

Dans le sillage de Maurice Gariel...

Recherches et progrès dans le domaine des turbines hydrauliques

Research and progress in hydraulic turbine design

PAR S. CASACCI

CHEF DU DÉPARTEMENT « TURBINES »
DES ÉTABLISSEMENTS NEYRPIG, GRENOBLE

J. DUPORT

CHEF DU DÉPARTEMENT « MACHINES HYDRAULIQUES »
A LA SOGREA, GRENOBLE

ET

H. PEYRIN

INGÉNIEUR DU DÉPARTEMENT « TURBINES »
DES ÉTABLISSEMENTS NEYRPIG, GRENOBLE

Tous trois membres des équipes qu'animait et guidait M. Maurice Gariel, les auteurs évoquent certains moments particulièrement saillants ou curieux de l'évolution des turbines hydrauliques.

L'art des machines hydrauliques n'a pas progressé selon une ligne continue; son histoire est parsemée de tournants inattendus, de découvertes à demi fortuites, de chemins longtemps suivis puis abandonnés, parfois repris plus tard. Sous une apparente permanence de forme et de conception, les turbines hydrauliques, même les plus traditionnelles, ont plus profondément changé que beaucoup d'autres produits de la technique. Leur histoire, qu'on pourrait faire remonter à l'antiquité, n'est pas celle d'un monde fini, mais celle, au contraire, d'un monde plus vivant que jamais; le souffle qui l'anime lui vient de la pensée et de l'action de quelques hommes exceptionnels comme M. Maurice Gariel, créateur et guide d'équipes autant que découvreur.

Reminiscing as members of research teams guided and inspired by M. Maurice Gariel, these three Authors recall some of the highlights and more curious incidents in the history of hydraulic turbine development.

Turbine design progress has been anything but steady. Luck and the unexpected have both played an important part; various lines of thought pursued at great length and then abandoned were sometimes continued again later. Though hydraulic turbines are outwardly similar in appearance and design, even the most traditional among them have probably undergone deeper changes during their development than many other technical products. Their history, which can be traced back to a very early age, has by no means reached its final point; on the contrary, turbine research and design are more alive than ever before, largely due to the thoughts and actions of a few such exceptional men as M. Maurice Gariel who was both a great leader and creator of research teams and a discoverer of facts.

I. — INTRODUCTION

Depuis l'avènement de l'utilisation de la houille blanche, pour la production d'énergie électrique, à la fin du siècle dernier, l'art des turbines hydrauliques a fait des progrès considérables et d'ailleurs continus.

L'évolution dans ce domaine est certainement

aussi importante que ce qu'elle a été dans les autres domaines techniques, bien qu'elle soit moins spectaculaire. C'est qu'en effet il n'y a eu depuis fort longtemps que peu de métamorphoses radicales des turbines et des aménagements hydroélectriques. Il faut rendre hommage aux

pionniers qui avaient su fouiller suffisamment les problèmes et donner presque dès le début, à ces machines, l'aspect global qu'elles ont conservé depuis. Même quand on voit apparaître des groupes hydroélectriques de conception nouvelle, c'est souvent parce qu'on a repris des idées parfois anciennes dont l'application n'avait pas été poursuivie au moment de leur apparition.

C'est ainsi que la forme moderne des grandes Pelton verticales, est déjà préfigurée par certaines machines construites avant 1930. On pourrait faire remonter la genèse des groupes axiaux à l'époque des études de l'aménagement d'Assouan, poursuivies en 1927. Les turbines Francis coniques à aubes mobiles, sont l'application d'idées antérieures à 1923.

Les vannes de garde cylindriques, disposées autour des distributeurs des turbines Francis, telles que celles dont le montage est en cours dans l'usine de Monteynard, s'apparentent aux très anciennes dispositions de turbines à tiroir, et l'on peut dire que, dans cette réalisation, ce qui est nouveau, c'est l'utilisation de ce tiroir comme vanne de garde d'une turbine à distributeur mobile.

Doit-on dire pour autant que les chercheurs ont maintenant beaucoup moins d'imagination que n'en ont eu leurs anciens? Certes pas, mais cette imagination s'exerce plutôt dans la recherche des perfectionnements et des mises en application.

Le fait que certaines idées, parfois anciennes, soient devenues applicables, le fait que les rendements, les vitesses spécifiques, les puissances unitaires se soient améliorés de façon continue et dans une proportion considérable, on le doit avant tout à une longue et patiente recherche.

Nous nous proposons de montrer quelques exemples des progrès de la technique des turbines hydrauliques et d'évoquer quelques phases particulièrement intéressantes des recherches de toutes sortes, qui ont permis l'accomplissement de ces progrès.

Le temps de la recherche individuelle est

révolu. Dans l'art des turbines hydrauliques comme ailleurs, la recherche est le fait d'équipes, parfois nombreuses, qu'anime un esprit toujours tendu vers l'avenir. M. Gariel fut à la fois le fondateur, l'animateur et le guide de l'une de ces équipes, à laquelle nous avons le bonheur d'appartenir.

Si cette équipe a pu œuvrer avec succès au développement de notre technique, elle ne le doit pas qu'à ses propres efforts.

M. Gariel avait le don de pressentir, parmi de nouvelles idées, celles qui pouvaient être génératrices de progrès; il avait aussi le don de constituer les équipes polyvalentes aptes aux genres de recherches et d'études appropriés à l'aboutissement concret de ces idées. Il savait leur insuffler les convictions et, s'il le fallait aussi, l'enthousiasme qui les portait à doubler les caps des difficultés qu'elles rencontraient dans leur propre technique. Pour aplanir les autres, il les plaçait parfois en contact avec d'autres chercheurs et d'autres équipes étrangères à notre entreprise.

Et à l'heure des résultats, concrétisés par des dessins de construction et des caractéristiques de fonctionnement, il savait développer un sage et tenace effort d'information auprès de personnalités et de maîtres d'œuvre, pour les inciter à examiner en toute objectivité ce que la technique des aménagements pouvait gagner à utiliser les nouvelles machines nées de tant de longues collaborations.

Notre propos est de retracer surtout l'évolution de la technique des turbines, qui a conduit à la réalisation des grands équipements hydroélectriques modernes.

Toutefois, nous citerons pour mémoire les turbines « tourbillon » sans distributeur mobile, du type Francis ou du type hélice à pales réglables, qui ont eu une certaine vogue à l'époque des petites installations de basse chute.

Nous citerons aussi les turbines à étages multiples du type Jonval qui entrent aujourd'hui dans la construction des turbo-foreuses.

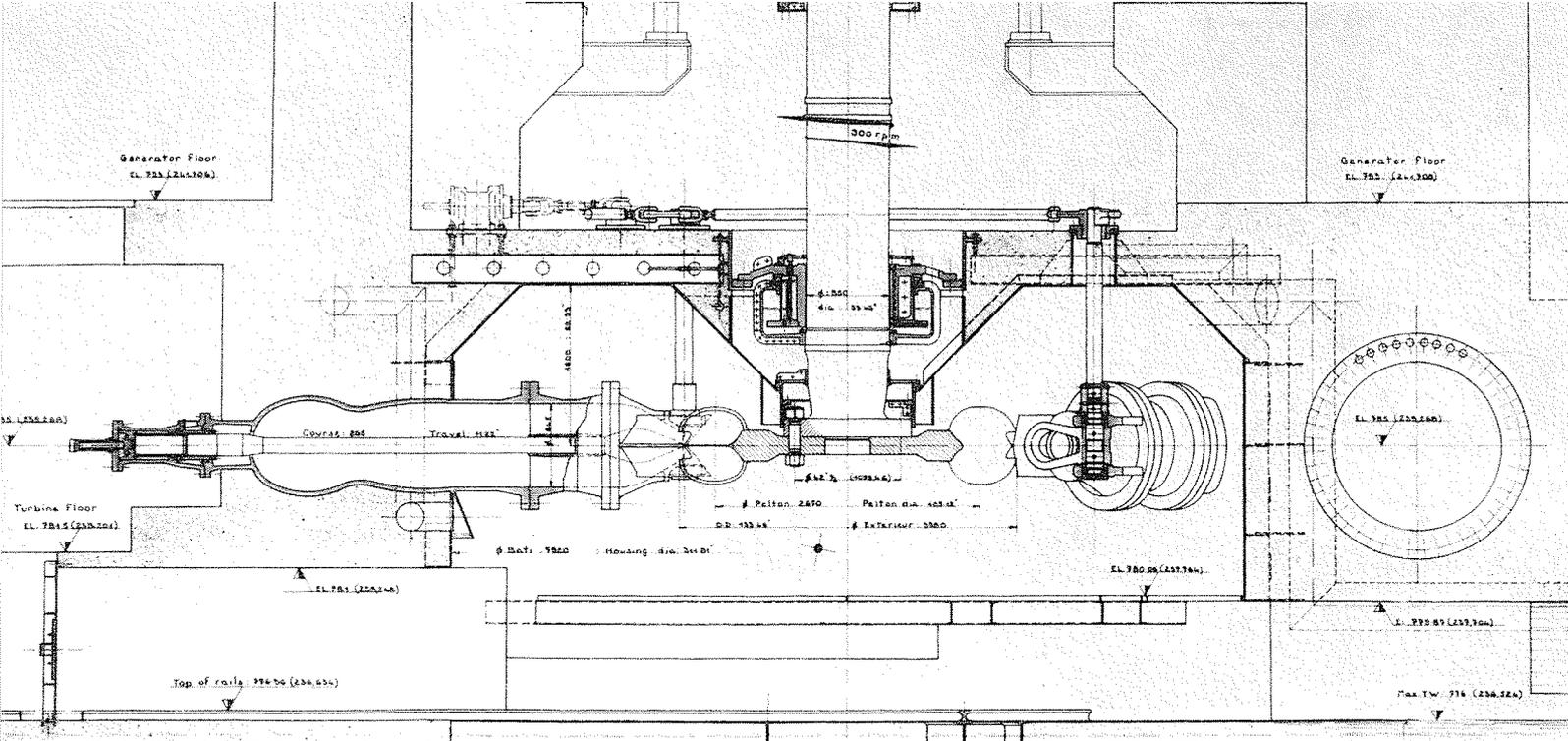


FIG. 2. — Bridge River (Canada) (1957).

Turbine Pelton à 6 jets, de 83 000 ch sous une chute de 385 m.
Vitesse : 300 tr/mn (n_s 51).

II. — LES TURBINES PELTON

Les métamorphoses les plus marquantes des turbines Pelton remontent pratiquement au début de leur utilisation industrielle, et ont été le fruit de deux idées importantes : l'injecteur à aiguille et le déflecteur ; ce dernier ayant permis de supprimer les injecteurs de compensation et les injecteurs basculants.

Par la suite, l'essor de la construction soudée a conduit à des formes plus simples des bâtis et des capotes.

Nous parlerons surtout de l'évolution des grandes Pelton verticales. La figure 1 montre la coupe des turbines d'Arhzerouffis, turbines de 46 000 ch sous 360 mètres, construites en 1946. Le collecteur qui amène l'eau aux quatre injecteurs est placé en dessous du plan des jets et le bâti a une forme de révolution dont la ligne méridienne a la forme d'un arc rampant.

Quelques années après, les Pelton verticales ont subi des transformations qui apparaissent sur la figure 2 représentant les turbines de Bridge River : turbines à 6 jets, de 83 000 ch sous 385 mètres ; le collecteur est maintenant situé dans le même plan que les jets, les tiges

de commande d'aiguille traversant les culottes d'alimentation, cependant que le bâti a des formes beaucoup plus simples : fond conique, plafond plat et forme générale cylindrique.

Les essais de laboratoire ont permis de mettre au point les formes de culottes, de collecteurs, et les formes simplifiées de bâtis et de plafonds permettant d'obtenir de très bons rendements. Le n_s global de cette turbine est de 51, chiffre qui évidemment ne peut être atteint que grâce au grand nombre des jets.

La figure 3 est la vue en plan de cette même machine et montre clairement la constitution du collecteur à culottes injecteurs.

Les figures 4 à 6 montrent quelques réalisations assez récentes de Pelton verticales du même style :

- Les turbines de Roselend de 113 000 ch sous 1 112 m de chute.
- Les turbines de Barrados de 21 000 ch sous 580 m ; construites en 1952 pour l'Espagne. Ces turbines présentent une particularité sur

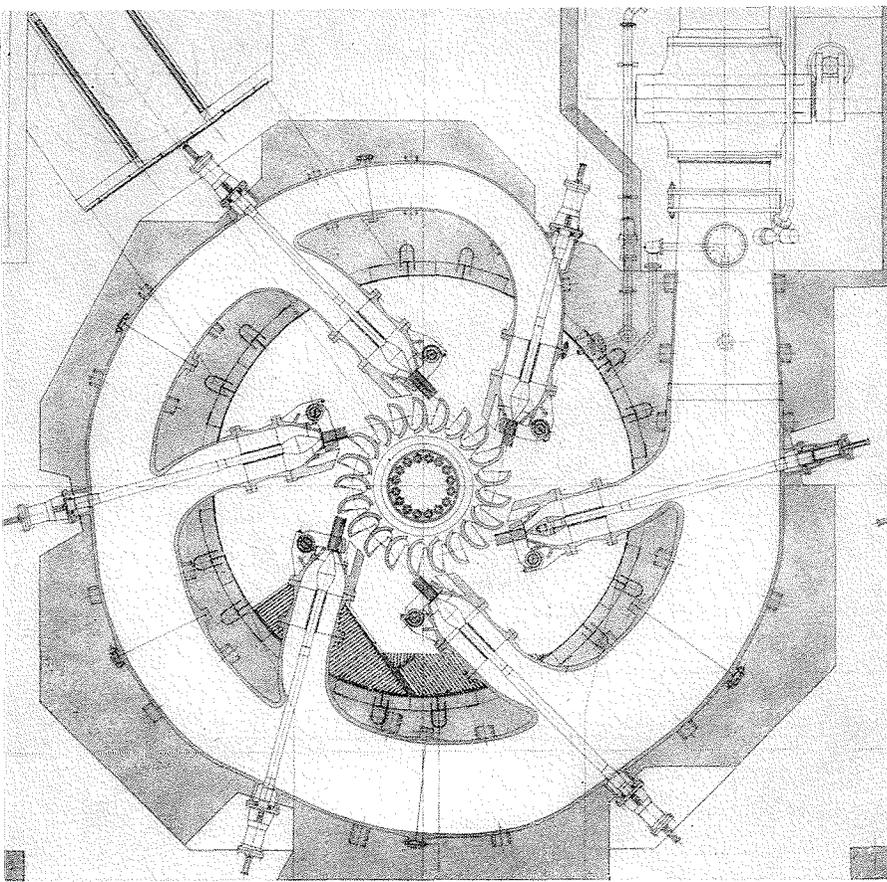


FIG. 3
Bridge River (vue en plan).

