Les groupes bulbes

De Röstin en Avignon : L'essor d'une technique

par J. Cotillon

Direction de l'Équipement,
Electricité de France.

L'évolution des idées vers le groupe bulbe est illustrée par les trois brevets déposés par Escher Wyss (Zurich) de 1930 à 1933 (fig. 1).

C'est ainsi que commence, officiellement, l'histoire des groupes bulbes, le 27 décembre 1933, à 15 heures.

Le brevet est homologué le 15 octobre 1934 et ses droits transférés à Arno Fisher, en vue d'une réalisation immédiate. Deux groupes de 168 kW sont en effet mis en service en août 1936, à Röstin^(a), en Poméranie, sur une rivière nommée Persante (fig. 2) : ce seront les premiers groupes à écoulement axial [1] [2] [3] [4].

Après Röstin, Arno Fisher délaisse les bulbes au profit des groupes Harza, dont nous allons parler — 73 de ces groupes d'une puissance totale de 100 MW seront mis en service en Bavière de 1937 à 1943 — car, ce qui l'intéresse pour son usine simplifiée^(b), c'est l'écoulement axial.

1. — Les groupes à écoulement axial

L'écoulement axial comporte en effet de nombreux avantages.

La répartition meilleure des vitesses pour l'alimentation de la roue permet un accroissement du débit spécifique,

^(a) Röstin : $\varnothing$ 1,35 m - $Q = 6,3 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 3,75 \text{ m}$ - 250 tr/mn - $P = 168 \text{ kW}$.

^(b) M. Fentzloff, ancien collaborateur d'A. Fisher et, après la guerre, ingénieur-conseil en génie civil à Passau, se considérait comme le véritable inventeur de ce type d'usine, appelée aussi « usine submersible » [8].

Date de dépôt : 27_7_1930

Inventeur : G. KÜHNE

Date de dépôt : 31_8_1933

Inventeur : J. HAEFELE

Date de dépôt : 27_12_1933

Inventeur : HUGUENIN

1/ Les brevets Escher Wyss.

donc de la puissance spécifique, ou, si l'on préfère, une réduction du diamètre pour un débit donné. C'est ainsi, qu'à l'occasion des études de la chute de Pierre-Bénite (en 1960), on a vérifié que, sous une chute et un débit donnés, on obtient la même puissance avec une roue de 6,10 m en écoulement axial, tournant à la vitesse de 83 tr/mn qu'avec une roue de 7 m tournant à 71 tr/mn dans la disposition classique à axe-vertical ($D_{\text{axial}} = D_{\text{vert}}/1,15$).

La diminution des pertes de charge d'entrée et de sortie entraîne une amélioration des rendements.

Le gain sur la cavitation, dû aux meilleures conditions d'écoulement, se traduit par un moindre enfoncement du groupe, ou, à enfoncement égal, par une vitesse de rotation plus grande, conduisant à un alternateur plus économique.

Enfin, cette disposition s'accompagne d'une simplification et d'une réduction de volume et de coût des ouvrages de génie civil.

Pourquoi, malgré d'aussi riches promesses, l'écoulement axial ne s'est-il pas imposé plus tôt ? D'abord, tout le monde, et notamment les « clients en turbines », n'avait pas une vue claire et précise de tous ces avantages. Ensuite, les constructeurs ne savaient pas où placer l'alternateur : à l'intérieur, à la périphérie ou à l'extérieur de la conduite ?

A. — La première proposition, à ce sujet, paraît être venue de l'ingénieur-conseil américain Leroy L. Harza de Chicago, qui mettait l'alternateur à la périphérie de la roue de turbine (brevets de 1919 et 1924) (fig. 3) : le groupe est à axe horizontal ou quasi horizontal, les pôles de l'alternateur constituent la ceinture de la roue, les pales jouant le rôle des bras du rotor, mais, si l'on veut que ces bras soient orientables, la transmission des efforts et des couples pose de difficiles problèmes mécaniques.

En Bavière où, sous l'impulsion d'A. Fisher, eurent lieu les premières réalisations par Escher Wyss (Ravensburg), les pales sont fixes; les fuites aux joints d'étanchéité ont causé quelques difficultés, résolues actuellement, la durée de vie des joints atteignant 20 000 h de marche (fig. 4).

Escher Wyss a abandonné ce type de turbine en 1950. Les Russes l'ont repris pour l'aménagement d'Ortchalsk, mais ont trouvé que l'exploitation de ces trois groupes de grandes dimensions (6,3 MW - $H = 10,5$ m - $\varnothing 3,30$ m) se heurtait à de grandes difficultés. Il semble même qu'ils en aient abandonné l'exploitation.

B. — Dans la proposition suivante, l'alternateur est disposé à l'extérieur de la conduite : c'est le groupe tube, dont la première tentative d'utilisation semble avoir été faite par Neyrpic lors de l'étude du premier barrage d'Assouan en 1927 [5].

Depuis quelques années, Allis Chalmers [6] [7] s'intéresse à ces groupes (Chaudière n° 2 pour Hydro-Québec, 10 MW; Ozark, sur l'Arkansas, 25 MW) mais, à notre connaissance, il n'y a pas encore de grosse machine de ce type en fonctionnement, et il semble que le constructeur ait rencontré des difficultés sérieuses de vibrations à leur sujet.

C. — Dans la dernière proposition — brevet Escher Wyss déposé le 27 décembre 1933 (fig. 1) — l'alternateur est placé à l'intérieur de la conduite, dans un bulbe : c'était l'idée la plus féconde. Mais en 1934-35, on l'ignore. Et si Arno Fisher choisit le bulbe pour sa première réalisation

d'usine submersible à Röstin, c'est sans doute parce qu'il a en main un brevet tout nouveau, dont les droits de propriété lui ont été transférés dans des conditions d'ailleurs mal éclaircies.

Les groupes de Röstin marchèrent sans incident d'août 1936 à janvier 1942 — le fait vaut d'être souligné — mais toutefois à puissance réduite, 110 kW au lieu de 168 kW, malgré des tentatives diverses pour diminuer un échauffement anormalement élevé, notamment par injection d'air à haute pression, ce qui absorbait une large part de la puissance produite.

A la suite de défauts d'étanchéité du joint carbone, des claquages d'enroulement interviennent en 1942 et 1944 et, depuis cette époque, la centrale n'aurait pas été remise en service.

Il ne semble pas que ce soit à cause des difficultés initiales rencontrées à Röstin qu'Arno Fisher ait eu recours aux groupes à alternateurs périphériques pour les usines de Bavière (deux années seulement séparent les mises en service de Röstin et de Steinbach-sur-Ilser) : la puissance limitée du groupe bulbe, qui s'accorde mal avec les ambitions de l'usine submersible, semble une meilleure raison.

En 1940, on ne sait pas encore faire un groupe bulbe. Né d'un père peu connu — le nom de M. Huguenin est rarement cité — adopté accidentellement par Arno Fisher qui devait vite lui préférer le groupe Harza, le groupe bulbe attend son véritable père et un terrain favorable pour prendre son essor.

2. — L'adoption française

Après la guerre, la France s'intéresse aux réalisations d'Arno Fisher dans une double perspective : pour la réalisation d'un groupe réversible marémoteur et pour l'équipement des usines de basse chute.

Dès 1942, une usine marémotrice est envisagée dans l'estuaire de la Rance. Le cycle à double effet (turbine dans les deux sens) qui paraît nécessaire à la justification de cet aménagement, ainsi que le pompage dans les deux sens pour assurer un surremplissage du bassin ou sa survivance, plaident en faveur de l'écoulement axial.

Les maîtres d'œuvre (E.D.F., C.N.R., S.N.C.F.) s'intéressent également aux usines submersibles pour les sites qui relèveraient, économiquement parlant, d'une telle technique et plusieurs missions s'en vont en Bavière en mai et décembre 1949. La C.N.R. est à l'avant-garde, songeant aux basses chutes du Rhône : dix ans plus tard, elle lancera à Pierre-Bénite les premiers grands bulbes. Mais c'est la S.N.C.F. qui sera en tête des réalisations avec Castet sur le Gave d'Ossau [9] [10] [11].

En 1943, Neyrpic avait proposé pour la Rance un groupe bulbe de 20 MW; le diamètre de la roue était de 8 m et celui du bulbe 12 m pour contenir un alternateur de taille classique (fig. 5). C'était bien là que le bât blessait !

Car, si l'écoulement axial est un rêve d'hydraulicien, pour son utilisation énergétique, c'est essentiellement une affaire d'électricien, et c'est bien ce que comprend M. Guimbal qui, dès fin 1949, propose à M. Gariel, Président-Directeur Général des Ets Neyrpic, d'œuvrer dans ce sens.

Sa solution : réduire considérablement les dimensions de

2/ Le groupe bulbe de Röstin.

3/ Groupe à alternateur périphérique, selon le brevet Harza.

4/ Le groupe à alternateur périphérique de Steinbach (Bavière).

l'alternateur et le remplir d'huile sous pression pour, d'une part éviter les rentrées d'eau que sa faible taille ne permettait plus d'éliminer par un dispositif simple, d'autre part assurer, plus efficacement que dans l'air, l'évacuation des pertes calorifiques qui sont beaucoup plus importantes que dans un alternateur normal.

Les problèmes d'échauffement et de rentrées d'eau, rencontrés à Röstin, trouvaient ainsi leur solution et la standardisation des « usines simplifiées », était reprise sous une forme différente : celle du groupe monobloc.

L'idée de réduire les dimensions de l'alternateur n'était pas nouvelle, et elle fut sans doute retenue à Röstin; celle d'utiliser l'huile sous pression comme fluide caloporteur et moyen d'étanchéité constitue, par contre, l'apport original et décisif de M. Guimbal.

La S.N.C.F., qui se proposait d'installer un bassin de compensation sur le Gave d'Ossau, accepte de tenter l'essai de ces nouveaux groupes. C'est un succès. Les deux groupes, mis en marche industrielle au début de 1954, ont une puissance de 800 kW — cinq fois celle attendue à Röstin — mais la chute est double et il en est de même du débit, à cause de la plus grande hauteur de chute et d'un plus grand diamètre de roue, 1,65 m au lieu de 1,35; de surcroît, le rendement est meilleur car, si le distributeur est fixe comme à Röstin, les pales de la roue, à la différence de Röstin, sont mobiles (*) (fig. 6).

Le groupe bulbe vient véritablement de naître et cette nouvelle technique va se développer, non pas simultanément, mais plutôt successivement, dans trois grandes directions : les petits et moyens bulbes, les groupes marémoteurs et les grands bulbes en rivière. La liste de ces réalisations est donnée en Annexes 1 et 2.

(*) Röstin : ϕ 1,35 m - $Q = 6,3 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 3,75 \text{ m}$ - 250 tr/mn - $P = 168 \text{ kW}$.

Castet : ϕ 1,65 m - $Q = 12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 7,50 \text{ m}$ - 250 tr/mn - $P = 735 \text{ kW}$.

5/ Le premier projet de groupe bulbe pour la Rance (1943).

6/ Groupe bulbe installé en chambre d'eau (Castet).

3. — Les petits et moyens bulbes [13][14][15][16]

Pour satisfaire la demande d'énergie électrique, il y a eu souvent, et dans de nombreux pays, deux thèses en présence : construire exclusivement des centrales de grande puissance qu'imposent les besoins des grandes agglomérations et de l'industrie, ou leur adjoindre toutes les petites usines hydroélectriques que le réseau hydrographique permet d'installer.

La première thèse vise à faire des réalisations à l'échelle des besoins globaux, sans dispersion des efforts, tandis que la seconde traduit le souci d'exploiter toutes les ressources nationales. On peut ajouter, en faveur de celle-ci, que les besoins sont dispersés et que lourdes peuvent être les charges de transport, si bien, par exemple, que les Centres de Distribution d'E.D.F. qui exploitent de petites usines hydrauliques débitant directement sur le réseau de distribution, ont pu tirer un avantage appréciable de cette situation.

De plus les pénuries, qu'entraînent les guerres, rappellent l'attention sur la sécurité des approvisionnements nationaux. D'où l'intérêt porté en France, comme dans beaucoup d'autres pays [12], dès après la guerre, aux petites centrales hydrauliques.

