Note sur la réalisation de turbines autorégulatrices permettant l'exploitation automatique de chutes de puissance moyenne, en vue d'alimenter des réseaux ruraux d'énergie électrique.

Par L. BARBILLION, *Directeur de l'Institut électrotechnique de Grenoble,*

La question de l'électrification des campagnes a fait, comme on le sait, un très grand pas à la suite des discussions très larges et très documentées dont le Parlement s'est fait l'écho.

En ce cas, comme en bien d'autres, on a vu naître une foule d'initiatives généreuses, mais parfois un peu inconsidérées. De même que la grande presse redécouvre périodiquement la Houille Blanche, et indique les moyens de la mettre en valeur, de même certains parlementaires ont trouvé que, pour électrifier les campagnes, il suffisait de construire, d'abord, un très grand nombre d'usines génératrices, puis un très grand nombre de lignes de transmission d'énergie, puis un très grand nombre de postes de transformation et une multitude de réseaux secondaires. La solution financière de ce problème, ainsi posé d'ensemble, serait éminemment inquiétante. Qu'on veuille bien croire qu'il n'entre dans les lignes qui précèdent aucune ironie envers un sujet de première importance pour notre pays, mais la question de l'électrification des campagnes est une question si vieille, en dépit des apparences, que nous ne croyons pas que ce qui semblait si difficile il y a quelques années, puisse être par un coup de baguette transformé en réalité. La grosse difficulté résidera toujours dans la faible durée d'utilisation de cette énergie, même surabondante, même produite et transportée dans des conditions économiques acceptables, ce qui n'est pas encore prouvé possible.

Ce dont il faut se défendre, comme toujours en pareille matière, c'est d'une solution unique et coercitive. De même qu'il ne faut pas négliger dans nos pays de plaines l'aménagement systématique de toutes ces petites chutes de houille verte, mises en honneur par leur regretté apôtre, M. Bresson, de même, dans nos régions de montagnes ou de plateaux d'altitude moyenne, on peut trouver des solutions singulièrement intéressantes par l'utilisation de puissances relativement restreintes, mais dont l'aménagement et la distribution dans un rayon suffisamment faible correspond souvent à la solution la plus économique (1). Nous-mêmes, dans quelques articles que la *Journée Industrielle* avait bien voulu publier, il y a deux ans, nous avons indiqué comme désirable une combinaison harmonieuse de ces deux solutions, la solution des grands réseaux et la solution des petits réseaux locaux. Cette double solution demeurerait très avantageuse, très importante au point de vue des intérêts locaux de par la concurrence même créée entre les deux systèmes, l'un devenant régulateur des prix de l'autre. Nous connaissons beaucoup de petites sociétés régionales qui se défendent encore et dont l'existence est très viable, car ce sont des affaires saines, dont le kilowatt-heure revient peut-être, certainement, plus cher que celui des grandes centrales, mais qui ne traînent pas avec elles ces

fardeaux de papier qui écrasent beaucoup de nos grandes entreprises.

Mais pour qu'une petite chute puisse réellement assurer un service public dans des conditions économiques, il faut que son installation soit autorégulatrice. On ne peut demander constamment au surveillant de l'installation, qui est le plus souvent un petit industriel occupé par ailleurs (voir les anciens moulins qui assuraient l'éclairage) de se tenir en permanence auprès de son tableau de distribution, auprès de la vanne de sa turbine. C'est donc un problème extrêmement intéressant à tous les points de vue, au point de vue social surtout, que cet aménagement dans des conditions de régularité suffisante des petites chutes. La régularité de marche des machines électriques est indispensable, au moins dans le cas d'un minimum de service public. C'est ce problème qui a particulièrement tenté l'un de nos excellents confrères et amis, M. Marcel Crozet-Fourneyron, constructeur au Chambon-Feugerolles (Loire).

LA PREMIÈRE TURBINE FOURNEYRON (1826)

A une époque où l'hydraulique prend une importance exceptionnelle et où aussi, devant la poussée des besoins, comme il arrive toujours en des temps d'industrialisme à outrance, les usagers perdent trop souvent la mémoire des inventeurs et des apôtres, nous ne croyons pas inutile d'ouvrir une courte parenthèse et de rappeler que l'auteur du dispositif appartient à la grande famille industrielle des Crozet-Fourneyron.

On sait que Benoît Fourneyron, sorti le premier de la première promotion de l'École des Mines de Saint-Etienne, ayant eu la mission comme ingénieur d'installer une fabrication industrielle à Pont-sur-l'Ognon (Haute-Saône), s'attela immédiatement à la question de la réalisation de la turbine hydraulique. De 1821 à août 1826, cinq ans d'études acharnées lui permettaient de mettre en œuvre sa première turbine, de 6 chevaux, dont le fonctionnement fut immédiatement reconnu excellent. Un moteur nouveau était créé, qui devait bouleverser l'industrie et la vie économique du monde entier.