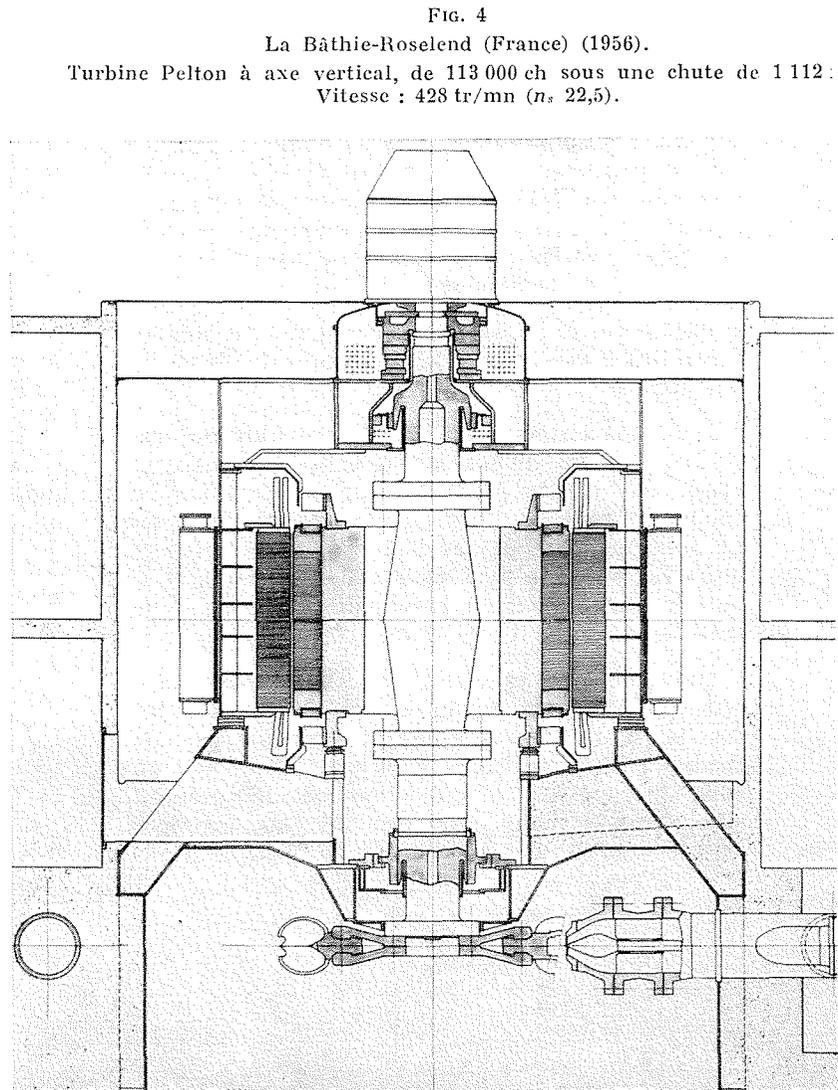


FIG. 4
La Bâthie-Roselend (France) (1956).
Turbine Pelton à axe vertical, de 113 000 ch sous une chute de 1 112.
Vitesse : 428 tr/mn (n_s 22,5).

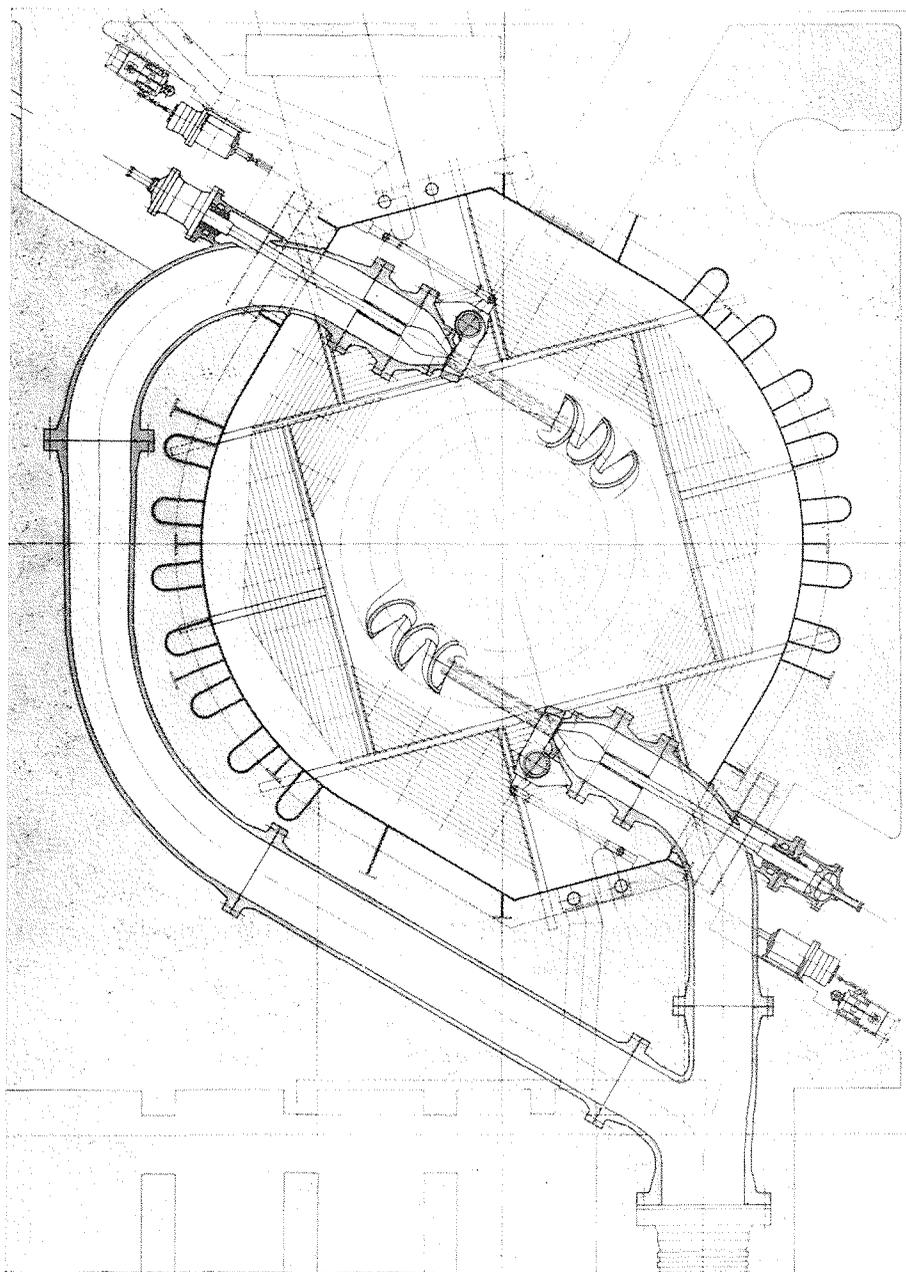


FIG. 5

La Bathie-Roselend (vue en plan).

laquelle nous désirons attirer l'attention : il n'y a que 3 jets, mais au lieu de les répartir uniformément autour de l'axe, nous les avons calés à 90° les uns des autres, acceptant ainsi une dissymétrie des poussées des jets, que les paliers et l'arbre sont largement en me-

sure de supporter. Cette disposition permet évidemment de réduire la longueur et donc le poids du collecteur. Il nous paraît évident que ce procédé pourrait être applicable avec profit à toutes les turbines verticales comportant 2 à 4 jets.

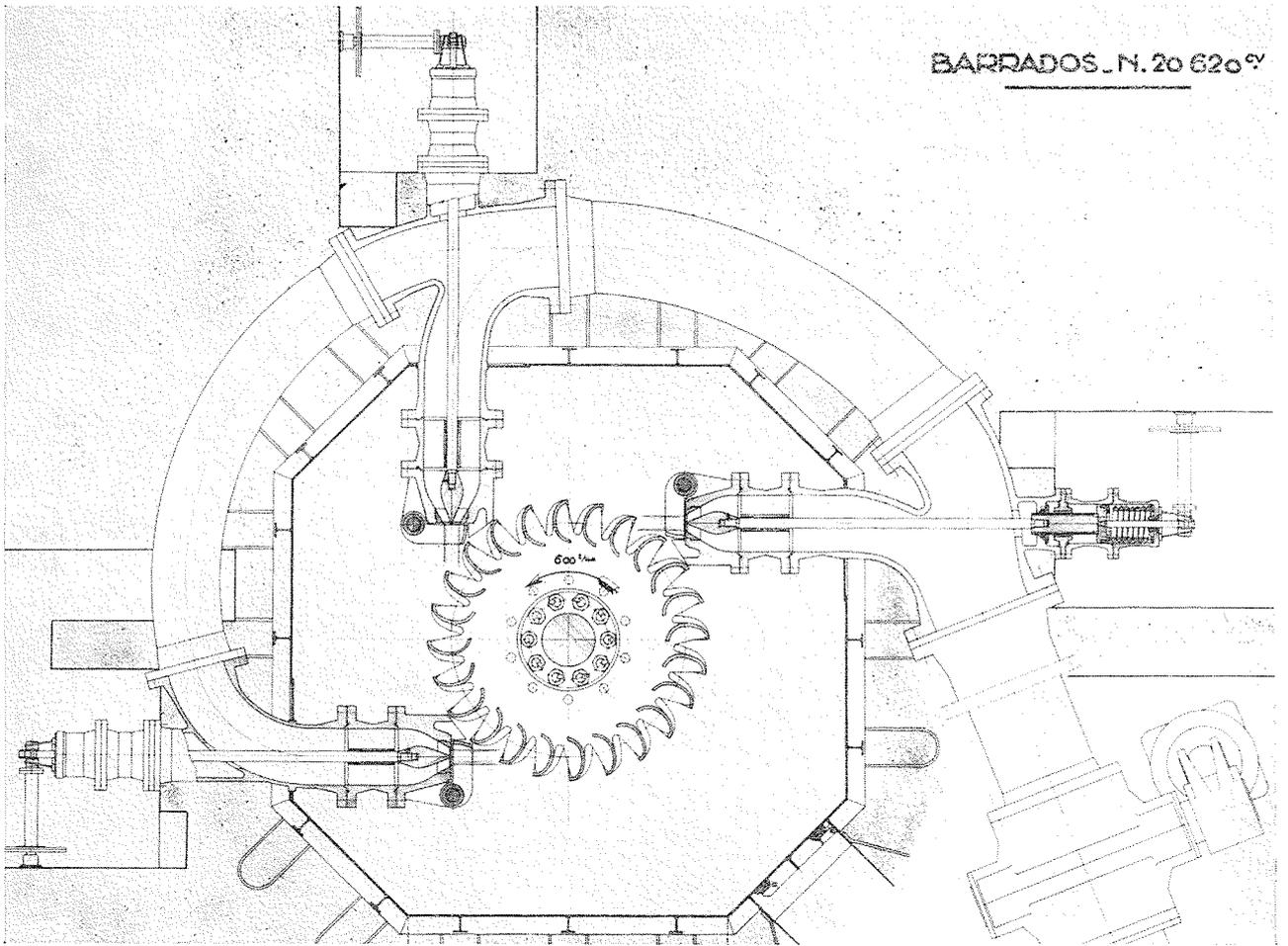


Fig. 6. — Barrados (Espagne) (1952).

Turbine Pelton verticale, de 20 620 ch sous une chute de 580 m. 3 jets calés à 90°.
Vitesse : 600 tr/mn (n_s 30).

La figure 7 montre les courbes de rendement obtenues sur le modèle réduit des turbines de Sharavati aux Indes : ces turbines à 6 jets, actuellement en cours de construction, auront une puissance de 142 000 ch sous 443 m. Il est remarquable que, grâce aux recherches sur modèle, ces rendements aient pu être obtenus malgré une réduction assez importante des dimensions du collecteur par rapport à ce qu'elles auraient été il y a quelques années.