Les groupes bulbes allaient être associés étroitement à l'aspect « petites usines » de cette politique « tout azimuth » de l'hydraulique, dans des dispositions très variées d'installation, en fonction des conditions locales : groupes en siphon, en pertuis ou en conduite.

● Les groupes en siphon.

E.D.F. a réservé la dénomination de « microcentrales » aux petits équipements de très basse chute (1,50 à 3 m) ne mettant en œuvre que de faibles débits (moins de $15 \text{ m}^3/\text{s}$), la puissance des groupes s'échelonnant alors de 50 à 300 kW.

Pour de tels groupes, voués à une marche automatique

$H=7,80\text{m}$ $\phi_{roue} = 1,65 \text{ m}$ $Q=12,5 \text{ m}^3/\text{s}$

$P= 810 \text{ kW}$

$n= 250 \text{ t/mn}$

1954

asservie au niveau amont, on a supprimé les vannes en adoptant la disposition en siphon, connue depuis fort longtemps. Cette disposition ne peut s'appliquer qu'à de faibles chutes. En effet, le groupe monobloc doit être placé près du coude du siphon pour se trouver hors d'eau à l'arrêt; or les conditions de cavitation limitent, en hauteur, le calage de la roue; la disposition en siphon ne peut donc s'appliquer qu'à des chutes ne dépassant pas 4 à 5 m.

Un groupe bulbe prototype en siphon, de 54 kW, avec génératrice asynchrone (fig. 7), est mis en service en janvier 1954 — soit à peu près dans le même temps que les groupes de Castet — à l'écluse de la Maignannerie sur la Mayenne canalisée^(d). A la suite de cette expérience heureuse, deux séries de réalisation sont décidées, sur l'Isle et la Mayenne, au droit de barrages existants ou d'écluses déclassées.

Sur l'Isle, 15 groupes sont installés et 18 sur la Mayenne. Ils sont à distributeur et pales fixes — pour certains, l'orientation des pales peut être réglée à l'arrêt — et correspondent à deux gammes de puissance, 50-100 kW et 100-200 kW. Le détail de ces réalisations est donné en Annexe 2.

Quant à la génératrice, qui tourne dans l'huile en légère pression, grâce à un réservoir placé au-dessus du siphon, elle est asynchrone, sauf pour les 6 derniers groupes, $\varnothing$ 1,12 m, installés en 1964-66 sur la Mayenne, qui comportent une génératrice synchrone.

En effet, parallèlement à l'expérience de la Maignannerie, un autre prototype^(e) est essayé à Echarcon, sur l'Essonne, près de Paris, en 1959, avec génératrice synchrone à aimants permanents, pour un fonctionnement à puissance constante, la différence entre la puissance fournie et celle appelée étant utilisée dans un circuit d'absorption.

Alors que l'absence de réglage des groupes asynchrones

(d) Maignannerie : $\varnothing$ 1,12 m - $Q = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 1,95 \text{ m}$ - 225 tr/mn - $P = 54 \text{ kW}$.

(e) Echarcon : $\varnothing$ 1,12 m - $Q = 4,4 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 1,63 \text{ m}$ - 214 tr/mn - $P = 53 \text{ kW}$.

et la consommation d'énergie réactive par la génératrice les condamnent à une fourniture d'énergie d'appoint sur un grand réseau, les groupes synchrones pourraient être utilisés pour l'alimentation d'un réseau autonome de faible puissance, et c'est dans la perspective de ce cas particulier que fut entreprise l'expérience d'Echarcon.

Mis à part le cas du réseau autonome, c'est bien de génératrice asynchrone qu'il faut équiper les petits bulbes débitant sur le réseau général : facilité d'exploitation et prix de revient (pas d'excitation, simplicité de la machine et de l'appareillage) plaident en leur faveur.

En dehors de l'Isle et de la Mayenne, deux autres groupes asynchrones ($\varnothing$ 1,68 m) sont installés sur l'Aube en 1964.

Au total, 37 groupes bulbes en siphon, installés par E.D.F., d'une puissance totale de 5 000 kW, sont actuellement en service sur l'Aube, la Mayenne et l'Isle. Les constructeurs ont été : Goulut-et-Borne ou Neyrpic, pour la partie turbine, et Bréguet-Sauter-Harlé ou Alsthom, pour la partie alternateur.

Rappelons que la disposition en siphon n'impose pas forcément le recours à la technique du bulbe : l'alternateur peut être extérieur au conduit, soit à l'air libre, soit immergé sous la branche amont du siphon : Cf. le brevet S.F.A.C. (fig. 8) pour les groupes de 100 kW qui équipent 5 écluses du Canal latéral à la Garonne, entre Toulouse et Moissac, depuis 1959 [17].

● Les groupes en chambre d'eau.

Dans cette disposition, le bulbe est immergé dans la chambre d'eau et l'eau attaque directement le distributeur et la roue, sans passage en conduite.

Les réalisations de ce type s'échelonnent, en France, de 1957 à 1966 et concernent, pour E.D.F., 42 groupes d'une puissance totale de 13 000 kW installés sur la Dordogne, la Vézère, l'Isle, le Lot, le Tarn, mais aussi sur l'Orne, l'Aisne et la Meuse.

7/ Bulbe de microcentrale, installé dans un siphon.

8/ Microcentrale avec turbine installée dans un siphon et alternateur immergé, placé à l'extérieur du siphon.

9/ Groupe bulbe de microcentrale, installé en conduite (basse Maulde).

10/ Groupe bulbe aval (Argentat).

Les chutes sont parfois de l'ordre de 2 à 3 m, mais plus souvent de 3 à 4 m et même 5 à 6 m, voire 9,40 m à Peyrissac sur le Lot.

Les débits unitaires sont, en général, de 10 à 15 m³/s, exceptionnellement 28 m³/s à Bergerac,

Les puissances restent de l'ordre de 100 à 300 kW, exceptionnellement 1 200 kW à Peyrissac et 700 kW à Bergerac.

Les groupes de Castet sont de ce type ^(f) (fig. 6).

En gros, les diamètres de roue ($\varnothing$ 1,40 à 1,80 m, sauf à Bergerac 2,50 m) ainsi que les débits restent du même ordre de grandeur que pour les groupes en siphon; c'est la chute un peu plus élevée qui impose, souvent, la disposition en chambre d'eau.

● Les groupes en conduite.

Parallèlement à l'essai d'un prototype en siphon, E.D.F. met en service, en février 1955, sur la Mayenne, à l'écluse de l'Ame, un groupe prototype en conduite: $Q = 9 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 1,90 \text{ m}$ - $P = 120 \text{ kW}$ - génératrice asynchrone tournant à 165 tr/mn dans l'huile. Mais, pour les basses chutes inférieures à 3 m, c'est le groupe en siphon essayé à la Maignannerie qui est retenu.

Le groupe en conduite allait être essayé un peu plus tard, en novembre 1958, mais sous une plus haute chute, à Lartige, sur la Basse-Maulde, dans un barrage-usine d'un type nouveau dit « Basse-Maulde ». On y retrouve les trois caractéristiques de l'usine simplifiée allemande: implantation de l'usine, non plus en rive mais dans le lit même de la rivière, si bien que barrage et usine sont confondus en un seul ouvrage; évacuation des crues, en totalité ou en partie, par déversement par dessus l'ouvrage; utilisation de groupes à écoulement axial, d'un modèle standard. Toutefois l'usine du type « Basse-Maulde » est conçue pour des chutes plus élevées (10 à 18 m au lieu de 8 à 9 m en Bavière): le recours qui en est résulté au type Ambursen, pour le barrage, et à la disposition en conduite, pour les groupes bulbes, donne encore plus de légèreté et de simplicité à l'ouvrage (fig. 9).

A Lartige, la chute est de 13,50 m et 3 groupes bulbes, à pales fixes de 800 MW, furent essayés ^(g), la génératrice tournant dans l'air pour l'un des groupes (Jeumont) et dans l'huile pour les deux autres (Goulut-et-Borne, Bréguet-Sauter-Harlé); ces derniers étaient proposés à des prix moindres que les premiers, mais les rendements garantis étaient moins élevés.

L'expérience de l'usine de Lartige ne s'étant pas révélée suffisante pour départager les deux techniques, c'est dix groupes de chaque catégorie qui sont commandés pour équiper les cinq autres paliers de la Basse-Maulde. Leur mise en service s'échelonne d'août 1961 à juillet 1963.

En cours d'exploitation, on a pu faire d'intéressantes observations. Pour les groupes dans l'huile, on a noté d'abord un rendement inférieur d'environ 4 % à celui des groupes dans l'air (pertes par frottement). On s'est rendu compte, ensuite, qu'il était difficile d'extraire les traces d'eau dans l'huile, d'où la nécessité de mesures fréquentes d'isolement et des traitements d'huile périodiques. Enfin, le facteur de puissance s'est révélé plus faible, l'entrefer étant plus grand.

^(f) Castet: $\varnothing$ 1,65 m - $Q = 12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 7,50 \text{ m}$ - 250 tr/mn - $P = 735 \text{ kW}$.

^(g) Maulde: $\varnothing$ 1,12 m - $Q = 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 13,50 \text{ m}$ - 500 tr/mn - $P = 800 \text{ kW}$.

Sur les groupes dans l'air, on a surtout constaté des amorçages sur les enroulements statoriques, dus à des déformations des circuits magnétiques. Si, à Röstin, ces déformations étaient provoquées par un échauffement exagéré, sur la Maulde, elles ont eu pour origine un dispositif de dilatation du stator insuffisant pour un échauffement acceptable. Le dispositif a dû être modifié et il donne, maintenant, toute satisfaction sur les groupes de la Maulde, ainsi que sur les 12 groupes suivants, mis en service en 1967 (Brugale sur la Cère) et 1970 (Le Prat sur le Cher), qui n'ont donné lieu à aucun incident.

Actuellement, grâce à l'amélioration des isolants, qui favorisent les groupes dans l'air, la technique « dans l'huile », qui avait permis aux groupes bulbes de prendre leur essor, a donc tendance à être abandonnée. Il s'agit là d'un processus classique de progrès.

Les barrages-usines « type Maulde » prolongeaient l'effort de nos voisins allemands pour l'équipement des petites rivières, mais pour des hauteurs de chute un peu plus élevées. La prospection effectuée en France en 1953, montrait que, sur les seules rivières du Massif Central (Vézère, Corrèze, Aveyron, Vial, Truyère, Creuse, Gartemps, Sioule...), environ 700 GWh, nécessitant 300 groupes, relevaient de cette technique. La défaveur, qui affecte l'hydraulique en France depuis quelques années, a conduit à limiter les réalisations à environ 10 % de ce programme ^(h).

Pour les usines de la Basse-Maulde, qui comportent au total 23 groupes, la production escomptée, en année d'hydraulicité moyenne, correspondait à une valeur d'environ 50 GWh qui s'est vérifiée en exploitation, comme on peut le vérifier sur le tableau 1 suivant:

Tableau 1	
ANNÉES	GWh
1967	41
1968	59
1969	50
1970	52,5
1971	50

A noter que des groupes bulbes en conduite ont été installés, comme groupes de restitution, au droit de certains barrages du Rhône et de la Durance.

● Vue d'ensemble sur les petites chutes.

D'autres groupes que les bulbes sont utilisés en France pour l'exploitation des petites chutes. Une tentative récente de recensement conduit aux chiffres suivants:

140 petits bulbes (dont 110 E.D.F.)..... 63 000 kW
 90 petits groupes classiques Kaplan ou Hélice. 25 000 kW
 26 petits groupes à écoulement axial et génératrice extérieure..... 11 000 kW

100 000 kW

^(h) 10 ouvrages - 85 GWh - 37 groupes - 31 MW.

4. — Les groupes marémoteurs [18]

Rappelons, pour mémoire, le groupe bulbe de 20 MW déjà cité et esquissé par Neyrpic, en 1943, pour la Rance.

Dès la fin de la guerre, plusieurs types nouveaux de groupes sont examinés, mais ces solutions comportent tant d'incertitudes que, jusqu'en 1951, le projet de la Rance est encore étudié avec des groupes classiques à axe vertical.

