de la région pyrénéenne, les conditions dans lesquelles se présente un problème si important pour l'avenir industriel de notre beau pays. Vous m'excuserez de vous en avoir fait un exposé aussi aride et surtout d'avoir retenu si longtemps votre attention.

H. Ader,
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

RÉGULATEUR DE VITESSE SYSTÈME H. BOUVIER

Principes généraux sur la régulation des turbines

Considérons une turbine tournant à une vitesse uniforme V_0 et actionnant une machine quelconque qui absorbe un travail résistant T_0, pour la vitesse indiquée.

Admettons que cet état de régime se maintienne pendant un certain temps : nous aurons (fig. 1) la droite OA, représentative du travail résistant T_0 et la droite O_1A_1 (fig. 2), représentative de la vitesse uniforme V_0.

Si, à un moment donné, correspondant au point AA_1, nous venons à faire varier brusquement le travail résistant T_0, sans modifier l'ouverture de la turbine, il se produit une variation de vitesse ; au bout d'un certain temps, un nouvel état de régime a succédé au premier et la vitesse atteint une valeur V_1 d'autant plus différente de V_0 que la variation de charge aura été plus grande. Cette variation de vitesse s'effectue avec une accélération qui diminue graduellement pour devenir nulle lorsque l'ensemble, moteur et machines, possède sa nouvelle vitesse de régime.

Les causes qui tendent à faire diminuer progressivement l'accélération sont les suivantes :

1° Le travail résistant croît généralement bien plus vite que la vitesse ;

2° Le travail développé par la turbine diminue lorsqu'on s'éloigne de la vitesse pour laquelle le rendement est maximum.

Si (fig. 1), nous représentons en AB une diminution brusque du travail résistant, la courbe des vitesses et la courbe du travail résistant affecteront la forme indiquée, en traits pleins, dans les fig. 1 et 2, les nouvelles valeurs T_1 et V_1 étant respectivement le travail résistant et la vitesse qui correspondent au nouveau régime.

Si, maintenant, nous admettons l'intervention d'un régulateur agissant sur les organes de réglage de la turbine, lorsque celle-ci s'écarte de la vitesse normale, nous aurons, pour une perturbation comme celle que nous venons de considérer, des résultats qui différeront des précédents. Admettons la même variation du travail résistant, le couple moteur variant sous l'action du régulateur, nous atteindrons plus rapidement l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant, et la courbe des vitesses affectera le tracé en pointillé, jusqu'au point M où l'équilibre entre les couples sera réalisé.

Si, à ce moment, on supprimait toute action du régulateur sur le vannage, une nouvelle vitesse de régime V_2 serait obtenue et cette vitesse serait plus rapprochée de V_0 que ne l'était la vitesse V_1.

On conçoit qu'étant donnée une variation déterminée du travail résistant, il sera toujours possible de calculer les masses en mouvement et la vitesse d'action du régulateur pour que la différence $V_2 - V_0$ ne dépasse pas la limite qu'on se sera imposée.

Fig. 1

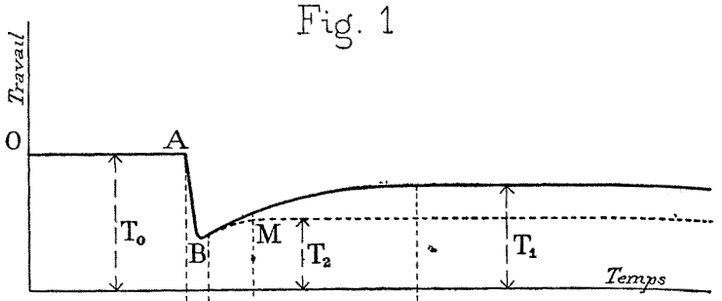
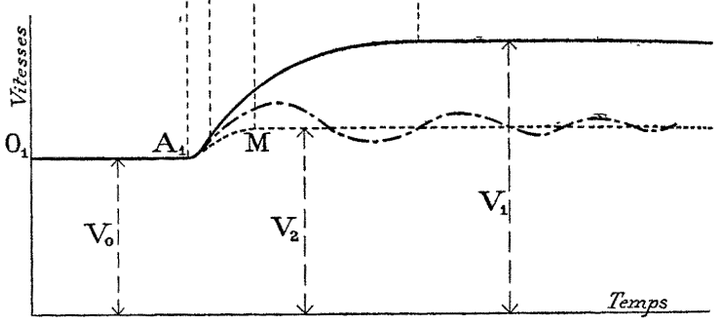


Fig. 2



Les conditions idéales à réaliser pour le bon fonctionnement d'un régulateur consisteraient donc dans une action aussi rapide que possible sur les organes de réglage, cette action cessant d'une façon complète lorsque le couple moteur est devenu égal au couple résistant.

