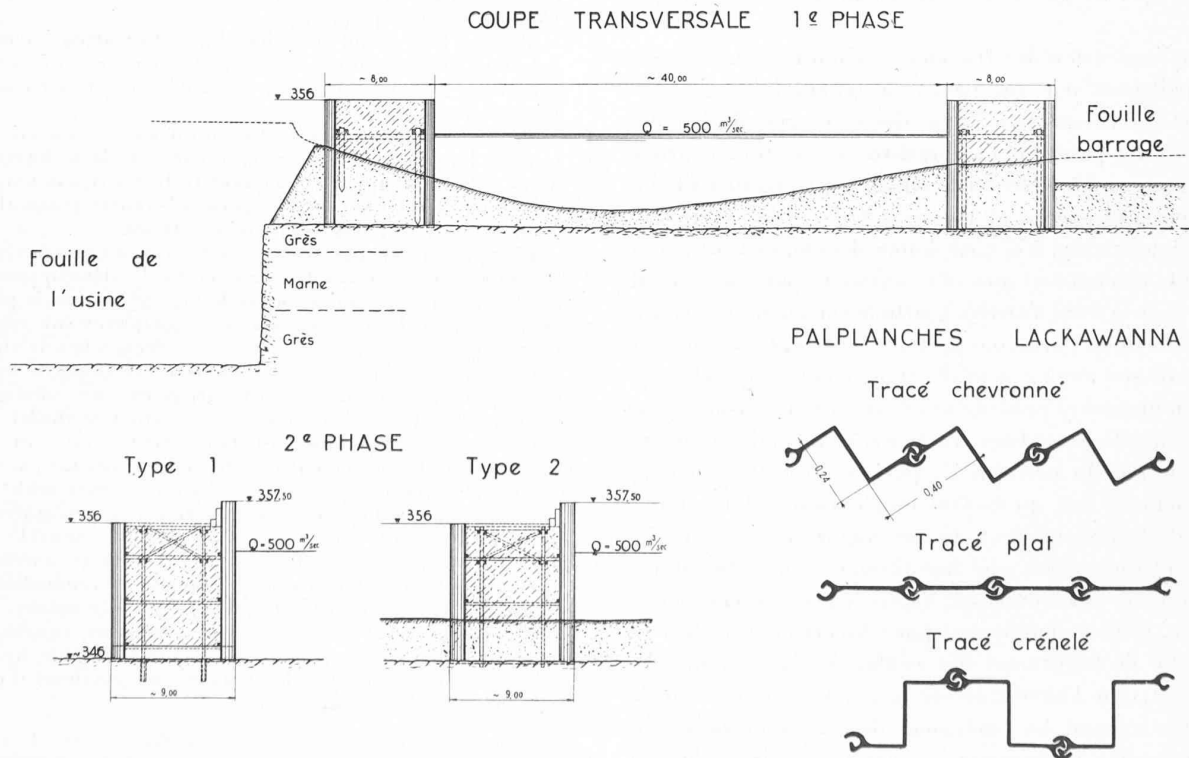


Fig. 13. — Coupes schématiques des batardeaux et types de palplanches.

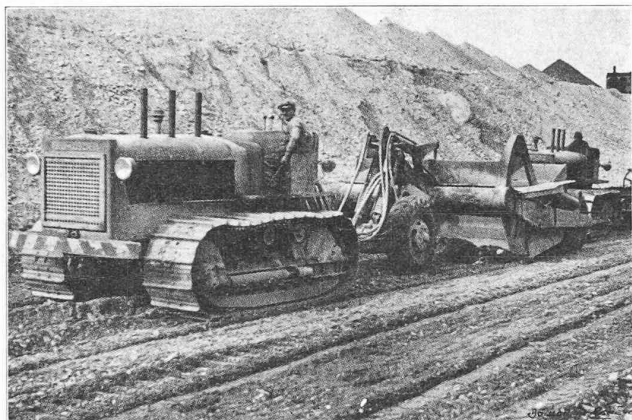


Fig. 15. — «Scraper» utilisé pour les terrassements de la correction du Rhône.

la fig. 13, et sa stabilité et son étanchéité seront assurées par une semelle de béton qui sera coulée à la base de la cellule et qui sera elle-même reliée avec le sous-sol par des pieux forés et ancrés dans le rocher.

La coupe transversale indiquée au haut de la figure 13 donne une image simplifiée de l'exécution de la première phase. On voit au centre le fleuve s'écoulant dans une passe de 40 m. de largeur entre deux batardeaux du type cellule. Sur la rive droite, la fouille de l'usine est en cours à l'abri du batardeau, et dans la rivière, côté rive gauche, on procède aux fouilles du barrage. Ces travaux de fondation nécessiteront de multiples précautions, puisqu'en certains points, le fond des fouilles doit être descendu jusqu'à près de 20 m. au-dessous du niveau des hautes eaux.