L'intérêt du pompage et du turbinage dans les deux sens paraît cependant tel pour la justification du projet, qu'en 1951, E.D.F. lance une consultation auprès des principaux constructeurs européens. Des groupes à écoulement axial sont proposés; ils sont tous d'un nouveau type, à bulbe « aval » à une ou deux roues (fig. 10).

Cette consultation est suivie, en 1952, d'une commande d'études et d'essais, sur modèles réduits, pour tous les types de groupes à écoulement axial proposés. Sur la base des résultats obtenus, quatre groupes expérimentaux sont commandés en 1955, et installés, en 1957-58, sur les sites de Cambeyrac (chute de 11 m) et d'Argentat (chute de 16 m), dans le Massif Central.

4.1. Les groupes expérimentaux de Cambeyrac et d'Argentat.

Pour Cambeyrac, il s'agit de deux groupes de 5 MW, mis en service en 1957, et prévus pour fonctionner en turbinage direct ou inversé (chute de 3 à 10,75 m), ou en pompage direct ou inversé (chute de 1 à 3 m), grâce à une conception spéciale de l'usine.

L'un est à simple roue (Alsthom-Neyrpic), avec mécanisme de retournement des pales de 230°⁽ⁱ⁾; l'autre (Société de Construction des Batignolles) est à deux roues, chacune pouvant être distributrice ou motrice, suivant le sens de l'écoulement^(j).

Les deux groupes d'Argentat (14 MW) sont installés en 1958^(k), l'un est du type bulbe aval et identique, à la puissance près, à celui de Cambeyrac, l'autre est un groupe « puits aval ». Rappelons que, dans un groupe puits, le conduit est profilé autour d'un puits dans lequel est installé un alternateur classique, le puits pouvant être placé à l'amont ou à l'aval de la roue.

Ces trois groupes bulbes comportent une génératrice synchrone refroidie à l'air; il était, en effet, difficilement pensable de noyer de grandes génératrices dans l'huile, et beaucoup de raisons militaient en faveur de l'air, fluide caloporteur utilisé dans les alternateurs classiques.

4.2. Bulbe aval et bulbe amont.

Si les petits bulbes sont tous du type amont, avec roue en porte-à-faux, les groupes bulbes, proposés en 1951 et 1952 pour la Rance, sont d'un type nouveau dit « bulbe aval », l'alternateur étant placé à l'aval de la roue.

(i) Cambeyrac : $\varnothing$ 3,10 m - $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 10,75 \text{ m}$ - 150 tr/mn - $P = 5 \text{ MW}$.

(j) Cambeyrac : $\varnothing$ 3,30 m - $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 10,75 \text{ m}$ - 136 tr/mn - $P = 5 \text{ MW}$.

(k) Argentat : $\varnothing$ 3,80 m - $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 16,50 \text{ m}$ - 150 tr/mn - $P = 14 \text{ MW}$.

Trois raisons expliquent ce choix :

- pour loger l'alternateur, on dispose de plus de place dans l'aspirateur qu'à l'amont de la roue;
- pour la Rance, on avait envisagé d'assurer la commande du distributeur, non de l'extérieur mais de l'intérieur du conduit, ce qui excluait le bulbe de l'alternateur comme support du distributeur;
- pour des roues de grands diamètres, le porte-à-faux faisait peur : d'une part, on craignait les vibrations, capables d'engendrer une trop grande flèche de l'arbre au droit de la roue (risque de frottement de la roue sur son manteau) et une déformation du rotor (risque de frottement par un entrefer de l'ordre de 4 mm); d'autre part, on ne savait pas faire, à cette époque, de palier à forte charge pour de faibles vitesses (par exemple 100 t pour 100 tr/mn, alors que 200 t pour 75 tr/mn ne font plus peur maintenant). Rappelons, à cet égard, qu'il n'existait pas de grande turbine Kaplan à axe horizontal.

Mais les deux premières raisons allaient vite disparaître. Quant à la troisième, des études et des essais sur modèles réduits allaient permettre de surmonter les craintes initiales.

Le groupe « puits amont » de Wadrinau, sur la Moselle (Régie de Metz), première grande roue Kaplan ($\varnothing$ 3,05 m) à axe horizontal disposée en porte-à-faux, est mis en service en 1957; il devait donner raison à ses promoteurs et leur fournir l'occasion de nombreuses mesures. Mais, sans attendre cette heureuse confirmation, le groupe de Beaumont-Montoux sur l'Isère, identique à celui d'Argentat mais utilisé sous une chute plus faible (12 au lieu de 16 m) allait être commandé, dès 1956, en disposition bulbe amont.

Le « bulbe amont », qui s'avère ainsi réalisable pour les roues de grande dimension, présente en effet de nombreux avantages sur le bulbe « aval » : il est moins long et conduit ainsi à des ouvrages moins importants; il est plus léger, donc moins coûteux; le rendement est plutôt meilleur et, enfin, le démontage, qui ne nécessite d'ailleurs qu'une fosse, est de plus courte durée.

Toutefois, pour des raisons de paliers notamment, on pense que le domaine d'utilisation du bulbe amont est limité à la zone de puissance inférieure à 0,4 MW/tr/mn; aucune puissance supérieure n'a d'ailleurs été rencontrée en France.

4.3. Les groupes expérimentaux de Beaumont-Montoux et de Saint-Malo.

Un complément d'équipement à apporter à la dernière usine sur l'Isère, tout près du confluent Isère-Rhône, Beaumont-Montoux, sous-équipée par rapport aux usines amont plus récentes, va donner l'occasion d'expérimenter un bulbe amont^(l) de même diamètre de roue que le bulbe aval d'Argentat : le site et la hauteur de chute s'y prêtent.

De plus, on va se rapprocher des caractéristiques de chute et de puissance des futurs groupes de la Rance. A ce titre, le bulbe de Beaumont-Montoux est un précurseur des groupes marémoteurs.

Cependant, prévu pour un seul sens de rotation, il ne permet pas les divers modes de fonctionnement de ces groupes. En contrepartie, sa construction est simplifiée, tant pour la butée que pour la commande du distributeur et des

(l) $\varnothing$ 3,80 m - $Q = 90 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 12,50 \text{ m}$ - 150 tr/mn - $P = 8,5 \text{ MW}$.

$H=11,30 \text{ m}$
 $P=8,5 \text{ MW}$

$\varnothing_{\text{roue}} = 3,80 \text{ m}$
1959

$Q=89 \text{ m}^3/\text{s}$
 $n=150 \text{ t/mn}$

11/ Groupes bulbe amont
de Beaumont-Monteux
et de Saint-Malo.

$H=3,40 \text{ m}$
 $P=9 \text{ MW}$

$\varnothing_{\text{roue}} = 5,80 \text{ m}$
1959

$Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$
 $n=88,3 \text{ t/mn}$

pales. A cet autre titre, le groupe de Beaumont-Monteux, d'une puissance de 8 500 kW sous une chute variable de 9,80 à 12,50 m, peut être considéré comme le premier des grands bulbes en rivière. Mis en service en janvier 1959, il sera suivi, dans la voie des bulbes en rivière, par les deux groupes d'Ambialet mis en service sur le Tarn en 1961, mais de puissance unitaire plus faible, 2 MW ($\varnothing$ roue = 2,50 m).

Le groupe de Saint-Malo, mis en service fin 1959, dans une écluse désaffectée du port de Saint-Malo, témoigne d'un triple progrès (fig. 11) : d'abord dans le diamètre de roue, qui passe de 3,80 à 5,80 m, ensuite dans une conception plus compacte qu'à Beaumont-Monteux; enfin et surtout

dans un accroissement de la vitesse spécifique n_s par une augmentation, à la fois de la puissance spécifique N_{11} et du coefficient de vitesse n_{11} , c'est-à-dire de la vitesse $n^{(m)}$.

Ainsi, dans les études d'avant-projet, en conservant le même diamètre de roue $\varnothing 5,65 \text{ m}$, on a pu passer, par un meilleur tracé d'aubage, de 7 à 9 MW, et de 75 tr/mn à 88 tr/mn, cette augmentation de vitesse ayant permis de réduire le diamètre du bulbe de 5,75 à 5 m.

^(m) — Puissance spécifique = puissance pour une roue $D = 1 \text{ m}$, avec $H = 1 \text{ m}$: $N_{11} = N/D^2 H^{3/2}$.

— Coefficient de vitesse = vitesse pour une roue $D = 1 \text{ m}$, $H = 1 \text{ m}$: $n_{11} = nD/H^{1/2}$.

— Vitesse spécifique $n_s = n N^{1/2}/H^{3/4} = n_{11} N_{11}^{1/2}$.

A/ La Rance : Groupe.

B/ La Rance : Groupe bulbe.

C/ Villeneuve-sur-Lot : Groupe bulbe n° 2.

4.4. Les groupes de la Rance.

La conception du groupe de Saint-Malo date de 1957, alors que les caractéristiques des groupes de la Rance sont arrêtées en 1960. En trois années, le progrès s'est poursuivi : net accroissement encore de la puissance spécifique, qui permet d'augmenter la puissance du groupe de 9 à 10 MW tout en réduisant de 5,80 à 5,35 m le diamètre de la roue, réduction qui permet de porter la vitesse de 88,2 à 93,75 tr/mn; très net accroissement aussi du « poussage » de l'alternateur, rendu possible par l'utilisation d'air comprimé à 2 bars (surpression de 1 bar par rapport à la pression atmosphérique) et qui permet de réduire encore le diamètre du bulbe de 5 à 4,38 m (le coefficient de poussage, dont on parlera plus loin, a augmenté de 50 % ⁽ⁿ⁾).

La nécessité d'un groupe court et de faible diamètre, à la fois pour réduire le coût du génie civil et satisfaire aux impératifs de marche dans les deux sens, aura conduit, finalement, à un groupe très poussé, tant du point de vue hydraulique qu'électrique. Les améliorations sont également d'ordre mécanique et concernent les paliers, la double

⁽ⁿ⁾ Saint-Malo : $\varnothing$ 5,80 m - $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ - $H = 4,70 \text{ m}$ - 88 tr/mn - $P = 9 \text{ MW}$.

Rance : $\varnothing$ 5,35 m - 93,75 tr/mn - $P = 10 \text{ MW}$.

butée, l'accouplement de la roue polaire et la commande des pales; les accès intérieurs, plus dégagés, faciliteront l'entretien, si bien que les progrès, qui seront faits ultérieurement, seront faibles comparés au bond réalisé de Saint-Malo à la Rance: la technique du bulbe vient de trouver son épanouissement.

Dans ces conditions, il est permis de dire que les groupes bulbes du Rhône, du Rhin et de la Garonne, que nous allons maintenant passer en revue, de puissance plus grande (20 à 40 MW au lieu de 10 MW grâce à une chute plus élevée), ne seront finalement que des « retombées » des études de l'usine marémotrice de la Rance.

5. — Les bulbes de grande puissance

5.1. L'extrapolation des groupes de la Rance [19] [20] [21].

Un complément d'équipement, à l'usine de Beaumont-Monteux, avait donné l'occasion d'installer un bulbe amont à grand diamètre de roue ($\varnothing 3,80$ m).

L'usine de Pierre-Bénite, sur le Rhône, près de Lyon, va constituer, elle aussi, une tentation: équiper intégralement en groupes bulbes une grande usine de basse chute.

En effet la C.N.R., qui n'a pas abandonné l'idée d'équiper de groupes bulbes les chutes du Rhône, a suivi, avec attention, le développement des études des groupes marémoteurs; et, à l'époque de la décision pour Pierre-Bénite, fin 1960, les groupes de Saint-Malo et de Beaumont-Monteux fonctionnaient parfaitement, respectivement depuis une et deux années. De plus, la rentabilité de l'aménagement de Pierre-Bénite était moindre que pour les équipements précédents, à cause d'une plus faible hauteur de chute (8 m pour le débit d'équipement au lieu de 11 à 12 m); toute innovation visant à réduire les investissements serait donc la bienvenue.

Le passage à une roue de 6,10 m, pour la turbine, et à une puissance de 20 MW, pour l'alternateur, ne posait pas de problèmes constructifs. Les craintes se situaient sur le plan de la fiabilité et de l'entretien, car il s'agissait d'une usine au fil de l'eau pour laquelle la durée de fonctionnement des groupes, à charge variable, était de l'ordre de 7 500 à 8 000 h.

