Le statisme des régulateurs et son élimination

Governor speed-droop and its elimination

PAR J. DANIEL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MÉTIERS
ET DE L'ÉCOLE DES ÉLÈVES INGÉNIEURS MÉCANICIENS DE LA MARINE

English synopsis p. 5

PREMIÈRE PARTIE. — ÉTUDE GÉNÉRALE

La présente note vise avant tout à rappeler de manière synthétique un certain nombre de faits connus; il arrivera pourtant qu'ici ou là la synthèse mette en évidence quelque élément plus nouveau.

Le *statisme* est un « moindre mal » que l'on tolère parfois comme contre-partie de la stabilité des systèmes de réglage. Lorsqu'il ne peut être toléré, on doit consentir, pour réaliser la stabilité, d'autres concessions qui, comme nous le montrerons, se ramènent actuellement à deux : on substitue au statisme tantôt une « lenteur de réglage », tantôt un « statisme virtuel ».

Avant d'étudier les moyens par lesquels on l'élimine, nous rappellerons brièvement comment le statisme apparaît. Pour rester aussi concrets que possible, nous supposerons qu'il s'agit de régler la vitesse d'un groupe turbo-alternateur; la transposition aux autres problèmes de régulation sera très facile dans tous les cas où elle présentera quelque utilité.

1. Régulateur direct.

On connaît la description classique des régulateurs de vitesse. D'un côté, un tachymètre détecte les écarts de vitesse; de l'autre, un organe de réglage « obturateur » ou « cerce de vannage », est susceptible de modifier, si on le déplace, la puissance développée par la turbine. Entre eux, une liaison rigide est établie de telle sorte que tout écart de vitesse en plus ou en moins provoque un changement de puissance en moins ou en plus tendant à rétablir la vitesse.

Ce mécanisme est caractérisé sur la figure 1 par un « point de fonctionnement » A dont les coordonnées sont la puissance P_a et la vitesse N_a , et par une ligne BAC précisant la relation entre les écarts de vitesse tels que $N_a N_b$ et les variations de puissance telles que $P_a P_b$ qu'ils provoquent.

2. Statisme.

Aux extrémités de la ligne BC droite ou courbe, les vitesses sont : N_0 pour la puissance nulle et N_m inférieure à N_0 pour la puissance maxima P_m . La baisse de vitesse : $N_0 - N_m$ constitue évidemment un défaut de réglage, mais un défaut manifestement nécessaire pour le type de régulateur décrit. Sa valeur relative : $\frac{N_0 - N_m}{N_0}$ est appelée *statisme*; sur la figure, où N_0 et P_m sont représentés par la même longueur, ce statisme global est mesuré par la pente moyenne de la courbe $N_0 B A C M$. Parfois il est utile de considérer la pente de BC au point A : on lui donne le nom de « statisme au point A ».

FIG. 1. — FONCTIONNEMENT DU RÉGULATEUR DIRECT
(Ce diagramme peut également servir pour le régulateur à servo-moteur asservi.)

3. Les servo-moteurs.

Au régulateur direct, nous devrions, semble-t-il, opposer le régulateur indirect. Nous évitons pourtant cette expression qui peut prêter à confusion. Le terme « servo-moteur » que nous emploierons n'est d'ailleurs pas, lui-même, exempt de toute ambiguïté. Nous distinguerons :

a) LE SERVO-MOTEUR ASSERVI, qui, à tout déplacement déterminé de son point de commande, répond par un *déplacement correspondant* de son point d'utilisation : c'est un amplificateur d'efforts et un *transmetteur* de déplacements (avec ou sans amplification) ⁽⁰⁾.

(0) Bien construit, il transmet pratiquement sans retard. Ce fait est supposé par M. STEIN dans sa communication à la S.F.E. du 13 octobre 1947 (*Bulletin S.F.E.*, 6, VIII, 78, p. 97) et précisé par M. ALMERAS (*La Houille Blanche*, 1947, n° 6). M. GADEN semble l'ignorer et fait au contraire état d'un retard considérable dans son article : « Asservissement et accélérométrie » (*Bulletin technique de la Suisse Romande*, 13 et 27 mars 1948).

b) LE SIMPLE MOTEUR que, pour respecter la terminologie reçue, nous appellerons *servo-moteur non asservi*, et qui, à un déplacement donné de son point de commande, répond par un déplacement à *vitesse donnée* de son point d'utilisation; c'est encore un amplificateur d'efforts, mais un *intégrateur* de déplacements.

4. Régulateurs simples à servo-moteur.

Nous distinguerons deux cas, correspondant chacun à l'emploi de l'un des deux types de servo-moteurs :

a) Le remplacement de la transmission d'un régulateur direct par un servo-moteur asservi ne modifie en rien ce que nous avons constaté : UN STATISME SUBSISTE NÉCESSAIREMENT. Toutefois, le statisme nécessaire se trouve considérablement réduit par cette disposition, du fait qu'elle ne demande au tachymètre qu'un effort insignifiant.

a) Asservi

b) Non asservi

FIG 2. — EXEMPLES DE RÉGULATEURS TACHYMETRIQUES.

Principe commun aux deux systèmes : Lorsque la vitesse est trop grande le manchon T du tachymètre se soulève et, par le levier flottant PFT qui s'appuie alors en P, lève le tiroir H de sorte que l'huile sous pression fournie par une pompe auxiliaire en I est introduite dans le cylindre C comme l'indiquent les flèches 1. Celle qui se trouve de l'autre côté du piston suit les flèches 2 et est évacuée en E. Le déplacement du piston qui en résulte entraîne une fermeture de l'organe de réglage articulé en R.

Asservissement : Il consiste en ce que dans la disposition a le déplacement du piston provoque en outre, par la « came de statisme » S et son galet G un mouvement vers le bas de P, ce qui, ramenant F et H en position moyenne, met fin au mouvement de R.

Tout se passe en définitive comme si l'on avait uniquement une liaison cinématique TFGSR (où F serait fixe), irréversible de telle manière que T commanderait R sans effort appréciable tandis que R ne réagirait pas sur T. Notons que le dimensionnement de la partie hydraulique est choisi pour que le délai d'obtention de ce résultat final soit négligeable.

Système non asservi : Il n'est pas stable par lui-même, mais peut pourtant être employé dans les cas où un effet stabilisateur existe par ailleurs.

Il diffère du précédent non seulement par la suppression de S et G, mais encore par le dimensionnement de la partie hydraulique et spécialement du tiroir : celui-ci doit en effet *régler* la vitesse du piston par sa levée, et non comme dans le cas précédent provoquer un mouvement aussi rapide que possible dès qu'il n'est plus en position moyenne.

b) L'emploi d'un servo-moteur non asservi introduit au contraire deux changements considérables. D'une part, le servo-moteur ne s'arrêtant que lorsque son point de commande est en position moyenne, aucun équilibre ne sera possible que lorsque la vitesse aura repris la valeur normale N_0 ; il n'y aura donc plus de *statisme*. D'autre part, malheureusement, ce système de régulation est par lui-même ⁽¹⁾ sans stabilité : il ne trouve pas une position d'équilibre, mais *oscille indéfiniment*, à la manière d'un pendule sans frottement.

5. Réalisations empiriques de régulations astatiques.

Deux types de réglages astatiques dérivent des deux systèmes indiqués au paragraphe 4.

a) Le plus ancien en date utilise le servo-moteur asservi et fait disparaître le statisme tout en maintenant son effet stabilisateur. Il est connu sous le nom de réglage à statisme provisoire; l'appareil qui le réalise est appelé régulateur à dash-pot, ou à cataracte, ou à compensateur, ou enfin à transmission à glissement. On peut le caractériser de la manière suivante : la ligne BC, définissant sur la figure 1 les variations de vitesse autour du point A, cesse d'être un segment d'une courbe fixe et devient susceptible de translations parallèles à l'axe des abscisses; un dispositif automatique opère une telle translation, dans le sens convenable, chaque fois que la vitesse N_a est différente de N_0 ; toutefois, il l'effectue assez lentement ⁽²⁾ pour ne pas supprimer l'effet stabilisateur.

b) Plus récemment, on a utilisé le servo-moteur non asservi, en stabilisant la régulation par l'emploi d'un accéléromètre dont l'action a été ajoutée à celle du tachymètre de telle manière que toutes deux soient de même sens lorsque l'écart de vitesse et sa tendance sont eux aussi tous deux de même sens, par exemple lorsque la vitesse étant trop grande le groupe accélère encore. (Voir fig. 4, page suivante.)

Cette solution séduit par son élégance; nous verrons plus loin les éléments d'un jugement plus solide.

(1) Nous adoptons ici l'hypothèse simplificatrice de l'absence d'autorégulation et de phénomènes plus ou moins analogues susceptibles de modifier le résultat moyen indiqué, les uns en stabilisant le régime, les autres au contraire en introduisant un amortissement négatif.

(2) C'est intentionnellement que nous donnons ici la description ancienne et assez empirique du phénomène. Il est évident que dans une étude serrée on ne pourrait ainsi séparer les deux mouvements concomitants, l'un, déplacement sur BC, qui produit la stabilité, l'autre, déplacement de BC, qui annule le statisme; il n'y a en fait qu'un mouvement global et il doit être étudié en bloc : c'est ce qui sera fait au paragraphe 8.