L'invention eut bientôt un retentissement considérable. Dans la séance de l'Académie des Sciences du 27 novembre 1837, Arago disait déjà : « La turbine de M. Fourneyron a fait en Allemagne une vive sensation ; la Russie, l'Ecosse paraissent vouloir profiter de cette invention. Puisse la France entrer elle-même largement dans une voie qui promet de si utiles résultats à l'industrie. »

Le 31 juillet 1838, Poncelet lisait à l'Académie des Sciences en mémoire ayant pour titre « Théorie des effets mécaniques de la turbine Fourneyron » qu'il terminait en disant : « On sait avec quel art infini M. Fourneyron a perfectionné les différentes parties

(1) Voir la communication de M. Rigotard, Ingénieur Agronome, Congrès de la « Houille Blanche », Association des Anciens Elèves de l'Institut Electrotechnique de Grenoble (juin 1922). Revue la *Houille Blanche* (septembre-octobre 1922).

de ses turbines, de manière à constituer de l'ensemble un moteur puissant qui est à tout point comparable pour la simplicité et l'élégance des dispositions à cette admirable machine due à quarante années de travaux d'un homme de génie tel que Watt. »

Cette comparaison au premier abord peut paraître orgueilleuse et Fourneyron lui-même s'en est défendu. Et cependant, maintenant que presque un siècle s'est écoulé, il semble que l'invention du grand Anglais ait bien pâli à côté de celle de Fourneyron. Pour beaucoup d'applications, les machines à vapeur à piston sont battues en brèche par les turbines à vapeur dérivées de celles de Fourneyron. Son invention, au contraire, a connu un essor nouveau le jour où l'électricité a permis le transport de l'énergie à distance.

Dans toutes les innombrables usines génératrices dont les fils de force tissent leur toile sur la terre entière, le récepteur de la puissance des chutes, qu'il soit à axe horizontal ou vertical, centrifuge ou centripète, est toujours la turbine Fourneyron dont il avait prévu dès 1832 dans ses brevets les différentes formes.

Il semble donc bien que la France puisse s'enorgueillir de l'invention de Fourneyron au même titre que l'Angleterre se glorifie de celle de Watt.

Ces origines de la turbine, bien qu'indiscutables, sont pourtant parfois bien oubliées et il n'est pas rare de lire dans certains ouvrages, émanant souvent d'auteurs réputés, que les premières turbines datent de 1850. On cite Fourneyron en France, Mac Cormick, Francis et Pelton en Amérique, et l'on oublie que l'invention de Fourneyron est antérieure de 24 ans à cette date, qu'en 1832, il avait déjà indiqué les différentes dispositions des turbines : centrifuges, centripètes, parallèles, mixtes, et qu'en 1837, il a mis en marche les deux premières turbines de haute chute : celles de 108 et 114 mètres installées à Saint-Blaise, dans la Forêt-Noire.

LE PROBLÈME DE LA RÉGULATION DES TURBINES. — RÉGULATION DIRECTE OU INDIRECTE.

Revenons aux turbines plus modernes, à celles de Crozet-Fourneyron, de 1923.

Les études de savants et d'ingénieurs bien connus, qui ont marché dans la voie ouverte par les mémoires classiques et célèbres de MM. Léauté et Lecornu, et aussi l'expérience, ont montré que la régulation des turbines hydrauliques était en réalité un problème rendu extrêmement complexe par la nécessité dans laquelle on se trouvait de faire appel, pour la manœuvre des vannages, à des régulateurs à action indirecte.

M. Léauté a montré, en particulier, dans son célèbre mémoire de 1888, que ces régulateurs donnaient naissance à de graves fluctuations de vitesse appelées *oscillations à longue période* et qu'il était nécessaire, pour obvier à cet inconvénient, de recourir à l'*asservissement*.

La complication de ces mécanismes n'a pas été diminuée, loin de là. Tout récemment, M. Boucherot (Voir son Rapport à la Conférence des Grands Réseaux, Paris, novembre 1921) s'élevait contre cette complication, qu'il trouvait souvent peu justifiée. Parmi les autres inconvénients des régulateurs indirects, les moindres ne sont pas leur prix élevé et leur entretien délicat.

Ce n'est donc pas sans regrets que l'on renonce généralement, pour la commande des *turbines hydrauliques*, à la régulation directe.

PRINCIPE DE LA NOUVELLE TURBINE AUTORÉGULATRICE

La difficulté principale en matière de régulation de turbine hydraulique consiste en ce fait que la manœuvre du vannage demande des efforts considérables. Il semble indiqué d'utiliser pour le mouvement du vannage un mouvement louvoyant. L'effort nécessaire est alors tellement diminué, que l'accouplement direct du vannage avec un régulateur à force centrifuge de dimensions acceptables peut devenir possible (1).