Pour rendre facile et rapide l'entretien, des dispositions élaborées sont adoptées: l'attention est portée sur l'accessibilité à tous les organes dans le bulbe et à la manutention

D/ Strasbourg: Usine. — Groupe 5 en cours de montage.

Tableau 2

DATE MS	AMÉNAGEMENT	NOMBRE DE GROUPES	NOMBRE DE PALES	DIAMÈTRE DE ROUE (m)	P (kW)	H nominale (m)	Q (m³/s)	VITESSE (tr/mn)
<i>Rhône</i>								
1966	Pierre-Bénite	4	4 M	6,10	20 000	7,95	332	83
1970	Beaucaire	6	4 M	6,25	35 000	10,50	404	93,75
1971/1972	Gervans	4	4 M	6,25	30 000 *	10,15	405	93,75
1973/1974	Avignon	4	4 M	6,25	30 000	9,75	400	93,75
1973	Sauveterre	2	4 F	6,90	33 000	9,40	400	93,75
1975	Caderousse	2	4 M	6,25	32 500	9,10	400	93,75
		4	4 F	6,90	32 500	9,10	400	93,75
1977	Péage de Roussillon	4	4 M	6,25	40 000	12,50	400	93,75
1978	Vaugris	2	4 F	6,90	18 500	7,20	400	71
		ou		ou	ou			ou
		3	4 M	6,25	17 000	7,20	400	75
<i>Rhin</i>								
1967/1968	Gerstheim	6	4 M	5,60	23 300	11,10	234	107
1970/1971	Strasbourg	6	4 M	5,60	24 450	11,65	234	100
1973/1974	Gambsheim **	4	4 M	5,60	24 200	10,95	244,5	100
1977	Iffezheim ***	4	4 M	5,60	28 000	11,70	267,5	100
<i>Lot</i>								
1969/1970	Villeneuve-sur-Lot	2	4 M	4,40	14 400	11,30	141,5	136
<i>Garonne</i>								
1973	Golfèch	3	5 M	5,10	23 200	14,40	180	125

* 35 000 kW pour les alternateurs (cf. Beaucaire).
 ** Société franco-allemande de droit français.
 *** Société franco-allemande de droit allemand.

des pièces, à leur introduction ou leur évacuation (longue galerie horizontale desservant tous les bulbes); la possibilité est ménagée d'un démontage global rapide, en déplaçant l'ensemble rotor-roue vers l'aval pour dégager le rotor et l'extraire au pont-roulant; des dispositifs sont prévus pour assurer une vidange rapide des groupes... Certaines de ces dispositions allaient, d'ailleurs, être abandonnées pour les usines suivantes (dispositif global de démontage rapide) ou réservées aux usines à grand nombre de groupes (galerie de service).

Pour la fiabilité, Beaumont-Montoux permet de faire un acte de foi.

C'est ainsi qu'en 1961, la C.N.R. prend la décision d'équiper de quatre groupes bulbes de 20 MW son usine de Pierre-Bénite. E.D.F. s'engage à son tour dans cette voie sur le Rhin, à Gerstheim (1963), à Strasbourg (1966), Gambsheim (1969) et de même sur le Lot à Villeneuve (1965) et sur la Garonne à Golfèch (1968) ^(o).

Si pour des raisons particulières, c'est encore des groupes classiques que la C.N.R. commande à Bourg-les-Valence (1964), c'est définitivement des groupes bulbes qui assurent ensuite l'équipement du Rhône à Beaucaire (1965), Gervans

(1969), Avignon et Sauveterre (1970) et Caderousse (1971).

Le tableau 2 donne les caractéristiques de ces équipements, dont les 58 groupes représentent une puissance totale de 1 500 MW et une productibilité de l'ordre de 8 TWh.

Le tableau 3 résume, dans le cas de Pierre-Bénite, usine pour laquelle la comparaison bulbe-Kaplan vertical fut particulièrement détaillée, les gains en poids et en prix réalisés en choisissant quatre groupes bulbes de 20 MW, ayant une roue de 6,10 m et tournant à 83,3 tr/mn, au lieu de quatre groupes Kaplan verticaux de même puissance, ayant une roue de 7 m et tournant à 71 tr/mn.

Au total, en tenant compte des économies réalisées sur le génie civil, le gain s'élève à environ 5 MF par groupe, soit, comme l'a fait remarquer M. Cazenave, le chiffre rond d'un million de dollars U.S. Pour les 58 groupes bulbes qu'il est prévu d'installer sur le Rhin, le Rhône et la Garonne, l'économie totale, de l'ordre de 300 MF, représente ainsi la moitié des investissements nécessités par l'usine marémotrice de la Rance.

5.2. Les problèmes posés par les bulbes [22 à 28].

LA TURBINE.

On a parlé ci-dessus, à propos de la Rance, de l'augmentation importante, par rapport au groupe de Saint-Malo, des

(o) Les dates citées entre parenthèses sont celles de l'année d'engagement des travaux.

Tableau 3

	POIDS			PRIX	
	Groupe vertical	Groupe horizontal	Gain de poids en faveur du groupe horizontal	Majoration du prix au kg au préjudice du groupe horizontal	Gain de prix global au bénéfice du groupe horizontal
Turbine	720 t	575 t	20 %	13 %	10 %
Alternateur	270 t	145 t	46 %	40 %	25 %
Groupe complet	990 t	721 t	27 %	17 %	15 %

débits spécifiques et du coefficient de vitesse. Ce progrès s'est poursuivi. M. Casacci en traite dans sa communication. Je me bornerai donc à une seule remarque.

Pour la turbine, ce progrès est plus difficile à apprécier que pour l'alternateur : le débit spécifique et le coefficient de vitesse, à cause de la cavitation, dépendent en effet de l'enfoncement de la roue et de la variation des hauteurs de chute en exploitation (marnage), alors que, pour l'alternateur, nous verrons plus loin que le « poussage » peut se caractériser par un simple coefficient.

Aussi, le progrès des turbines ne doit-il pas être examiné sans précautions : par exemple, pour Strasbourg et Gerstheim, si les roues paraissent moins « poussées » que pour les chutes du Rhône, cela tient à ce que l'enfoncement est plus faible, car plus cher, du fait de l'enceinte étanche et du pompage que nécessitent les fondations.

Le turbinier détermine donc la vitesse de rotation, le diamètre $\varnothing_r$ de la roue et le diamètre $\varnothing_b$ du bulbe. Pour les grands bulbes mis en service jusqu'ici, on s'en est tenu à $\varnothing_b = 0,8$ à $1 \varnothing_r$.

Examinons maintenant les problèmes posés au constructeur d'alternateur.

L'ALTERNATEUR.

Rappelons que, du point de vue constructif, la puissance de l'alternateur peut s'exprimer par la relation suivante :

$$N = K_u \cdot D^2 \cdot L \cdot n$$

N = puissance apparente nominale de l'alternateur (en kVA);

D = diamètre d'alésage du stator (en m);

L = longueur axiale du circuit magnétique du stator (en m);

n = vitesse de rotation (en tr/mn);

K_u = coefficient d'utilisation ou de poussage (en kVA/m³. tr/mn).

Pour les alternateurs classiques, la puissance N , la vitesse

n et l'inertie MD^2 constituent les données de base. Comme $MD^2 = k'D^4L$, on peut trouver D^4L alors que, par la relation précédente, on connaît D^2L ; on peut donc calculer D et L et vérifier ensuite que la valeur trouvée pour D s'accorde bien avec certains critères de factibilité concernant, par exemple, l'auto-ventilation radiale par ventilateurs situés sur la jante du rotor, qui nécessite une vitesse périphérique d'au moins 40 m/s — par exemple la vitesse à l'emballement : on peut aller jusqu'à 170 m/s, même avec des pôles en acier laminé.

Les données sont différentes pour les alternateurs des groupes bulbes : pour un type de carcasse, le diamètre imposé pour le bulbe fixe le diamètre D d'alésage du stator. Alors que, pour les alternateurs classiques, on arrive à $D \# 2 \varnothing_r$, on s'impose ici $D < \varnothing_r$, soit une réduction supérieure à 2.

Si, pour une puissance donnée on réduit D , il faut augmenter les autres facteurs K_u , L ou n . Notons tout de suite que les constructeurs français et les maîtres-d'œuvre ont écarté, à l'occasion des études de la Rance, l'idée du multiplicateur de vitesse, technique qui a été développée à l'étranger, et notamment sur la Moselle, mais pour des bulbes de 4 à 6 MW : à l'époque, on pouvait tout juste envisager des multiplicateurs pour 10 MW et l'on pressentait, non sans raison, que les groupes bulbes étaient promis à plus d'avenir. On a donc décidé de jouer uniquement sur L et K_u .

Si l'on ne modifiait pas K_u , il faudrait multiplier par plus de 4 la longueur L , ce qui serait inacceptable pour la ventilation axiale à laquelle on doit avoir recours, la réduction de diamètre conduit à une vitesse périphérique insuffisante pour la bonne marche, en ventilation radiale, des ventilateurs disposés sur la jante du rotor.

Pour ne pas augmenter aussi fortement la longueur L , il ne reste donc plus qu'à augmenter le coefficient K_u dont la formule suivante donne les variables :

$$K_u = K_1 \times B_\delta \times A_c$$

B_δ = induction dans l'entrefer à vide, en teslas (T);

A_c = courant par cm de périphérie, en ampère (A/c).

Pour augmenter A_c , il faut accroître soit le nombre d'encoches, soit l'intensité par encoche, soit les deux à la fois, ce qui conduit généralement à affiner les encoches et, par conséquent, à augmenter leur perméance P .

Pour augmenter B_δ , il faut accroître le courant d'excitation et la densité de courant dans les bobines du rotor.

Les réactances, synchrone, transitoire et subtransitoire, étant de la forme $(A_c/B_\delta) \times P$, il faut s'efforcer d'augmenter parallèlement B_δ et A_c , comme indiqué dans le tableau 4,

Tableau 4

	ALTERNATEUR CLASSIQUE	ALTERNATEUR EN BULBE
B_δ	0,7 T	0,9 T
A_c	500 A/c	650 à 700 A/c

pour ne pas atteindre des valeurs trop élevées de réactances; d'ailleurs celles-ci croissent déjà à cause de l'augmentation de la perméance P.

On arrive ainsi à multiplier la longueur L par 2,4 seulement au lieu de 4,3.

Le tableau 5 donne l'évolution du coefficient de poussage K_u , exprimé en kVA/m³.tr/mn, depuis le premier bulbe expérimental de Cambeyrac. Ce coefficient est donné, à titre comparatif, pour les groupes classiques Kaplan de Bourg-lès-Valence. Quant à celui de Golfech, nous y reviendrons à propos de la réfrigération.

Tableau 5	
Cambeyrac	4,55
Argentat	5
Beaumont-Montoux	4,95
Saint-Malo	5,36
La Rance	7,65
Pierre-Bénite	7,8
Gerstheim	8,77
Beaucaire	8,84
Golfech	6,63
Bourg-lès-Valence	5,19

Jusqu'où peut-on aller dans cette voie? Nous renvoyons, à ce sujet, à l'excellent article de M. Ruelle [23] qui traite des limites de «poussage» des alternateurs en général et des alternateurs de groupes bulbes en particulier.

Le tableau 6 donne une idée des dimensions d'alternateur auxquelles on aboutit :

Tableau 6					
	PUISSANCE (MW)	Ø ROUE (m)	Ø BULBE (m)	ALÉSAGE DU ROTOR	
				D (m)	L (m)
Saint-Malo ..	9	5,80	5	4,80	0,95
La Rance ...	10	5,35	4,35	4,20	0,935
Pierre-Bénite .	20	6,10	5,14	4,96	1,50
Beaucaire ...	35	6,25	5,60	5,05	1,95

La modification de structure de l'alternateur — réduction de diamètre et poussage électrique — comparativement à un groupe hydraulique classique, entraîne une série de conséquences qui ont trait à l'inertie, au coût de l'énergie réactive, au démarrage, au refroidissement et à l'excitation. Nous limiterons notre propos au problème du refroidissement.

LE REFROIDISSEMENT.

