LES TURBINES HYDRAULIQUES

QUELQUES PROJETS

ET RÉALISATIONS ACTUELS

J. CHENAIS

Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique

Ingénieur E.S.E. et P.T.T.

Nous allons essayer dans cet article de mettre en relief quelques-uns des problèmes que pose actuellement la technique des turbines hydrauliques et de donner une idée, dans la mesure où le permettront les quelques chiffres et documents que nous avons pu réunir, des perfectionnements dont bénéficient les grandes réalisations actuellement en cours — ou en projet — et des moyens de plus en plus puissants mis en œuvre pour leur achèvement.

Ce travail se divisera en trois parties.

Après avoir donné quelques chiffres relatifs aux installations nouvelles mises en route depuis 1939 en France, nous consacrerons une première partie au réaménagement de quelques centrales anciennes, auxquelles, en quelque sorte, un sang nouveau a été transfusé ; nous parlerons en particulier de *Jonage*, des usines de la vallée de la *Têt*, dans les Pyrénées-Orientales, enfin de celles de *Fond-de-France*, dans le massif d'Allevard, et de *Champ-sur-Drac*, près de Grenoble.

Dans une seconde partie, nous dirons quelques mots de la place que tiennent les systèmes automatiques dans la commande des centrales hydro-électriques et de cette question à la fois si complexe et si intéressante qu'est la régulation des Centrales interconnectées.

Enfin, nous examinerons, dans une troisième partie, quelques dispositions caractéristiques des trois principaux types de turbines : hélice à pales orientables, Pelton, Francis, et nous terminerons par une brève description des machines motrices les plus puissantes du monde, parmi lesquelles, au milieu des machines du *Boulder Dam*, de *Shipshaw*, de la *Sungari* et du *Grand Coulee Dam*, les turbines en construction pour les centrales de *Génissiat* et de *Chastang*, tiennent une place qui fera honneur à la technique française.

Si les terribles années que nous venons de traverser et les difficultés actuelles, encore considérables, ont pesé lourdement et pèsent toujours sur les constructions hydrauliques françaises, nous pouvons cependant trouver un grand réconfort dans l'examen du bilan des travaux effectués dans ce domaine depuis 1940.

La vie des grands chantiers s'est certes trouvée ralentie du fait du manque de matières premières, de main-d'œuvre, de transports, mais les grandes réalisations qui sont actuellement en cours marquent incontestablement un pas en avant par rapport à celles d'avant-guerre, en particulier du point de vue de la puissance unitaire des groupes.

Après les six machines de 42.500 CV de *Brommat*, les quatre de 52.000 CV de *Sarrans*, sur la Truyère, les quatre de 46.200 CV de *Marèges*, les six groupes de 16.000 CV du *Sautet*, les trois turbines de 40.000 CV de *Bissorte* qui jalonnent la technique 1930-39, nous avons déjà vu, entre 1939 et 1945, dans les centrales de grande puissance, la mise en route des deux turbines de 21.750 CV de *Pradières*, du groupe de 44.000 CV de *Fond-de-France*, de celui de 55.600 CV du *portillon*, des quatre groupes de 16.600 CV de *Pont-Escoffier*, sur le Vénéon, de *Saint-Etienne-Cantalès*, sur la Cère, avec trois groupes de 34.000 CV, de *L'Aigle* (1), sur la Dordogne, avec quatre de 70.000 CV, et nous allons prochainement assister à celle de *Cordéac*, sur le Drac, avec deux groupes de 28.000 CV et 56.000 CV. Puis suivra *Génissiat*, avec quatre groupes de 90.000 CV et, plus tard, deux de 120.000 CV, enfin *Chastang*, sur la Dordogne, avec des machines de 135.000 CV.

(1) Les turbines de *L'Aigle* ont été construites par Schneider et Cie.

A côté des 210.000 CV que représentent les installations importantes de *Pradières*, de *Fond-de-France*, du *Portillon*, de *Pont-Escoffier*, il convient de ne pas oublier les quelques 200.000 CV que représentent les installations de puissance unitaire moindre, mises en route depuis 1940, parmi lesquelles on peut citer :

deux Pelton verticales de la *Cassagne*, les deux Francis de *Saint-Cricq* (6.700 CV.), les six groupes Pelton et Francis de *Soulom*, le nouveau groupe de 6.000 CV. de *Saint-Lary*, les trois groupes hélice de 3.470 CV. de *Baigt*, les deux Pelton de 9.000 CV. d'*Artiques*, la turbine Francis de 5.000 CV. du *Teich*.

L'AIGLE. - VANNE DE PRISE D'EAU
EN COURS DE MONTAGE (Ensemble)

L'AIGLE. - VANNE DE PRISE D'EAU
EN COURS DE MONTAGE (Détail)

DANS LES ALPES. — Les nouveaux groupes de 4.000 CV. de la *Saussaz*, celui de *Champ-sur-Drac*, les groupes Pelton de 9.500 CV. de la *Rageat* et de 4.000 CV. de l'*Argentière*, la Centrale de *Calypso* basse chute (deux groupes de 6.800 CV.), détruite au cours de la retraite allemande en *Maurienne* et reconstruite depuis.

MASSIF CENTRAL. — Les deux groupes Francis de *Monistrol-d'Allier* (7.470 CV.), les turbines hélice de *Fumel*.

POUR LES PYRÉNÉES. — Les groupes de 6.400 CV. de *Font-Pedrouse*, de 12.500 CV. d'*Usson*, les

Cette liste qui est certainement incomplète, ne tient pas compte de la production de l'Afrique du Nord.

L'ensemble de ces machines représente, rien que pour la France métropolitaine, une puissance de l'ordre de 400.000 CV., dont l'appoint est heureusement supérieur aux destructions allemandes, qui ont cependant coûté, en *Maurienne*, plus de 250.000 CV avec les Centrales de *Pontamafrey*, de *Saint-Jean*, *La Praz*, *Avrieux*, de *Calypso*, et nous en passons, et surtout de *Bissorte*. Les destructions de ces Centrales ne sont, évidemment, pas complètes et les travaux que nécessite leur remise en état sont active-

ment poussés. C'est ainsi que, dans la Centrale de la *Bissorte*, deux groupes ont repris le service en 1945, et que le troisième a été remis en route en janvier 1946 ; il est à remarquer que, quoique datant de 1936, ces trois turbines Pelton, qui donnent 40.000 CV sous 1.160 m., ont été réinstallées à peu près sans modifications ; leur bonne tenue en exploitation, les rendements qu'elles donnent, qui dépassent 90,7 % ne sont, dans le domaine des hautes chutes, guère dépassés aujourd'hui dans le monde, si même ils ont été atteints.