FIG. 3. — RÉGULATEUR A DASH-POT.

Description : Ce régulateur se déduit du régulateur asservi (fig. 2 a) par l'insertion entre P et G du dash-pot D et l'accrochage sur l'articulation P d'un système de ressorts r . Le dash-pot n'est autre qu'un piston enfermé dans un cylindre à huile et percé d'un orifice calibré : un déplacement relatif est possible, mais exige un effort proportionnel à sa vitesse. Quant aux ressorts r , ils tendent à ramener P à sa position moyenne et pour cela exercent un effort proportionnel à l'écart : c'est cet effort qui produit le glissement du piston dans le cylindre du dash-pot.

On notera que la partie « hydraulique » reste celle de la figure 2 a; aussi l'avons-nous représentée seulement par le trait mixte H_1C_1 : cette simplification est d'autant plus légitime que, comme on l'a noté (fig. 2 a), il s'agit uniquement d'un relais rendant la transmission sans effort et irréversible.

Premier exposé du fonctionnement (à consulter en lisant le § 5 a).

Le passage d'un régime de charge à un autre se traduit nécessairement par un déplacement de R, donc de G. Ceci exige :

1° En l'absence de dash-pot (fig. 2 a) un déplacement de P, donc (F étant fixe) de T, et par suite une vitesse du groupe différente pour chaque degré de charge.

2° Le dash-pot autorise P (et donc T) à revenir progressivement en position moyenne après toute variation de charge; de ce fait l'écart de vitesse, et le statisme dont il est la traduction, ne sont plus que provisoires.

Explication complémentaire (à consulter en lisant le § 8).

Le point F étant fixe, l'écart de P mesure, comme celui de T, l'écart de vitesse $\Delta\omega$. Par suite la vitesse du glissement intérieur de D est proportionnel à $\Delta\omega$, en sorte que les variations de longueur de PG sont proportionnelles à l'écart intégré : $\int_0^t \Delta\omega dt$. Au total, le déplacement de G, somme de celui de P et de la variation de PG, est la somme de deux termes proportionnels, l'un à l'écart de vitesse $\Delta\omega$, l'autre à l'écart intégré $\int_0^t \Delta\omega dt$: il en va évidemment de même du déplacement de R.

6. Statisme et couplage.

Les solutions rappelées au paragraphe 5 montrent que, contrairement à ce que pourrait laisser supposer le paragraphe 4, le statisme n'est pas véritablement une condition nécessaire de stabilité : il suffit, pour réaliser un réglage astatique, d'adopter un régulateur convenable.

Par contre, le couplage entre eux de groupes astatiques repose le problème : il est instable, alors que celui de groupes doués de statisme

FIG. 4. — RÉGULATEUR ACCÉLÉRO-TACHYMÉTRIQUE.

Description : Ce régulateur se déduit du régulateur non asservi (fig. 2 b) par la substitution au point fixe P du manchon A d'un accéléromètre.

On notera que la partie « hydraulique » reste celle de la figure 2 b ; aussi l'avons-nous représentée seulement par le double trait mixte H_2C_2 . Nous avons choisi cette figuration conventionnelle peu différente du trait unique H_1C_1 adopté à la figure 3 afin de marquer à la fois la ressemblance et les différences qui existent entre les appareillages correspondants : ils sont de schéma identique, mais de dimensionnement différent ainsi qu'on l'a signalé à la fin de la légende de la figure 2.

est stable. Aussi a-t-on dû, pour assurer la stabilité du couplage, réintroduire un statisme sous la forme d'un :

- FAIBLE STATISME PERMANENT à côté du statisme provisoire,
- LÉGER ASSERVISSEMENT à côté de la stabilisation par accéléromètre.

Il faut alors, à moins de renoncer au réglage astatique, prévoir un dispositif supplémentaire pour éliminer à son tour ce « statisme de couplage » ; c'est à ce but que répondent, par exemple pour les réseaux de distribution d'électricité,

le vieux système de réglage par « chef d'orchestre » et le dispositif moderne du réglage « fréquence-puissance ».

7. Etude rationnelle de l'élimination du statisme.

L'exigence manifestée par la figure 1 tient au fonctionnement même du régulateur ; la grandeur dont les variations commandent le réglage doit nécessairement décroître ⁽³⁾ pour faire augmenter celle sur laquelle elle agit.

C'est ce DÉCRÉMENT nécessaire qui constitue le *statisme* lorsque la grandeur qui commande est celle que l'on veut régler, ici la vitesse, et que la grandeur commandée, ici la valeur relative de la puissance, doit être modifiée dans des proportions non négligeables.

Mais si un DÉCRÉMENT est nécessaire au fonctionnement du régulateur, il n'est nullement nécessaire que les grandeurs liées par lui soient la grandeur réglée et une autre grandeur à variations non négligeables. On peut opérer une substitution sur l'un ou l'autre des éléments liés, ou même sur chacun d'eux. Ainsi, au lieu d'employer comme élément de commande l'écart de vitesse, on pourra utiliser son intégrale, L'ÉCART DE VITESSE INTÉGRÉ : le *décrément* nécessaire ne sera plus alors un statisme, mais une *lenteur de réglage*. De même, on pourra ne faire agir le régulateur que pour produire des écarts de puissance développée, autour d'une puissance développée moyenne, ou de « régime », dont l'égalisation à la puissance demandée sera obtenue par ailleurs : le *décrément* nécessaire sera ici un *statisme virtuel*.

Nous étudierons successivement ces deux systèmes : à lenteur de réglage et à statisme virtuel, d'abord dans le cas des groupes isolés, puis dans les couplages. Pour ne pas compliquer inutilement l'exposé, nous laisserons de côté les systèmes plus complexes qui utilisent à la fois les deux transformations.

8. Régulation à « lenteur de réglage » des groupes isolés.

En confiant la commande à « l'écart intégré », on doit, pour assurer la stabilité, maintenir une action de l'écart non intégré. Cette obligation ⁽⁴⁾ se déduit immédiatement des « conditions d'Hurwitz », celles-ci exigeant notamment qu'aucun des coefficients de l'équation caractéristique ne

(3) Avec les conventions de signe ordinaires. Il est bien évident qu'avec d'autres conventions de signe on exprimerait la même propriété comme une croissance nécessaire ; cette difficulté est uniquement d'ordre mathématique ; on nous pardonnera de ne pas y insister dans un exposé technique.

(4) Toujours dans l'hypothèse signalée ci-dessus à la note (1).

soit nul. La réalisation comportera donc, en principe :

a) un tachymètre et un détecteur d'écart intégré dont les actions additionnées seront reçues par l'organe de réglage; l'amplification de puissance sera confiée à un servo-moteur asservi;

b) si l'on veut employer un servo-moteur non asservi, on tiendra compte de l'intégration qu'il produit en opérant des dérivations préalables; plus précisément, un tachymètre remplacera le détecteur d'écart intégré, et un accéléromètre tiendra le rôle joué dans la disposition précédente par le tachymètre.

Le lecteur aura reconnu sans peine dans la disposition *b* le réglage accélero-tachymétrique dont la genèse historique, plus empirique, a été signalée au paragraphe 5 *b*.

Quant à la disposition *a*, elle peut recevoir plusieurs formes dont l'une est le réglage à dash-pot indiqué au paragraphe 5 *a* : le dash-pot, avec ses accessoires, constitue en effet un véritable intégrateur; le « glissement » introduit par lui dans la transmission se fait à une vitesse proportionnelle à l'écart de vitesse mesuré, en sorte que l'amplitude de ce glissement se trouve proportionnelle à l'écart intégré.

Une autre forme de la même disposition a été donnée par Stein, d'ailleurs dans une tout autre perspective à la réunion de la S.F.E. du 13 octobre 1947 ⁽⁵⁾. Nous avons nous-même proposé ⁽⁶⁾ une forme où l'intégrale de l'écart de vitesse est fournie par un différentiel recevant d'une part le mouvement du groupe réglé, et de l'autre celui d'un système chronométrique. Plus simplement, on pourrait atteler au tachymètre un appareil conçu comme le servo-moteur non asservi mais de dimensions très réduites puisqu'il n'aurait à fournir qu'un effort insignifiant.

Quelle que soit la disposition choisie et la forme sous laquelle elle est réalisée, on substitue au décrément de vitesse un décrément d'écart intégré. Rapporté à la vitesse normale, le décrément de vitesse était mesuré par un nombre, le statisme. Rapporté de même à la vitesse normale, le décrément d'écart intégré est mesuré par un temps; le lecteur vérifiera aisément que ce temps coïncide avec celui qu'après Stein nous nommons « LENTEUR DE RÉGLAGE » et dont l'inverse est ordinairement appelé avec M. Gaden : « PROMPTITUDE DE RÉGLAGE ».