Les génératrices de petits bulbes, dont le diamètre est de l'ordre du mètre, ont une carcasse montée avec serrage sur le circuit magnétique, ce qui permet l'évacuation directe d'une grande partie des pertes par la carcasse vers l'eau du conduit, le reste étant éliminé par brassage du fluide, air ou huile.

Pour les groupes de grande puissance, l'huile ne pouvait être conservée et, pour l'air, il ne pouvait plus en aller de même que dans les alternateurs hydrauliques classiques à ventilation radiale, à cause de la réduction considérable de la vitesse périphérique du rotor, sur la jante duquel sont installés les ventilateurs : on a été ainsi conduit à abandonner la ventilation radiale pour la ventilation axiale.

Dans les alternateurs «poussés», le fluide caloporteur utilisé est l'air comprimé, à la pression absolue de 2 à 3 bars, en vue de réduire la puissance de ventilation nécessaire. En effet, la capacité calorifique du fluide est proportionnelle à son débit massique, c'est-à-dire pour un débit volumétrique donné, à sa pression, tandis que la puissance de ventilation, à débit massique donné, est inversement proportionnelle au carré de la pression. Notons, qu'à cause de la faible vitesse de rotation de la machine, les ventilateurs ne sont pas montés sur l'arbre du groupe.

L'échangeur air-eau peut être du type classique à simple ou double échange (Beaumont-Montoux et Pierre-Bénite), ou être constitué par un ailetage soudé sur la paroi intérieure d'une enveloppe, qui peut être l'ogive quand l'alternateur est à carcasse pleine (Saint-Malo - La Rance), ou la carcasse de l'alternateur lorsque celle-ci est creuse (Cambeyrac, Argentat, Gerstheim, Strasbourg, Gambsheim, Beaucaire, Gervans, Avignon, Caderousse).

C'est cette dernière conception d'échangeur qui semble se généraliser. En effet, la carcasse creuse peut être réalisée en plusieurs parties, car les tôles minces ne nécessitent pas un recuit après soudure. Elle s'impose donc pour les grands diamètres et les grandes puissances.

Il faut noter toutefois qu'une carcasse pleine, montée avec serrage sur le circuit magnétique (Saint-Malo, La Rance), permet d'évacuer directement un pourcentage important (30 %) des pertes calorifiques, ce qui allège d'autant l'échangeur principal, alors qu'une carcasse creuse, munie d'ailetages, doit transmettre à l'eau la totalité des pertes.

A la différence des groupes de la Rance et de tous les groupes bulbes de grande puissance, ceux de Golfech ont été conçus avec une réfrigération à air non pressurisé, comme les premiers groupes expérimentaux de faible puissance. Cette simplification fut rendue possible, d'une part à cause de la hauteur de chute importante (14,4 m) qui permettait le choix d'une vitesse élevée (125 tr/mn) et autorisait de ce fait un moindre «poussage» de l'alternateur — ce qui explique la faible valeur du coefficient K_u car la réduction des dimensions de l'alternateur est fonction du produit $K_u \cdot n$ — d'autre part, grâce à une surface développée triple de l'échangeur, l'ailetage de la carcasse creuse ayant été complété par une surface double d'ailetages placés dans des tubes extérieurs, fixés sur la carcasse, parallèlement à son axe.

5.3. Les bulbes simplifiés [29].

Tous les groupes bulbes, construits pour l'équipement du Rhin et de la Garonne, et les premiers construits pour l'équipement du Rhône (Pierre-Bénite, Beaucaire et Ger-

vans), comportent le double réglage Kaplan traditionnel du distributeur et des pales. On s'était cependant interrogé, tant à E.D.F. pour Strasbourg, qu'à la C.N.R. pour Gervans (Saint-Vallier), sur l'intérêt de groupes à distributeur fixe.

Les sites de Beaumont-Monteux et de Pierre-Bénite avaient offert l'occasion d'aller de l'avant : ils permirent l'expérience, l'un du premier grand bulbe amont, l'autre de la première grande usine de basse chute équipée entièrement de groupes bulbes. La chute d'Avignon allait, à son tour, offrir la tentation d'un nouveau pas.

Pour des raisons géographiques, cet aménagement intéresse deux bras du Rhône : dans l'un, transite l'essentiel du débit, alors que, dans l'autre, il est prévu de faire passer, pendant les trois quarts de l'année, un débit constant de $400 \text{ m}^3/\text{s}$, la chute restant pratiquement fixe pendant ce temps (9 à 9,40 m).

L'usine d'Avignon, installée sur le premier bras, sera ainsi équipée de quatre groupes bulbes de 30 MW, à double réglage, alors que, pour celle de Sauveterre, installée sur l'autre bras, toutes les conditions sont réunies pour des groupes simplifiés; elle recevra donc deux groupes de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ à pales et distributeur fixes, le deuxième groupe étant justifié par le débit des hautes eaux.

De tels groupes présentent de nombreux avantages sur les groupes réglables : suppression des mécanismes de commande du distributeur et des pales et des auxiliaires de régulation; simplification et réduction du génie civil. Ces machines simplifiées ont, d'ailleurs, vocation à être installées en chambre d'eau plutôt qu'en conduite.

En gardant le même débit et la même vitesse que pour les groupes d'Avignon, afin d'utiliser des alternateurs identiques, on peut augmenter économiquement le diamètre de la roue et réduire, en conséquence, l'enfoncement du groupe : on arrive ainsi à des roues de 6,90 m de diamètre, sans que le palier turbine soit plus chargé. Malgré cette augmentation de diamètre, l'économie de poids est de l'ordre de 30 %; de surcroît, le prix au kilogramme est plus faible, les machines étant plus rustiques.

Cette importante économie incite à concevoir des centrales comportant juste ce qu'il faut de groupes à distributeur et pales mobiles, pour s'adapter aux variations de débit du fleuve, les autres groupes étant simplifiés, pour assurer la marche en base, par tout ou rien.

Toutefois, il faut noter que la juxtaposition, dans la même usine, de ces deux types de groupes ne permet pas de réaliser, sur le génie civil, toutes les économies obtenues à l'usine de Sauveterre, notamment en ce qui concerne l'enfoncement des groupes et la longueur de l'aspirateur; par contre, la présence des groupes simplifiés incite à installer tous les groupes en chambre ouverte et à réaliser ainsi, pour les groupes réglables, une économie supplémentaire sur le matériel. L'usine de Caderousse sur le Rhône, sera de ce type : elle comportera quatre groupes réglables et deux groupes simplifiés. Sa mise en service est prévue pour 1975.

L'équipement des basses chutes de grande puissance prend ainsi une nouvelle physionomie.

5.4. La vanne de coupure.

Rappelons que c'est pour les groupes Kaplan verticaux que s'est présenté le problème du choix de l'emplacement — à l'amont ou à l'aval du groupe — de la vanne de coupure qui doit intervenir en cas d'emballement.

Pour les premiers groupes Kaplan, c'est l'emplacement

amont qui a été choisi, disposition traditionnelle pour les groupes hydroélectriques, car, en permettant d'isoler le groupe du conduit amont, la vanne joue le rôle de vanne de sécurité. Mais sa fermeture s'accompagne d'un écoulement dissymétrique dans la bêche et d'une mauvaise alimentation de la roue; la cavitation qui s'ensuit peut engendrer de fortes vibrations.

Des essais, effectués notamment par Charmille au Verbois et par les Américains à Bonneville, ont mis en évidence ces phénomènes; l'installation d'une vanne aval à Seyssel a, par contre, permis à Neyrpic de montrer l'intérêt d'une telle disposition, d'ailleurs moins onéreuse, car la section du conduit où est placée la vanne, est plus faible.

Sur le Rhône, les usines de Bollène (Donzère) et de Chateaufort (Montélimar) ont encore été équipées de vannes amont, mais les suivantes, Baix-Logis-Neuf, Beauchastel, et Bourg-lès-Valence, ont été pourvues de vannes aval. Et, dans la foulée, les groupes bulbes récents ont été tout naturellement équipés de vannes aval.

5.5. La marche en déchargeur [30].

Dans la recherche de déchargeur au moindre coût, la tentation est venue tôt d'utiliser les groupes comme organes de décharge, tout en s'efforçant d'éviter tout renchérissement des machines. Des essais ont été effectués à cette fin, dès 1955, à Bollène, puis à Beauchastel sur le Rhône et à Palaminy sur la Garonne; ils ont montré qu'on pouvait décharger sans inconvénients, mais en vitesse hypersynchrone, 30 % du débit nominal du groupe, par une déconjugaison du distributeur et des pales.

Mais, dans cette recherche, deux éléments favorables sont intervenus fortuitement, et tout-à-fait indépendamment des recherches sur la marche en déchargeur : il s'agit de la vanne aval, dont la fermeture partielle permet de réduire la puissance à dissiper dans la roue, et du groupe bulbe, dont l'écoulement axial réduit les pertes d'énergie dans la roue.

Cette réduction des pertes dans la roue permet d'augmenter le débit au travers de celle-ci.

Cette amélioration du débit de décharge peut aussi être constatée, pour la première fois, sur le groupe bulbe de Beaumont-Monteux, à vanne amont, et, par la suite, on est arrivé, avec les groupes bulbes à vanne aval à coupure rapide, à assurer, et en vitesse hyposynchrone, un débit de décharge égal à 70 % du débit nominal du groupe — ce qui permet de se passer de tout autre déchargeur. A Vallabrègues, l'économie réalisée a été chiffrée à 10 millions de francs.

6. — Les bulbes hors de France

Pendant que les bulbes connaissent chez nous l'essor que l'on vient de décrire, que se passait-il hors de France ?

Seule, l'U.R.S.S. a construit des bulbes de grande puissance. Ils sont de deux types : à refroidissement à air, selon la technique française, pour les groupes construits à Khar'kov (Kiev, 23 MW en 1966 et Kaniév, 18 MW en 1972); à refroidissement à eau pour ceux construits à Léninegrad chez L.M.Z. Parmi ces derniers, il convient de mentionner les deux groupes de Saratov (47 MW - $\varnothing$ 7,50 m - H = 15 m) qui détiennent le record de puissance et de diamètre de

roue : l'un, qui est à trois paliers, est en marche expérimentale, l'autre, qui est à deux paliers, donc avec roue en porte-à-faux, semble ne pas avoir encore fonctionné.

Dans le reste du monde, on a construit un peu partout, depuis 1958, beaucoup de bulbes, avec un usage fréquent du multiplicateur de vitesse : des petits bulbes de puissance inférieure à 1 MW et des bulbes plus gros, mais de puissance toujours inférieure à 10 MW et le plus souvent à 5 MW (voir les nomenclatures données en annexe).

C'est l'Allemagne et le Japon qui arrivent en tête, pour le nombre des réalisations, mais il faut citer aussi la Suisse, l'Espagne, le Luxembourg, la Finlande, la Suède, la Norvège et l'Inde, le Soudan, etc.

Quelques réalisations méritent d'être citées : l'équipement de la Moselle, San Floriano Nuovo en Italie et les derniers bulbes japonais.

La canalisation de la Moselle a permis, sur le cours allemand de la rivière, l'équipement de neuf usines par 36 groupes bulbes de 3,6 à 5,8 MW, fonctionnant sous des chutes de 4 à 7 m; le diamètre des roues était compris entre 4,2 et 4,6 m. Sur le cours germano-luxembourgeois, deux autres usines comportent au total 6 groupes de 1,5 à 2,6 MW, fonctionnant sous des chutes de 3,4 à 5,5 m, le diamètre des roues étant compris entre 3,2 et 3,6 m. Au total, et y compris l'usine de Koblenz équipée de groupes Kaplan verticaux, cet équipement correspond à une productibilité de 850 GWh pour une puissance installée de 170 MW.

Le groupe de San Floriano Nuovo, mis en service en 1966 sur la Piave, est le plus gros groupe bulbe réalisé, jusqu'à ce jour, par des constructeurs étrangers, les constructeurs d'U.R.S.S. mis à part : 9 MW sous 16,50 m de chute ($\varnothing$ roue = 3 m); toutefois, il faut noter que les études de l'alternateur ont été sous-traitées à un constructeur français. Au Japon, il faut signaler les 3 groupes de l'ordre de 8 MW mis en service en 1966.

A l'étranger, la France a des références importantes, notamment les 4 groupes bulbes de 21 MW de Paldang (Corée).