Après ces quelques mots d'introduction, nous allons passer à la description de quelques Centrales

Le nombre encore élevé de modernisations récentes fait d'ailleurs toucher du doigt l'échelle des progrès réalisés depuis l'autre guerre, puisque les dépenses engagées sont compensées :

- d'une part, grâce à l'amélioration du rendement et l'augmentation du débit, dans le cadre d'installations existantes ;
- d'autre part, dans certains cas, grâce à une plus grande facilité de conduite, qui entraîne une réduction sensible des frais d'exploitation.

La réalisation-type qui, dans ce domaine, se présente à l'esprit, est certes celle de *Jonage*. Il con-

L'AIGLE. - VANNE DE VIDANGE, TYPE « A CHENILLES »
POUR PERTUIS DE 2,500 M. X 8,500 M. HAUTEUR D'EAU SUR LE SEUIL : 75 M.

anciennes qui, grâce à des réaménagements récents, fonctionnent maintenant dans des conditions de rendement et avec une facilité de conduite qui n'ont souvent rien à envier à celles des usines les plus modernes.

Ces installations posent aux Ingénieurs des problèmes d'une difficulté particulière, du fait que les dispositions nouvelles doivent s'inscrire dans le cadre des anciennes ; il faut trouver, dans chaque cas, la solution qui assure le gain maximum, en kwh. par an, moyennant la moindre dépense relative. En particulier, le temps d'immobilisation des machines, entre l'arrêt de l'ancienne centrale et la mise en route de la nouvelle, doit être réduit au strict minimum.

vient, tout d'abord, de rappeler le bruit qu'avait fait dans le monde, en 1896, cette construction d'une échelle alors inconnue en Europe, qui mettait en relief l'esprit d'entreprise qu'à si souvent manifesté l'industrie lyonnaise. On peut citer, à ce sujet, l'appréciation de M. Routin qui écrivait à cette époque :

« L'importance de l'entreprise exigeait, pour sa mise en œuvre, tous les soins minutieux dont elle a été l'objet. La station de *Jonage* peut, en effet, être comparée comme importance, à la station fameuse de la *Niagara Falls Company*. L'ancien continent semble enfin se réveiller de sa torpeur habituelle car, moins de deux ans après la grande tentative américaine, on pourra opposer, en France, une application aussi audacieuse de l'asservissement des forces de la nature. »

Rappelons que la Centrale comportait 16 groupes *Jonval* et *Francis* de 1.250-1.350 CV à 120 t./m., avec des alternateurs triphasés (nouveau pour l'époque) de 6 mètres de diamètre.

Entre 1930 et 1939, ces groupes anciens, dont un seul a été conservé comme groupe auxiliaire et aussi probablement à titre de témoin du passé, ont fait place à 14 turbines Hélice à pales orientables, de 6.000 CV chacune, à 214 t./m., sous 12 mètres de chute, ce qui correspond à une vitesse spécifique particulièrement élevée de plus de 700 t./m. L'augmentation de chute (à l'origine, elle était de 10 m.) a été obtenue grâce à la construction d'un barrage mobile à cinq pertuis, le barrage de *Jons*, et la mise en place des nouveaux groupes a nécessité un véri-

cups de bélier, essais maintenant historiques, effectués par MM. Camichel, Eydoux et Gariel (1). Les deux chutes qui alimentent cette Centrale ont été munies, juste avant la récente guerre, l'une de trois turbines Pelton de 3.500 et 7.000 CV, construites par *Als-Thom Charmilles*, l'autre de trois groupes *Francis Neyrpic*, à axe vertical, de 5.870 CV. sous 107 m.

La Centrale de la Cassagne qui occupe le sommet de la vallée de la *Tet* a été remise en route en 1944, avec deux turbines Pelton-Neyrpic à axe vertical, de 5.700 CV. sous 400 m. de chute. Ces machines remplacent quatre turbines Girard de 2.000 CV. La disposition nouvelle, à axe vertical, a permis de réutiliser les maçonneries sans modifications importantes, l'alimentation par en-dessous des turbines

CHAMP-SUR-DRAC. - BACHE SUR TOUR VERTICAL

table tour de force ; une partie importante des maçonneries a été reprise en sous-œuvre, et cela sans arrêter l'exploitation de l'Usine.

Les turbines ont été fournies par la Société *Escher-Wyss*, par la Société *Alsacienne de Constructions Mécaniques*, *Als-Thom Charmilles*, et les Ateliers *N.B.P.P.*

On jugera de l'ampleur de cette transformation en soulignant que, dans le cadre d'une Centrale de 20.000 CV., en service depuis plus de trente ans, il a été installé un ensemble de turbines pouvant développer plus de 90.000 CV.

En passant des Alpes aux Pyrénées, on peut citer, à propos d'usines réaménagées, celles de *Soulom* qui, en 1916-1917 fût le siège des essais relatifs aux

Girard ayant fait place à une alimentation par-dessus des turbines Pelton placées à un niveau notablement inférieur : cette disposition permet de gagner quatre mètres de chute environ. Les quatre anciennes conduites, complètement usées, ont fait place à deux conduites neuves, capables d'un débit supérieur et les quelque 76 % de rendement des turbines Girard, aux 89,8 % des Pelton, si bien que la puissance de la Centrale a pu être portée de 8.000 à 11.400 CV., soit une augmentation de plus de 40 %.

Cette centrale est la première d'une série d'installations montées en cascade sur la vallée de la

(1) Camichel, Eydoux et Gariel : « Etude théorique et expérimentale sur les coups de bélier dans les conduites forcées » (Toulouse, Privat, 1919).