Dans les régulateurs des divers systèmes appliqués jusqu'à ce jour, le tachymètre n'agit pas directement sur le vannage, il n'intervient que pour embrayer ou débrayer un moteur auxiliaire dont l'énergie peut être empruntée à la turbine elle-même (régulateur à déclic) ou à l'eau sous pression (régulateur à servo-moteur).

La liaison entre le tachymètre et le moteur auxiliaire était autrefois un simple dispositif d'embrayage et de débrayage. Ce n'est qu'assez récemment que l'on s'est aperçu de l'avantage considérable qu'il y avait, pour le réglage en régime troublé, à réaliser l'asservissement du second de ces appareils au premier. Grâce à cet asservissement, la position de la vanne de réglage de la turbine est complètement déterminée, *en régime permanent*, par celle de l'index du tachymètre, tandis que ses déplacements d'ouverture ou de fermeture en sont, dans une certaine mesure, indépendants, pendant la période de régime troublé.

En somme, l'action sur le vannage ne cesse pas au moment précis où il y a équilibre entre les couples ; en effet, le vannage dépasse toujours la position qu'il doit occuper, une fois la perturbation terminée. Il en résulte que si, par exemple, on vient à décharger brusquement le moteur, la vitesse augmente, le vannage se ferme, arrivé au point où il y a équilibre entre les couples, mais son

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1903031

mouvement ne s'arrête pas là, la fermeture continue à se produire et, lorsque le mouvement s'arrête par l'action du mouvement d'asservissement, le vannage est trop fermé, la vitesse diminue alors jusqu'à ce que le vannage s'ouvre à nouveau, mais il s'ouvre encore un peu trop, la vitesse se met de nouveau à croître et ainsi de suite. En résumé, la courbe de la vitesse affecte, pendant la période troublée, la forme sinueuse que nous avons indiquée (fig. 2).

Dans l'appareil H. Bouvier, au contraire, les oscillations dont nous venons de parler ne peuvent se produire, car toute perturbation survenant dans le travail résistant est immédiatement corrigée par le déplacement correspondant des organes de vannage et, ainsi que nous allons le voir, un nouvel état d'équilibre succède immédiatement à l'état initial.

Principe de l'appareil H. Bouvier.

Une pompe P (voir fig. 3) à débit sensiblement constant refoule un liquide qui s'échappe par un orifice dont la section peut varier par le déplacement d'une soupape S dont la position est dépendante d'un tachymètre à force centrifuge.

Il est de toute évidence que, pour chaque position de la soupape, on aura une pression déterminée dans la conduite de refoulement de la pompe, pression qui est donnée à chaque instant par la relation :

$$Q = kS\sqrt{2gH}$$

dans laquelle Q est le débit de la pompe, k le coefficient de contraction, S la section de l'orifice à l'instant considéré, H la pression dans la conduite de refoulement à l'instant considéré.

Lorsque la vitesse du tachymètre va en augmentant, la section de l'orifice diminue progressivement et la pression augmente d'une façon continue. Lorsque la vitesse cesse de croître, la douille du tachymètre cesse de monter et la pression au refoulement de la pompe cesse de croître et conserve une valeur déterminée qui correspond à la position de la soupape.

Admettons maintenant que la pression créée dans la conduite de refoulement s'exerce en O sur un piston R et supposons que ce piston soit contrebuté par un ressort Z. Le ressort se comprimant proportionnellement à l'effort qu'il supporte, il devient évident que le piston R occupera une position bien déterminée pour chaque valeur de la pression H du liquide refoulé.

De ce qui précède, il résulte qu'à chaque position du tachymètre correspondent une pression du liquide et une position du piston R bien déterminées.