On attend sans doute de nous qu'après avoir marqué le parallélisme, au plan théorique, entre les dispositions *a* et *b* nous indiquions aussi leurs différences dans le domaine pratique. Nous nous bornerons à la principale. Elle consiste en ce que

la disposition *b* réunit dans un même appareil, le servo-moteur, deux fonctions : développer la puissance de manœuvre et produire une intégration, tandis que ces deux fonctions sont, dans la disposition *a*, confiées à des appareils distincts. Aussi, tandis que la lenteur de réglage du dispositif *a* reste indépendante de l'effort de manœuvre, celle du dispositif *b*, au contraire, lui est étroitement liée ⁽⁷⁾. Une telle liaison constitue un inconvénient sérieux dans le cas des turbines hydrauliques. On cherche alors, en effet, à réaliser la lenteur de réglage la plus faible autorisée par l'inertie de l'eau (phénomène du coup de bélier) *indépendamment de l'effort de vannage* dont la grandeur varie beaucoup avec le sens de manœuvre et le degré d'ouverture.

FIG. 5. — AUTRE RÉGULATEUR A TACHYMÈTRE ET INTÉGRATEUR.

Principe : Le tachymètre, par l'intermédiaire de l'intégrateur H_1C_1 (qui ici n'est autre qu'un petit servo-moteur non asservi), impose au point B des déplacements proportionnels à l'écart de vitesse intégré.

Le levier flottant BMT effectue une moyenne convenable de l'écart simple et de cet écart intégré et, par le servo-moteur asservi H_1C_1 , avec sa timonerie NFP G, lui assujettit la manœuvre du vannage.

Propriétés :

1° Le système est *astatique*, puisqu'il ne trouve de repos que lorsque le tiroir H_1 occupe sa position moyenne, donc lorsque la vitesse est normale.

2° Le déplacement de R entre deux régimes d'équilibre est proportionnel au déplacement de B. Le passage de la marche à vide à la toute puissance (course totale de R) correspond donc à une variation bien définie de l'écart intégré : elle constitue la *lenteur de réglage*. On diminue cette lenteur en rapprochant M de B et N de F.

9. Régulation à « statisme virtuel » des groupes isolés.

Nous ne connaissons pas de réalisation de ce genre; nous indiquerons donc seulement une disposition possible.

Elle utilise un servo-moteur asservi et le fait

(5) *Bulletin S.F.E.*, 6^e série, t. VIII, n° 78 (fév. 48), pp. 101-102.

(6) *R.G.E.*, t. LV (oct. 46), pp. 403-414.

(7) ALMERAS, *La Houille Blanche*, 1947, n° 6.

commander par l'ensemble d'un tachymètre et d'un wattmètre. C'est en somme la disposition du paragraphe 8 a où l'on aurait remplacé le détecteur d'écart intégré par le wattmètre; celui-ci mesure la puissance *débitée* par le groupe. Sa transmission est établie de telle manière que toute variation de puissance livrée entraîne une variation *égale* de la puissance développée; en outre, lorsque la vitesse a la valeur normale N_0 , les deux puissances, livrée et développée, sont

FIG. 6. — RÉGULATEUR TACHYMÉTRIQUE A STATISME VIRTUEL.

Description : Ce dispositif ne diffère du précédent que par la substitution du wattmètre W à l'intégrateur H_1C_1 .

Propriétés :

1° Les rapports de la transmission sont choisis de telle manière qu'au cours de variations de charge les déplacements dus à la came S et au wattmètre W s'équilibrent sans exiger aucun déplacement de T, donc sans variation de vitesse : le réglage est *astatique*.

2° A « demande constante » du réseau, B est fixe : le système se comporte comme un réglage statique ordinaire.

3° Une variation continue de la « demande » déplace B, et par suite R, sous la seule influence du wattmètre, sans exiger une modification de la vitesse moyenne : il n'y a donc pas de « lenteur de réglage ».

égales, en sorte que le groupe n'accélère ni ne retarde. Le rôle du tachymètre se limite à introduire entre ces deux puissances, lorsque la vitesse est autre que N_0 , une différence proportionnelle à l'écart de vitesse; il stabilise la vitesse à sa valeur normale.

Nous appelons ce dispositif « réglage à STATISME VIRTUEL » parce qu'il peut être regardé comme un réglage statique ordinaire où le statisme se trouve voilé par le fait que la variation de puissance susceptible de le déceler est normalement inexistante; elle peut accidentellement apparaître et manifester alors le statisme par un écart de vitesse. Tel serait le cas, par exemple, si l'indication du wattmètre était erronée : le statisme virtuel se manifesterait par le faible écart de vitesse correspondant à l'erreur.

10. Réglage des groupes couplés.

Le couplage pur et simple des groupes à réglage astatique n'est pas stable. Il faut, pour obtenir la stabilité, ne réaliser l'astatisme que pour l'ensemble couplé et non pour chaque groupe séparément. C'est ce qui explique l'espèce de contradiction signalée au paragraphe 6 : pour stabiliser le couplage, on y est amené à rétablir un « statisme permanent » alors qu'on a rendu « provisoire » le statisme nécessaire à la marche individuelle.

Les procédés qui permettent de rendre astatique un ensemble de groupes couplés sont en principe les mêmes que ceux qui ont été indiqués pour les groupes isolés : recours à une lenteur de réglage, ou à un statisme virtuel. Mais, en pratique, tandis qu'on n'utilise guère que le premier de ces procédés pour les groupes isolés, on lui préfère le second lorsqu'il s'agit d'un ensemble couplé. Ici :

a) d'une part, nous indiquerons sous quelle forme le premier peut satisfaire aux besoins des couplages,

b) d'autre part, nous montrerons comment la forme du second indiquée au paragraphe 8 pour les groupes isolés rejoint les solutions connues pour les couplages.

a) RÉGULATION A LENTEUR DE RÉGLAGE.

La seule condition à réaliser est que tous les groupes mesurent un même écart intégré. Elle est satisfaite par exemple par le système chronométrique signalé au paragraphe 8 (note 6); elle ne le serait pas par les autres systèmes d'intégration indiqués dans le même paragraphe, car les divers groupes couplés n'intégreraient pas les écarts de vitesse rigoureusement à partir du même zéro.

b) RÉGULATION A STATISME VIRTUEL.

Nous envisagerons successivement le couplage simple et le couplage d'interconnexion.

1° *Couplage simple* : pour adapter à la marche couplée le système indiqué au paragraphe 9, il suffit en principe de modifier l'action wattmétrique de la manière suivante :

- On mesure la puissance totale W livrée par l'ensemble (précédemment on mesurait la puissance livrée par le groupe unique);
- Au vu de cette puissance, un répartiteur (homme ou automate) fixe la « part demandée » à chaque groupe;
- Chaque « part » est signalée au groupe correspondant par une transmission instantanée qui détermine l'action wattmétrique.

En somme, dans l'action wattmétrique du régulateur, on substitue à la puissance du groupe une « part » de la puissance totale. Le lecteur

vérifiera facilement que ce processus répond à la définition donnée par FALLOU⁽⁸⁾ du réglage à statisme virtuel dans le cas où les opérations demandées ici sont possibles⁽⁹⁾.

2° *Couplage d'interconnexion* (réglage fréquence-puissance) : l'ensemble des appareils couplés est réparti en un certain nombre de « complexes géographiques » jouissant d'une large autonomie. On impose seulement à chacun d'eux de faire varier, en fonction de l'écart de fréquence $f - f_0$, la puissance F qu'il prend⁽¹⁰⁾ à l'interconnexion, suivant la loi :

$$F = F_0 + K(f - f_0) \quad (1)$$

où F_0 et K sont respectivement une « puissance de consigne » et une « énergie réglante » convenues à l'avance entre « l'interconnexion » et le « complexe ».

Dans notre système de réglage, la puissance totale W livrée par les groupes varie suivant une loi analogue :

$$W = W_0 - k(f - f_0)$$

où W_0 est la somme des « parts demandées » aux divers groupes et k une énergie réglante connue (définie par les statismes des groupes). Aussi nous suffit-il, pour vérifier automatiquement la loi (1) qui nous est imposée, d'adopter pour W_0 , au lieu de la valeur W prise dans le couplage simple, la nouvelle valeur :

$$W_0 = W + \frac{k}{K} (F - F_0).$$

Il n'y a pas là de complication réelle.

11. Conclusions.

Les moyens qui permettent de réaliser un réglage astatique se ramènent à deux principaux, pouvant d'ailleurs être combinés. Ils remplacent le statisme par d'autres décrets, l'un par une « lenteur de réglage », l'autre par un « statisme virtuel ». Tous deux conviennent à la fois aux deux réglages : en marche séparée et en marche couplée.

Au premier d'entre eux se rattachent tous les dispositifs employés d'ordinaire pour la marche séparée. Il y a de ce fait équivalence assez grande entre eux, malgré une certaine infériorité du réglage accéléro-tachymétrique imputable à l'abandon qu'il fait au servo-moteur du rôle d'intégrateur.

Inversement, les dispositifs employés en fait pour la marche couplée se rattachent au second moyen.

Le fait de réserver ainsi l'un des deux moyens à la marche séparée, l'autre à la marche couplée, conduit à les mettre tous deux en œuvre sur chaque groupe. C'est là une complication dont l'existence n'a sans doute pas été assez remarquée jusqu'ici, et dont, semble-t-il, la nécessité n'est pas établie.