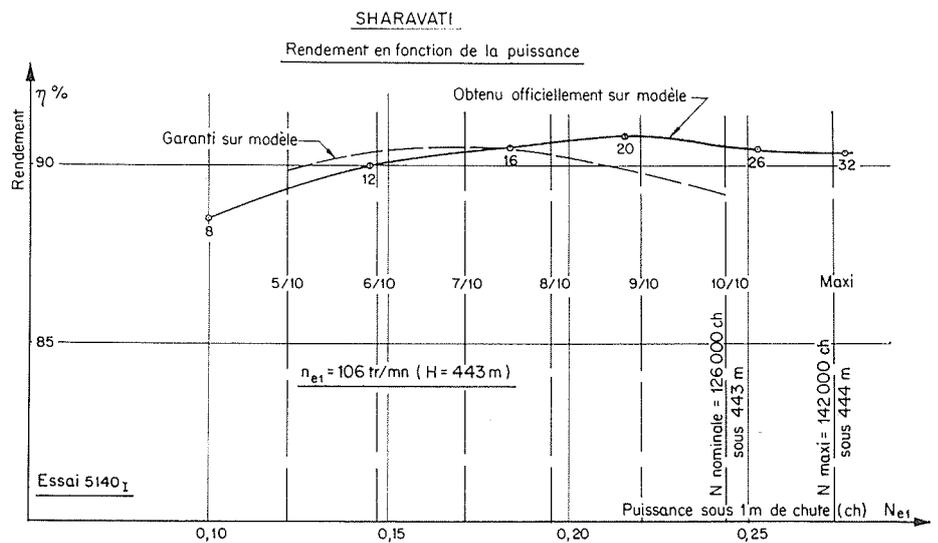


Fig. 7. — Rendement obtenu sur modèle réduit de turbines Pelton à 6 jets, fournissant 142 000 ch sous une chute de 443 m, en cours de construction pour Sharavati (Indes).

III. — ÉVOLUTION DES ÉQUIPEMENTS DE BASSES CHUTES

Nous ne pouvons mieux faire, en introduction à cette évocation de l'histoire des basses chutes, que de citer quelques extraits d'un document que M. Gariel écrivit en 1952, et qu'il remania en 1954 au moment où la technique des groupes bulbe prenait son essor :

« Il est dans la nature des choses que l'on ait d'abord cherché à équiper les chutes donnant lieu aux réalisations les plus simples et les plus économiques à l'époque considérée et compte tenu de la technique de cette époque.

« C'est ainsi que, pendant de longs siècles, les moulins ont utilisé des chutes limitées à quelques mètres et à quelques chevaux.

« Avec l'invention par Fourneyron (vers 1830) d'une machine hydraulique adaptée aux besoins des manufactures, il devint possible d'équiper des chutes de plusieurs dizaines de mètres et de plusieurs centaines de chevaux. Bergès réalisa 200, puis 400 mètres en choisissant naturellement des sites où, la pente des torrents se trouvant très forte, la longueur des canaux et conduites d'aménée et de fuite était réduite au minimum.

« Ce fut vers la recherche de tels sites que se tournèrent d'abord les pionniers de la houille blanche : dénivellation maxima pour un parcours horizontal donné.

« Naturellement, plus la chute est haute et plus chaque litre d'eau renferme sous son volume une quantité importante d'énergie. On conçoit donc que les machines hydrauliques elles-mêmes soient d'autant plus économiques que la chute est plus élevée.

« D'autre part, les réserves d'énergie sont d'autant plus efficaces qu'elles sont constituées à plus haute altitude.

« Pour toutes ces raisons, les usines de grande puissance furent d'abord des usines de hautes et de moyennes chutes.

« Cependant, dès 1892, une usine comme Jonage témoignait de l'intérêt que pouvait présenter l'utilisation du Rhône aux portes de Lyon, même avec une chute d'une douzaine de mètres seulement. Le prix d'installation du kWh/an de

Jonage restait néanmoins comme un chiffre record dont l'ombre plana longtemps sur l'utilisation des basses chutes.

« Cela n'empêcha pas d'ailleurs que l'on en équipât progressivement de plus en plus puissantes et ceci dans tous les pays industriels. Il en résulta des perfectionnements techniques dont la même usine de Jonage devint à partir de 1935 un exemple frappant.

« En effet, l'usine était équipée initialement avec 16 groupes de 1 250 ch. Or, à partir de 1935, on réussit à installer dans les chambres d'eau primitives des turbines de plus de 6 000 ch.

« Cet énorme progrès dans l'art d'utiliser un volume de maçonneries déterminé tenait essentiellement à l'évolution du tracé des roues de turbines, qui les conduisit à être des hélices et finalement à l'art d'augmenter dans des proportions énormes la capacité de débit d'un orifice déterminé lorsque celui-ci est suivi d'un diffuseur capable de récupérer convenablement l'énergie cinétique contenue dans l'eau à son passage dans l'orifice.

« Une transformation analogue vient d'être réalisée à l'usine de Tuilière sur la Dordogne où l'Electricité de France a installé des turbines de 7 000 ch dans les chambres primitives, qui datent de 1907 et dans lesquelles étaient montées depuis l'origine des machines de 3 100 ch.

« On saisit là l'influence considérable de l'évolution de la technique sur le prix de revient des centrales de basses chutes. Or, de nouveaux progrès très importants sont en voie de réalisation dans le même domaine à la suite d'inventions qui, soit en exprimant des idées entièrement nouvelles, soit en s'inspirant d'idées anciennes, proviennent pour la plus grande part d'ingénieurs français. »

Pour illustrer l'évolution des techniques d'équipement des basses chutes, il nous paraît intéressant de faire l'historique de trois usines françaises où se sont réalisées, au cours du temps, des transformations spectaculaires. M. Gariel évoquait d'ailleurs, dans les lignes qui précèdent, deux de ces usines : Jonage et Tuilière.

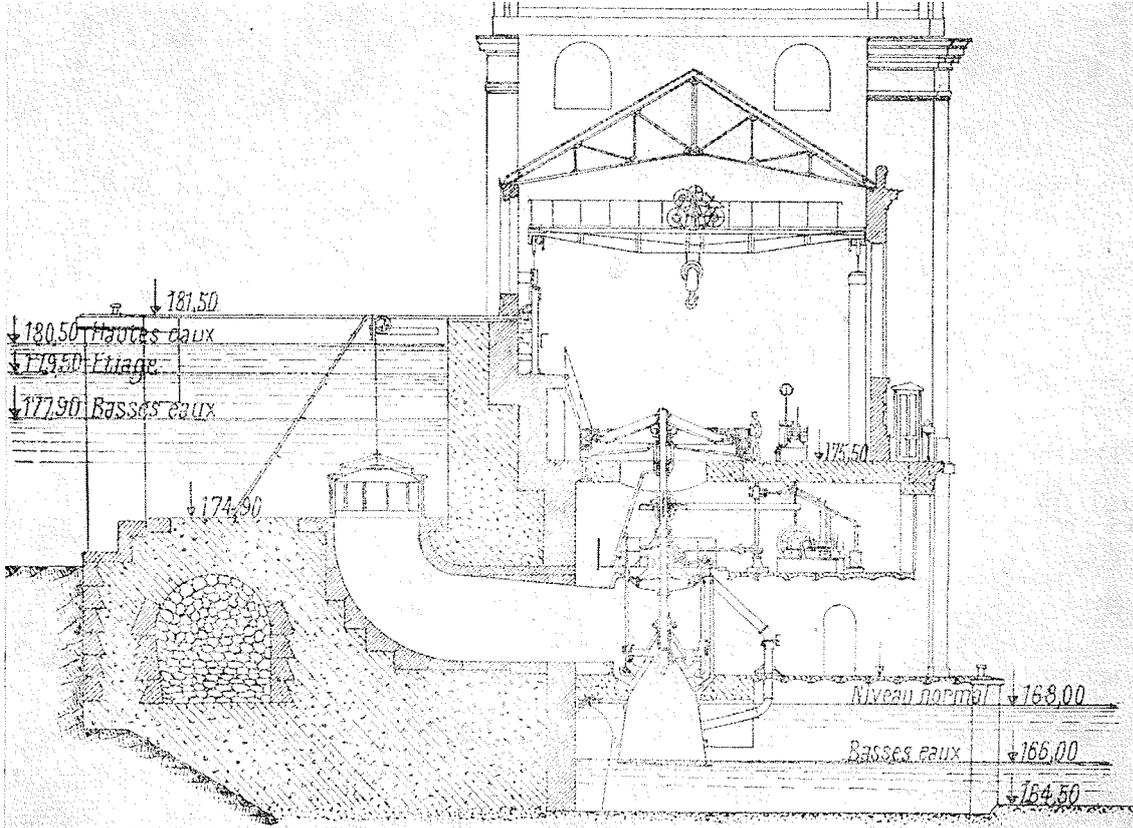


Fig. 8.
Jonage (France).
Coupe de l'usine en travers
d'une ancienne unité (1896).
Turbine Jonval de 1 250 ch
sous une chute de 12 m
à 9,50 m,
débit : 100 à 150 m³/s.
Roue de 1 050/2 100 mm.
Vitesse : 120 tr/mn (n_s 200).

1° Histoire de Jonage.

Le premier équipement de Jonage date de 1896. Il était destiné à la production d'électricité pour la ville de Lyon et c'est d'ailleurs ce qui explique son emplacement et le fait qu'on ait dû, alors, envisager l'utilisation de chutes relativement basses, car il n'aurait pas été possible à cette époque de transporter à longue distance des puissances électriques importantes.

L'usine initiale comportait 19 turbines (soit 16 groupes principaux de 1 250 ch et 3 groupes d'excitation de 250 ch chacun).

Les débits turbinés variaient de 100 à 150 m³/s, avec des chutes de 12 m à 9,50 m. Les turbines étaient des turbines Jonval à roue conique comportant 3 couronnes séparées par des cloisons et alimentées par des distributeurs fixes également cloisonnés. Ces turbines tournaient à 120 tr/mn et avaient un diamètre de roue de 1.050/2 100 mm (fig. 8).

Le réglage du débit était opéré au moyen de vannes cylindriques obturant chacun des canaux résultant de la séparation par les cloisons (fig. 9).

Le rendement garanti pour ces turbines était de 76 %, mais il y a des raisons de penser que le rendement réel était plus faible et c'est pour cette raison que, vers 1912, on commença à remplacer les groupes Jonval par des roues Francis de 1 350 ch avec un rendement de 75 %. Vers 1930, considérant que ce rendement n'était pas suffisant et que, par ailleurs, la baisse de

puissance pour les basses chutes était trop importante, on décida une modernisation radicale de l'installation. D'une part fut décidée la construction du barrage de Jons à l'aval immédiat de la prise d'eau du canal, et d'autre part on décida de remplacer progressivement les roues Jonval ou Francis par des hélices à pales mobiles alimentées par des distributeurs coniques à aubes mobiles.

Dans les années qui suivirent, d'autres groupes Kaplan furent installés qui purent profiter des progrès réalisés dans l'intervalle en matière de tracé, en vue d'augmenter encore la puissance spécifique, c'est-à-dire la puissance par pertuis.

On aboutit finalement aux groupes installés vers 1950, qui tournent à 214 tr/mn, ont des roues de 2,700 m de diamètre, et dont la puissance a pu être portée à 7 500 ch sous 13 m (fig. 10).

Il est important de noter que, dans ce cas, comme d'ailleurs dans tous les perfectionnements de tracés hydrauliques, il y a autant de progrès réalisés dans les tracés de bêche, de distributeur et d'aspirateur que dans les roues.

Enfin, il convient de signaler que c'est en méditant sur la coupe verticale des turbines de Jonage que les membres de notre équipe, qui sont à l'origine du développement des groupes bulbes, ont eu l'idée de loger l'alternateur dans le cuvelage, de refermer ensuite la partie supérieure de ce cuvelage pour mettre l'alternateur à l'abri de l'eau, de supprimer la bêche semi-

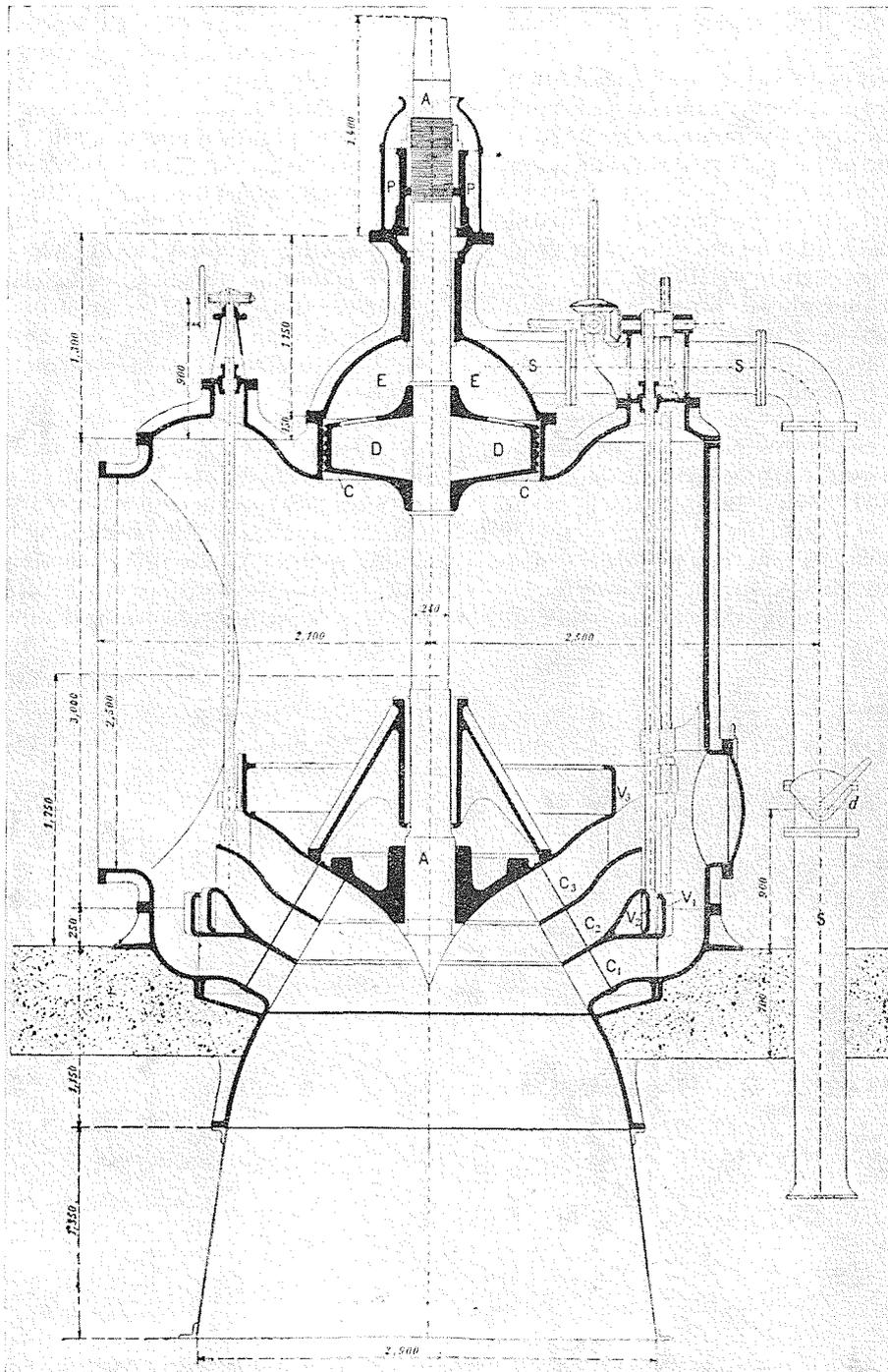


FIG. 9
Jonage : Coupe des turbines (1896).

spirale et de donner à l'axe de l'ensemble mécanique ainsi imaginé une inclinaison quelconque comprise entre la verticale et l'horizontale : le groupe bulbe amont était né.