Tet, et destinées à alimenter le réseau de traction de la S.N.C.F.

Immédiatement à l'aval de la *Cassagne*, la Centrale de Fontpedrouse a été mise en route en 1942, dans le même bâtiment qui abritait, depuis 1913, deux turbines Pelton de 2.200 CV. Le canal d'ame-

d'altitude des *Sept-Laux*, situés au pied du *Rocher-Blanc*, bien connu des skieurs. En 1941, un nouveau bâtiment fut construit sur l'ancien et une nouvelle conduite forcée fut mise en place. Un nouveau lac du groupe des *Sept-Laux* fut percé et l'augmentation de débit réalisée permit de porter la puissance de

CORDEAC. - BACHE SUR TOUR VERTICAL

née a été remis à neuf : dans certaines sections son tracé a été modifié afin d'éviter des zones de terrain instable. La conduite forcée a été changée ; le débit maximum utilisé est ainsi passé de 2.000 l./sec. à 3.800 l./sec. et le groupe Pelton unique, à marche entièrement automatique, qui remplace les anciennes machines, développe 7.400 CV à 428 t./min. sous 166 m. de chute. La faible hauteur de chute a imposé la disposition à deux roues, quatre jets, qui permet d'utiliser à bon rendement, même de faibles débits d'étiage. A l'aval de la Centrale de Fontpedrouse, deux Centrales nouvelles sont en constructions : celle de *Thues* qui comportera deux groupes Francis de 4.500 CV sous 75 m. et celle d'*Olette* où seront installés deux groupes Pelton à deux roues, quatre jets, de 6.800 CV sous 214 m.

Toujours dans le domaine des turbines Pelton, une utilisation des plus intéressantes est celle de la Centrale de *Fond-de-France*. L'ancienne Centrale, construite par la *Société Générale de Force et Lumière*, à la fin de la guerre 1914-1918 comportait un groupe de 8.000 CV et alimentait à l'origine le réseau continu série. La Centrale prend son eau sous une chute de 1.000 m. environ, dans les lacs

la Centrale à 44.000 CV grâce à un groupe Pelton *Alsthom-Charmilles* à deux roues, deux jets, tournant à 500 t./min. Les deux roues sont montées en porte-

CHAMP-SUR-DRAC. - MODELE DU SIPHON

à-faux aux deux extrémités de l'arbre, qui repose sur les deux seuls paliers de l'alternateur. Le groupe ancien de 8.000 CV a été conservé comme machine

de secours. On conçoit que, dans ce cas, c'est un remaniement très important de l'installation qui a été effectué puisque la puissance a été plus que quintuplée.

C'est au contraire moyennant des modifications relativement minimales qu'a été modernisée la Centrale de *Champ-sur-Drac*, également de la *Société Générale de Force et Lumière*. L'ancienne usine, qui comptait parmi les premières installations de France puisqu'elle date de 1900, comportait à l'origine cinq groupes centripètes de 1.350 CV munis de distributeurs à tiroirs, utilisant sous 31 m. un débit de 25 m³/sec. environ. Entre 1913 et 1918, ces groupes firent place à six turbines Francis, portant la puissance de 6.750 CV à 7.000 CV environ.

en cas de coupure brusque du débit et peuvent fonctionner à débit partiel.)

— Les orifices de déversement de la cheminée d'équilibre furent modifiés de façon à permettre l'évacuation d'un débit de 12 m³/sec.

Il ne pouvait être question d'installer dans l'ancien bâtiment le nouveau groupe Francis à axe vertical, de 9.430 CV sous 28 m. à 250 t./min. Alors que l'ancienne Centrale était toujours en service, une nouvelle usine fut construite à proximité immédiate. Ce n'est qu'au moment de son achèvement que fut effectué, en un mois environ, le piquage de la nouvelle turbine sur la conduite, par une culotte de forme complexe, construite en béton armé. L'ancienne Centrale fut ensuite démontée et les 432

FONTPEDROUSE. - TURBINE EN ATELIER

Le réaménagement effectué entre 1940 et 1941 s'inscrit dans cet ancien cadre : la prise d'eau, le canal d'amenée, la conduite de 3 m. 50 de diamètre, de 5 kms de long, en grande partie construite en béton, la cheminée d'équilibre, furent intégralement conservés.

Le débit fut porté de 25 à 28 m³/sec. grâce à deux modifications :

— Une batterie de siphons régulateurs de niveau, permit d'élever le plan d'eau dans le canal d'amenée, jusqu'à quelques centimètres des berges.

(Ces siphons, qui avaient été mis au point sur modèle réduit, dans les laboratoires des Ateliers N.B.P.P. sont conçus de façon à s'amorcer très rapidement,

tonnes de ses machines (contre 286 tonnes seulement de matériel neuf) furent récupérées.

La turbine, du type Francis à axe vertical, a une vitesse spécifique relativement élevée (Ns 377). La bache est construite en fonte, en quatre pièces. Malgré la puissance relativement modeste de la machine, ses dimensions sont assez imposantes du fait de la hauteur faible de chute.

Les conditions particulièrement défavorables dans lesquelles s'effectue la régulation du groupe : conduite de 5 km. de long, cheminée d'équilibre de section insuffisante pour maintenir la stabilité en réseau séparé, ont imposé l'installation d'un déchargeur de compensation qui est ici, en raison du débit élevé et de la faible hauteur de chute, un papillon

de 1 m. 75 de diamètre, muni d'un double système d'équilibrage et d'un groupe de deux pompes à huile assurant sa refermeture lente.

La manœuvre de la Centrale est semi-automatique : un seul agent y suffit, malgré la répartition des appareils sur les deux étages du bâtiment, grâce à un système de signalisation des incidents et d'arrêt automatique en cas d'avarie.

On peut se faire une idée du gain réalisé grâce à ces nouveaux aménagements, relativement peu importants par rapport à l'ensemble des ouvrages, en notant les augmentations successives de puissance :

— De 5.000 CV à l'origine, la puissance est passée successivement à 7.000 CV puis à 9.430 CV, cette dernière étape procurant une augmentation de 35 % par rapport à l'équipement en service avant 1940. En ce qui concerne la production, elle est passée de 35 à 47 millions de Kwh par an.