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION AU PERFECTIONNEMENT DES RÉGULATEURS DES TURBINES HYDRAULIQUES

12. Particularités du réglage des turbines hydrauliques.

Le mouvement de fermeture du vannage augmente temporairement la pression dans la conduite forcée; le mouvement inverse la diminue. Ce phénomène, connu sous le nom de coup de bélier, a deux conséquences principales :

a) Il exige que la vitesse de manœuvre du vannage, au moins à la fermeture, soit limitée à une valeur maxima telle que la surpression qui en résulte ne soit pas dangereuse.

b) Il diminue la stabilité des dispositifs de régulation de la turbine⁽¹¹⁾.

La première nous oblige à distinguer entre des « petits mouvements de réglage » ou « manœuvres normales » au cours desquels l'emploi

(8) *Bulletin S.F.E.*, 5^e série, t. VI, n° 65 (mai 1936), p. 461.

(9) *Ibid.*, § B, II, 4° (p. 480).

(10) Nous n'excluons pas le cas où le complexe livre de la puissance à l'interconnexion : il se traduit simplement par F négatif.

(11) Cette question a été traitée récemment par plusieurs auteurs, notamment MM. ALMERAS, GADEN, STEIN; nous l'avons nous-même abordée. Le livre de M. GADEN : *Considérations sur le problème de la stabilité*, a paru, en 1945, aux éditions La Concorde, à Lausanne. Les autres travaux ont été publiés en majeure partie dans *La Houille Blanche*, la *Schweizerische Bauzeitung* et le *Bulletin technique de la Suisse Romande*. Des rapports à la Société Française des Electriciens et les comptes rendus de leur discussion ont été donnés dans le *Bulletin* de cette Société, en particulier 6^e série, tome VIII, n° 78 et 80 (février et avril 1948).

de la vitesse maxima est *inutile*, voire pratiquement irréalisable, et des « grands mouvements » ou « manœuvres exceptionnelles » qui au contraire *doivent* être effectués à la vitesse maxima pour éviter des survitesses ou des ralentissements excessifs du groupe. L'étude principale de la régulation porte évidemment sur les manœuvres normales. Avant de nous y livrer, nous précisons quelles sujétions nous impose la nécessité d'assurer dans de bonnes conditions les manœuvres exceptionnelles.

1° M. l'Abbé CAYÈRE a pensé ⁽¹²⁾ qu'il était pratiquement indispensable de recourir à un servo-moteur non asservi ⁽¹³⁾, mais cette nécessité n'est que théorique. Tout servo-moteur, même asservi, est en fait incapable de dépasser une vitesse de manœuvre limite fixée par son dimensionnement. Les servo-moteurs asservis actuels sont excellents ⁽¹⁴⁾ bien que leur vitesse maxima soit celle qu'imposent les manœuvres exceptionnelles. Les « grands mouvements » ne nous imposent donc rien de ce point de vue du choix du type du servo-moteur.

2° On démontre ordinairement que la stabilité des grands mouvements peut être assurée par deux méthodes :

a) l'emploi d'un critère de manœuvre accéléro-tachymétrique;

b) le recours à un statisme.

Mais ces démonstrations sont le plus souvent incorrectes du fait qu'elles négligent l'influence du coup de bélier.

Si l'on veut en tenir compte, on peut admettre à la rigueur, comme le font ces démonstrations, que pour chaque sens de marche du servo-moteur le couple accélérateur ou retardateur du groupe est fonction linéaire du temps. Mais le changement du sens de marche ne peut se traduire simplement par une inversion de pente de la droite de variation des couples : il doit comporter en outre une variation brusque d'ordonnée. Avec cette représentation encore grossière, mais tout de même acceptable ⁽¹⁵⁾, on établit facilement les résultats qui suivent :

(12) « Les régulateurs de vitesse des turbines hydrauliques », *Revue Arts et Métiers*, n° 84-85 (sept.-oct. 1927), p. 322-324. Cet article a fait autorité; on s'en rendra compte en parcourant par exemple les ouvrages de MM. TENOT : *Turbines hydrauliques et régulateurs automatiques de vitesse* (1935), BARBILLON : *les Groupes électrogènes et leurs régulateurs* (1928), AILLERET : *Cours à l'Ecole Nationale des P.C.* (19422), CHENAIS : *Cours à l'Ecole des Ingénieurs Hydrauliciens* (1945).

(13) Régulation indirecte dans la terminologie reçue à l'époque

(14) Cf. ci-dessus, note (0), page 16.

a) Le critère accéléro-tachymétrique conduit toujours à un régime auto-oscillant dont l'amplitude, illimitée si le dosage d'accélérométrie m est inférieur à une valeur donnée, diminue lorsque m augmente, mais reste supérieur à une limite non négligeable même si l'on fait croître m indéfiniment.

Si nous appelons :

y_0 le rapport de la puissance moyenne développée par le groupe dans ce régime, à la valeur de sa puissance nominale;

b un nombre tel qu'à ouverture constante du vannage le débit absorbé par la turbine varie comme la puissance b de la pression;

θ le temps caractéristique de l'inertie de l'eau dans la conduite;

T le temps caractéristique de l'inertie du rotor;

δ le temps nécessaire à la fermeture du vannage à la vitesse maxima;

Y un nombre définissant l'amplitude des oscillations et tel que le vannage se déplace entre les ouvertures : $y_0(1 - Y)$ et : $y_0(1 + Y)$;

m le dosage d'accélérométrie;

nous trouvons pour le régime auto-entretenu :

$$m = \frac{Y y_0 \theta (1 + b)}{Y - (1 + b) \frac{\theta}{\delta}}$$

Quel que soit m , Y reste supérieur à $(1 + b) \frac{\theta}{\delta}$, soit 3/8, si l'on admet que la surpression maxima θ est de 25 % et que $b = 0,5$; en outre, Y croît au-delà de toute limite si m s'abaisse jusque : $y_0 \theta (1 + b)$.

Bien entendu, ces résultats ne valent que dans l'hypothèse des grands mouvements. Aussi, en pratique :

1. Si l'amplitude Y ainsi calculée est du domaine des petits mouvements, et que la stabilité de ceux-ci est assurée, celle des grands l'est du même coup.

(15) Si l'on tient compte du caractère progressif de la variation de pression, les valeurs de m et de δ données dans le texte doivent être remplacées par les suivantes :

$$m = \frac{\left(1 - \frac{\theta h \beta}{\beta}\right) y_0 \theta (1 + b)}{1 - \frac{(1 + b) \theta h \beta}{b \beta}}$$

$$\text{et : } \delta = y_0 \frac{\theta}{T} (1 + b) \left(1 - \frac{\theta h \beta}{\beta}\right) \text{ avec : } \beta = \frac{\delta Y}{\theta b}$$

La discussion de ces formules conduit pratiquement aux résultats obtenus par la méthode approchée

FIG. 7. — Dispositifs Dejou I et Dejou II.

a) En utilisant la dérivée seconde de la vitesse.

Le dispositif se déduit du système accéléro-tachymétrique de la figure 4 en faisant agir en F une moyenne pondérée de trois éléments au lieu de deux : le troisième est la dérivée seconde de la vitesse.

On pourrait ainsi diviser la lenteur de réglage par 5,6 en basses chutes.

b) En utilisant le régulateur à dash-pot avec tachymètre et accéléromètre.

Le dispositif se déduit de celui de la figure 3 en y remplaçant le tachymètre par un ensemble accéléromètre-tachymètre.

Bien qu'il ne permette de diviser la lenteur de réglage que par 4,2, ce mécanisme paraît préférable au précédent, notamment parce qu'il n'emploie « que des éléments depuis longtemps connus ».

2. Le fait que le changement de signe du critère n'amène pas un changement brusque mais progressif de la vitesse et du sens de marche du servo-moteur introduit un effet stabilisateur qui tempère les résultats énoncés.

b) Au contraire, l'emploi d'un statisme δ permet toujours d'assurer la stabilité. Il suffit que :

$$\delta \geq y_0 (1 + b) \frac{\theta}{T}$$

13. Perfectionnements acquis récemment.

Dans une thèse soutenue en 1947 et publiée par la *Houille Blanche* ⁽¹⁶⁾, nous avons montré qu'on peut améliorer considérablement la régulation des turbines hydrauliques en combinant à l'action d'un accéléro-tachymètre sur un servo-moteur non asservi celle d'un manomètre différentiel. Deux dispositifs équivalents ont été trouvés depuis ⁽¹⁷⁾ et publiés dans la *Revue générale de l'Electricité* sous la signature de M. DEJOU ⁽¹⁸⁾.

(16) Accélération du réglage de vitesse des turbines hydrauliques (n° 1 et 2, 1948).

(17) Voir l'article de M. ALMERAS : « Procédés d'amélioration des qualités de réglage des groupes hydro-électriques », *La Houille Blanche*, 1949, n° 1.

(18) Considérations sur les régulateurs de groupes générateurs hydro-électriques de basse chute. *Revue Générale de l'Electricité*, t. LVII, 8 (août 1948).

Le premier, que pour simplifier le langage nous appellerons « DEJOU I », se déduit du réglage accéléro-tachymétrique par addition d'un détecteur de la dérivée seconde de la vitesse au lieu du manomètre différentiel que nous avons proposé (fig. 7 a).