2° Histoire de Tuilière.

L'usine de Tuilière, sur la Basse-Dordogne,

installée en 1907, comportait initialement 9 turbines Francis doubles en huches à axe vertical, de 2 700 ch, sous la chute moyenne de 9 m (fig. 11). La chute variait de 6 m, avec un débit turbiné de $20,5 \text{ m}^3/\text{s}$, à 12 m avec un débit turbiné de $22,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces machines avaient des roues de 2 m de diamètre, tournaient à 107 tr/mn, le rendement était de 75 % à la

pleine charge et de 70 % seulement à la demi-charge.

Pour moderniser cette usine tout en augmentant dans de larges proportions la puissance installée, on a progressivement remplacé les 9 groupes Francis par 8 groupes Kaplan à axe vertical.

Nous avons participé à ce travail en installant, à partir de 1950, cinq de ces nouveaux groupes Kaplan dans les pertuis existants.

Le type de turbine choisi rappelle beaucoup celui des machines de Jonage; mais grâce aux progrès réalisés entre la mise au point des turbines de Jonage et de celle de Tuilière, la puissance spécifique des roues et la puissance par mètre de pertuis est nettement plus grande.

Le diamètre des roues est de 2,900 m, la vitesse de rotation de 167 tr/mn, la puissance maximale obtenue est de 7 000 ch.

La figure 12 présente la courbe des rendements mesurés par E.D.F. sur la turbine industrielle, ainsi que la courbe des rendements du

modèle réduit. Il est intéressant de noter que les effets d'échelle sont en très bon accord avec la formule proposée par le professeur Hutton. Cet exemple avait été choisi par M. Gariel dans la communication qu'il avait préparée pour le Congrès organisé par l'Académie des Lynx à Venise en septembre 1955.

Le rapport de la largeur maximale de la bêche au diamètre de roue est de 2,38, ce qui est tout à fait remarquable pour des Kaplan à bêche semi-spirale, où ce rapport est normalement égal ou même légèrement supérieur à 3 (dans les machines à distributeur cylindrique). Précisons cependant que, même avec des distributeurs cylindriques, nous avons pu mettre au point un tracé de bêche semi-spirale dont la largeur est seulement de 2,52 fois le diamètre de roue.

Cette faible largeur a pu être obtenue sans préjudice pour les performances hydrauliques grâce à des formes particulières des radiers de la bêche. Cette disposition avait été baptisée par M. Gariel du nom de bêche fronto-spirale.

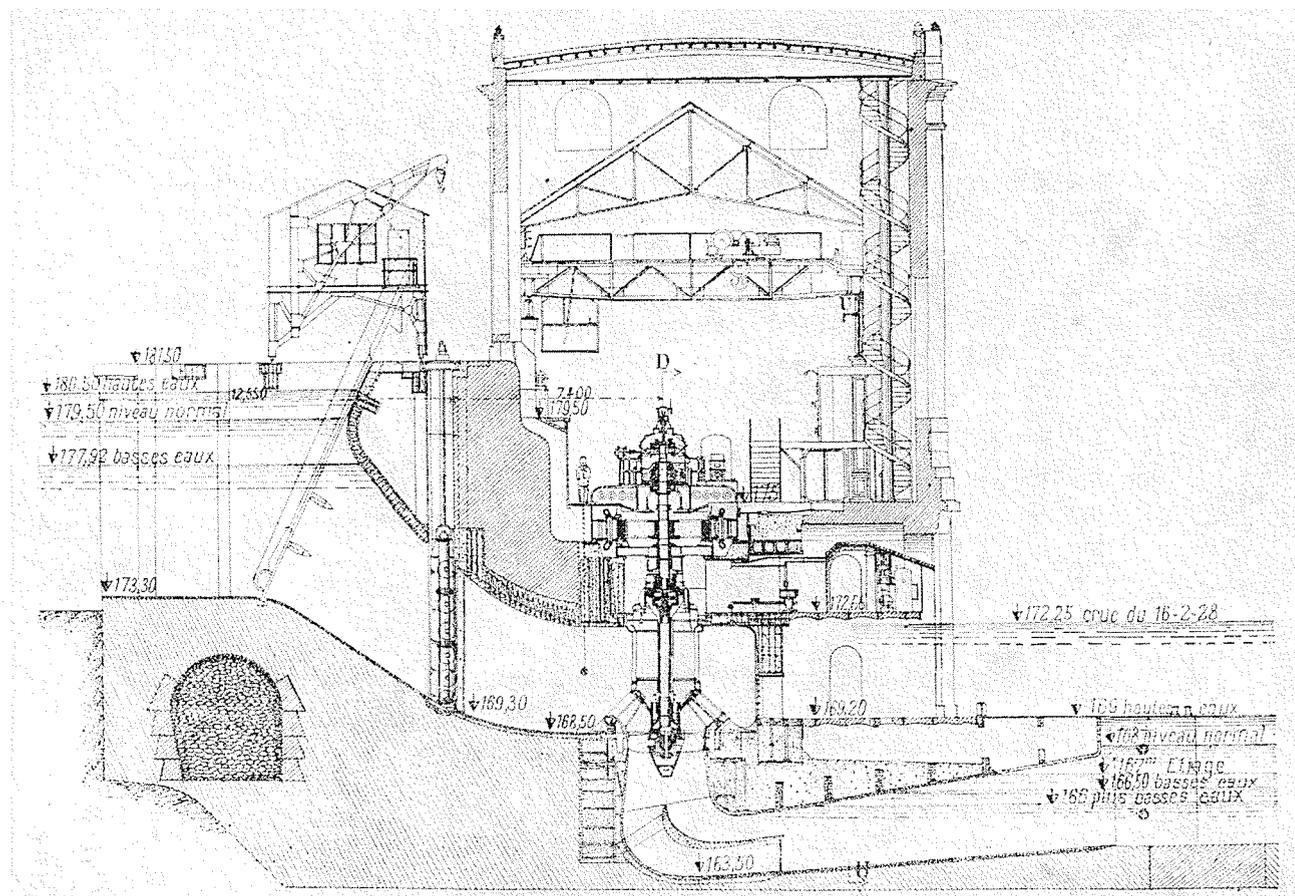


FIG. 10. — Jonage : Coupe de l'usine en travers d'une nouvelle unité (1950).
Turbine Kaplan de 7 500 ch sous une chute de 13 m. Roue de 2,700 m de diamètre.
Vitesse : 214 tr/mn (n , 750).

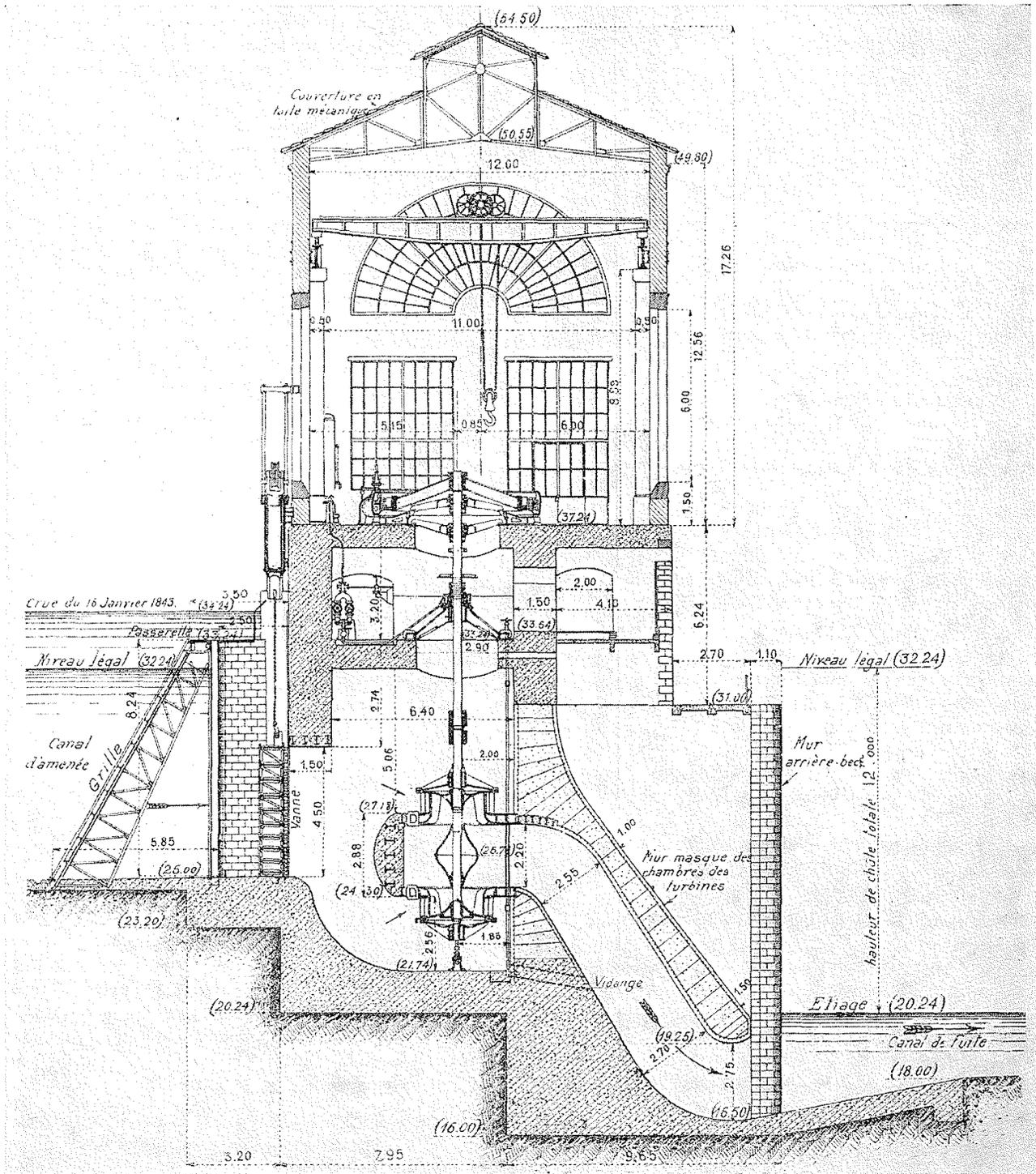


FIG. 11. — Usine de Tuilière (France) (coupe transversale) (1907).
 Turbine Francis double en huche, de 2700 ch sous une chute moyenne de 9 m.
 Roue de 2 m.
 Vitesse : 107 tr/mn (n_s 350).

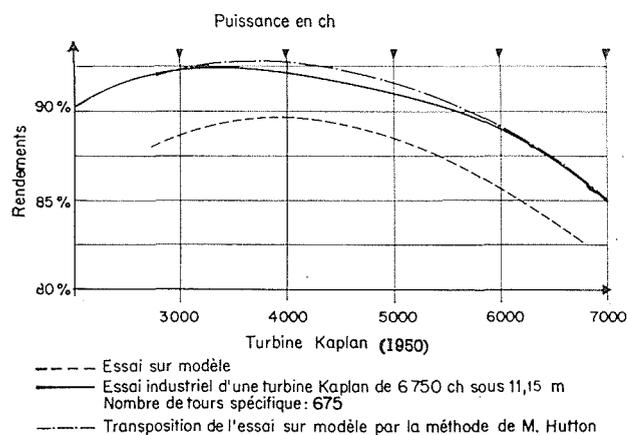


FIG. 12

Tuilière : Courbe des rendements

3° Histoire de Beaumont-Monteux.

L'usine de Beaumont-Monteux sur la Basse-Isère, réalisée dans les années 1920 à 1922, comportait initialement sept groupes Francis à axe vertical de 5 600 ch, sous 10,20 m, tournant à 107 tr/mn (fig. 13).

L'étude et la réalisation de ces machines, commencées par la Société Piccard-Pictet puis par Neyret-Beylier et Piccard-Pictet constituaient à l'époque un record par la valeur élevée de la vitesse spécifique (435) et aussi par la dimension des roues (diamètre 3,850), qui pesaient 12 tonnes. Le rendement de ces machines était d'environ 82 %. Le fonctionnement de ces roues en fonte donnait lieu à quelques difficultés : on constata la fêlure de certaines aubes et même il y eut des ruptures.

Alors que l'on recherchait la cause de ces phénomènes, on constata un jour un soulèvement du rotor au cours d'une manœuvre de fermeture, peut-être un peu plus rapide qu'à l'ordinaire, et ceci permit de reconnaître le phénomène du « marteau d'eau » qui est une des préoccupations des constructeurs de turbines Francis rapides ou de turbines hélice ou Kaplan.