Parmi les projets d'équipement en groupes bulbes importants on peut citer : les Portes-de-Fer (Roumanie) $18 \times 22,8$ MW, Rock Island (U.S.A.) 8×50 MW (roue $\varnothing$ 7,25 m) et différents projets en Norvège : Akersus ($1 \times 33,5$ MW, roue $\varnothing$ 6,25 m) et Hedmark ($1 \times 20,5$ MW) ainsi qu'au Canada : Jenpeg (8×21 MW).

7. — Conclusions

Sur cet essor des groupes bulbes, on peut faire aujourd'hui trois remarques.

C'est en France, dans la foulée des études de la Rance, que la percée a été faite pour les groupes bulbes de grande puissance, c'est-à-dire d'une puissance supérieure à 20 MW : en parcourant, en septembre 1972, les ateliers des constructeurs, à Belfort et à Grenoble, on pouvait voir 12 des 13 grands bulbes d'Avignon, Caderousse, Gambsheim et Golfech, représentant une puissance totale de 350 MW et une productibilité de l'ordre de 2 TWh. Et, actuellement, de nombreux pays s'ouvrent à cette technique.

La deuxième remarque a trait à la conception du groupe. En ce qui concerne la réduction du diamètre du bulbe et le « poussage » consécutif de l'alternateur, avec emploi d'air pressurisé pour le refroidissement, il faut rappeler que la

technique a été très marquée par les impératifs des groupes marémoteurs de la Rance, destinés à fonctionner dans les deux sens. La tendance actuelle viserait à diversifier davantage cette technique, pour s'adapter toujours mieux aux diverses conditions locales d'équipement et aux desiderata des maîtres d'œuvre : accroître les rendements ou améliorer encore les conditions d'accès, en faisant des groupes moins compacts. Mais, quoi qu'il advienne, les groupes de Golfech, réfrigérés à l'air à la pression atmosphérique, et les groupes simplifiés de Sauveterre et Caderousse, témoignent déjà de cette diversité.

Il y a une dizaine d'années, en France, la plupart des colloques techniques ayant trait à l'hydro-électricité étaient consacrés aux bulbes, destinés à se substituer aux groupes verticaux classiques. Maintenant, l'actualité, voire la mode, est au pompage : entre temps les groupes bulbes sont devenus eux-mêmes des groupes classiques.

**

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à MM. Cazenave, Casacci et Ruelle, sans l'aide desquels cet article n'aurait pu être écrit.

Index bibliographique

- [1] H. F. CANAAN. — L'usine hydroélectrique immergée et la turbine immergée (Système Arno Fischer). Heidenheim (Brenz), 1945.
- [2] O. VAS. — Le premier type de construction d'Arno Fischer. Extrait du mémoire *Ueber das Unterwasserkraftwerk*, Vienne, 1947, p. 23-33.
Centrales noyées. Revue hydrotechnique autrichienne *Springer Verlag*, 1947.
- [3] A. B. SCHULZ. — Les centrales-barrages modernes. *Die Wasserwirtschaft*, décembre 1950, p. 61-70.
- [4] H. CRISTALLER. — Centrale submergée en comparaison avec une centrale au fil de l'eau avec turbines Kaplan, *Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens*, n° 24, 27 novembre 1948, p. 801-804.
- [5] M. GABRIEL. — Report on the development of the technique of low heads and resultant decrease in the cost price of the installed kilowatt-hour-year.
- [6] H. A. MAYO Jr. — Tube turbine units and their application. Winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Chicago III, November 7-11 1965.
- [7] Powerplant's turbines are inclined to produce low-head, low-cost power. *Engineering News Record*, April 20, 1972.
- [8] H. E. FENTZLOFF. — Principes fondamentaux de la construction des centrales submersibles. *La Houille Blanche*, septembre-octobre 1949; *Schweizerische Technische Zeitschrift*, 13 juillet 1950.
- [9] H. CHAMAYOU et J. GUIMBAL. — Les nouveaux groupes de la centrale prototype de Castet. *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 1954.
- [10] H. CHAMAYOU. — Le groupe prototype de Castet et ses perspectives d'avenir. Mémoire présenté au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France le 25 novembre 1954.
- [11] J. GUIMBAL. — Les groupes immergés de la centrale de Castet et l'extension de leur principe aux centrales de grande puissance. Séance du 5 novembre 1954 de la 1^{re} Section de la Société Française des Electriciens.
- [12] D. ZLATOVSKI. — Microcentrales soviétiques. Extrait de « L'Electrification des campagnes », *Etudes Soviétiques*, N° 6, octobre 1948, p. 69-72.
- [13] S. CASACCI et H. AMBLARD. — L'utilisation des groupes axiaux pour l'équipement des basses chutes. *Chaleur et Industrie*, décembre 1961.

- [14] R. LANGLOIS. — L'utilisation des groupes bulbes dans les aménagements de basse chute. Communication présentée au Congrès de la Société française des Electriciens, Brest, le 25 septembre 1963.
- [15] G. RUELLE. — Equipements des basses chutes d'eau de faible puissance avec des microcentrales à groupes bulbes.
- [16] F. AUROY et L. KAMMERLOCHER. — L'équipement hydroélectrique des basses chutes avec des groupes bulbes immergés. *La Technique Moderne*, tome LIII, N° 6, juin 1961 et N° 9, septembre 1961.
- [17] J. GOUSSET. — Les microcentrales asynchrones. Extrait de la revue *S.W.*, N° 28, mars 1959.
- [18] J. DUCLOS. — Projets d'usines marémotrices en France. Communication présentée le 20 avril 1956 devant la 9^e Section de la Société Française des Electriciens.
- [19] M. HENRY et P. CAZENAVE. — Progrès techniques et économiques résultant de l'emploi des groupes axiaux dans les usines de basse chute, ou à titre d'équipement accessoire dans les barrages de ces mêmes usines, ou dans les digues des bassins de réfrigération des grandes centrales thermiques. Comité d'Etudes de la Production hydraulique, Congrès de Scandinavie, 23-30 juin 1964.
- [20] M. WECKEL, Cl. GEMAEHLING et P. CAZENAVE. — La chute de Pierre-Bénite sur le Rhône. Extrait de *Travaux*, N° 391, octobre 1967 et N° 392, novembre 1967.
- [21] P. CAZENAVE. — Un exemple d'aménagement de basse chute équipé de groupes bulbes : Pierre-Bénite sur le Rhône. *Revue Générale de l'Electricité*, tome 73, novembre 1964, p. 545-564; Congrès de la Société Française des Electriciens, Brest, le 25 septembre 1963.
- [22] S. CASACCI. — La technique de construction des groupes bulbes. Congrès de la Société Française des Electriciens, Brest, le 25 septembre 1963.
- [23] G. RUELLE et J.-F. HEUILLARD. — Contribution à l'étude théorique de la puissance maximale des alternateurs. *Revue Générale de l'Electricité*, N° 7-8, tome 74, juillet-août 1965.
- [24] D. BOUILLERET. — Pourquoi les plus puissants alternateurs hydrauliques Alsthom ne font pas appel au refroidissement par eau. *Revue Alsthom d'Electricité et de Mécanique*, N° 123, 1970.
- [25] G. RUELLE. — Les groupes bulbes. *Revue Alsthom d'Electricité et de Mécanique*, N° 123, 1970.
- [26] M. FARAL, B. FAVEZ et G. RUELLE. — L'emploi des groupes bulbes pour l'équipement des grandes centrales hydroélectriques de basse chute. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension, session 1962, 16-26 mai.
- [27] G. RUELLE. — Influence de la production d'énergie réactive sur le dimensionnement, le prix et les pertes des alternateurs, principalement ceux des centrales hydrauliques. 1^{re} Section de la Société Française des Electriciens, 19 janvier 1960.
- [28] J. de VERDELHAN et L. ZURBACH. — Les groupes bulbes et leur emploi, en France, pour l'équipement des basses chutes. Publication 507, de juillet 1964, de *Svenska Vattenkraftföreningens*.
- [29] P. CAZENAVE. — Evolution des équipements des centrales de basse chute (Rhône et Rhin). Colloque de la Commission Economique pour l'Europe, Comité de l'Energie Electrique, Dubrovnik, 19-21 octobre 1970.
- [30] P. CAZENAVE. — Marche en déchargeur des turbines-hélices à pales orientables (Kaplan et bulbes). — Application aux usines du Rhône. Communication présentée au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France, le 16 novembre 1967.

ANNEXES 1 ET 2

Note pour la lecture des tableaux

- (1) La chute indiquée en premier est en principe la chute « caractéristique » ou chute la plus basse pour laquelle le groupe donne sa puissance maximale. Lorsqu'elles sont données, les chutes minimales et maximales sont indiquées entre parenthèses.

(2) TYPE DE GROUPE :

A	Anneau.	F	Distributeur fixe.
V	Bulbe aval.	B	Bulbe amont.
K	Kaplan (pales mobiles).	H	Hélices (pales fixes).
P	Groupe puits.	R	Distributeur réglable.
M	Multiplicateur.	O	Pales orientables à l'arrêt.

(3) CONSTRUCTEUR :

A	Alsthom.	KMW	Karlstads Mekaniska Werkstad.
C	Charmilles.	AF	Arno Fischer.
J	Jeumont.	EW	Escher Wyss.
S	S.F.A.C.	N	Neyrpic.
V	Voith.	SW	Schneider-Westinghouse.
H	Hitachi.	Ma	Maier.
Br	Breguet.	Mi	Mitsubishi.
B	Batignolles.	R	Riva.
GB	Goulut-Borne.	GM	Ganz Mavag.
JS	Jeumont-Schneider.	T	Tashiba.
SFAC	Sté des Forges et Ateliers du Creusot.	BSH	Bréguet-Sautter-Harlé.
LMZ	Usines de Machines Léningrad.	CEM	Compagnie Electro-Mécanique.

CONSORTIUM : Alsthom, Alsthom-Charmilles, Jeumont, Neyrpic, SFAC, SW.

Dans l'annexe 2, les noms suivis d'un astérisque sont ceux des centrales comportant des groupes de récupération.