On sait que le mouvement louvoyant consiste en une rotation accompagnée d'une translation. Si la vitesse de la rotation est grande par rapport à la vitesse de la translation, le pas de l'hélice décrite par un point de l'organe en mouvement devient extrêmement fin et l'effort qui s'oppose au déplacement dans le sens de l'axe de rotation diminue d'autant.

Pour utiliser cette propriété dans le cas du problème de la régulation, l'un des moyens les plus simples consiste à se servir du manchon lui-même du tachymètre comme vannage et, en particulier, pour une turbine hydraulique, à prendre le rotor lui-même comme manchon.

RÉALISATION PRATIQUE SUR UNE TURBINE DES PRINCIPES QUI PRÉCÈDENT

C'est le dispositif qui a été réalisé dans la turbine que nous allons décrire et dont le schéma est donné, fig. 1.

Il s'agit, dans l'exemple considéré, d'une turbine à axe horizontal. Le rotor r , à aubages centripètes parallèles, porte un prolongement en forme de tiroir cylindrique a . Le jeu laissé entre le distributeur d et le rotor r est réduit au minimum compatible avec la construction, pour des raisons que nous donnerons plus loin.

L'arbre sur lequel est claveté ce rotor passe par un palier presse-étoupe b , puis dans un deuxième palier b^1 . Sur cet arbre sont fixés un volant poulie v et une chappe c . Un plateau p peut tourner autour de l'axe, entraîné qu'il est par des brimballes r du régulateur à force centrifuge, mais ne peut pas se déplacer dans le sens de l'axe, retenu qu'il est par les deux butées à billes f et f' . Sur ce plateau sont fixés, symétriquement par rapport à l'axe, les deux axes d'oscillation du régulateur à boules et les deux extrémités des ressorts R de traction, les autres extrémités de ces ressorts étant fixés au volant-poulie.

Le fonctionnement de ce mécanisme se comprend immédiatement. Les dimensions du régulateur à force centrifuge et des ressorts de traction ayant été calculées de telle sorte qu'il y ait équilibre pour la position de pleine ouverture à une vitesse déterminée (qui sera la vitesse de régime de la turbine) entre la composante horizontale de la force centrifuge et la traction des ressorts, une augmentation de vitesse, à quelque cause qu'elle soit due, va provoquer un déséquilibre au profit de la force centrifuge et, par conséquent, un mouvement du rotor dans le sens de la flèche de fermeture. La partie pleine du tiroir cylindrique venant se substituer aux aubages, provoquera une diminution dans le passage du fluide moteur et, par conséquent, une dimi-

(1) Nous avons adopté, avec notre collaborateur M. Cayère, aujourd'hui Ingénieur aux Etablissements Neyret-Beylier-Piccard Pictet, dans un but analogue, mais sur un appareil de type tout à fait différent, le principe du mouvement louvoyant, si remarquablement souple, préconisé par M. Haton de la Goupillière (Voir *Annales de l'Université de Grenoble*, tome XXIX, n° 1, 1917, et *Publications de l'Institut Polytechnique de l'Université de Grenoble*, n° 66, avril-mai 1917).

nution du couple moteur. Une diminution de la vitesse, à quelque cause qu'elle soit due, provoquera l'effet inverse.

Arbre et Parties animées d'un mouvement loupoyant

Fig. 1. = Turbine autorégulatrice.

Il en découle que la turbine ainsi équipée sera autorégulatrice; l'écart entre les vitesses, pour la pleine ouverture et la fermeture presque complète, pouvant être aussi faible que le comporte la stabilité du régulateur.

Ce résultat est obtenu avec un régulateur de dimensions restreintes :

1° Par ce que le déplacement du vannage est un mouvement loupoyant qui ne demande qu'un effort insignifiant ;

2° Parce que le rotor n'est soumis, dans son mouvement de translation, qu'à l'action du régulateur et qu'il est soustrait, autant que faire se peut, à la poussée axiale du fluide.

Pour arriver à ce résultat, on a diminué à l'extrême la fuite au joint entre le distributeur et le rotor.

La suppression même du vannage permet de rapprocher ces deux organes, et, d'autre part, le prolongement en forme de tiroir cylindrique, permet d'opposer au passage du fluide sous pression la perte de charge d'un long parcours dans un orifice extrêmement étroit. Pour assurer encore mieux l'équilibre des deux faces du rotor, des orifices *o* de forme appropriée sont percés dans sa toile.

C'est sur deux turbines construites et expérimentées par les Ateliers Crozet-Fourneyron qu'a été vérifiée l'exactitude de ces prévisions théoriques.