Les remèdes furent apportés par un ajustement meilleur du temps de manœuvre, par l'adjonction d'une ventouse d'entrée d'air et par le remplacement des roues en fonte cassées par des roues en acier.

A partir de 1932, on remplaça progressivement les roues Francis par des roues hélice tout en conservant le même cadre (bâche, distributeur et aspirateur).

Les objectifs de cette modernisation étaient les suivants : d'une part, augmenter les rendements et la puissance, et d'autre part, construire des roues plus robustes grâce à une attache plus solide des aubes au moyeu. Ces roues hélice à 8 pales ont un diamètre de 3,855 m et une puissance de 6 750 ch; leur rendement atteint 90 % pour une vitesse spécifique de 480.

Le pertuis central de l'usine a été équipé en 1936 avec une Kaplan de 7 500 ch dont le diamètre de la roue est de 3,550 m.

L'histoire de Beaumont-Monteux représente déjà à ce stade une assez belle illustration de l'évolution des turbines de basse chute avec des résultats remarquables en ce qui concerne les progrès des rendements et des puissances spécifiques. Cette belle histoire s'achève par l'installation, dans l'emplacement initialement prévu pour une écluse, d'un groupe bulbe amont, à distributeur mobile et pales mobiles, mis en service en 1958, et qui a les caractéristiques suivantes :

Puissance 12 400 ch, sous une chute de 12 m;

Vitesse 150 tr/mn;

Diamètre de roue 3,800 m;

(fig. 14).

Toute une série d'essais industriels a été effectuée parallèlement à des essais sur modèle réduit. Les phénomènes constatés sur la machine et sur le modèle réduit sont en bon accord, et nous ont fourni en particulier des données précises sur le fonctionnement en déchargeur des groupes bulbes.

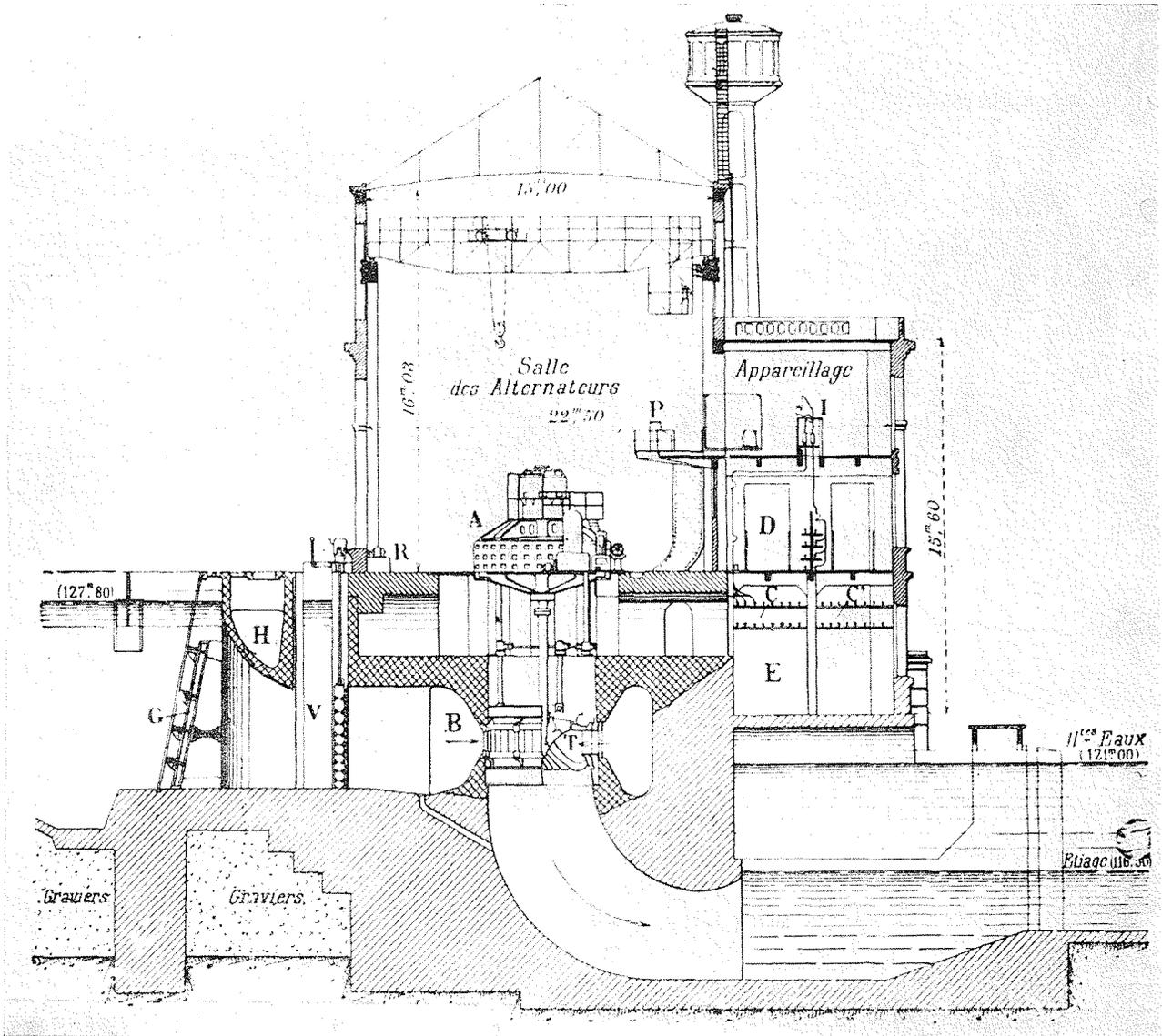


FIG. 13. — Beaumont-Montoux (France) (1920-1922) : coupe transversale de l'usine.

Turbine Francis verticale, de 5 600 ch sous une chute de 10,20 m. Roue de 3,850 m.

Vitesse : 107 tr/mn (n_s 435).

A, alternateur. — B, bache en béton armé. — C, câbles allant des interrupteurs aux transformateurs. — D, étage intermédiaire. — E, étage inférieur. — G, grille. — H, canal d'évacuation des déchets de grille. — I, interrupteurs. — P, pupitre. — R, moteurs des vannes. — T, turbine. — V, vanne.

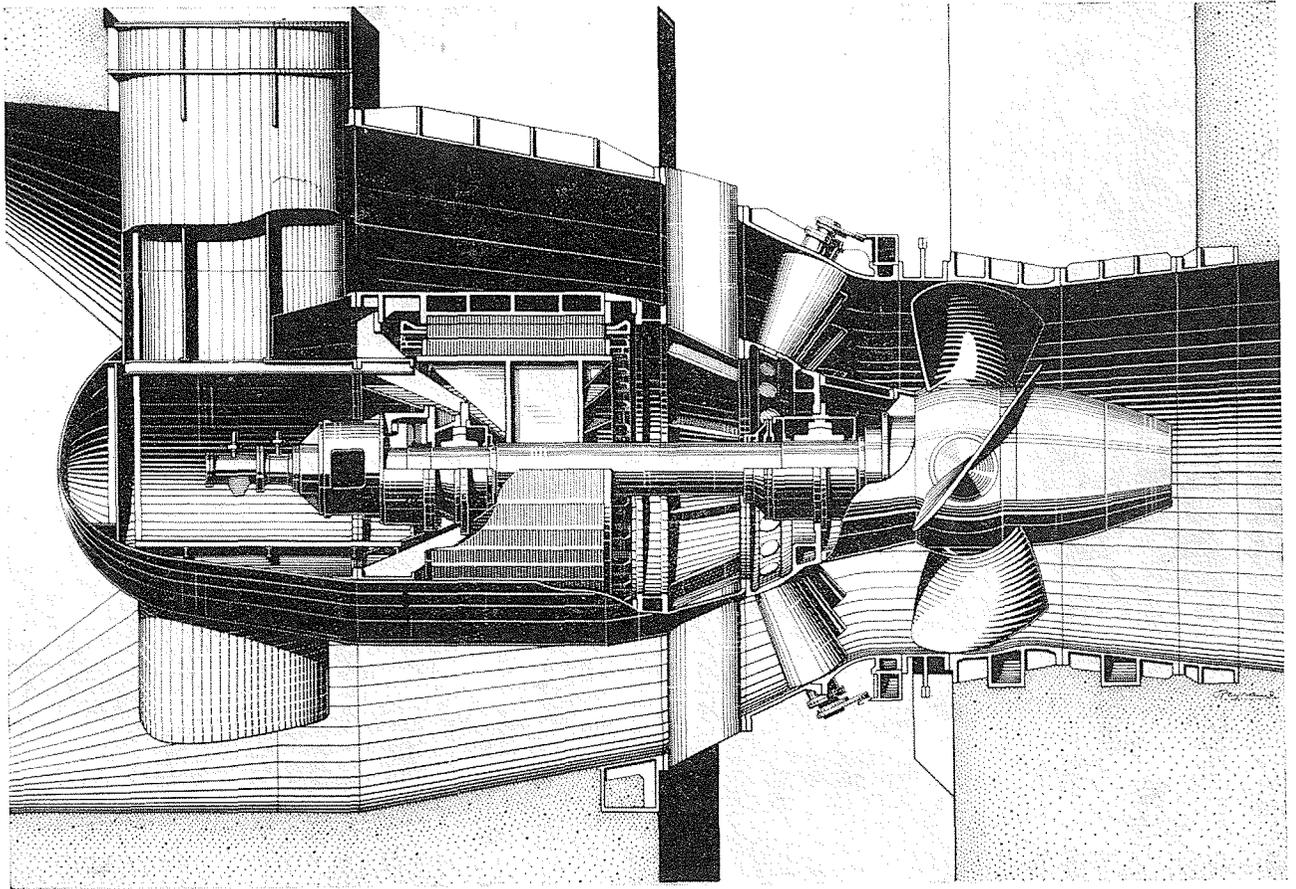


Fig. 14. — Beaumont-Monteux (France) : groupe bulbe-amont (1958).
Puissance : 12 400 ch sous 12 m de chute. Roue de 3,800 m.
Vitesse : 150 tr/mn (n_s 750).

IV. — LES GRANDES KAPLAN MODERNES

Pour se rendre compte des progrès réalisés en matière de conception mécanique et de technologie, nous allons décrire brièvement les principales caractéristiques des machines qui équiperont l'usine de Châteauneuf-du-Rhône.

Sur la figure 15, on voit que cette machine ne comporte que deux paliers : le pivot repose sur le fond turbine. Cette disposition permet d'alléger considérablement le croisillon supérieur de l'alternateur et de supprimer son croisillon inférieur.

Il en résulte une réduction importante de la hauteur totale du groupe, et par conséquent du dégagement nécessaire sous le crochet du pont

roulant. Le rotor de l'alternateur n'est plus traversé par un arbre forgé; la partie inférieure de son moyeu conique repose directement sur l'anneau mobile de la pivoterie.

Le fond de la turbine supporte le poids des parties tournantes et les poussées hydrauliques. Cette pièce, de grandes dimensions, chaudronnée, se compose de trois coques tronconiques reliées par des anneaux. Ces formes se prêtent à un calcul précis des flèches et des contraintes.

Cette Kaplan de grande puissance comporte une bêche fronto-spirale et un aspirateur sans guideau dont les formes ont été étudiées longuement en laboratoire.

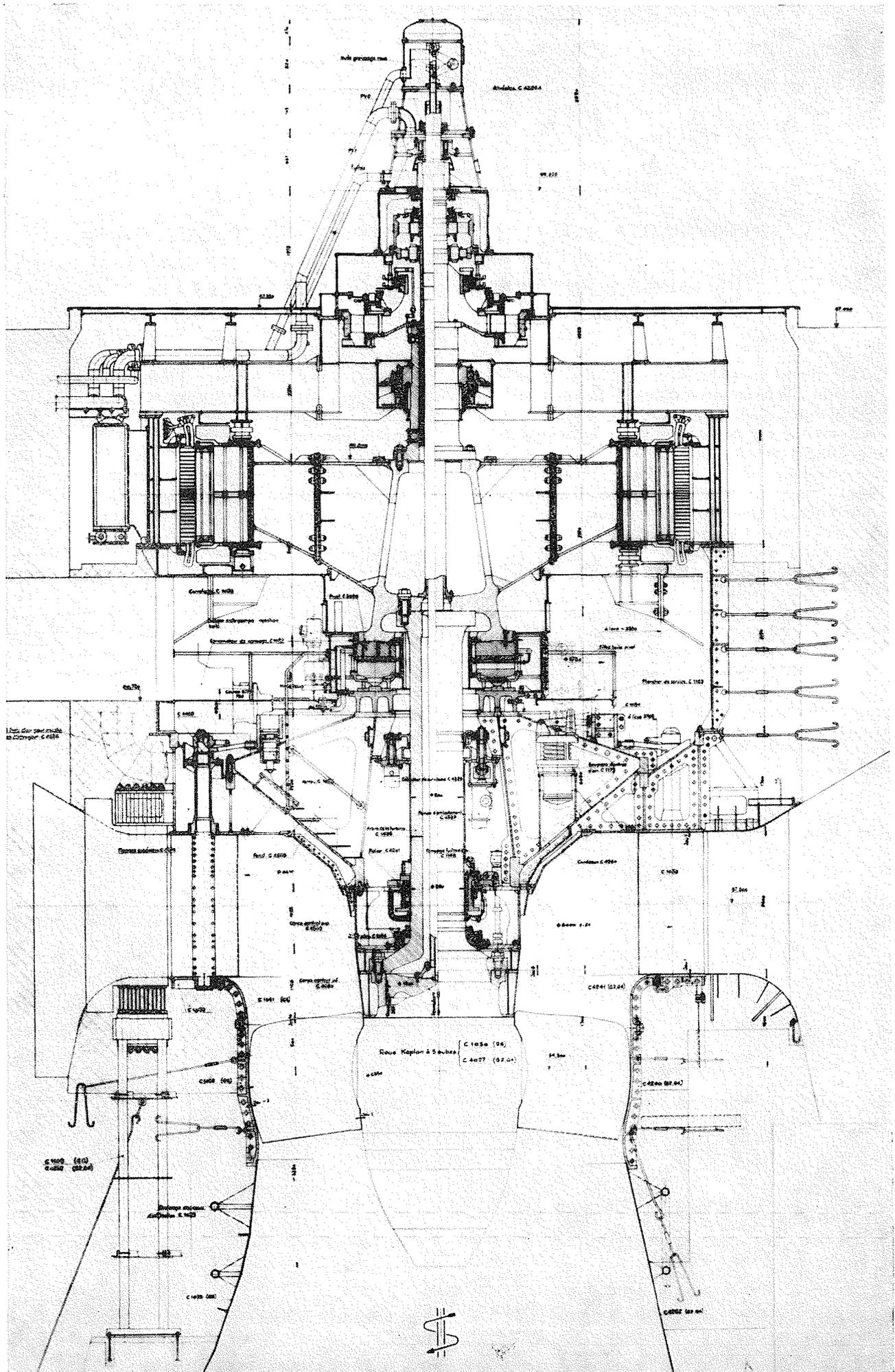


FIG. 15. — Usine de Châteauneuf-du-Rhône (France) (1953).
 Puissance : 62 450 ch sous 19,30 m de chute. Vitesse 94 tr/mn (n , 535).