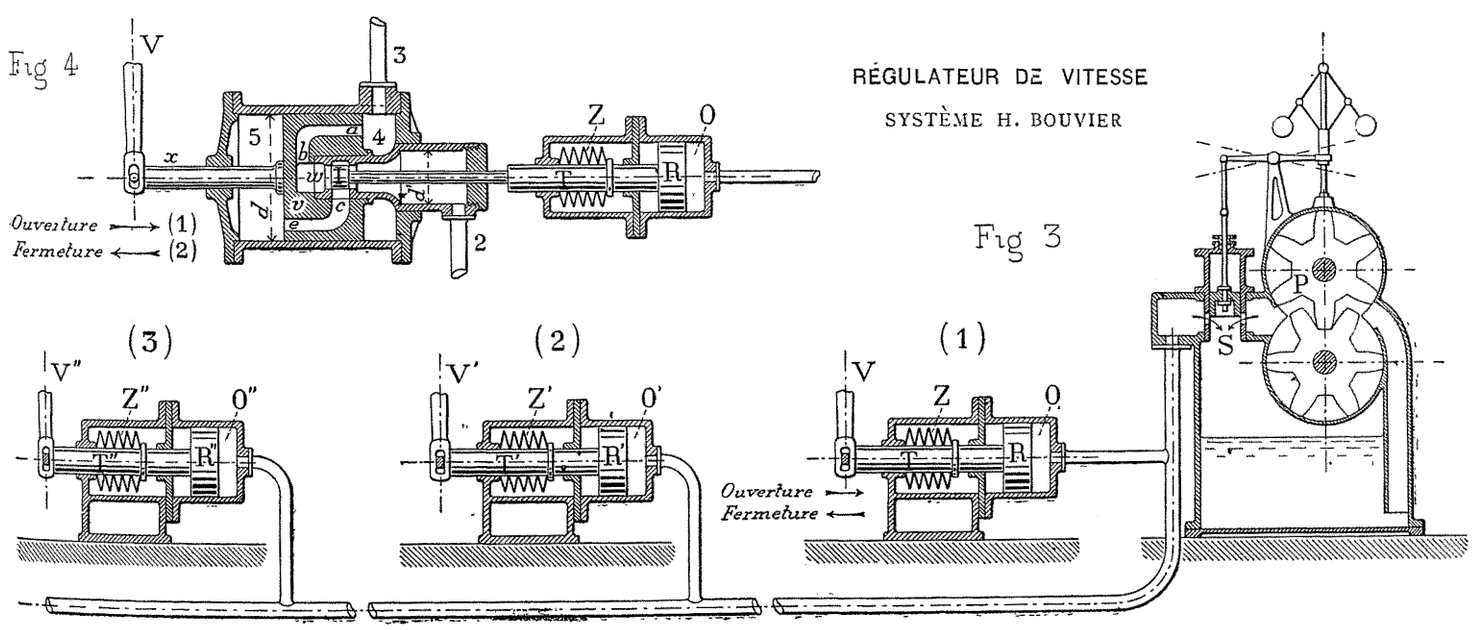
Si, maintenant, l'on suppose que le piston R est relié d'une façon rigide par un levier V avec les organes de réglage de la turbine, il y aura, à tout instant, pour une position donnée du tachymètre, une seule position possible pour le vannage.

Fonctionnement. — Supposons que le moteur tourne à une vitesse angulaire uniforme V_0 et qu'il vienne à être déchargé brusquement, la vitesse angulaire augmente, le tachymètre s'élève, la soupape diminue la section de l'orifice de refoulement, la pression H va en augmentant, les ressorts se compriment et le vannage se ferme de plus en plus. Mais cette action sur le vannage cesse à l'instant précis où le couple moteur est devenu égal au couple résistant. A ce moment, la pression H cessant d'augmenter, les ressorts cessent de se comprimer et tout l'ensemble est en nouvel équilibre à une vitesse angulaire V_2 peu supérieure à la vitesse initiale considérée V_0.

Si nous admettons, au contraire, qu'on vienne à augmenter brusquement le travail résistant, la vitesse diminue, la pression du liquide devient plus faible, les ressorts antagonistes se détendent et tout déplacement s'arrête aussitôt que la vitesse cesse de diminuer.