Groupes bulbes : Centrales importantes

NOM DE LA CENTRALE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE	RIVIÈRE	CHUTE (m)	GROUPES		DÉBIT UNIT. (m³/s)	PUIS. UNIT. (MW)	PUIS. DE LA CENTR. (MW)	Ø DE LA ROUE (mm)	VIT. DE ROTATION (tr/min)		CONS-TRUC-TEURS
				NOM-BRE	TYPES					TUR-BINE	ALTER-NATEUR	
ALLEMAGNE												
Palzem	1964	Moselle	3,4	3	B-M	50	1,5	4,5	3 600	78	750	Ma
Grevenmacher	1962	Moselle	5,5	3	B-M	59	2,6	7,8	3 200	120	750	EW
Trèves (Trier)	1958	Moselle	5,1	4	B-R-K-M	95	4,4	17,6	4 600	78	750	EW
Detzem	1959	Moselle	7,0	4	B-R-K-M	95	5,8	23,2	4 200	92,5	750	EW
Wintrich	1963	Moselle	5,6	4	M	95	4,9	19,6	4 600	83	750	EW
Zeltingen	1964	Moselle	4,0	4	M	95	3,3	13,2	4 800	67	750	Ma
Enkirch	1965	Moselle	5,1	4	M	95	4,3	17,2	4 600	79	750	Ma
Neef (St-Aldegund)	1964	Moselle	5,5	4	B-R-K-M	95	4,0	16,0	4 600	76	750	EW
Fankel	1962	Moselle	4,1	4	M	95	3,7	14,8	4 600	77	750	V
Muden	1962	Moselle	4,1	4	M	95	3,6	14,4	4 600	77	750	V
Lehmen	1966	Moselle	5,3	4	B-R-K-M	95	4,6	18,4	4 600	85	750	V
Buckenhofen	1960	Iller	5,2	2	B-R-K	35	1,5	3,0	2 450	166,7	166,7	EW
Finsing	1961		10,6	1		35	3,0	3,0	2 300	214,3	214,3	V
Upspring	1963	Moselle	8,1	3		52	3,4	10,2	2 850	166,7	166,7	V
Lech III	1963	Lech	9,2	3	B-R-K	47,5	4,2	12,6	2 850	166,7	166,7	EW
Gersthofen									2 400	137	137	V
Iffezheim	Projet	Rhin	11,7	4	B-R-K	268	27,0	108,0	5 600	100	100	
BELGIQUE												
Neuville-sur-Ruy	1962		4,0	4	B-M	75	2,4	9,6	3 600	97,5	750	EW
CANADA												
Hydro-Ontario	Projet		15,0	3	B-R-K		24,5	73,5				
Jenpeg	Projet		7,3	8	B-R-K	360	21,0	168,0	6 250	81,8	81,8	
Lachine	Projet	St-Laurent	11,0	22	B-F-H	400	35,0	700,0	6 900	93,8	93,8	
CORÉE (RÉPUBLIQUE DE)												
Nam-Gang	1972		8,70/ (15,0)	2		93	6,5	13,0	3 000	189,5		S-J
Paldang	1972		11,8	4		200	21,0	84,0	5 200	120	120	A-N
AUTRICHE												
Ottensheim	En Cion	Danube	12	6			25,0	150,0	5 600			C
Altemoorth	En Cion	Danube	16	9			40,0	360,0	6 100			C
ESPAGNE												
Cherta	Projet		11,0	4	B-R-K	296	26	144,0	5 900			
Garcia	Projet		8,0	5	B-R-K	270	17,2	86,0	5 900			
Santiago-del-Sil	1965		12,0	2		86	8,3	16,6		157,9	157,9	EW
FRANCE												
Wadrinau	1957	Moselle	4,5	4	F-P-M-K	39	1,4	5,6	3 050	107	750	
Cambeyrac	1957	Truyère	10,8	1	V-R-K	55	5	5	3 100	150	150	A-N
Cambeyrac	1957	Truyère	10,8	1	V-R-K, 2 roues	55	5	5	3 300	136,4	136,4	AF-J-CEM-B
Argentat	1957	Dordogne	16,5	1	P-R-K	100	14	14	3 750	150	150	C-J
Argentat	1958	Dordogne	16,5	1	V-R-K	100	14	14	3 800	150	150	A-N
Beaumont-Montoux	1959	Isère	11,3	1	B-R-K	89	8,5	8,5	3 800	150	150	A-N
Saint-Malo	1959	Ecluse	3,4	1	B-R-K	300	9	9	5 800	88,3	88,3	A-N
Ambialet	1961	Tarn	6,5	2	B-F-K	38	2,0	4,0	2 500	187	187	S-SW
Usine marémotrice	1966	Rance	5,8	24	B-R-K	192	10	240	5 350	93,8	93,8	Consor.
Pierre-Bénite	1966	Rhône	7,8	4	B-R-K	333	20	80	6 100	83,3	83,3	A-N
Vaugris	Projet	Rhône	7,2	1	B-R-K	330	19,0	19,0	6 250	93,8	93,8	
Vaugris	Projet	Rhône	7,2	2	B-F-H	330	19,0	38,0	6 900	93,8	93,8	
Péage-de-Roussillon	Projet	Rhône	12,5	4	B-R-K	400	40,0	160,0	6 250	93,8	93,8	
Gervans	1971	Rhône	9,7	4	B-R-K	405	30,0	120,0	6 250	93,8	93,8	A-N
Caderousse	1975	Rhône	9,1	2	B-R-K	400	32,5	65,0	6 250	93,8	93,8	A-N
Caderousse	1975	Rhône	9,1	4	B-F-H	410	32,5	130,0	6 900	93,8	93,8	A-N
Sauveterre	1973	Rhône	9,4	2	B-F-H	400	33,0	66,0	6 900	93,8	93,8	A-N
Avignon	1973	Rhône	9,3	4	B-R-K	400	30,0	120,0	6 250	93,8	93,8	A-N
Beaucaire	1970	Rhône	10,7	6	B-R-K	400	35,0	210,0	6 250	93,8	93,8	A-N

NOM DE LA CENTRALE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE	RIVIÈRE	CHUTE (m)	GROUPE		DÉBIT UNIT. (m³/s)	PUIS. UNIT. (MW)	PUIS. DE LA CENTR. (MW)	Ø DE LA ROUE (mm)	VIT. DE ROTATION (tr/mn)		CONSTRUC-TEURS
				NOM-BRE	TYPES					TUR-BINE	ALTER-NATEUR	
Iffezheim	1977	Rhin	11,7	4	B-R-K	267	28,0	112,0	5 000	100	100	V-EW
Gerstheim	1967	Rhin	11,1	4 + 2	B-R-K	234	23,3	139,8	5 600	107	107	A-N-S
Strasbourg	1970	Rhin	14,4	6	B-R-K	234	29,0	174,0	5 600	100	100	A-N
Gambshheim	1974	Rhin	13,2	4	B-R-K	270	24,5	88,0	5 600	100	100	A-N
Villeneuve-sur-Lot	1970	Lot	11,3	2	B-R-K	128	14,4	28,8	4 400	136,6	136,6	S-J
Golfech	1973	Garonne	15,5	3	B-R-K	180	23,0	69,0	5 100	125	125	A-N
HONGRIE												
Tisza II	1973		4,7/ 10,7	4	B-R-K	138	5,2/ 7,2	28,8	4 300	107	107	A-N-GM
INDE												
Gandak	1966		6,1	3		112	5,5	16,5		107	107	EW
Kosi			7,7	4			5,0	20,0	4 500	93,8		H
ITALIE												
San Floriano nuovo	1966	Piave	16,5	1	B-R-K	62	9,0	9,0	3 000	187,5	187,5	R-A
JAPON												
Konakajima	1961		9,2	1		31	2,3	2,3		200	200	T
Akirashima	1961		13,7	1		44	4,8	4,8		240	240	EW
Omata	1961			1	P		3,5	3,5	2 200			V
Joganjigawa	1961	Joganji	15,1	3		44	5,3	15,9		240		V
Taguchi	1965		12,4	1		63	6,3	6,3		187,5	187,5	EW
Koide	1966		12,9	1		85	8,8	8,8		150	150	EW
Yanagihara	1966		9,8	1		98	7,7	7,7		125	125	T
Aramaki	1966		9,5	1		108	8,2	8,2		125	125	T
Hitokita			15,7	1	M		5,4	5,4		240	720	Mi
NORVEGE												
Akersus	Projet		11,0	1		380	33,5	33,5	6 250	93,8		
Hedmark	Projet		9,4	1		270	20,5	20,5	5 600	100	100	
ROUMANIE												
Portes de Fer II	Projet	Danube	6,9	9		410	22,8	205,2	7 250	71,5	71,5	
SOUDAN												
Khassm-el-Girba	1967	Atbara	7,0	3	M	50	2,8	8,4	2 700	150	750	R
SUEDE												
Skogsforsen	1959		14,0	1	B-R-K	32	3,6	3,6	2 180	250	250	KMW
Parki	1970	Lulëa	5 à 14	1	B-R-K	140	20	20	4 900	112	112	KMW
SUISSE												
Rüchlig	1962		3,3	4	B-P-M	60	1,6	6,4		75	1 000	EW
Aue	1963	Limmat	5,5	2	B-M	38	1,7	3,4		136,4	1 000	EW
Flumenthal	1965		7,5	3		133	8	24	4 200	107	107	EW
U.S.A.												
Rock Island	Projet		12,0	8		530	50,5	404,0	7 250	85,7	85,7	
Vanceburg	Projet		8,4	3		360	24	72	6 250	94,8	94,8	
U.R.S.S.												
Kiev	1966	Dniepr	7,7/11,8	20		290	23	460	6 000	85,7	85,7	Kharkov
Kama	1968		21,0	1	B-P-R-K	130	21,8	21,8	4 500	125	125	LMZ
Perepad	1972		11,2	6		230	20,6	123,6	5 500	93,8	93,8	LMZ
Saratov	1972	Volga	10,6/ 15,0	1 + 1		528	47,3	94,6	7 500	75	75	LMZ
Kaniev	Fin 1972		8,4	24		240	18,2	437,0	6 000	85,7	85,7	Kharkov
Tcherepovetz	1967-1973		15,0	2 + 2		175	21	84,0	5 500	93,8	93,8	LMZ
YOUgoslavie												
Portes-de-Fer II	Projet	Danube	6,9	9		410	22,8	205,2	7 250	71,5	71,5	

Groupes bulbes : Microcentrales

NOM DE LA CENTRALE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE	RIVIÈRE	CHUTE (m)	GROUPES		DÉBIT UNIT. (m³/s)	PUIS. UNIT. (MW)	PUIS. DE LA CENTR. (MW)	Ø DE LA ROUE (mm)	VIT. DE ROTATION (tr/mn)		CONS-TRUCTEURS
				NOM-BRE	TYPES					TUR-BINE	ALTER-NATEUR	
ALLEMAGNE												
Röstin	1936	Persante	3,75	2	F-B-K	6,67	0,200	0,400	1 350	258	258	EW
Osberghausen	1956		7,25	1	F-V-M-K	6,72	0,390	0,390	—	312	1 000	EW
Ravensburg	1956		4	1	F-V-M-K	4,06	0,130	0,130	1 000	280	1 000	EW
Sylvenstheim	1957		25,8	1	B-R-K	13,56	2,800	2,800	1 460	452	1 000	V
Finsing	1958		8,25	1	B-R-K	11,36	0,750	0,750	1 300	345	345	EW
Weilheim	1960		4,35	1	M	16,66	0,580	0,580	—	186	600	EW
Altbach	1960		5,1	2	M	24,50	1,000	2,000	—	175	750	V
Hausen	1962		5,0	2		22,50	0,900	1,800	2 090	200	—	V
Forbachrohr	1965		10,3	2		15,78	1,300	2,600	—	300	—	
Deisisau	1966		5,1	2	M	24,5	1,000	2,000	2 190	175	750	V
Arlen*	1959	4,6	2	B-M-K	7,88	0,290	0,580	1 200	265	760	EW	
AUTRICHE												
Reutte	1956	Lech	6,07	1	R-B-M-K	25,74	1,250	1,250	2 200	165	1 000	EW
Partensteinrohr	1962		10,9	1	—	28,67	2,500	2,500	2 090	234	—	V
FINLANDE												
Herrfors	1961	—	3,50	1	R-M-K	15,36	0,430	0,430	1 800	165	600	EW
Puhos	1962		4,5	1	R-B-M-K	22,22	0,800	0,800	2 200	150	750	EW
FRANCE												
Rethel	1959	Aisne	2,85	2	F-K	9,0	0,197	0,394	1 650	182	182	N-A
Beaulieu	1963	Aube	4,3	2	F-K	9,12	0,297	0,594	1 540	218	218	GB-BSH
Juvanze	1964	Aube	2,6	2	F-K	9	0,174	0,348	1 680	170	170	GB-BSH
Marvit	1961	Auvezère	6,65	1+1	F-H	3,08/ 1,92	0,156/ 0,099	0,255	800/ 630	510/ 615	510/ 615	J
Moulin-du-Pont	1965	Auvezère	3,82	1	F-H	7,55	0,280	0,280	—	219	219	GB-BSH
Brugale-Lavaur	1967	Cère	11,50	7	F-O	7,50	0,728	5,096	1 120	500	500	SFAC-JS
Le Prat	1970	Cher	17,40	5	F-O	7,8	1,143	5,715	1 120	500	500	SFAC-JS
Bergerac	1968	Dordogne	3,20	2	F-O	28,6	0,725	1,450	2 500	136	136	N-A
Oraison	1964	Durance	17,35	1	F-K	3,65	0,445	0,445	800	760	760	J-J*
Echarcon I	1955	Essonne	1,64	1	F-H	4,2	0,038	0,038	1 400	187,5	187,5	GB-J
Echarcon II	1959	Essonne	1,63	1	F-H	4,4	0,0534	0,0534	1 120	214	214	EDF-EDF
Castet	1954	Gave-Ossau	7,50	2	F-K	12,5	0,735	1,470	1 650	250	250	N-A
Abzac	1958	Isle	2,35	4	F-K	9	0,146	0,584	1 720	163	163	C-A
Chandean-du-Maine ..	1965	Isle	2,80	2	F-O	10,42	0,240	0,480	1 750	146	146	GB-BSH
Coly-Gaillard	1966	Isle	2,80	2	F-H	12,27	0,400	0,800	1 800	146	146	GB-BSH
La Caillade	1957	Isle	3,00	4	F-H	5,0	0,104	0,416	1 120	257	257	N-A
Marcillac	1959	Isle	2,04	5	F-H	4,85	0,0565	0,2825	1 120	254	254	N-A
St-Martin-l'Astier	1966	Isle	2,04	2	F-H	10,05	0,310	0,620	1 750	146	146	GB-BSH
Albas	1964	Lot	3,4	5	F-H	15	0,369	1,845	1 800	181,5	181,5	N-A
Capdenac	1959	Lot	5,5	3	F-H	15	0,670	2,010	1 800	260	260	N-A
Mercues I GR 1 & 2 ..	1966	Lot	3,7	2	F-H	15	0,436	0,872	1 800	214	214	N-A
Mercues I GR 3	1955	Lot	3,5	1	F-K	9,5	0,240	0,240	1 650	181	181	N-A
Mercues I GR 6	1961	Lot	3,5	1	F-H	9,5	0,253	0,253	1 400	254	254	N-A
Mercues II GR 4 & 5 ..	1958	Lot	3,6	2	F-H	9,75	0,260	0,520	1 400	254	254	N-A
Bujaleuf	1961	Maulde	14,4	2+2	F-O	7,5	0,740	2,960	1 130	500	500	2J-2J 2GB-2BSH
Fleix	1961	Maulde	14,4	2+2	F-O	7,5	0,740	2,960	1 130	500	500	2 GB-2 BSH
Langleret	1962	Maulde	14,4	2+2	F-O	7,5	0,740	2,960	1 130	500	500	2GB-2BSH
Martineix	1962	Maulde	14,4	2+2	F-O	7,5	0,740	2,960	1 130	500	500	2GB-2BSH
Villejoubert	1963	Maulde	14,4	2+2	F-O	7,5	0,740	2,960	1 130	500	500	2GB-2BSH
Lartige	1958	Maulde	14,4	3	F-O	7,5	0,740	2,220	1 130	500	500	1J-1J 2GB-2BSH
Verdun	1956	Meuse	3,15	2	F-K	8,9	0,202	0,404	1 650	182	182	N-A