Le second, « DEJOU II », qui apparaît supérieur aux précédents, parce que plus facile à réaliser immédiatement, souffre d'une certaine infériorité d'ordre théorique. Le dash-pot, fonctionnant en intégrateur, opère sur une combinaison de la vitesse et de l'accélération; le résultat n'est donc pas l'écart de vitesse intégré seul, mais un complexe où entre avec lui la vitesse. Il se trouve que de ce fait certaines combinaisons des trois dosages sont matériellement irréalisables, combinaisons au nombre desquelles se rangent précisément celles qui permettent de réduire au minimum la lenteur de réglage. En somme, tout réglage possible par le dispositif « DEJOU II » a son équivalent exact dans les deux autres systèmes, mais la réciproque n'est pas vraie.

14. Nouveaux perfectionnements.

La première partie du présent exposé a suggéré deux lignes de recherche : les systèmes à lenteur de réglage et ceux à statisme virtuel. Nous les examinerons successivement.

a) SYSTÈMES A LENTEUR DE RÉGLAGE. — Nous avons vu qu'il convient d'employer un servo-moteur asservi afin d'éviter de mesurer une grandeur dérivée pour la soumettre à une opé-

FIG. 8. — RÉGLAGE PAR ACCÉLÉROMÈTRE, TACHYMÈTRE ET INTÉGRATEUR.

Description : Ce dispositif ne diffère de celui de la figure 5 que par l'addition d'un accéléromètre. La lenteur de réglage peut, du fait de cette addition, être divisée par 5,6.

ration d'intégration effectuée dans de mauvaises conditions. Aussi avons-nous écarté l'accéléro-tachymètre commandant un servo-moteur non asservi, lui préférant la combinaison tachymètre-intégrateur associée à un servo-moteur asservi.

Transformant d'après ces principes les deux ⁽¹⁹⁾ dispositifs « DEJOU », nous faisons agir sur un servo-moteur asservi l'ensemble formé par un accéléromètre, un tachymètre et un intégrateur (fig. 8).

La transformation du système utilisant un manomètre différentiel conduit à mettre en œuvre, outre le manomètre, un tachymètre et un intégrateur. Plusieurs dispositions sont possibles;

(19) Pour le dispositif I, la transposition est évidente : les trois grandeurs mesurées par M. DEJOU sont remplacées par leurs intégrales. Quant au dispositif II, son infériorité provient de ce que le dashpot intègre la combinaison vitesse-accelération : nous devons donc le remplacer par un intégrateur disposé de manière à n'opérer que sur la vitesse.

celle que représente la figure 9 nous paraît préférable ⁽²⁰⁾.

FIG. 9. — RÉGLAGE PAR MANOMÈTRE, TACHYMÈTRE ET INTÉGRATEUR.

Description : Ce dispositif ne diffère de celui de la figure 5 que par l'allongement de la tige MN et l'addition des deux manomètres M_1 et M_2 dont l'action combinée déplace N. L'un, M_1 , mesure la pression moyenne de l'eau et l'autre mesure sa pression instantanée.

Principe : Le point D est choisi au milieu de CE afin que la distance FN mesure constamment la pression moyenne augmentée de la moitié de la surpression; de ce fait, FN varie au cours des perturbations comme la racine carrée de la pression. D'ailleurs, en adoptant pour DE/CE un rapport quelconque b' , on assurerait au besoin une variation de FN proportionnelle à la puissance b' de la pression instantanée. Au total, tandis que les déplacements de P mesurent l'ouverture du vannage, ceux de M mesurent le débit d'eau, si $b' = b$, ou une combinaison linéaire du débit et de l'ouverture, si $b' \neq b$.

b) SYSTÈME A STATISME VIRTUEL ET SES DÉRIVÉS. — L'application pure et simple aux turbines hydrauliques du dispositif représenté par la figure 6 conduit facilement à un statisme élevé qu'il est permis de trouver excessif malgré son caractère de statisme virtuel. La figure 10 indique comment tourner la difficulté : on combine le « wattmètre » avec un ensemble tachymètre-

(20) On remarque que la pression intervient dans le réglage par sa valeur propre et non par son intégrale comme on aurait pu l'attendre après ce qui a été dit dans la première partie. C'est que dans le dispositif manométrique initial (à servo-moteur non asservi) on peut aussi efficacement mettre en œuvre la dérivée de la pression que la pression elle-même. Bien plus, l'utilisation de la dérivée élimine la difficulté signalée par M. ALMERAS dans son dernier article cité : *La Houille Blanche*, 1949, p. 41. C'est donc la transformation de ce dispositif à dérivée de pression qu'il convient de retenir; elle fait l'objet de la figure 9.

FIG. 10. — ANNULLATION DE LA LENTEUR DE RÉGLAGE.

Cette disposition est une combinaison de celles que représentent les figures 5 et 6.

On remarquera que :

a) Si l'on supprime l'intégrateur DH_1C_1E en fixant le point E, le dispositif reproduit le réglage à statisme virtuel de la figure 6.

b) Si au contraire on supprime le wattmètre W en fixant B, on retrouve le dispositif de la figure 5, avec cette différence toutefois que les points T et D confondus sur la figure 5 sont ici séparés : cette séparation introduit un statisme.

c) L'action du wattmètre superposée à celle de l'intégrateur rend :

1° virtuel le statisme qui autrement serait permanent et qui, virtuel ou permanent, est utilisé pour les couplages.

2° nulle la lenteur de réglage, conformément à ce qui a été dit à propos de la figure 6.

intégrateur, réalisant ainsi une commande que l'on pourrait dire « à lenteur de réglage virtuelle ». L'emploi de l'intégrateur permet en effet d'annuler tout statisme, soit réel, soit virtuel. Il faut toutefois prendre garde que les couplages exigent un certain statisme : c'est pour en tenir compte que le schéma de la figure 10 correspond à un réglage à statisme virtuel réduit mais non nul (on y a séparé les points T et D).

15. Bases de comparaison des divers perfectionnements.

a) ECARTS SYSTÉMATIQUES. — Nous avons vu qu'il est intéressant de réaliser une lenteur de réglage aussi faible que possible. Or, dans la « marche séparée », l'existence du coup de bélier rend la régulation instable dès que la lenteur de réglage tombe au-dessous d'une valeur-limite dépendant du type de régulateur adopté. De ce chef,

le type le meilleur sera celui qui offrira la limite la plus basse.

On ne peut d'ailleurs, en pratique, se tenir exactement sur cette limite : elle correspond à un régime oscillatoire entretenu que l'on ne saurait admettre. Le but poursuivi n'est en effet pas simplement de maintenir une *moyenne* de la vitesse; on vise en outre à limiter le plus possible les *écarts* autour de cette vitesse moyenne, et pour y parvenir, on n'hésite pas à faire choix d'une lenteur de réglage un peu supérieure au strict minimum nécessaire à la stabilité. Reste que la comparaison des minima qui s'imposent constitue une première approximation de celle des valeurs effectives à choisir en dépendance d'eux; elle est plus ou moins bonne suivant que l'on s'intéresse plus ou moins au maintien d'une *moyenne* et moins ou plus à la limitation des *écarts accidentels*.

b) ECARTS ACCIDENTELS. — Pour qui porte son attention avant tout ⁽²¹⁾ sur les écarts accidentels, le minimum auquel est astreinte la lenteur de réglage ne constitue qu'un médiocre critère de qualité du régulateur. Elle correspond en effet à une moyenne, donc renseigne sur des écarts « systématiques » tandis que pour caractériser des écarts accidentels il convient de recourir à une moyenne des carrés : nous utiliserons une méthode de ce genre au § 17.

c) CONSIDÉRATIONS DIVERSES. — Diverses considérations d'ordre plus matériel méritent aussi notre intérêt :

1° Il est souhaitable que les appareils servant à la régulation normale (petits mouvements) suffisent encore aux réglages accidentels (grands mouvements), au moins avec l'aide d'accessoires aussi réduits que possible.

2° Il est également désirable que le passage de la « marche séparée » au fonctionnement « en couplage » ne demande qu'un minimum d'appareils supplémentaires et peu de manœuvres.

3° Enfin, si un paramètre de la régulation s'avère particulièrement important, il est préférable qu'on puisse au montage, et même si possible en service, l'ajuster à la valeur convenable sans risquer de le modifier ensuite par l'ajustement des autres.

Examinons rapidement de chacun de ces points de vue les principaux systèmes proposés.

(21) En réalité, comme bien l'on pense, les deux points de vue doivent être retenus. Mais on est amené, suivant les cas, à attribuer plus de poids à l'un ou à l'autre : c'est pourquoi nous devons les étudier séparément.

16. Réduction de la lenteur de réglage.

Les auteurs assignent d'ordinaire ⁽²²⁾ comme but aux études sur la régulation des turbines hydrauliques l'obtention d'une lenteur de réglage $\mathfrak{S}'$ réduite au minimum compatible avec une stabilité convenable : c'est que cette obtention conditionne la réduction des écarts systématiques de vitesse.