En somme, tout se passe comme si le vannage était manœuvré directement par la douille du pendule.

En donnant aux divers éléments du régulateur des dimensions suffisantes pour permettre une action rapide sur le vannage et en calculant les masses en mouvement, on peut, pour une variation de charge donnée, faire en sorte que la variation de vitesse $V_2 - V_0$ soit rendue aussi



petite qu'on le désire. Un dispositif simple permet de revenir de la vitesse V_2 à la vitesse initiale V_0, dans le cas où il y a intérêt à maintenir exactement la même vitesse, quelle que soit la charge du moteur; il suffit pour cela de commander le tachymètre à force centrifuge par un jeu de deux cônes lisses ou bien d'agir sur les ressorts du tachymètre.

Nous voyons par cet exposé qu'avec le dispositif simple que nous venons de décrire on passe d'une charge déterminée du moteur à une autre charge quelconque par un seul déplacement du vannage et sans qu'il puisse dépasser la position pour laquelle il y a de nouveau équilibre entre la puissance du moteur et le travail résistant.

Cas où la manœuvre du vannage exige un gros effort. — Lorsque le déplacement des organes de vannage exige un effort par trop considérable, le piston R n'agira pas directement sur le vannage et, dans ce cas, l'appareil Bouvier se complète par l'addition d'un SERVO-MOTEUR *formant relai*, et le piston R n'aura qu'à manœuvrer la soupape de distribution de ce servo-moteur (voir fig. 4); la disposition de ce dernier appareil est telle que son piston suit exactement et instantanément les déplacements de la soupape.

Ce servo-moteur peut fonctionner avec l'eau motrice, si la hauteur de la chute est suffisante, car il ne comporte aucun appareil délicat; si la pression de la chute n'est pas suffisante, le servo-moteur est actionné par un liquide sous pression provenant d'un accumulateur alimenté par un jeu de pompes.

L'appareil se compose d'un cylindre dans lequel se meut un piston *v* différentiel en *d d'*. Le piston est relié par une tige *x* au levier V du vannage de la turbine. L'eau sous pression arrive constamment par le tuyau *3* du côté *4* du piston *v*. En temps ordinaire, la soupape I recouvre l'orifice du canal *c.e*.

1° Supposons que la soupape ait un déplacement dans la lumière *w* et dans le sens de la flèche (*1*). L'eau sous pression a accès dans la chambre *5* par les canaux *a.b, c.e* ; la pression vient s'exercer simultanément sur les deux faces du piston et le mouvement de ce dernier se produit dans le sens de celui de la soupape en vertu de la forme différentielle du piston. Le mouvement s'arrête aussitôt que le piston est venu, par son déplacement, remettre l'orifice du canal *c.e* en face de la soupape.

2° Supposons que la soupape manœuvre dans le sens de la flèche (*2*). Dans ce cas, la soupape met en communication la chambre *5* avec le tuyau *2* d'évacuation à l'aide du canal *e.c*; la pression ne s'exerçant plus que sur le côté *4* du piston, ce dernier s'avancera dans le même sens que la soupape.

Le piston suit donc exactement les mouvements de la soupape et permet d'obtenir un effort aussi considérable que l'exige la manœuvre du vannage.

Principaux avantages de ce régulateur.

1° Ce système évite, d'une façon complète, les oscillations qui se produisent dans les régulateurs qu'on a appliqués jusqu'ici;

2° La pompe fonctionnant constamment avec un même liquide, on est, par conséquent, à l'abri des inconvénients qui se présentent lorsque les organes reliés directement au tachymètre sont en contact avec l'eau motrice qui peut tenir en suspension des corps étrangers;

3° L'appareil se prête d'une façon toute particulière à la régulation simultanée de moteurs hydrauliques actionnant des alternateurs mis en parallèle (voir fig. 3).

Dans ce dessin, nous avons supposé l'appareil s'appliquant à la régulation simultanée de trois moteurs dont les leviers de vannage sont indiqués en V, V', V".