L'exemple de *Champ-sur-Drac* dont un seul homme peut assurer l'exploitation, nous incite à dire quelques mots du rôle de plus en plus important joué dans les Centrales par les systèmes de commande automatique.

L'introduction de l'automatisme dans tous les domaines de l'industrie (depuis les trieurs de cigares jusqu'aux installations téléphoniques) est un signe caractéristique de notre époque. Dans le domaine des installations hydro-électriques, où la moindre défaillance peut avoir des conséquences graves, il importe d'examiner dans chaque cas avec une réserve prudente, les avantages et inconvénients d'un automatisme plus ou moins poussé.

Il est intéressant de remarquer, tout d'abord, que dans les centrales d'assez grande puissance il est toujours nécessaire de maintenir sur place du personnel d'entretien et, dans la plupart des cas, un chef de quart chargé de la manœuvre d'un poste d'interconnexion à départs multiples. Il serait alors illogique, dans de telles centrales, de réduire à presque rien le rôle de ce personnel dont la présence est par ailleurs indispensable. Le rôle véritable des systèmes automatiques est alors celui d'une centralisation des postes de manœuvre, de façon à faciliter la surveillance du chef de quart et lui permettre d'effectuer plus rapidement les manœuvres de démarrage et de modification de la charge.

On peut également remarquer à ce propos, que la sûreté de marche d'un équipement électro-mécanique automatique est d'autant plus grande que sa conception est plus simple : la surveillance d'un chef de quart « l'œil du maître » permet précisément d'éviter, dans une certaine mesure, les sécurités surabondantes, les « contrôles des contrôles » qui

pourraient alourdir l'installation et multiplier les contacts de ses relais électro-magnétiques.

Dans le domaine de la signalisation des incidents et du déclenchement automatique, des manœuvres d'arrêt en cas d'avarie, il semble que la question soit bien tranchée : moyennant l'installation de quelques détecteurs électro-mécaniques simples, mais dont la mise au point a d'ailleurs posé des problèmes techniques intéressants, moyennant la disposi-

PONT-ESCOFFIER. - ROUE ET INJECTEUR

tion de servo-moteurs à huile ou à eau sous pression, judicieusement disposés, on peut accorder, tout bien pesé, aux systèmes électriques de sécurité une confiance plus grande qu'à l'attention et aux réflexes de l'homme de manœuvre le mieux entraîné.

Malgré les réserves faites plus haut, l'automatisme intégral, généralement réalisé sous forme d'un télépilotage, constitue cependant une solution intéressante pour certaines Centrales de puissance assez faible et de manœuvre simple, le plus souvent ne comportant qu'un seul groupe. C'est en particulier le cas pour des Centrales situées dans des vallées

très reculées, comme cela se rencontre dans les Pyrénées. La Société exploitante dispose alors d'une équipe volante d'entretien, chargée de la surveillan-

MONISTROL-D'ALLIER. - CHEMINÉE D'EQUILIBRE

ce de plusieurs centrales, la manœuvre étant assurée à distance, depuis une usine placée plus à l'aval et où viennent généralement converger les lignes électriques provenant des centrales satellites.

Alors que la commande manuelle directe n'aurait été souvent possible que moyennant la construction d'un véritable village et même d'un réseau de téléphériques, comme dans les Usines de *Tramezaignes* et *Lassoula* dans les Pyrénées (n'oublions pas que le service continu requiert un personnel de quatre ou cinq hommes), la commande à distance réduit le personnel d'exploitation, soit à zéro, soit plus souvent à un paysan, non spécialiste, chargé de la garde du bâtiment et éventuellement, appelé à effectuer de temps à autre des manœuvres très simples.

De telles installations sont prévues, par exemple, toutes dans les Pyrénées, à Fontpédrouse (pilotage depuis la Centrale de la Cassagne, avec asservissement de la puissance au niveau amont), à Rioumajou, où dans une gorge profonde, se monte actuellement un groupe Pelton vertical de 10.500 CV sous 200 m. de chute. Le pilotage sera effectué depuis la Centrale de *Saint-Lary*. De même à *Orgeix* deux groupes Pelton seront pilotés depuis la centrale du *Têt* et enfin à *Fabrèges* un groupe Francis de 11.100 CV sous 105 m. sera piloté depuis l'usine d'*Artouste*, distante de quelque 200 mètres.

Ces questions de manœuvre automatique nous conduisent à effleurer un problème qui dépasse de beaucoup le cadre de cet exposé, puisqu'il a trait aux réactions mutuelles des turbines et des réseaux interconnectés qu'elles alimentent : nous voulons faire allusion à la régulation des Centrales interconnectées et aux aspects multiples que revêt cette question complexe : répartition économique de la charge,

LABARRE. - DISTRIBUTEUR

stabilité des groupes et des lignes d'interconnexion, réglage des puissances échangées et de la fréquence.

Nous ne voulons pas parler ici des études et essais qui ont suivi les travaux de MM. Fallou et Darrieus sur le réglage de fréquence-puissance ni discuter des incompatibilités entre le réglage rapide du tachymètre et l'action plus lente d'un mécanisme automatique agissant sur le réglage de charge-vitesse et des réactions de ces systèmes sur la stabilité des lignes d'interconnexion et la reprise du synchronisme après un incident.

Nous voudrions simplement attirer l'attention sur un aspect assez simple de la question, qui avait été peut-être un peu oublié depuis les tout premiers temps de l'interconnexion et sur lequel les Anglais

titude de l'ordre de 2 % sur la puissance ; mais si le statisme est, non plus de 1 % mais de 1 p. 1.000, cette incertitude deviendra égale à 20 %.

Essayons maintenant, sur un grand réseau d'interconnexion, de régler la fréquence par le simple jeu des tachymètres des régulateurs et proposons-nous de réaliser ce réglage avec une précision comparable à celle que montrent les meilleurs enregistrements de fréquence réalisés vers 1939, soit environ 1/20 de période :

— Si le réglage est effectué, comme cela était couramment réalisé vers 1936, par une seule centrale « chef d'orchestre », le statisme de chacun des groupes de réglage devra être inférieur à 1 % : ces quelques groupes fonctionneront alors à charge cons-

LABARRE. - ROUE-HELICE

et les Américains semblent avoir remis l'accent dans quelques articles et réalisations récents.