En ce qui concerne les régulateurs classiques, le minimum de $\mathfrak{S}'$ a été calculé maintes fois. Nous nous bornerons donc à rappeler un résultat. Si l'on désigne par ⁽²³⁾ :

T, le temps de lancer du groupe (caractéristique de l'inertie du rotor),

0, le temps caractérisant de manière analogue l'inertie de la conduite,

b, un nombre, de l'ordre de 0,5, et tel qu'à ouverture constante du vannage le débit de la conduite varie comme la puissance b de la pression,

il vient :

$$\mathfrak{S}' \geq \frac{\theta^2}{T} (1 + 2b + 2\sqrt{b(1+b)})$$

soit, en admettant : $b = 0,5$:

$$\mathfrak{S}' \geq (2 + \sqrt{3}) \frac{\theta^2}{T}$$

Qui voudrait annuler la lenteur de réglage le pourrait facilement en adoptant l'une ou l'autre des deux lignes de perfectionnement étudiées dans la première partie. Il lui suffirait d'ajouter aux régulateurs astatiques classiques :

a) Soit un intégrateur. Cette modification est analogue à celle par laquelle on passe du réglage statique au réglage astatique; ici nous passerions du réglage astatique au réglage sans lenteur.

b) Soit un wattmètre. Cette modification est analogue à celle par laquelle on passe du statisme réel au statisme virtuel; ici on passerait de la lenteur de réglage réelle à la lenteur de réglage virtuelle. Un dispositif de ce genre est représenté par la figure 10.

Les perfectionnements qui font l'objet des figures 8 et 9 (et peut-être 7) ne visent pas d'abord à réduire la lenteur de réglage. Aussi ne doit-on pas être surpris de constater qu'ils ne l'annulent pas. Ils la réduisent pourtant dans une propor-

tion importante : tous la divisent approximativement par 5,6, sauf la disposition « DEJOU II » qui la divise seulement par un nombre de l'ordre de 4,2. On trouve en effet avec les notations déjà indiquées :

$$\mathfrak{S}' \geq \frac{4b\theta^2}{(1+b)^2 T}$$

pour le dispositif « DEJOU II », et simplement :

$$\mathfrak{S}' \geq \frac{\theta^2}{(1+b) T}$$

pour les autres ⁽²⁴⁾.

17. Réduction de l'écart quadratique.

La réduction de l'écart quadratique est le but principal des perfectionnements représentés par les figures 8 et 9. C'est pour obtenir, par des moyens assez simples, un avantage important de ce côté qu'on a renoncé aux possibilités que nous venons de signaler d'annuler la lenteur de réglage.

On montrerait assez facilement que des deux procédés qui annulent la lenteur de réglage :

a) Le premier, consistant à ajouter un nouvel intégrateur aux dispositifs classiques, loin de diminuer l'écart quadratique, l'augmente.

b) Le second, employant un wattmètre pour rendre virtuelle la lenteur de réglage, réduit relativement peu l'écart quadratique. Nous allons d'ailleurs préciser dans quelle proportion ce dispositif et ceux des figures 8 et 9 le diminuent.

Il est commode de caractériser l'écart quadratique par l'intégrale :

$$\mathfrak{S}_e = \int_0^\infty (\Delta\omega)^2 dt$$

calculée pour une variation brusque de puissance demandée égale à l'échelon unité. La variable $\Delta\omega$ est l'écart instantané de vitesse ⁽²⁵⁾.

a) Nous avons calculé, en admettant : $b = 0,5$, la valeur minima de $\mathfrak{S}_e$ permise par les régulateurs astatiques, tachymètre et dash-pot, ou accéléro-tachymètre. Elle est sensiblement :

$$\mathfrak{S}_{e0} = \frac{12 \theta^3}{T^2}$$

et se trouve réalisée dans les conditions suivantes :

(22) Mentionnons seulement l'ouvrage de M. D. GADEN : « Considérations... » (p. 29) et l'article de M. DEJOU déjà cités. On se rappellera en lisant M. GADEN que la « promptitude » de réglage est l'inverse de la « lenteur ».

(23) Pour la définition précise, et désormais classique, de ces temps, le lecteur moins bien informé pourra se reporter aux travaux cités plus haut. Ici, dans un but de simplification, nous n'envisageons que le mouvement en masse, donc les basses chutes.

(24) Y compris les dispositifs utilisant un manomètre. On pourra voir à ce sujet l'article de M. ALMERAS dans le n° 1 de *La Houille Blanche*, 1949.

(25) Pour plus de généralité et de simplicité, nous le mesurons en valeur relative :

$$\Delta\omega = \frac{\Omega - \Omega_0}{\Omega_0}$$

1° Tachymètre et dash-pot :

temps de relaxation du dash-pot : $\mathfrak{S}'' = 5,75 \theta$;

statisme provisoire : $\mathfrak{S}' = 1,36 \frac{\theta}{T}$.

2° Accéléro-tachymètre :

dosage d'accélérométrie : $m = 5,75 \theta$;

lenteur de réglage : $\mathfrak{S}' = 7,81 \frac{\theta^2}{T}$.

b) Pour le dispositif à lenteur de réglage virtuelle, toujours avec $b = 0,5$, nous avons trouvé la limite :

$$\mathfrak{S}_{ev} = 4,48 \frac{\theta^3}{T^2}, \text{ soit : } \frac{1}{2,68} \mathfrak{S}_{eo},$$

ce qui représente une réduction, appréciable certes, mais moindre que celle que nous trouverons pour les dispositifs des figures 7 à 9. L'écart quadratique moyen est divisé par : $\sqrt{2,68} = 1,6 \sim$. Encore faut-il préciser que cette limite ne saurait être atteinte tout à fait. Elle correspond au passage à l'infini du dosage d'accélérométrie et de la lenteur de réglage virtuelle, ce qui se traduit physiquement par la dégénérescence de la « lenteur de réglage virtuelle » en simple « statisme virtuel » $\mathfrak{S} = 2,39 \frac{\theta}{T}$ et la réintroduction d'une véritable lenteur de réglage : $\mathfrak{S}' = 3,58 \frac{\theta^2}{T}$ du même ordre que celle des réglages astatiques classiques : $\mathfrak{S}' = (2 + \sqrt{3}) \frac{\theta^2}{T}$.

c) Avec les dispositifs perfectionnés que représentent les figures 7 à 9, la valeur limite de $\mathfrak{S}_e$ s'établit à :

$$\mathfrak{S}_{ea} = \frac{2\theta^3}{T^2}, \text{ soit : } \frac{1}{6} \mathfrak{S}_{eo}, \text{ ou : } \frac{1}{2,24} \mathfrak{S}_{ev},$$

représentant une réduction nettement plus importante qu'avec le dispositif à lenteur de réglage virtuelle. Ici encore, il s'agit d'une limite : nous précisons au paragraphe 18 le genre et les caractères de cette limite, mais nous indiquons dès maintenant les valeurs qu'y prennent les différents paramètres pour chacun des montages des figures 7 à 9. Nous écrirons d'abord les lois de réponse correspondantes : on saisira mieux ainsi les significations des divers paramètres et leurs correspondances. Ces lois sont :

1° Pour le système à intégrateur, tachymètre et accéléromètre, ainsi que pour la disposition « DEJOU I » :

$$\Delta p_o = - \frac{1}{\mathfrak{S}'} \left[\int_0^t \Delta \omega dt + m \Delta \omega + n \frac{d}{dt} \Delta \omega \right]$$

où Δp_o est, mesuré en valeur relative, « l'écart

de réglage en puissance », dans la terminologie de M. GADEN, et « l'écart d'ouverture » dans celle de M. ALMERAS.

$\mathfrak{S}'$ est la lenteur de réglage,

m est un temps que l'on appelle dosage d'accélérométrie jusqu'à présent.

n est le carré d'un temps caractéristique de l'influence du détecteur supplémentaire, accéléromètre si le servo-moteur est asservi (cas où il y a un autre intégrateur), détecteur de dérivée seconde dans l'hypothèse « DEJOU I ».

2° Pour le dispositif « DEJOU II », l'équation se déduit de la précédente en remplaçant :

$\mathfrak{S}'$ par : $\mathfrak{S}' \mathfrak{S}''$

m par : $m' + \mathfrak{S}''$

n par : $m' \mathfrak{S}''$

les nouveaux paramètres étant :

$\mathfrak{S}''$ temps de relaxation du dash-pot,

m' dosage d'accélérométrie de l'accéléro-tachymètre,

$\mathfrak{S}$ statisme provisoire.