Chaque moteur est muni d'un cylindre récepteur de pression et d'un jeu de ressorts Z, ainsi qu'il est figuré en 1, 2 et 3. La pression créée par la pompe P se rend simultanément aux organes de réglage de chacun des moteurs et, si ces moteurs sont exactement semblables et si les ressorts Z, Z' Z", sont convenablement tarés, tous les vannages occuperont la même position pour une même pression du liquide refoulé; les ouvertures de toutes les turbines étant exactement les mêmes, les alternateurs seront également chargés.

Si les turbines n'étaient pas de puissances équivalentes, il sera toujours facile de combiner les courses des ressorts Z, Z', Z", pour que les moteurs, bien que de types différents, travaillent néanmoins tous à une même fraction de leur puissance:

4° Dans le cas d'une station centrale, un seul tachymètre à force centrifuge règlera la vitesse de toute l'usine; on évite ainsi la difficulté si grande qu'on a toujours éprouvée, lorsqu'on a voulu accoupler des moteurs réglés chacun par un tachymètre spécial.

Résultats pratiques et applications.

Les appareils construits par MM. A. et H. Bouvier, de Grenoble, en appliquant le principe précédent, ont donné les résultats qu'on en attendait, et l'exposé des avantages que nous venons de faire est pleinement confirmé par l'expérience.

Le premier régulateur de ce système a été installé à l'usine de Calypso, dans la Maurienne (Compagnie des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue). Un deuxième fonctionne à la station centrale d'éclairage électrique et de transport de force de Sassenage, près Grenoble; ici, le système est appliqué pour la régularisation simultanée de deux turbines actionnant des alternateurs triphasés.

Les résultats obtenus dans ces deux usines, résultats que nous avons mis en évidence dans la description qui précède, et qui consistent principalement dans la suppression complète des oscillations et dans la possibilité du réglage simultané de plusieurs moteurs avec un seul appareil central, ont valu à MM. A. et H. Bouvier, d'importantes commandes. Nous citerons, entre autres, celle des turbines destinées à la Société des Forces motrices du Vercors, laquelle a pour but le transport de l'énergie électrique pour la ville de Vienne et de ses environs, soit pour l'éclairage, soit pour la distribution de force (L'usine comprendra 6 unités de 1500 HP et les turbines destinées à la commande des excitatrices). Le régulateur qui a été construit pour cette usine est disposé pour permettre le réglage simultané de toutes les unités couplées en parallèle.

Enfin, MM. A. et H. Bouvier viennent encore d'obtenir la

commande des trois turbines de 2500 HP de la nouvelle installation de la Société électrochimique de la Romanche, pour l'alimentation en énergie électrique de la ville de Grenoble.

Le système que nous venons de décrire s'applique également à la régulation des moteurs à vapeur et autres, et permet, comme pour les moteurs hydrauliques, le réglage simultané de plusieurs machines à vapeur avec un seul tachymètre répartissant la charge sur tous les moteurs en fonctionnement.

J. Debauge,
Ingénieur des Arts et Manufactures.

A propos de la dégradation du Puy de Dôme (1)

Mes fréquentes ascensions au Puy de Dôme et mes séjours au sommet de la montagne m'ont fourni l'occasion d'observer les désastreux effets du ruissellement sur des pentes déboisées et dénudées. Bien qu'elles soient étrangères au bassin de la Garonne, je demande la permission de présenter ici ces observations et de les faire suivre de quelques réflexions qu'elles me suggèrent.

Un chemin de mulets qui descend en pente modérée, du sommet du Puy de Dôme jusqu'au petit Puy de Dôme, en contournant la montagne sur le flanc Est, chemin qu'on aperçoit très bien de Clermont, et qui date des premiers travaux, c'est à-dire de 30 ans, est tout à fait dégradé; par endroits, tout le tapis végétal, sur 10 à 20 mètres, au-dessus et au-dessous du chemin est enlevé ; la roche friable (domite) est complètement à nu, et le chemin dans ces passages est à peine praticable.