Du fait des jeux et du frottement de la timonerie des régulateurs, si bien construits soient-ils, l'ouverture du vannage qui correspond à une fréquence donnée n'est pas exactement déterminée : en fait, la puissance du groupe reste indéterminée entre deux valeurs, d'autant plus écartées l'une de l'autre que l'insensibilité du régulateur est plus grande, mais aussi que le décrément de statisme est plus petit.

Autrement dit, pour un groupe couplé sur un grand réseau, les imperfections du régulateur se font particulièrement sentir si le statisme est faible. C'est ainsi que sur un régulateur de précision, on pourrait associer, à un statisme de 1 %, une incer-

tamment variable, le partage de puissance entre eux sera de plus, mal déterminé ; le rendement moyen de l'installation sera alors peu élevé.

— On peut, au contraire, mettant bien entendu à part les centrales qui ne disposent d'aucune réserve hydraulique, faire participer au réglage un nombre important de groupes. Si, par exemple, pour aucun d'eux, la charge ne vient pas à varier de plus de 10 %, le même réglage de fréquence que plus haut sera obtenu grâce à un statisme de 1 % et non plus de 1 p. 1.000 : le partage de la charge sera alors bien déterminé et le réglage sera effectué autour d'une position « de programme », dans une zone de bon rendement de chaque turbine.

Il semble donc que, en exploitant de façon assez

complète les possibilités de réglage des centrales hydrauliques, on puisse obtenir un réglage précis de la fréquence, en même temps qu'une répartition bien déterminée de la charge, autour des valeurs « de programme » fixées par des consignes appropriées, ceci en faisant simplement appel au jeu des régulateurs tachymètres de grande précision.

Une conclusion serait actuellement prématurée, et l'on peut dire que la régulation des grands réseaux

Rappelons, en terminant, la contribution très importante apportée à l'avancement de ces problèmes, par les travaux et discussions récents des 1^{re} et 4^e sections de la Société Française des Electriciens et de leurs Présidents, MM. Langlois-Berthelot et Ailleret.

Revenons maintenant, après cette excursion dans le domaine des grands réseaux d'interconnexion, aux turbines elles-mêmes.

cherche encore sa voie, mais il n'est pas exclu de penser que celle-ci puisse être trouvée dans le retour à un réglage très simple, tel que celui dont il vient d'être question. Il va sans dire que, dans certains cas, il pourra être nécessaire de lui superposer un réglage correctif, qui permette en particulier d'éviter la surcharge momentanée des lignes d'interconnexion, ou de tenir compte de certains contrats d'échange à caractère impératif.

Nous allons examiner quelques particularités de machines réalisées récemment, ou en cours de construction, et se rattachant aux trois grandes familles : Pelton, Francis et Hélice.

Pour les unes comme pour les autres, une caractéristique essentielle réside dans la tendance vers des puissances unitaires de plus en plus élevées, vers des machines de dimensions de plus en plus imposantes.

L'échelle sans cesse croissante des réseaux interconnectés, les moyens de construction de plus en plus puissants, tant en ce qui concerne le Génie Civil que les constructions mécaniques et électriques, reculent sans cesse les limites de puissances réalisables.

Si bien que nous en venons à l'idée que la limitation, peut-être la plus impérative, réside, dans ce domaine, dans le débit de nos fleuves et dans les hauteurs de chute dont l'équipement est possible dans des conditions convenables d'économie.

Si les 42.500 CV de *Brommat*, les 52.000 CV de *Sarrans* ont été, il y a maintenant quinze ans, des entreprises audacieuses, le nombre des machines de cette puissance est actuellement élevé dans le monde, en particulier en Amérique et les réalisations récentes, les plus caractéristiques nous mènent :

dans le domaine des turbines Pelton :

- aux 40.000 CV de *Bissorte*, 55.000 CV du *Portillon*, 56.000 CV d'*Innertkirchen* en Suisse, et aux 85.000 CV de *Serra de Bubatao* au Brésil.

dans celui des turbines Hélice :

- aux 60.800 CV de *Bonneville* aux U.S.A., aux 65.000 CV de *Hojum* en Suède.

enfin, dans celui des Francis :

- aux 90.000 CV de *Génissiat*, aux 100.000 CV de *Shipshaw*, aux 116.000 CV du *Boulder-Dam*, aux 135.000 CV de *Chastang*, enfin aux 143.000 CV du *Grand Coulee Dam* aux U.S.A.

En ce qui concerne les dimensions des machines elles-mêmes, c'est avec les turbines Hélice de basse chute que les chiffres les plus imposants sont atteints.

ESCALDES. - ROUE EN MONTAGE DANS LA CENTRALE

Les quelques 5 m. des roues Francis de *Génissiat* et du *Grand Coulee* ou les 5 m. 80 des 10 turbines de *Beauharnois* au Canada (53.750 CV sous 24 m.) ne sont cependant pas très loin au-dessous des 6 m. 80 et 7 m. 85 des roues Hélice d'*Allbruck-Doggern* et de *Ryburg-Schworstaedt*, en Suisse et

enfin des 8 m. des deux turbines suédoises de *Vargon*, les plus grandes roues du monde, de 18.000 CV sous 4 m. de chute, tournant à 50 t./min. et absorbant chacune un débit de 312 m³/sec. Peut-être les centrales marémotrices, dont une étude poussée est en ce moment effectuée en France, nous conduiront-elles prochainement à des diamètres encore plus considérables, sans parler des turbines géantes que les Russes projetaient déjà en 1941, mais dont nous n'avons pas de nouvelle à l'heure actuelle.

C'est dans deux directions principales que, dans ce domaine des turbines Hélice à pales mobiles, les constructeurs orientent leurs recherches :

- D'une part, vers des turbines de relativement haute chute et de vitesse spécifique moyenne, qui jalonnent la zone de transition entre le domaine des roues Hélice et celui des roues Francis.
- D'autre part, vers les turbines Hélice de basse chute et de grande puissance, pour lesquelles une vitesse spécifique élevée est généralement recherchée.