3° Pour le système à intégrateur, tachymètre, manomètre :

$$\Delta p_o = - \frac{1}{\mathfrak{S}_1'} \left[\int_0^t \Delta \omega dt + m \Delta \omega \right] - b' \Delta h$$

où Δh est la valeur relative de l'écart de pression,

b' le coefficient caractérisant l'action du manomètre,

$\mathfrak{S}_1'$ est une promptitude apparente, la promptitude vraie ayant pour valeur :

$$\mathfrak{S}' = \mathfrak{S}_1' \left(1 - \frac{b'}{1+b} \right)$$

L'autre condition d'équivalence entre ce système et celui à intégrateur, tachymètre et accéléromètre, est :

$$\frac{T \mathfrak{S}'}{n} = \frac{1+b}{b'} - 1$$

Avec ces données, le minimum : $\mathfrak{S}_e = \frac{2\theta^3}{T^2}$ est obtenu lorsque les valeurs des paramètres sont :

1° Pour le système : intégrateur, tachymètre, accéléromètre :

$$\mathfrak{S}' = \frac{2\theta^2}{(1+b)T}, \quad m = 2\theta, \quad n = \frac{2b}{1+b} \theta^2$$

2° Pour le dispositif « DEJOU II » :

$$\mathfrak{E}'' = 0 \left(1 + \sqrt{\frac{1-b}{1+b}} \right),$$

$$m' = 0 \left(1 - \sqrt{\frac{1-b}{1+b}} \right),$$

$$z' = \frac{0}{T} \cdot \frac{1 - \sqrt{\frac{1-b}{1+b}}}{b}$$

3° Pour le dispositif à intégrateur, tachymètre, manomètre :

$$\mathfrak{E}_1' = \frac{2\theta^2}{T}, \quad m = 2\theta, \quad b' = b.$$

18. Remarque : importance du paramètre $b - b'$.

Les cas particulièrement favorables relevés dans les deux paragraphes précédents, 16 et 17, constituent des limites. Ils se trouvent tous deux sur une frontière du domaine de stabilité; celle-ci est définie par la relation ⁽²⁶⁾ : $b - b' \geq 0$, soit, équivalentement :

$$\frac{n}{\mathfrak{E}} \leq bT \quad \text{ou} : \quad \frac{m'}{z'} \leq bT.$$

Contrairement à ce qui arrive d'ordinaire dans les études de stabilité, il y a ici intérêt à se tenir aussi près que possible de la frontière, bien qu'on ne doive pourtant pas la franchir, ni même l'atteindre tout à fait ⁽²⁷⁾. Aussi est-il particulièrement important que l'ingénieur chargé du montage ou de l'exploitation puisse, par ajustement d'un paramètre, fixer la distance à laquelle il se tiendra de cette limite, sans risquer de la modifier ensuite par des interventions sur d'autres paramètres.

La possibilité souhaitée est offerte par le dispositif manométrique, car, b étant imposé, la dis-

tance à la frontière, que caractérise $b - b'$, ne dépend plus que de b' ⁽²⁸⁾.

Au contraire, dans les autres dispositifs, la distance dépend des deux paramètres, $\mathfrak{E}'$ et n ou m' et z' ⁽²⁹⁾.

19. Exemples de courbes de variations de vitesse.

Nous avons tracé sur la figure 11 trois courbes montrant comment varie la vitesse après une diminution de puissance demandée égale à l'échelon unité. Ces courbes correspondent à l'écart quadratique minimum dans les cas suivants :

- 1° Régulateurs classiques : $b - b' = 0,5$ (courbe a).
- 2° Limite des régulateurs perfectionnés : $b - b' = 0$ (courbe b).
- 3° Cas intermédiaire : $b - b' = 0,05$ (courbe c).

Les paramètres définissant les courbes a et b ont été précisés ci-dessus (§ 17). Pour la courbe c ($\mathfrak{E}_c = 3,68 \frac{\theta^2}{T^2}$), leurs valeurs sont les suivantes :

1° Pour le système intégrateur, tachymètre, accéléromètre :

$$\mathfrak{E}' = \frac{3,24 \theta^2}{(1+b)T}, \quad m = 2,70 \theta,$$

$$n = \frac{3,08 (b - 0,05)}{1+b} \theta^2.$$

(28) Pour être tout à fait exact, il faut ajouter que b n'est pas parfaitement connu; il dépend du type de la turbine et même de sa charge. Aussi serait-il encore préférable de se rendre maître directement de la différence $b - b'$. La chose est possible de la manière suivante. On a remarqué ci-dessus (note 26) que sur la frontière les régulateurs perfectionnés se comportent comme des régulateurs classiques mais agissant sur le débit d'eau au lieu d'agir sur l'ouverture du vannage. Cette observation peut se généraliser : on ramènerait les appareils perfectionnés aux appareils classiques en substituant à Δp_0 le binôme : $(1 - \epsilon) \Delta q + \epsilon \Delta p_0$. Le coefficient ϵ serait l'équivalent de b'/b , et caractériserait, aussi bien qu'on peut le souhaiter, la distance à la frontière, même lorsque b varierait. La difficulté est, en pratique, de faire entrer une mesure de débit dans la régulation; l'appareillage électronique doit permettre de la tourner.

(29) Cette difficulté n'est pas insurmontable. Il est en effet possible de s'astreindre à ne pas ajuster séparément les deux paramètres en cause et de soumettre à un réglage unique leur rapport qui seul intervient ici; on peut même prévoir un dispositif permettant un ajustement complémentaire qui n'affecte pas le rapport. Resterait pourtant la difficulté signalée dans la note précédente (28) : une certaine variation de b est possible.

(26) La signification de cette limite mérite qu'on s'y arrête. Les régulateurs perfectionnés sont alors équivalents à un régulateur qui différerait des types classiques seulement par la substitution à l'écart d'ouverture Δp_0 de l'écart de débit : $\Delta q = \Delta p_0 + b \Delta h$. Le régulateur agirait donc sur le débit au lieu d'agir sur l'ouverture. Les calculs se trouvent d'ailleurs simplifiés : l'équation résolvante, ordinairement du troisième degré, descend au second. Elle tombe même au premier dans le cas particulier réalisant le minimum de $\mathfrak{E}$.

(27) C'est que, à proximité de la frontière, certains éléments négligés dans la mise en équations cessent d'être négligeables. Une étude plus détaillée montrerait que de ce fait l'optimum que l'on recherche ne se trouve pas exactement à la frontière, mais un peu en-deçà.

Fig. 11. — Courbes de variation de vitesse.

2° Pour le dispositif « DEJOU II » :

$$m' = \left(1,35 - \sqrt{\frac{1,98 - 1,26b}{1+b}} \right) \theta,$$

$$\mathfrak{G}'' = \left(1,35 + \sqrt{\frac{1,98 - 1,26b}{1+b}} \right) \theta, \quad \mathfrak{Z}' = \frac{\mathfrak{G}'}{\mathfrak{G}''}$$

3° Pour le dispositif à intégrateur, tachymètre, manomètre :

$$\mathfrak{G}_1' = 3,08 \frac{\theta^2}{\tau}, \quad m = 2,70 \theta, \quad b' = b - 0,05.$$

20. Adaptation au cas des grands mouvements de réglage.

Nous avons vu au § 12 que pour les grands mouvements :

1° Il convient d'utiliser le servo-moteur à vitesse maxima;

2° La stabilité n'est complètement assurée que par un réglage faisant appel à un statisme suffisant;

3° Le critère accéléro-tachymétrique ne permet pas d'obtenir la stabilité, même avec un dosage élevé d'accélérométrie, si la vitesse de manœuvre est maintenue à son maximum jusqu'au changement de signe du critère. Un ralentissement est donc nécessaire.

Avant d'étudier comment tenir compte de ces exigences dans les dispositifs perfectionnés, nous examinerons les moyens par lesquels elles sont satisfaites dans les dispositifs classiques.

a) RÉGLAGE ACCÉLÉRO-TACHYMÉTRIQUE.

On pourrait, en principe, satisfaire aux deux conditions en adoptant la loi de manœuvre du vannage représentée par $A'A BB'$ sur la figure 12: la vitesse de manœuvre est proportionnelle au-

critère $\Delta\omega + m \frac{d\omega}{dt}$ tant que cela ne conduit pas à sortir des limites $\pm V_m$. La pente maxima admissible pour la droite AB est définie par l'étude des petits mouvements; elle dépend d'ailleurs du choix de m .

Fig. 12. — Lois de manœuvre du servo-moteur dans les grands mouvements de réglage.

Il est plus commode d'adopter une loi représentée par $A'A_1C_1D_1B_1B'$. Elle offre le double avantage d'assurer *largement* la stabilité des petits mouvements (C_1D_1 est moins inclinée que AB) et d'atteindre la vitesse V_m pour une moindre valeur absolue du critère (A_1 est situé entre A et l'axe, et peut être d'autant plus loin de A que C_1D_1 l'est de AB).

La nature de ce deuxième avantage doit être précisée. On le présente parfois comme susceptible de diminuer la vitesse d'emballement: il faudrait pour justifier ce point de vue montrer que, dans les cas intéressants, l'intégrale $\int V dt$ de la vitesse de vannage le long de la ligne brisée OC_1A_1A est supérieure en valeur absolue à l'intégrale prise le long de la droite OA. Rien ne prouve *a priori* qu'il y ait là un gain, mais la différence, quel que soit son sens, est certainement minimale devant le déplacement total du vannage. L'avantage est donc ailleurs. Il réside

à notre avis dans la réduction de l'intervalle de mesure du critère : il est en effet plus commode de déterminer avec précision la vitesse du groupe et son accélération ou une de leurs combinaisons lorsqu'on se borne à un intervalle réduit que lorsqu'on cherche à embrasser toute l'étendue des variations possibles.

b) RÉGLAGE TACHYMÉTRIQUE A DASH-POT. — Ce mode de réglage, on le sait, équivaut au précédent dans le domaine des petits mouvements. Si l'on avait voulu réaliser l'équivalence dans le domaine des manœuvres exceptionnelles, on aurait dû :

1) Ne pas modifier le temps de relaxation du dash-pot pour passer aux manœuvres rapides, puisque dans l'autre système on ne modifie pas son équivalent, le dosage d'accélérométrie.