Le fondateur de l'Observatoire, M. Alluard, remontant, l'an dernier, au sommet à l'occasion du 25e anniversaire de l'inauguration de cet établissement, où il n'était pas allé depuis quelques années, fut frappé des progrès de la dégradation ; à son retour, il s'en exprimait en ces termes à l'Académie de Clermont :

« Le retour prochain des éruptions des volcans qui nous « entourent n'est pas à redouter, mais il y a une crainte « dont personne ne se préoccupe et qui est cependant « fondée : la montagne du Puy de Dôme se démolit sur « plusieurs points. En voici la preuve :

« Lorsque les orages y éclatent et sont accompagnés de « pluies diluviennes, dans les ravins situés sur les flancs Sud-« Est, ces pluies font des dégradations considérables. Sur le « chemin nouveau qui va de la route de Rochefort au col de « Ceyssat, comme il présentait une surface unie et libre « quelques années après sa construction, terminée en 1876 « pour l'inauguration de l'Observatoire, le cantonnier « chargé de son entretien, ayant réuni en tas réguliers les « terrains et les débris de rochers entraînés des ravins, il « me fut facile d'évaluer approximativement leur quantité; « or, leur volume s'élevait à plusieurs centaines de mètres « cubes. Qui ne sait avec quelle rapidité un ravin à grande « pente s'agrandit quand il est pratiqué dans une roche « friable comme la domite.

« Des travaux de protection sont donc urgents, sinon « cette belle montagne du Puy de Dôme qui décore « admirablement la ville de Clermont se défigurera et se « démantellera peu à peu. »

Un conseiller général, M. Colombier, se fit l'interprète de ces doléances à la session d'août 1902 du Conseil général du Puy-de-Dôme (1).

Il y ajouta ce détail, que pour le seul flanc Sud-Est, les éboulis qui ont dû être déblayés par les agents du service vicinal pour dégager la route du col de Ceyssat se sont élevés, pour 1902 seulement, à 400 mètres cubes. Sur sa proposition, le Conseil général a chargé l'Administration d'examiner l'affaire et de mettre à l'étude la question du reboisement.

Par malheur, l'Administration des Eaux et Forêts se déclare désarmée. Non que, dans notre région, elle soit restée inactive. Dans la région des Puys sous l'impulsion d'inspecteurs actifs, au premier rang desquels il faut citer M. Bertrand, elle a fait des merveilles. Tout le versant Sud du Puy de Dôme jusqu'à l'altitude de 1.250 mètres environ, a été reboisé par ses soins aux frais du département et de l'Etat, sur des terrains communaux ou sectionaux, qu'on avait préalablement fait soumettre au régime forestier. Mais il s'agissait là de terrains communaux, ce qui n'est pas le cas des versants Est et Sud-Est, les plus menacés.

On a bien, en dehors des reboisements *facultatifs*, sur terrains communaux, pratiqué parfois des reboisements dits obligatoires, mais il a fallu, chaque fois, un décret spécial. On a réussi à opérer des reboisements sur des terrains appartenant à des particuliers, lorsque les propriétaires ont consenti à s'engager à faire eux-mêmes les travaux avec les subventions données par l'Administration, en argent ou en nature, plantes ou graines. Mais on n'est parvenu que dans des cas très rares à vaincre la méfiance et l'inertie du propriétaire.

Dans le cas des pentes supérieures et des versants Sud-Est et Est du Puy de Dôme, il serait illusoire d'attendre des propriétaires une action de ce genre, car elle supposerait une entente commune à peu près impossible. Cette partie du Puy de Dôme présente, en effet, un type de propriété assez peu fréquent et qu'il est bon de signaler ici, ne fût-ce que pour montrer qu'on ne résout pas les difficultés auxquelles conduit la conception absolutiste du droit de propriété par la simple transformation de la propriété individuelle en propriété collective. Il s'agit, en effet, d'une propriété collective, appartenant à un grand nombre de propriétaires (ils étaient 73 en 1874), héritiers des droits de M. le marquis de Vény, propriétaire de ces pacages au XVIIIe siècle et qui a laissé une propriété frappée d'une servitude d'indivision. Ce régime date d'avant la Révolution ; depuis lors, c'est-à-dire depuis plus de 120 ans, les copropriétaires « aux

(1) Communication de M. Bernard Brunhes, professeur à l'Université de Clermont-Ferrand, directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme, au *Congrès du Sud-Ouest navigable*, à Toulouse, en mai-juin 1903.

(1) Conseil général du Puy-de-Dôme, séance du 22 août 1902. Session d'août 1902, p. 135-137.