Rappelons brièvement, à cette occasion, que la vitesse spécifique, vitesse de rotation d'une turbine semblable à celle projetée et développant 1 CV sous 1 m. de chute, détermine dans une assez large mesure, la forme des roues de turbines. La vitesse spécifique est d'autant plus grande que la puissance et la vitesse de rotation sont plus élevées, et que la hauteur de chute est plus basse.

On voit donc qu'une vitesse spécifique élevée permet d'augmenter soit la puissance unitaire, soit la vitesse de rotation.

Parmi ces turbines Hélice de basse chute, citons les réalisations récentes de :

- *Swir*, en U.R.S.S., avec quatre turbines de 37.500 CV à 75 t./min. sous 11 m., $ns = 725$.
- *Pickwick Landing*, aux U.S.A., avec deux groupes de 48.000 CV sous 13 m. à 82 t./min., $ns = 724$.
- *Reckingen*, en Suisse, avec deux groupes de 24.000 CV, sous 8 m. 50 à 75 t./min., $ns = 765$.
- *Jonage*, dont les quatorze groupes de 6.000 CV atteignent, en raison de leur vitesse de rotation particulièrement élevée (214 t./min.) la vitesse spécifique de 760 et même de 900 sous les chutes les plus basses.
- Enfin, les turbines de *Vargon*, pour lesquelles une hauteur de chute de 4 m. est associée à une vitesse spécifique supérieure à 950.

En France, où la prospection des basses chutes n'est pas encore très avancée, et où les fleuves n'ont, malgré tout, pas la puissance de Russie ou d'Amé-

rique, nous citerons outre *Jonage*, les quatre groupes de *Pizançon* sur l'Isère (14.600 CV sous 10 m. 70), *Kembs* sur le Rhin (groupes de 36.600 CV sous 16 m. 50), les groupes, en cours de montage, de *Labarre* sur l'Ariège (6.440 CV sous 11 m. 50), de *Cajarc* sur le Lot (6.200 CV sous 9 m.), enfin, parmi les projets, les trois groupes de *Romans* sur l'Isère et la Centrale de *Donzère-Mondragon* sur le Rhône.

Pour en revenir aux turbines Hélice de haute chute, nous remarquerons les installations récentes de :

— *Harjavalta*, en Finlande (47.000 CV sous 26 m.).

entre 150 et 350 m., on peut hésiter, dans certains cas, à installer, soit des turbines Pelton à plusieurs jets, tournant assez lentement, soit au contraire des turbines Francis à faible vitesse spécifique, mais à vitesse de rotation élevée.

Si la solution Francis conduit souvent à une machine plus légère, la solution Pelton présente un grand intérêt en raison de son rendement élevé à charge partielle et des avantages qu'elle procure en ce qui concerne l'usure par une eau très chargée de sable.

— *Le Shannon*, en Irlande (33.000 CV sous 32 m. 50).

— *Hojum*, en Suède (65.000 CV sous 31 m.).

— Enfin, en France, *Cize-Bolozon* (trois groupes de 10.750 CV sous 17 m. 50) et, au Maroc, les deux groupes d'*Im'Fout* (22.000 CV sous 36 m.).

A l'inverse des turbines Francis, à vitesse spécifique élevée, dont le rendement baisse très vite lorsque l'ouverture diminue, ces turbines Hélice de haute chute permettent de conserver un rendement élevé, même aux ouvertures partielles.

C'est un avantage assez analogue que procurent, dans une autre zone de transition que nous allons maintenant examiner, les turbines Pelton de chute peu élevée par rapport aux turbines Francis de haute chute. Pour des chutes comprises, en gros,

Parmi ces installations « de transition » citons pour les Pelton :

— *Fontpedrouse*, dont nous avons déjà parlé sous 166 m.

— *Pont-Escoffier* où quatre groupes de 16.600 CV fonctionnent sous 375 m. à 600 t./min.

— Le projet d'*Olette*, sur la *Tet*, pour lequel la solution Pelton (6.800 CV sous 228 m. à 600 t./min.) l'a emporté, après une étude approfondie, sur une solution « Francis » à 1.000 t./min.

Parmi les Francis de haute chute, nous citerons entre autres :

— Le groupe de 12.000 CV de *Beaufort-sur-Doron* sous 260 m. de chute.

- Les groupes de 42.500 CV de *Brommat*, sous 255 m.
- Les trois groupes d'*Ixapantongo*, au Mexique (39.000 CV sous 328 m.).

Passons maintenant aux turbines Pelton et examinons, en nous référant à quelques machines-type, quelques dispositions caractéristiques.

En ce qui concerne les turbines Pelton à axe horizontal, les dispositions, qui comportent deux

spécifique un peu supérieure (voisine de 17) dont le rendement est particulièrement élevé.

La disposition à axe vertical, qui a été retenue, par exemple pour les Centrales de la *Cassagne* et de *Rioumajou*, dont nous avons déjà parlé, permet de concentrer sur une roue unique les jets de deux, de trois et même de quatre injecteurs.

Ainsi, les cinq groupes d'*Innerltschen*, en Suisse, à deux jets, développent chacun 56.000 CV. sous 650 m., ceux d'*Escaldes*, en Andorre, à trois jets, donnent 17.500 CV sous 460 m., celui de *Rioumajou* comporte quatre jets. Cette disposition nous a même permis, dans un avant-projet récent, de faire le croquis d'une machine dont les 118.000 CV auraient été, grâce à quatre jets, fournis par un roue unique de 2 m. 50 environ de diamètre.

Il nous reste, maintenant, à donner un bref aperçu de quelques turbines Francis récentes, soit à axe horizontal, soit à axe vertical.

Parmi les turbines à axe horizontal, les plus intéressantes sont certes les turbines doubles :

- soit comportant deux turbines distinctes, une à chaque bout d'arbre de l'alternateur, comme au *Sautet* (c'est l'équivalent de la disposition *Fond-de-France* en Pelton) ;

- soit comportant une roue double, avec un distributeur unique et deux coudes d'évacuation latéraux, comme cela a, par exemple, été fait récemment dans la Centrale de *Morel*, en Suisse Valaisanne, sur trois groupes de 24.000 CV sous 263 mètres de chute.