EXEMPLES D'INSTALLATIONS DE TURBINES AUTORÉGULATRICES

Première Installation.

La première a été installée le 15 décembre 1921 à Trablaine, commune du Chambon-Feugerolles (Loire), sur la rivière l'On-daine (Fig 2 et 3).

Fig. 2. — Rotor de la Turbine.

Elle fonctionne sous une chute de 3 m. 400, en débitant 100 litres à la seconde, et elle sert à l'éclairage et au chauffage d'une maison particulière.

Elle tourne sans arrêt, nuit et jour, depuis un an, sans aucune surveillance, bien que le couple résistant soit variable de zéro au maximum. La vitesse à pleine charge est de 420 tours-minute, et à décharge complète de 440 tours-minute, soit $\frac{20}{440}$ ou encore 4,5 % d'écart de réglage.

[Fig. 3. — Régulateur.

Deuxième Installation.

La deuxième turbine a été mise en marche le 16 décembre 1922. Elle est installée à l'usine électrique de la Méane, dépendant des Usines Dorian-Holtzer-Jackson & C^{ie}, à Pont-Salomon (Haute-Loire), sur la rivière la Semène (fig. 4).

La chute est de 11 mètres 500 et le débit est de 500 litres par seconde.

La turbine actionne un alternateur triphasé 3.000 volts 50 périodes qui est couplé sur le réseau général de l'usine.

Fig. 4. — Station hydroélectrique de la Méane équipée avec une turbine autorégulatrice type B 22 et un alternateur 3.000 volts, 50 périodes.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION D'UNE TURBINE AUTORÉGULATRICE

La turbine est du type centripète parallèle à réaction en bêche fermée (voir photographie ci-jointe, fig. 5).

L'eau arrive au coquillard en fonte par une tuyauterie en tôle de 500 m/m de diamètre intérieur, munie d'une vanne.

Fig. 5. — Turbine autorégulatrice.

en fonte dans la maçonnerie. Ce dernier palier est à graissage par bague, le premier est à graissage par compte-goutte.

Les deux masses du régulateur pèsent chacune 3 k.

Un dispositif permet de faire varier la tension des ressorts et, par conséquent, de changer la vitesse de rotation pour permettre l'accrochage de l'alternateur sur le réseau.

L'arbre de la turbine se termine du côté opposé au rotor par une série de stries formant crémaillère avec un pignon dont l'axe est muni d'une aiguille. Cette aiguille se déplaçant sur un cadran gradué indique les positions du rotor dont le déplacement maximum est de 80 m/m.

Enfin, un grain de butée placé à l'extrémité de l'arbre et une vis manœuvrée par un volant permettent, en poussant le rotor, d'étrangler l'arrivée d'eau et d'arrêter la turbine.

La mise en marche s'opère en tournant le volant en sens inverse, les ressorts ramenant le rotor dans la position d'ouverture.

Les essais de ce dispositif ont montré que la régulation était obtenue d'une façon très satisfaisante.

La différence des vitesses à pleine charge et à vide étant de 4 % et l'augmentation de vitesse pour une décharge brusque de la charge maximum étant de 7,5 % et ne durant que 3 secondes.

*
* *

Le niveau amont est à 5 m. 000 au-dessus de l'axe de la turbine.

Le niveau aval en marche est à 6 m. 500 au-dessous de cet axe. Le tube d'aspiration est de forme tronconique et se termine par un pavillon évasé qui plonge dans l'eau du canal de fuite.

Deux vacuomètres métalliques indiquent le vide en avant et en arrière du rotor. Un tachymètre donne à chaque instant la vitesse de rotation.

Le rotor est claveté sur un arbre qui est supporté par un palier presse-étoupe, solidaire d'une pièce en fonte qui forme aussi distributeur, et qui vient se fixer par des boulons sur le coquillard. Cette disposition permet, en démontant ces boulons, de glisser le distributeur le long de l'axe, et par conséquent, de nettoyer commodément les aubages.

L'arbre est supporté par un deuxième palier fixé sur un bâti

Les avantages de ce dispositif s'aperçoivent aisément. Il est particulièrement simple et peu encombrant. Il est indérégable, ne demande aucune surveillance et n'absorbe qu'une puissance négligeable, contrairement à certains régulateurs à pression d'huile, si bons par ailleurs.

Nous estimons qu'il est de nature à rendre quelques services, notamment dans des installations de moyenne importance pour lesquelles un matériel de prix élevé et la nécessité, d'une surveillance constante constitueraient des impossibilités. Il autorisera donc la création de petites usines hydroélectriques dont la multiplication en dehors des zones d'action des Grands Réseaux électriques, permettra, comme nous le disions tout à l'heure, l'utilisation complète des ressources hydrauliques de notre sol national.