V. — POSSIBILITÉS ACTUELLES D'ÉQUIPEMENT DES INSTALLATIONS DE BASSES CHUTES

USINES DE RIVIÈRE. — USINES MARÉMOTRICES

Avec des Kaplan classiques à aspirateur coudé, le prix du kWh/an augmente rapidement lorsque la chute diminue, surtout au-dessous de 10 m. Les turbines Kaplan actuelles les plus poussées ne semblent pas dépasser une puissance spécifique (puissance d'une roue de 1 m sous 1 m de chute) de l'ordre de 28 à 30 ch, sans diminution importante de rendement. Des roues de ce type, essayées dans un cadre axial, développent, sans modification de leur tracé, déjà des puissances spécifiques de l'ordre de 32 ch et ce, bien entendu, sans diminution de rendement. Des tracés de roues spécialement adaptés aux machines axiales ont déjà permis d'atteindre des puissances spécifiques de l'ordre de 35 ch.

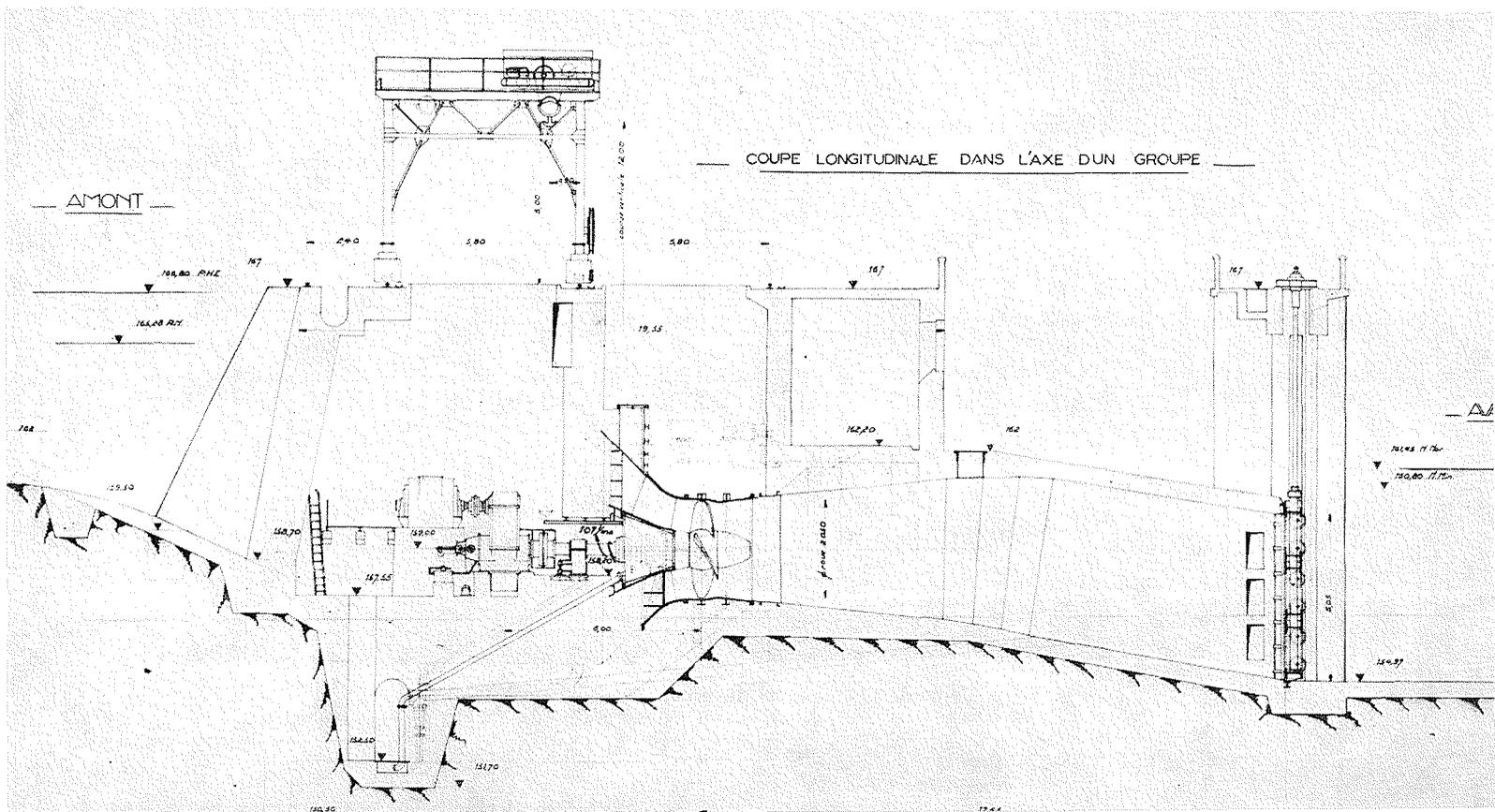
A cet avantage des puissances spécifiques élevées des bulbes s'ajoute le fait que la largeur du pertuis, pour un diamètre de roue donné, est nettement plus faible qu'avec les Kaplan à bêche semi-spirale. Ce rapport est d'environ 3 pour les Kaplan à distributeur cylindrique; on

a vu qu'on peut le réduire à 2,5 environ par des dispositions spéciales de la bêche, et même à 2,4 environ si on utilise des distributeurs coniques comme dans les machines de Tuilière. Avec les bulbes, la largeur du pertuis d'entrée peut descendre à 1,8 fois le diamètre de roue.

La notion des performances possibles avec des machines à écoulement axial n'est pas nouvelle. Dès 1927, M. Gariel avait pressenti la possibilité d'augmenter considérablement le débit spécifique des turbines hélice grâce à la bonne transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle qu'effectue un diffuseur tronconique. Le groupe français qui étudiait alors l'utilisation du barrage d'Assouan avait proposé des turbines axiales. Des essais sur modèles réduits furent entrepris par les Ateliers Neyret-Beylier et Piccard-Pictet qui confirmèrent les qualités de ce type de turbine.

Les solutions nouvelles qu'apporte à l'équipement des basses chutes la mise au point des

Fig. 16. — Usine de Wadrinau (France) : groupe puits (1954).
Puissance : 2 000 ch sous 4,60 m de chute. Vitesse : 107 tr/mn (n_s 700).



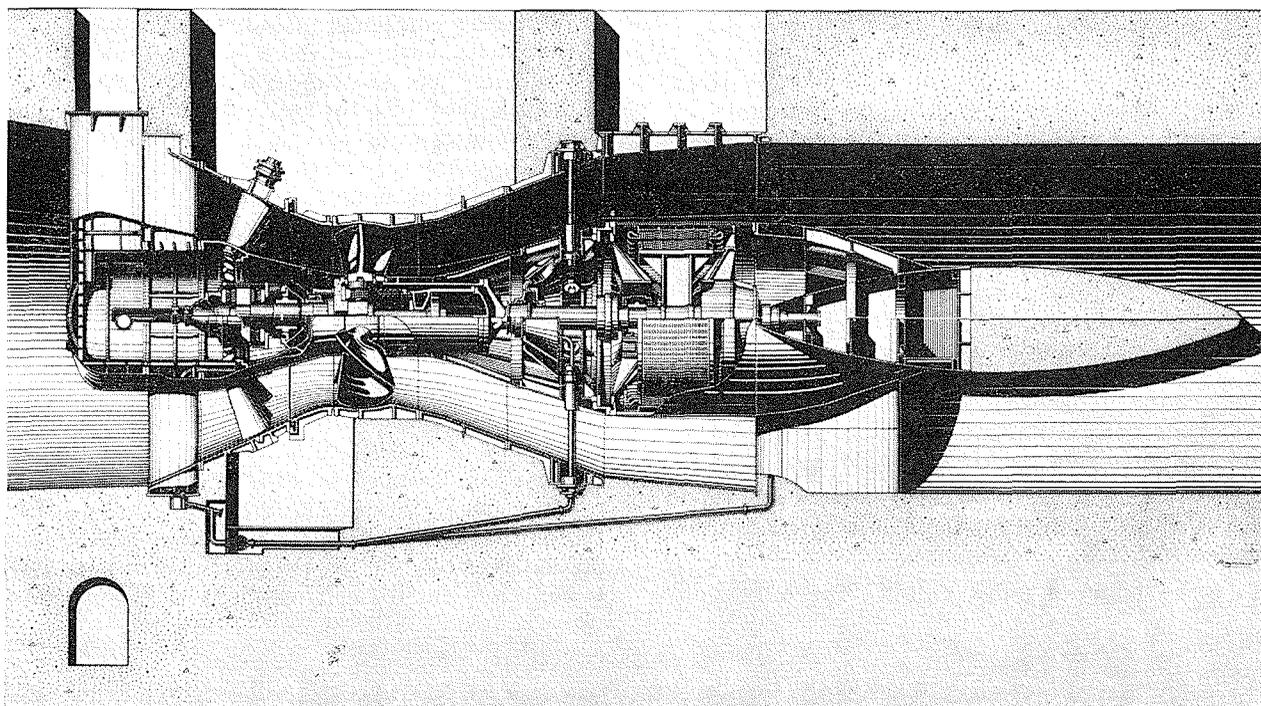


FIG. 17. — Cambeyrac (France) : groupe bulbe-aval (1953).

Puissance : 7 000 ch sous 10,75 m de chute. Vitesse : 150 tr/mn (n , 645).

groupes axiaux permettent d'améliorer considérablement l'économie d'ensemble de ces aménagements et auront même une répercussion sur la conception des groupes Kaplan classiques.

Dans le cas des groupes de faible puissance, qui sont à l'origine de nos études, le distributeur est à aubage fixe et la génératrice, du type asynchrone, directement accouplée à la turbine, tourne dans de l'huile qui sert de fluide réfrigérant. C'est cette conception qui fut adoptée pour les deux premiers groupes bulbes installés en France par la S.N.C.F. à Castets. On peut dire que cette audacieuse réalisation a ouvert la voie à l'utilisation de ce groupe de basse chute. Pour des puissances plus importantes, le distributeur est mobile et l'alternateur tourne dans l'air atmosphérique ou comprimé.

Quelques réalisations actuelles

WADRINAU. Groupe puits :

C'est la disposition qui s'éloigne le moins des réalisations classiques. Elle comporte (fig. 16) à l'amont ou à l'aval de la turbine à axe sensiblement horizontal, un puits ménagé dans une pile et isolé hydrauliquement, dans lequel se trouve

un alternateur classique accouplé directement ou par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse.

Cette disposition ne constitue pas une révolution pour le groupe turbo-alternateur, qui reste classique, mais, comme nous le pensions, la réalisation de l'usine de Wadrinau (France) nous a montré que le génie civil de l'ensemble de la centrale est remarquablement réduit et constitue le principal facteur d'économie; il reste cependant de réalisation assez délicate par suite des formes hydrauliques assez complexes qu'il est nécessaire d'adopter pour obtenir un rendement convenable.

BEAUMONT-MONTEUX. Groupe bulbe amont :

Ce groupe de 8 800 kW fonctionne en turbine directe sous une chute qui peut varier de 9,85 m à 12,48 m. Il est du type à pales et distributeur mobiles et comprend essentiellement le conduit hydraulique, le croisillon amont et la partie monobloc démontable (voir fig. 14).

ARGENTAT. Groupe bulbe aval :

Le groupe, de 14 400 kW, fonctionne en turbine directe, sous des chutes allant de 8 à 16,50 m. Il peut être appelé, à titre expérimental seulement, à fonctionner en pompe.

Il est du type à pales et distributeur mobiles analogues à ceux de la figure 17.

CAMBEYRAC. Groupe bulbe aval :

La réalisation de ce groupe de 5 000 kW sous 10,75 m, prévu pour fonctionner en turbine et en pompe dans les deux sens d'écoulement, est liée aux problèmes posés par l'équipement des usines marémotrices.

La turbine est du type à pales et distributeur mobiles (voir fig. 17).

SAINT-MALO. Groupe bulbe amont.

Ce groupe expérimental fonctionnera en turbine et en pompe dans les deux sens d'écoulement. Sa puissance est de 9 000 kW sous 5,50 m de chute.

La turbine est du type à pales et distributeur mobiles (fig. 18).