Les deux groupes Francis double du Péage-de-Vizille, dont la galerie a été attaquée en 1944 et dont la réalisation se poursuit, seront dans ce domaine les plus puissants du monde avec 35.000 CV sous 132 mètres de chute.

Remarquons, à ce sujet, que pour des puissances importantes, seules les turbines doubles seront, en pratique, installées à axe horizontal. Pour les turbines Francis simples, la disposition à axe vertical est, dans la plupart des cas, la plus intéressante pour des machines de grandes dimensions : la bache peut être plus facilement fondée, les démontages sont, en règle générale, plutôt plus faciles, et surtout la possibilité de placer la roue de la turbine à un niveau inférieur permet de réaliser des conditions d'aspiration plus favorables.

C'est donc parmi les turbines Francis simples à axe vertical que nous trouverons les machines les plus puissantes, dans de grandes centrales telles que *Cordéac*, *l'Aigle*, *Génissiat*, ou celles de la *Sungari*,

GENISSIAT. - VANNE DE DERIVATION

roues, donc deux ou quatre jets, conviennent particulièrement pour les chutes moyennes. Cependant, grâce à un tracé de roue à vitesse spécifique peu élevée (13 environ), la première disposition a été retenue pour les turbines de très haute chute de *Fond-de-France* (1.000 m.), du *Portillon* (1.340 m.) et de la *Dixence* (42.500 CV sous 1.750 m.) la plus haute chute du monde.

Sous une chute de 1.160 m. la disposition « *Bissorte* » a permis d'installer une roue unique de vitesse

de *Boulder-Dam*, du *Grand-Coulee-Dam*, de *Shasta*, de *Shipshaw*.

Les hauteurs de chute sont, en gros, comprises entre 60 et 150 mètres :

- 64 m. 50 à *Génissiat* ;
- 67 m. à *Shipshaw* (Canada) ;
- 69 m. à la *Sungari* (Mandchourie) ;
- 80 m. à *l'Aigle* ;

essentiels : le débit, la hauteur de chute, un réservoir d'accumulation de grande capacité.

En ce qui concerne plus particulièrement les turbines, leurs bâches spirales sont construites, soit sur place en tôle rivée, comme à *Génissiat* ou à la *Sungari*, soit en acier coulé, en plusieurs parties, comme à *Cordéac*, au *Boulder* ou à *Grand-Coulee*, soit encore comme à *Saint-Etienne-Cantalès*, en tôle rivée et

Graphique des rendements comparés des turbines Girard et des turbines Pelton

- 99 m. à *Shasta* (U.S.A.) ;
- 109 m. au *Grand-Coulee-Dam* (U.S.A.) ;
- 158 m. au *Boulder-Dam* (U.S.A.).

C'est dire que ces centrales de grande puissance ne sont pas situées en haute montagne, où les bassins versants n'apporteraient pas un débit suffisant, ni en plaine, où il serait difficile de créer une chute assez élevée, mais dans des régions de moyenne montagne, où il est possible de réunir trois éléments

soudée, mais en plusieurs tronçons construits à l'avance.

On conçoit que la coulée, l'usinage, l'assemblage, le transport de ces pièces énormes nécessitent la mise en œuvre de moyens d'une puissance inusitée. C'est ainsi que pour l'usinage et le montage des turbines de *Cordéac* (56.000 CV), de *Génissiat* (90.000 CV), et *Chastang* (135.000 CV), les Ateliers N.B.P.P., à Grenoble, ont construit un grand hall d'usinage et

de montage, dans lequel un pont-roulant de 60-90 tonnes, placé au-dessus d'une fosse bétonnée, permet de monter ces machines en disposant d'une hauteur de crochet de plus de 15 mètres.

Pour donner une idée du poids et des dimensions de quelques pièces, voici des chiffres :

- le cercle de vannage de *Génissiat* se démonte en quatre parties de 6 tonnes chacune ;
- la roue, magnifique pièce d'acier coulé de quelques 5 mètres de diamètre (et c'est à 10 cm. près environ qu'elle s'inscrit dans le gabarit des chemins de fer) pèse 38 tonnes ;
- la bache de *Cordéac*, 56.000 CV, en acier soudé, pèse plus de 100 tonnes et a été usinée en six tranches, dont certaines dépassent 20 tonnes ;

maintenant un aperçu de l'amélioration des rendements et des perfectionnements apportés au tracé des roues et aux méthodes d'essai qui permettent de juger, avant construction, des qualités d'une turbine nouvelle.

Deux graphiques comparatifs permettent de juger, quoique de façon assez imparfaite, des progrès réalisés en ce qui concerne le rendement.

On sait que le rendement d'une turbine croît, dans une certaine mesure, avec les dimensions de la machine : ces graphiques montrent que les meilleurs rendements atteints en 1931-32, sur des turbines de grande puissance, sont égalés maintenant, dépassés même, par des turbines de puissance unitaire bien moindre. Il est intéressant de comparer,

CORDEAC. - PAPILLON DE 2,350 M. MONTE

- la bache du *Boulder Dam* pèse près de 200 tonnes, l'élément le plus lourd en pesant 36.

En ce qui concerne *Génissiat*, la bache pèsera dans les 300 tonnes, et l'on peut compter que, au total, les parties métalliques de la turbine pèseront un millier de tonnes.

Les papillons de garde, dont le corps et même la lentille sont construits en plusieurs pièces, mesurant 3 m. 50 à *Cordéac*, 4 m. 20 au *Boulder Dam*, 5 m. 20 à *Génissiat*, 5 m. 30 à la *Sungari*. Quant aux turbines de 135.000 CV de *Chastang*, sur la Dordogne, leurs papillons de garde auront 5 m. 75 de diamètre : c'est là une dimension record sous cette chute.

Nous venons de parler « dimensions ». Voici

sur ce graphique, à côté des 80 % des antiques turbines à tiroir, dont la première installation de *Champ-sur-Drac* est un exemple, les 84-88 % de la technique de 1919, avec les 92,8 % de *Sarrans* (52.000 CV, 1931) presque atteints aujourd'hui par des machines beaucoup moins puissantes, telles que le *Sautet* (1936, 2×8.000 CV — 92,5 %) et même le *Refrain* (1939, 2×3.140 CV — 90,7 %).