2) Réduire le statisme provisoire, comme on réduit la lenteur de réglage, dès que l'on passe aux grandes vitesses de manœuvre, donc dès que le tiroir du servo-moteur franchit une position fixée à l'avance.

En réalité, on opère tout autrement : on laisse le statisme inchangé et on diminue le temps de relaxation. Expliquons le processus. Son élément caractéristique est le maintien du statisme. Il suffit à lui seul, nous l'avons vu ⁽³⁰⁾, à assurer la stabilité dans le cas où l'influence du dash-pot est négligeable, donc pratiquement, tant qu'on ne diminue pas son temps de relaxation. Reste à expliquer pourquoi la plupart des constructeurs provoquent une diminution de ce temps et comment il se fait qu'une instabilité n'en résulte pas toujours.

On répond d'ordinaire que cette « compensation accélérée » ramène plus rapidement le groupe au régime normal. C'est vrai, en fait, mais il faut remarquer :

1° Le maximum de survitesse du groupe reste indépendant de la compensation si le tachymètre mesure effectivement la vitesse, c'est-à-dire si celle-ci ne sort pas de son domaine de mesure.

2° Si le domaine de mesure du tachymètre est insuffisant (ce qui est le cas général), la manœuvre du vannage s'arrête trop tôt : la compensation a pour effet de retarder cet arrêt. Aussi court-on le double risque de l'emballement illimité, si la compensation est trop lente, et de l'instabilité, si elle est trop rapide.

(30) Le statisme nécessaire est $\delta \geq (1+b) y_0 \frac{\theta}{T}$ (ci-dessus, § 12), soit : $\frac{3y_0\theta}{2T}$ pour : $b = 0,5$. Le statisme provisoire δ' que l'on doit adopter pour réaliser dans les petits mouvements la lenteur de réglage minima est alors :

$\delta' = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{\theta}{T}$ soit 5 % de plus que le minimum exigé de δ .

c) LE RÉGLAGE DES GRANDS MOUVEMENTS DOIT ÉVITER :

1° Le risque d'auto-oscillation, même à amplitude limitée, tel qu'on peut le craindre avec le dispositif accéléro-tachymétrique si le détecteur n'a pas un domaine utile de mesure assez étendu ;

2° Le double risque d'une compensation trop lente ou trop rapide des dispositifs à dash-pot, dans le cas correspondant au précédent, c'est-à-dire lorsque le domaine de mesure du tachymètre est trop réduit.

d) NOTRE PROCÉDÉ. — Il nous semble que pour tenir compte à la fois de toutes les exigences, soit dans les systèmes classiques, soit dans les systèmes perfectionnés à lenteur de réglage (le cas du statisme virtuel ne pose pas le problème), il convient d'employer :

1. Un servo-moteur asservi (nous excluons par là le dispositif « DEJOU I » et le réglage accéléro-tachymétrique : on en a vu la raison dans l'étude des petits mouvements).

2. Un ensemble tachymètre intégrateur ou tachymètre dash-pot dont on ne réduira pas la lenteur de réglage pour les grands mouvements.

3. Dans cet ensemble, le tachymètre doit avoir un domaine de mesure assez étendu pour que la compensation normale suffise toujours. Il est d'ailleurs facile de mettre en œuvre deux tachymètres : l'un, de précision, à domaine de mesure étroit, l'autre, à domaine étendu et n'intervenant que lorsque le premier atteint ses limites, ce qui permet de n'exiger de lui qu'une précision moindre.

On notera que dans les systèmes perfectionnés le statisme nécessaire se réduit à la limite à :

$$\delta = y_0 \frac{\theta}{T}$$

$$\left[\text{au lieu de } (1+b) y_0 \frac{\theta}{T} \right]$$

e) REMARQUE. — Dans les systèmes à lenteur de réglage virtuelle ou à statisme virtuel, la présence de la commande wattmétrique dispense d'autre dispositif pour satisfaire à la condition examinée ici, pourvu que l'alimentation du wattmètre reste toujours en conformité avec les conditions de fonctionnement du groupe : en particulier, il est indispensable que le déclenchement du disjoncteur couplant le groupe au réseau coupe l'alimentation correspondante du régulateur.

21. Adaptation au couplage.

Pour que l'adaptation au couplage ne nécessite pas d'appareil supplémentaire, il faut que le réglage des groupes isolés soit de même type que celui de l'ensemble couplé. Les intercon-

nexions étant réglées suivant le système « fréquence-puissance », le couplage sans appareillage spécial n'est possible qu'avec les dispositifs à statisme virtuel, combinés éventuellement à une lenteur de réglage virtuelle. Les conditions de réalisation d'un tel couplage ont été examinées ci-dessus (§ 10 b).

D'autres systèmes d'interconnexions sont possibles ⁽³¹⁾ et compatibles avec les dispositifs à lenteur de réglage : les intégrateurs devraient alors, comme on l'a vu dans la première partie (§ 10 a), être d'un type particulier.

(31) Et même économiquement plus avantageux. Nous l'avons établi dans une note publiée récemment par la *Revue Générale de l'Electricité* sous le titre : « Réglage économique des interconnexions », t. LVIII, pp. 475-477 (nov. 1949).

22. Conclusions concernant le réglage des turbines hydrauliques.

Nous concluerons en résumant sous forme de tableau l'essentiel des avantages et inconvénients notés pour les principaux types de régulateurs perfectionnés. Le lecteur pourra ainsi, dans chaque cas particulier, peser les uns et les autres, et à l'occasion choisir en connaissance de cause l'appareil adapté à ses besoins. Certaines difficultés sont susceptibles de disparaître par la substitution de transmissions électriques aux transmissions mécaniques que nous avons supposées; d'autres seront justiciables de l'adoption de détecteurs électroniques; notre tableau voudrait par sa présentation synoptique aider à préciser sur quels points peuvent porter utilement des efforts de ce genre.

DISPOSITIF EXAMINÉ	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
A) Systèmes perfectionnés à lenteur de réglage. (Propriétés communes.)	Divisent par 5,6 environ la lenteur de réglage ($\mathfrak{S}'$). Divisent approximativement par 2,5 l'écart moyen quadratique ($\sqrt{\mathfrak{S}_c}$). Deux d'entre eux (A_1 et A_2) conviendraient, par un choix judicieux de l'intégrateur, au couplage économique (le réglage fréquence-puissance ne l'est pas) des groupes turbo-alternateurs.	Laissent subsister une lenteur de réglage. Adaptés à des groupes turbo-alternateurs exigent dans les conditions actuelles de couplage (réglage fréquence-puissance) le recours à des appareils de réglage supplémentaires qui les rapprochent des systèmes à statisme virtuel.
A ₁) Intégrateur-tachymètre et manomètre ou débit-mètre. (Pour les propriétés générales, voyez A ci-dessus.)	Offre directement un réglage distinct de l'important paramètre $b-b'$, ce qui assure commodément la maîtrise de la stabilité et même (avec un débit-mètre) dans le cas où b varie.	
A ₂) Intégrateur, tachymètre et accéléromètre. (Propriétés générales : voir A ci-dessus.)		Demande un mécanisme spécial pour assurer la maîtrise de la stabilité par réglage séparé du paramètre $b-b'$.
A ₃) « Dejou I ». (Accéléro-tachymètre et détecteur de dérivée seconde.)		Nous n'avons pas l'expérience des détecteurs de dérivée seconde. Exige comme le précédent un dispositif spécial pour l'ajustement séparé du paramètre : $b-b'$.
A ₄) « Dejou II ». (Accéléro-tachymètre et dash-pot.)	Mêmes avantages et mêmes inconvénients que le précédent, sauf : N'a pas recours à une mesure de dérivée seconde.	Ne permet de diviser le minimum de la lenteur de réglage que par 4,2 au lieu de 5,6 (inconvénient peu important en pratique).
B) Systèmes à statisme virtuel ou à lenteur de réglage virtuelle	Suppriment les écarts systématiques dus au statisme ou à la lenteur de réglage. Le dispositif à lenteur de réglage virtuelle réduit les écarts accidentels dans une proportion sérieuse mais nettement moindre que celle à laquelle conduisent les dispositifs du groupe A ci-dessus. Le statisme virtuel est particulièrement commode pour le couplage des turbo-alternateurs suivant le système « fréquence-puissance ».	Ne convient bien que si la puissance demandée au groupe est facilement mesurable, ce qui en limite actuellement l'usage aux groupes générateurs d'électricité : même dans ce cas, la réalisation effective est assez complexe. Ne permet pas le couplage économique des générateurs d'électricité tel que l'autorisent les dispositifs A_1 et A_2 ci-dessus. Peut, si le statisme virtuel n'est pas nul, réintroduire certains écarts systématiques, par exemple du fait d'une variation considérable de la chute.