La roue hélice à pales mobiles spéciales *non*

renversables comporte un moyeu de construction classique; elle est montée en porte-à-faux sur l'arbre-turbine. Le servomoteur de commande des pales, du type télescopique, est placé entre l'arbre-turbine et le moyeu du rotor alternateur.

Ce groupe devait être, à l'origine, la première unité devant équiper l'usine de la Rance. Pour des raisons qui ne sont pas que techniques, la construction de cette usine a été un peu retardée, ce qui nous a donné le temps de faire un dernier effort de recherche, si bien qu'on a pu décider d'installer à la Rance des groupes qui seront à la fois plus petits, plus rapides et de puissance unitaire plus élevée que le groupe de Saint-Malo.

Les machines actuellement retenues pour l'équipement des marémotrices (bulbe amont à distributeur mobile) ne diffèrent pas fondamentalement des grandes machines de rivières. Toutefois, leur tracé hydraulique et leur agencement de contrôle ont été prévus de façon à permettre le fonctionnement en turbine et en pompe dans

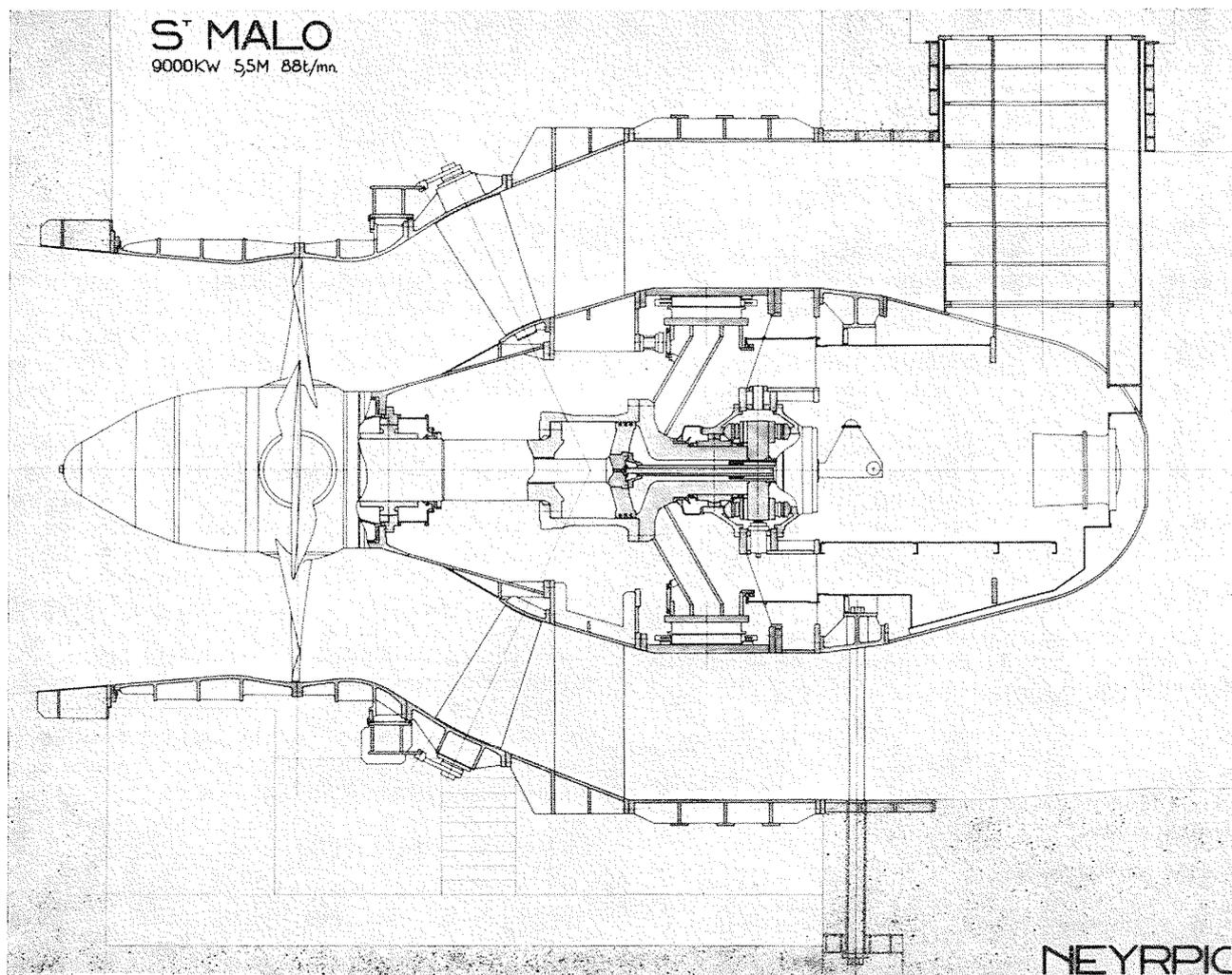


FIG. 18. — Saint-Malo (France) : groupe bulbe-amont (1956).
Puissance : 12 200 ch sous 5,50 m de chute. Vitesse : 88 tr/mn (n_r 1155).

les deux sens d'écoulement ainsi que les marches en orifice.

Ce qui est remarquable, c'est que ceci ait pu être obtenu, grâce à des tracés hydrauliques spéciaux de la roue sans que le mécanisme du moyeu diffère de celui d'une Kaplan habituelle; ce qui veut dire qu'il n'est pas nécessaire de renverser les aubes pour les fonctionnements en turbine inversée et en pompe inversée.

Que faut-il penser de l'avenir des marémotrices? Pour notre part, cette question amène les réflexions suivantes :

Tout de suite après la réalisation, jugée très

onéreuse, de l'usine de Jonage, bien peu auraient pu penser qu'un jour le Rhône serait pratiquement couvert d'un bout à l'autre d'usines de basses chutes, cet exemple étant d'ailleurs suivi sur le Rhin, et dépassé par les installations des grands fleuves du monde entier.

Demain la Rance sera équipée. Il nous est agréable de croire qu'à l'image de ce qui s'est passé pour les grands fleuves, le monde sera un jour parsemé de grandes installations marémotrices dont l'usine de la Rance aura été le petit modèle.

VI. — LES TURBINES FRANCIS

Les turbines Francis ont subi au début une métamorphose très nette lorsque les bâches spirales remplacèrent les huches ou les chambres d'eau ouvertes, mais on peut dire que, par la suite, les formes de ces turbines n'ont pas apparemment beaucoup changé, ce qui masque un peu l'étendue des progrès réalisés dans ce domaine.

En y regardant de plus près, on constate tout de même que la forme des roues, la forme des aubages directeurs ont considérablement évolué.

Par exemple, les roues à petites vitesses spécifiques comportaient initialement un assez grand nombre d'aubes de faible longueur. Elles ont maintenant des aubes beaucoup moins nombreuses, mais beaucoup plus longues, se prolongeant le plus souvent jusqu'à la section d'entrée de l'aspirateur.

Pour les grands nombres de tours spécifiques, on a vu disparaître les formes d'aubes avec poches; les aubes se sont allongées et les roues sont beaucoup moins évasées qu'elles ne l'étaient autrefois. (Cette évolution étant motivée en partie par le fait que, sous une chute donnée, on a réalisé des vitesses spécifiques de plus en plus grandes.)

Ce qui mesure l'évolution des Francis dans les trois dernières décennies, c'est l'amélioration des rendements, l'augmentation des vitesses spécifiques réalisables pour une chute donnée, et la construction de machines de plus en plus grandes et de plus en plus puissantes.

Il est certain qu'on a intérêt à choisir la plus grande vitesse spécifique possible; ce en quoi on était limité par la résistance mécanique de la roue et par les phénomènes de cavitation.

Actuellement, les formes de roues sont plus résistantes que les formes anciennes; par ailleurs, sous des chutes élevées ou pour de très

grandes machines, on emploie maintenant à peu près systématiquement des aciers à haute résistance ou des bronzes d'aluminium qui ont à la fois une bonne résistance mécanique et une très bonne tenue à la cavitation.

Si les limites de vitesses spécifiques inhérentes aux phénomènes de cavitation ont pu être progressivement reculées, c'est grâce à deux voies de recherches : l'expérimentation en laboratoire sur modèle réduit qui permet de prévoir les sigmas d'installation donnant une marge de sécurité suffisante et qui permet aussi l'amélioration systématique des tracés d'aubages, grâce à la visualisation directe des phénomènes.

A propos de la cavitation dans les turbines Francis, il nous paraît intéressant de signaler que le problème ne se pose pas de la même façon que pour les turbines Kaplan. Dans ces dernières, c'est essentiellement la cavitation le long des aubages et de la ceinture que l'on constate, tandis que, dans les turbines Francis, ce phénomène se combine parfois assez désagréablement avec le phénomène maintenant bien observé de la torche centrale, avec tous ses effets néfastes de pulsations de puissance, de pulsations de pression, de vibrations et de cavitation dans l'aspirateur, ce qui apparaît dans certains cas bien avant la cavitation dans l'aubage et bien avant que la réduction des sigmas n'affecte les performances de la machine.

La conception mécanique des grosses turbines Francis a fortement bénéficié du développement de la construction soudée et l'on peut même dire que celle-ci a rendu possible la réalisation de Francis très puissantes, sous des chutes de l'ordre de 80 à 150 m; des puissances de l'ordre de 200 000 ch sont actuellement courantes pour cette gamme de chutes.

La figure 19 représente une turbine Francis développant 170 000 ch sous $H = 139$ m et tour-

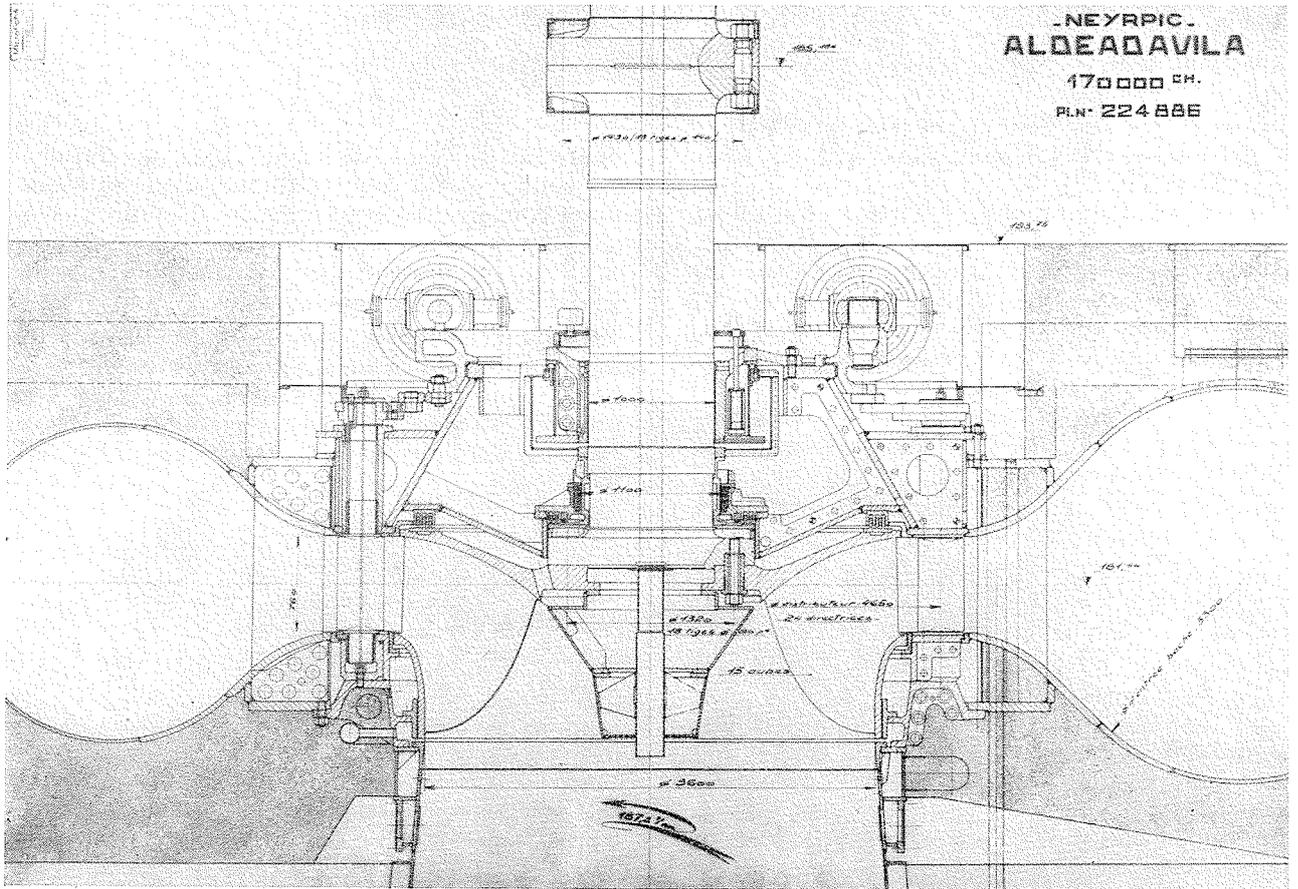


FIG. 19. — Turbine Francis d'Aldeadavila (Espagne) (1957).
Puissance : 170 000 ch sous 139 m de chute. Vitesse : 187,5 tr/mn (n_s 162).