Ces trois roues fonctionnent à des vitesses spécifiques comparables de l'ordre de 180 t./min.

Sur l'autre graphique, relatif à des roues plus lentes (vitesses spécifiques de l'ordre de 120-130), on peut comparer les 90,6 % de *Brommat*, avec 42.500 CV, aux 91 % de la petite turbine de 4.000 CV de la *Saussaz* (1944).

C'est grâce aux théories de la similitude, sur des roues modèle de petites dimensions, que l'on étudie le tracé des roues industrielles, et que l'on cherche à en parfaire le rendement. Une même roue d'essai peut, à différentes échelles, sous différentes chutes, à différentes vitesses, donner naissance à toute une gamme de turbines industrielles. La roue « Sautet », par exemple, a servi de modèle, entre autres :

ont duré, en ce qui concerne le groupe *Alsthom-Charmillès-N.B.P.P.* (1), de 1939 à 1941 et ont comporté le relevé de plus de 65 diagrammes en collines, ce qui correspond, en gros, à 9.000 points d'essai.

Cette méthode d'essai, suivant la similitude classique dite de *Combes-Rateau*, n'est cependant pas complète et ne rend pas compte, en particulier, des phénomènes de cavitation.

Graphique montrant la progression du rendement des turbines centripètes depuis 1900

- à l'échelle 1/2, aux turbines du *Sautet* et du *Refrain* ;
- à l'échelle 1/3, à la turbine de 28.000 CV de *Cordéac* ;
- à l'échelle 1/5, à la turbine de 56.000 CV de *Cordéac*.

Les essais sur modèle réduit, qui ont permis de mettre au point les tracés de la roue de *Génissiat*, de sa bêche, de son distributeur, de son aspirateur,

Nous n'insisterons pas sur les graves inconvénients bien connus auxquels peut donner lieu la cavitation des turbines hydrauliques : baisse de rendement, vibrations, usure. D'autre part, l'installation d'une turbine est, dans certains cas, d'autant

(1) Sur les quatre turbines de *Génissiat* actuellement en construction ou en montage, deux sont de construction *Alsthom-Charmillès-N.B.P.P.* et deux de construction *Schneider-Escher-Wyss-Fives-Lille*.

moins onéreuse qu'on approche de plus près sa limite de cavitation. Il est donc extrêmement intéressant de savoir, par la reproduction sur modèle réduit des régimes de cavitation, à partir de quelle puissance, de quelle chute, de quelle hauteur d'aspiration une turbine risque de caviter.

Plusieurs méthodes ont été pour cela proposées. La plus perfectionnée d'entre elles a été mise en

de la baisse de rendement, les limites entre lesquelles la turbine industrielle pourra fonctionner sans danger de cavitation.

Cet exposé aura montré, nous l'espérons, d'une part, la complexité des problèmes qui sont posés chaque jour aux constructeurs hydrauliciens, d'autre part, la grande diversité des types, des formes,

GENISSIAT. - ROUE DE TURBINE FRANCIS

œuvre aux Ateliers N.B.P.P., à Beauvert, sur la demande de la Compagnie Nationale du Rhône, pour les essais de la roue destinée à la Centrale de *Génissiat*. Dans cette station d'essais, établie à 12 m. au-dessus du sol, une roue réduite a été essayée sous 7 m. de chute, dans un circuit fermé dont une pompe de 200 CV entretient le débit, et sous une dépression importante, qui peut atteindre 9 m. 40 de vide. Les essais, déjà terminés depuis deux ans, ont permis de préciser à la fois par écoute des vibrations consécutives à la cavitation et par mesure

des dimensions des machines qu'ils doivent concevoir et réaliser.

Quelle commune mesure pourrait-on trouver, en effet, entre une petite turbine Pelton de quelques dizaines de CV et une turbine géante telle que celle de *Génissiat* ?

Devant des réalisations aussi hardies que celles que nous venons de passer en revue — et qui pourtant, si l'on examine de près la question, sont le fruit d'une lente évolution — devant celles qui, demain peut-être, seront à l'échelle non plus du

Rhône ou du Colorado, mais du Volga, du Congo ou de l'Amazone (les Russes ne parlent-ils pas de turbines hélice de 14 m. de diamètre, et les usines à marées n'imposent-elles pas davantage encore), on peut se demander, avec quelque inquiétude, si l'homme ne se trouvera pas, un jour, complètement dépassé par son œuvre. Que devient, autrement dit, la personnalité de l'homme, le respect qui lui est dû, quand il doit participer à des tâches si gigantesques, que seul, un travail entièrement discipliné,

qui doivent faire appel, avant tout, à son intelligence ?

Nous n'en sommes heureusement pas encore là, et l'on peut dire que des réalisations de très grande envergure, telles que l'Aigle, Génissiat ou Chastang font encore plus appel à l'habileté manuelle du tourneur ou de l'alésur, à la science de l'ingénieur, à leur esprit de discipline personnelle, qu'à l'embrièvement dans une masse où se perdraient les personnalités.

Graphique montrant la progression du rendement des turbines centripètes depuis 1900

pour ne pas dire un jour asservi, permet de coordonner les activités de quelque 10.000 ou 50.000 ouvriers, contremaîtres et ingénieurs ?

Nous avons vu tout à l'heure que les conditions géographiques pouvaient apporter une limitation à la puissance des turbines. Une autre frontière, plus étroite peut-être, ne pourrait-elle pas résulter de l'homme lui-même et des limites qu'il convient peut-être d'assigner en toute raison, à des travaux

Alors que nous avons pu, au cours des quatre dernières années, nous demander parfois, aux temps les plus sombres de l'occupation, si la France ne portait pas en elle les germes d'une décadence irrémédiable et n'était pas capable de déborder le cadre étroit de l'action individuelle, le fait qu'il nous ait été possible, en pleine tourmente, de mener à bien des tâches aussi difficiles, est pour nous le meilleur gage de confiance.