Pour l'exécution des travaux, le chantier sera desservi principalement par une passerelle reliant les deux rives et située directement à l'aval des ouvrages, de laquelle partiront des passerelles secondaires, et par 6 mâts grues.

Les travaux de correction du Rhône sont effectués à l'aide d'un matériel spécial et nouveau. On a utilisé à cet effet des «scrapers» (fig. 15), c'est-à-dire des engins tirés par de puissants tracteurs et qui sont constitués par une sorte de caisse dont le fond s'ouvre, gratte le sol au moyen d'une des arêtes de la partie ouvrante, et se remplit au fur et à mesure de son avancement. L'équipement d'une telle machine comprend normalement un scraper et un tracteur ou exceptionnellement deux tracteurs, le second renforçant alors l'action du premier. La particularité de ces engins réside dans le fait qu'ils sont employés à la fois comme engins de terrassement et comme engins de transport. La fermeture du scraper une fois terminée, opération qui se fait d'ailleurs par commande depuis le tracteur et en cours de route, tout le chargement part directement au lieu de dépôt. Le déchargement des déblais se fait, en marche également, par l'ouverture de la partie inférieure de la caisse du scraper. Le rendement de cet engin varie évidemment selon la distance du transport et la nature du terrain ; pour un terrain graveleux et une distance de

transport ne dépassant pas 150 m., il peut atteindre pratiquement 30 à 35 m<sup>3</sup> par heure.

\* \* \*

Tous les travaux et fournitures adjugés jusqu'à ce jour l'ont été à des entreprises et à des industries genevoises.

Les travaux de l'usine et du barrage ont été confiés à l'entreprise ZOCER, un consortium qui réunit la S. A. Conrad Zschokke, la S. A. Ed. Cuénod, la S. A. Victor Olivet et l'entreprise ERDIGT. Les travaux de correction du Rhône à l'aval de l'usine sont exécutés par l'entreprise ERDIGT, une association des entreprises Rubin, Dionisotti, Indumi. Gini et Thorens Les turbines seront livrées par les Ateliers des Charmilles et les alternateurs par les Ateliers de Sécheron.

Plus de 16 millions de commandes ont ainsi été passées à Genève jusqu'à ce jour. C'est là une des conséquences immédiates et heureuses de la construction de cette usine du Verbois sur l'activité économique genevoise.

## Les étapes de l'architecture du XIX<sup>e</sup> siècle en Suisse,

par EDMOND VIRIEUX, architecte cantonal, à Lausanne.<sup>1</sup>

### Caractères généraux.

Il peut sembler à l'observateur superficiel que le dix-neuvième siècle ait apporté peu d'éléments nouveaux à l'architecture. Car les constructions de cette période ne paraissent à première vue, pour la plupart, que des imitations de monuments anciens ou des assemblages d'éléments divers empruntés à différentes époques.

Mais si l'on prend la peine d'analyser attentivement les créations architecturales du siècle dernier, on y découvre des caractères très marqués qui les différencient nettement de l'œuvre des âges précédents.

En premier lieu, l'architecture du dix-neuvième siècle a su profiter largement des énormes progrès de la technique moderne. Elle a fait appel à une quantité de matériaux nouveaux, utilisé en grand nombre certaines substances jusqu'alors inconnues ou dont l'usage était très restreint.

L'emploi du fer, par exemple, est l'une des grandes innovations des constructeurs de notre temps. Le développement de l'industrie en a permis l'emploi le plus général et le plus fréquent. Son utilisation en masse a complètement renouvelé l'art de bâtir et conduit à de nouvelles recherches de statique.

Le grand nombre d'autres métaux et de produits de toute nature qui furent mis à contribution par les constructeurs modernes confère à leurs œuvres un caractère inédit. Aussi, une maison contemporaine, quel que soit le style dont on l'ait revêtue, est-elle nettement différente de celles du passé.

Mais les architectes ne se sont point bornés seulement à innover dans le domaine des matériaux et des applications de la statique. Ils ont aussi complètement renouvelé la manière de concevoir les différents programmes de construction que posent les habitations, les bâtiments de l'industrie et du commerce, comme les édifices publics de toute nature. Ils ont aussi créé de nouveaux types pour certaines constructions inconnues des siècles précédents, comme par exemple : les gares de chemins de fer, les musées, les pavillons d'exposition, les installations sportives.

<sup>1</sup> Nous sommes redevables à l'obligeance du Comité central de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, de l'autorisation de reproduire cette remarquable étude extraite de l'ouvrage jubilaire 100 Jahre - S. I. A.