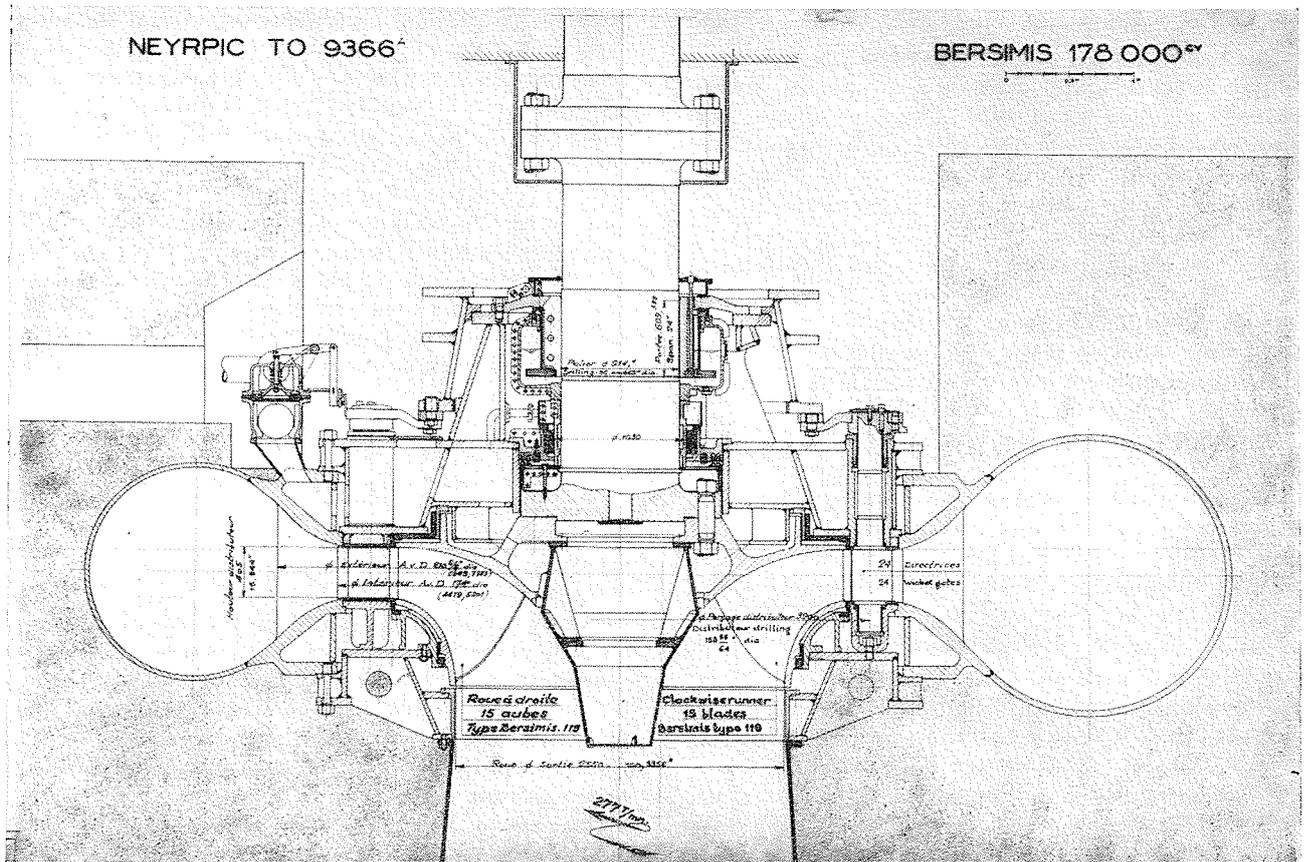


FIG. 20. — Turbine Francis de Bersimis (Canada) (1955).
Puissance : 178 000 ch sous 267 m de chute. Vitesse : 277 tr/mn (n_s 108).

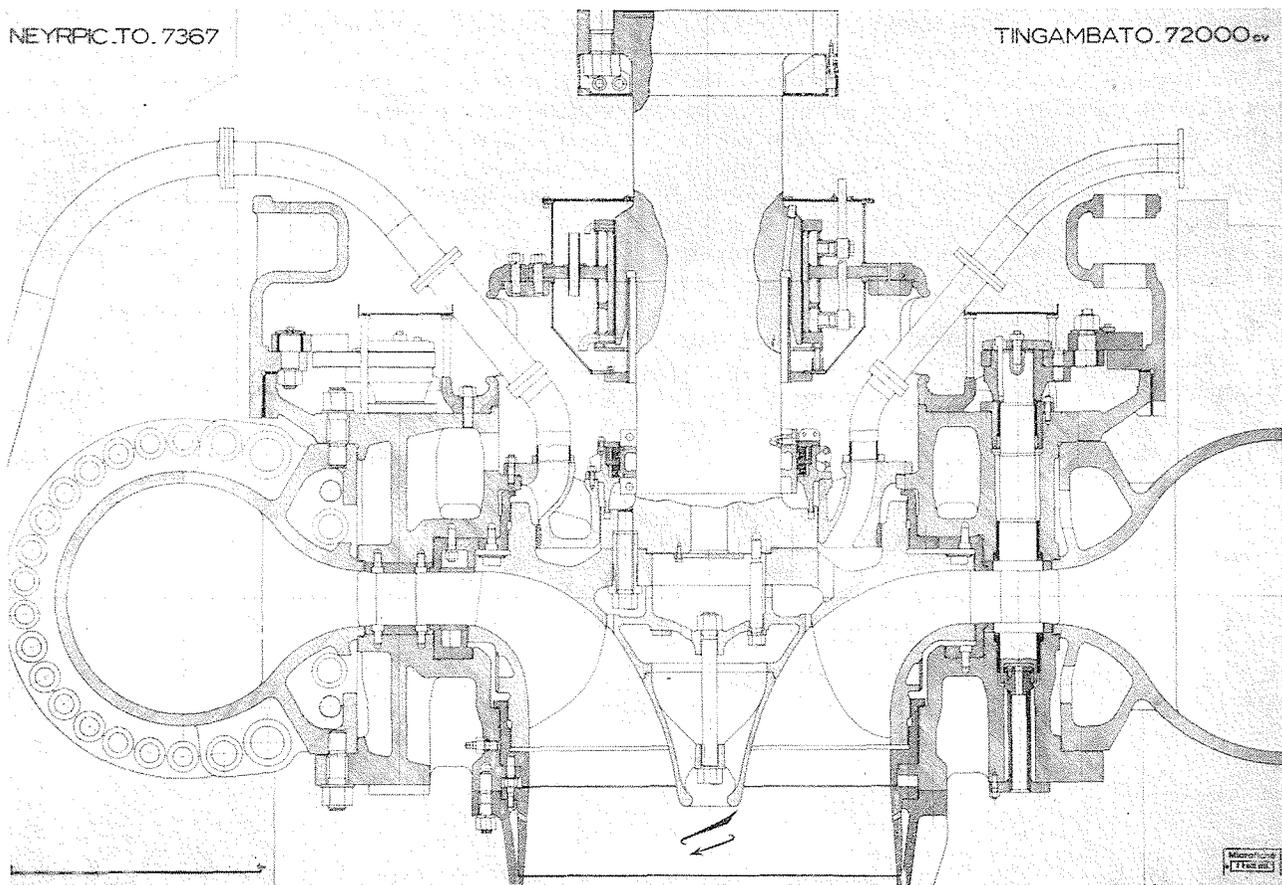


FIG. 21. — Turbine Francis de Tingambato (Mexique) (1952).

Puissance : 72 000 ch sous 380 m de chute. Vitesse : 600 tr/mn (n_s 96).

nant à 187,5 tr/mn (n_s 162). Six de ces machines équiperont l'usine d'Aldeadavila. Toutes les grosses pièces, bache spirale, avant-distributeur, fond, blindage de l'aspirateur sont de construction soudée.

La figure 20 représente une turbine développant 180 000 ch sous 267 m et tournant à 277 tr/mn (n_s 108). Quatre de ces machines équiperont la centrale de Bersimis au Canada. Cette

machine est de construction mixte coulée-soudée.

La figure 21 représente une turbine développant 72 000 ch sous 380 m et tournant à 600 tr/mn (n_s 96). Trois de ces machines équiperont l'usine de Tingambato au Mexique. Vu la chute et les dimensions relativement modestes malgré la puissance, c'est la construction en acier coulé qui a été retenue.

VII. — CONCLUSION

Nous avons essayé de montrer que les turbines hydrauliques, même lorsque apparemment elles n'ont que peu changé d'aspect, ont bénéficié de progrès considérables sans lesquels le développement de l'énergie hydroélectrique eût été impossible. Beaucoup d'indices nous permettent d'affirmer que cette progression ne fait que s'accroître dans la période la plus récente. Il y a dix ans environ, on ne parlait qu'avec prudence

de vitesses spécifiques de l'ordre de 1 000; or, les turbines de la Rance arrivent presque au double. A la même époque, on considérait comme gigantesques des machines d'une puissance unitaire de 150 000 ch. On parle maintenant couramment de 200 000, voire même de 300 000, et certains projets russes, sur des fleuves gigantesques bien entendu, envisagent des puissances unitaires de 500 000 kW, avec d'ailleurs des vitesses spécifi-

ques élevées eu égard aux chutes à équiper.

Nous ne nous hasarderons pas à essayer de prophétiser les limites du progrès encore possible, d'abord parce que cela serait présomptueux de notre part, étant donné que nous appartenons à l'une des nombreuses équipes qui, dans le monde, travaillent à améliorer encore les possibilités des turbines hydrauliques, mais aussi parce que ceux qui autrefois avaient essayé de prévoir le progrès à venir ont vu leurs prévisions très largement dépassées.

Nous présentons à ce sujet des courbes que M. Danel, président-directeur général de la SOGREAH, avait rassemblées à l'occasion d'une conférence qu'il fit, il y a quelques années, en Grande-Bretagne (fig. 22).

En 1907, Graf et Thoma avaient donné comme

des résultats de Francis, de Kaplan et de bulbes que nous avons en mains en 1956; mais comme nous sommes prudents, nous avons donné cette courbe comme l'enveloppe des résultats du moment, en nous gardant bien de dire que nous voyions une limite désormais infranchissable. Il ne nous appartient pas de dire si ces limites, et, d'une façon générale, toutes celles que nous rencontrons aujourd'hui dans d'autres domaines de notre technique, seront un jour franchies ou non; mais ce que nous pouvons affirmer, c'est que l'une au moins des conditions nécessaires à cette continuation du progrès est satisfaite; les équipes que M. Gariel avait réunies, animées et guidées, continuent et continueront, même après la disparition de leur Maître, à œuvrer avec l'esprit qu'il leur a insufflé.

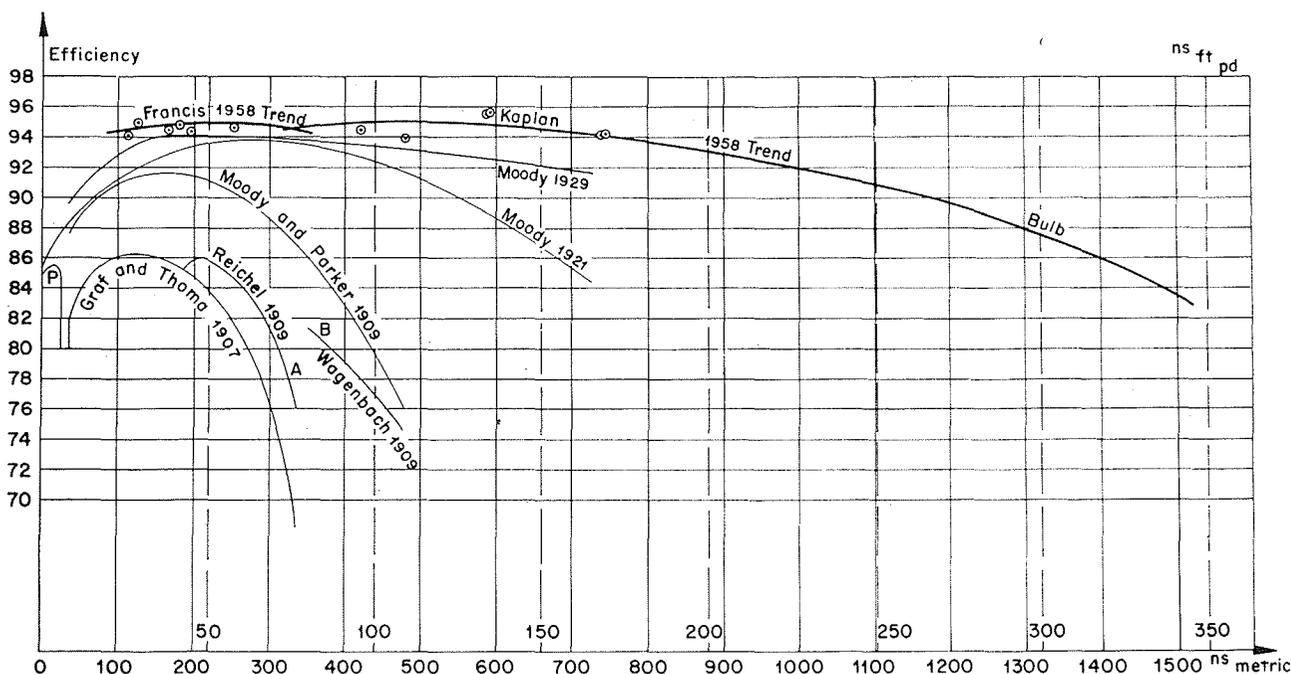


FIG. 22.

Cinquante années d'évolution des rendements des turbines hydrauliques.

limite des rendements en fonction des vitesses spécifiques, la courbe inférieure de la figure, puis à plusieurs reprises d'autres auteurs, et en particulier Moody, durent tracer de nouvelles courbes tenant compte des progrès réalisés dans l'intervalle. Nous avons nous-mêmes tracé la courbe supérieure du graphique, qui tient compte

Ces équipes se renouvellent et on peut imaginer que, dans l'avenir, elles comprendront beaucoup de jeunes éléments qui n'auront pas connu M. Gariel, mais à qui son esprit aura été transmis et préservé par ceux qui ont eu le bonheur de le connaître et de travailler sous sa direction.