NOM DE LA CENTRALE	ANNÉE DE MISE EN SERVICE	RIVIÈRE	CHUTE (m)	GROUPES		DÉBIT UNIT. (m³/s)	PUIS. UNIT. (MW)	PUIS. DE LA CENTR. (MW)	Ø DE LA ROUE (mm)	VIT. DE ROTATION (tr/min)		CONS- TRUCTEURS
				NOM- BRE	TYPES					TUR- BINE	ALTER- NATEUR	
Ame	1955	Mayenne	1,90	1	F-H	9,57	0,121	0,121	1 600	165	165	N-A
Maignannerie	1954	Mayenne	1,95	1	F-H	4,5	0,054	0,054	1 120	225	225	N-A
Maignannerie	1966	Mayenne	1,95	1	F-H	4,5	0,067	0,067	1 120	250	250	GB-BSH
Ste-Beaudelle	1960	Mayenne	1,98	1	F-O	8,96	0,131	0,131	1 800	143	143	GB-BSH
Grenoux	1961	Mayenne	1,80	1	F-O	8,78	0,115	0,115	1 800	143	143	GB-BSH
Boussard	1961	Mayenne	1,84	1	F-O	8,82	0,119	0,119	1 800	143	143	GB-BSH
Bas-Hambert	1961	Mayenne	1,50	1	F-O	8,41	0,087	0,087	1 800	143	143	GB-BSH
Les Communes	1962	Mayenne	2,59	1	F-O	9,62	0,178	0,178	1 800	143	143	GB-BSH
Le Port	1962	Mayenne	1,82	1	F-O	8,8	0,117	0,117	1 800	143	143	GB-BSH
La Nourrière	1961	Mayenne	2,00	1	F-O	9,0	0,132	0,132	1 800	143	143	GB-BSH
La Verrerie	1961	Mayenne	1,99	1	F-O	8,98	0,131	0,131	1 800	143	143	GB-BSH
La Richardière	1961	Mayenne	2,71	1	F-O	9,75	0,188	0,188	1 800	143	143	GB-BSH
La Fourmondière supérieure	1961	Mayenne	2,76	1	F-O	9,80	0,192	0,192	1 800	143	143	GB-BSH
La Fourmondière inférieure	1961	Mayenne	2,70	1	F-O	9,74	0,187	0,187	1 800	143	143	GB-BSH
Moulin Corçu	1965	Mayenne	2,16	2	F-H	4,5	0,075	0,150	1 120	250	250	GB-BSH
Moulin-Oger	1961	Mayenne	2,04	1	F-O	9,04	0,135	0,135	1 800	143	143	GB-BSH
La Roche	1965	Mayenne	1,74	2	F-H	4,50	0,055	0,110	1 120	250	250	GB-BSH
Rabodanges	1959	Orne	5,30	1	F-K	8,00	0,326	0,326	1 400	314	314	C-A
Markolsheim*	1957	Rhin	6,90/ 5	1	P-R-H	15,58/ 21,5	0,860	0,860	—	300	300	C-A*
Rhinau*	1960	Rhin	6,90/ 5	1	P-R-H	15,58/ 21,5	0,860	0,860	—	300	300	C-A*
Charmes*	1965	Rhône	13,0	1	F-B-H	7,00	0,752	0,752	1 250	500	500	SFAC-SW*
Pierre-Bénite*	1972	Rhône	9,5	1	F-B-H	9,87	0,75	0,75	1 250	428	428	CL-JS*
Lagarde	1957	Tarn	2,10	4	F-H	10,0	0,142	0,568	1 600	182	182	N-A
Aubas	1961	Vézère	3,29	3	F-H	14,25	0,310	0,930	1 600	218	218	J-J
Peyrissac	1960	Vézère	9,40	1	F-K	15,0	1,185	1,185	1 800	253	253	J-J
Les-Claies-de-Vire	1961	Vire	2,8	1	F-H	10,0	0,263	0,263	—	204	204	GB-BSH
GR.-BRETAGNE												
Shin-Diversinn-Dam ..	1959	Shin	2,75/ 5,80	1	V	4,54/ 2,16	0,100	0,100				
JAPON												
Hitokita	1958	—	12,0	1	M	13,54	1,300	1,300	—	333,3	1 000	E-W
Koshi	1959	—	8,5	1	—	23,53	1,600	1,600		225	225	E-W
Saikawa	1960	—	18,3	1	—	15,03	2,200	2,200		450	450	E-W
Shimoaka	1961	—	10,7	1	—	21,03	1,800	1,800		240	—	V
Tamayado	1963	—	16,8	1	—	32,74	4,400	4,400		300	300	E-W
LUXEMBOURG												
Es-sur-Sure	1965	Sure	2,80	2	F-K	13,84	0,310	0,620	1 800	176,5	176,5	N-A
Barrage n° 1		Sure	2,55	2	F-K	14,22	0,290	0,580	1 800	176,5	176,5	N-A
Barrage n° 2		Sure	2,62	2	F-K	14,79	0,310	0,620	1 800	176,5	176,5	N-A
Barrage n° 3			3,85	1	F-K	10,71	0,330	0,330	1 400	250	250	N-A*
GR. 7*	1965											
SUISSE												
Bürglen	1956	Thur	3,06	1	F-B-M-K	18,38	0,450	0,450	2 200	113		E-W
Neubannwill	1965	Aar	10,2	3		15,93	1,300	3,900	—	300	300	—

Abstract

Bulb units: from Röstin to Avignon The upsurge of a technique

The story of the bulb unit began with the original designs for which the firm Escher-Wyss took out patent rights in 1932/33 (Fig. 1). The first machines of this type to be commissioned were two 168 MW sets at Röstin power station in Pomerania in 1936 (Fig. 2). They were also the first axial-flow sets ever built. However, Arno Fischer lost interest in the Escher-Wyss design soon after taking over its patent rights, and turned to the Harza design featuring a peripheral generator (patent rights taken out in 1919 and 1924—Fig. 3). Seventy-three Harza units giving a total output of 100,000 kW were installed in Bavaria between 1937 and 1943 (Fig. 4).

French designers began to consider axial units for their Rance tidal power scheme and low-head applications in general shortly after the Second World War.

The first notable step forward was made by M. Guimbal in 1949, when he recommended the use of oil as a generator sealing and cooling fluid as a means of reducing generator dimensions. Neyrpic produced and commissioned two 800 MW sets of this type for the French Railway Castet Plant in 1954 (Fig. 6).

Electricité de France favoured small asynchronous (and occasionally synchronous) sets in the 50-100 kW range for heads from 1.50 m up to 4 m (Figs 7 and 8). In addition, standard 800 kW units of the 'Maulde' type were developed for heads in the neighbourhood of 13 m (Fig. 9). With the advent of more efficient insulating materials, the 'oil technique', to which the bulb design owed its increasing popularity, gave way to the 'air technique', which is the only suitable cooling method for large-capacity bulbs. Forty 'Maulde' sets were commissioned between 1961 and 1970 and are still in service.

Tidal power soon became one of Electricité de France's main development targets. Since a 20 MW bulb design produced by Neyrpic for the Rance scheme in 1943 (Fig. 5) had turned out to be too cumbersome, Electricité de France invited leading European manufacturers in 1951 to submit design proposals for axial flow units. All the designs submitted in 1952 were of the 'downstream-bulb' type with three bearings, since no solution had been found to the problem of designing a bearing capable of taking the loads produced by an overhung runner. In 1958, two experimental 5 MW downstream-bulb sets were installed at Cambeyrac, and two 14 MW sets at Argentat; all four sets featured air-cooled asynchronous generators (Fig. 10).

Further design work and model tests finally produced the answer to the bearing problem, and in 1957, the upstream unit at Wadri-neau installed in a well—the first successful set with a large overhung runner (3.05 m dia.) ever produced—confirmed its promoters' faith in

this design and marked the break-through of the 'upstream-bulb' layout for both large and small units. The advantages of the 'upstream-bulb' design include smaller length and reduced weight, hence lower cost, higher efficiency and greater ease of dismantling. However, this type of unit appears to be limited to an output range of up to 0.4 MW/r.p.m.

In 1959, i.e. before implementation of the Rance project, two large experimental sets were commissioned, one at Beaumont-Montoux and the other at Saint-Malo (Fig. 11).

Considerable progress then followed, and by the time the Rance project came into being, unit outputs had been raised from 9 to 10 MW, runner diameters were down to 5.35 m (from 5.80 m) and units were running at 93.75 r.p.m. instead of 88.2 r.p.m. Similarly, generators were operating under an absolute air pressure of 2 kg/cm², which allowed the bulb diameter to be reduced from 5 m to 4.38 m.

The final outcome of this comprehensive design programme were the large bulb sets commissioned on the Rhone, Rhine and Garonne (see table), i.e. fifty-eight units producing a total installed output of 1,500 MW, i.e. 8 TWh annually.

The advantages of the bulb over the vertical-shaft Kaplan design are summed up in a table referring to the Compagnie Nationale du Rhône's plant at Pierre-Bénite, which shows a cost saving of \$ 1 million for each set. Other tables compare the dimensions and electrical features of the two designs.

Until recently, all bulb units had their guide-vanes and runner blades controllable but a further step towards simpler design and lower cost has been made with guide-vanes and runner blades fixed. The Sauveterre plant will be the first to be equipped with this type of unit (2 × 30 MW), which is expected to result in a 30% saving on weight over the 'double-control' design.

For the bulbe units the shut-off valve is located downstream from the runner i.e. as in vertical Kaplan layout, which allows the bulb set to be operated as an orifice passing 70% of the rated discharge at sub-synchronous speed. This does away with the need for a conventional bypass system whilst resulting in a cost saving the Compagnie Nationale du Rhône has estimated to amount to 10 million Francs for its Vallabrègues plant.

It was the Rance tidal project which gave French designers the impetus for their significant break-through in bulb unit design. Interest in bulb unit technology has been steadily gaining ground in a number of countries, and thus, bulb units can now be claimed to have entered the conventional field barely ten years after they first appeared.

Cette communication a été discutée en même temps que la communication suivante. On trouvera le texte de cette discussion en page 214.