

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 74 (1948)  
**Heft:** 6

**Artikel:** A propos de régulateurs automatiques de vitesse: asservissement temporaire et accéléromètre: leur influence sur la stabilité d'un réglage et sur sa rapidité d'action  
**Autor:** Gaden, Daniel / Desbaillets, Jacques  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-56013>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 24.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

**ABONNEMENTS :**Suisse : 1 an, 20 francs  
Etranger : 25 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 17 francs  
Etranger : 22 francsPour les abonnements  
s'adresser à la librairie**F. ROUGE & Cie**  
à LausannePrix du numéro :  
1 Fr. 25

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : Fribourg : MM. L. HERTLING, architecte; P. JOYE, professeur; Vaud : MM. F. CHENAUX, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; E. D'OKOLSKI, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; Genève : MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. MARTIN, architecte; E. ODIER, architecte; Neuchâtel : MM. J. BÉGUIN, architecte; G. FURTER, ingénieur; R. GUYE, ingénieur; Valais : MM. J. DUBUIS, ingénieur; D. BURGNER, architecte.

Rédaction : D. BONNARD, ingénieur. Case postale Chauderon 475, LAUSANNE

**TARIF DES ANNONCES**Le millimètre  
larg. 47 mm.) 20 cts.Réclames : 60 cts. le mm.  
(largeur 95 mm.)Rabais pour annonces  
répétées**ANNONCES SUISSES S.A.**5, Rue Centrale  
Tél. 2 33 26LAUSANNE  
et Succursales**CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE**

A. STUCKY, ingénieur, président; M. BRIDEL; G. EPITAUX, architecte; R. NEESER, ingénieur.

**SOMMAIRE :** *A propos de régulateurs automatiques de vitesse : Asservissement temporaire et accéléromètre*, par DANIEL GADEN, ingénieur, directeur des Ateliers des Charmilles S.A., avec la collaboration de JACQUES DESBAILLETS, ingénieur. — *Grande Dixence : Données techniques du projet EOS*, par LOUIS FAVRAT, ingénieur en chef, et ANDRÉ LIVIO, ingénieur en chef-adjoint. — Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne : *Diplômes*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : *Assemblée générale annuelle*. — *SERVICE DE PLACEMENT*.

## A propos de régulateurs automatiques de vitesse

### ASSERVISSEMENT TEMPORAIRE ET ACCÉLÉROMÈTRE

#### Leur influence sur la stabilité d'un réglage et sur sa rapidité d'action

par Daniel GADEN, ingénieur, directeur des Ateliers des Charmilles S.A.,  
avec la collaboration de Jacques DESBAILLETS, ingénieur.

**I. Introduction**

Le sujet, que je me propose de traiter ici, a déjà fait l'objet de controverses et, tout en formulant à nouveau mon avis sur la question, je voudrais me garder de faire œuvre de partisan. Chacun peut avoir ses préférences et s'efforcer de les faire prévaloir; toutefois, la discussion ne saurait apporter la lumière, que si elle est menée avec le souci de la rigueur et de la clarté. Il est, dans ce sens, essentiel de rester parfaitement objectif dans l'exposé des résultats de l'analyse ou de l'expérience, de ne point confondre telle notion avec telle autre et jusque dans les détails de la notation, d'en choisir une bien adéquate qui permette de traduire les phénomènes, sans en embrouiller l'expression mathématique. Je souhaite que mes lecteurs trouvent dans ces lignes le témoignage de ce souci.

J'ai écrit<sup>1</sup> qu'à promptitude égale<sup>2</sup>, le régulateur accéléro-tachymétrique réagissait plus rapidement qu'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire (par dash-pot), à une variation de charge imposée au groupe, dont il commande le vannage. En d'autres termes, pour une même promptitude de réglage, le régulateur accéléro-tachymétrique bénéficie d'une plus grande rapidité d'action ou de réponse, en présence d'une modification de la charge du

groupe, circonstance qui constitue un premier aspect du problème du réglage, puisque le rôle essentiel du régulateur est d'ajuster au plus vite la puissance produite à la charge, à tout instant variable, de la consommation. J'ai motivé cette opinion par des considérations physiques, ainsi que par des appels à l'expérience, et un de mes aimables critiques, P. Waldvogel, Dr ing., m'a fait observer, dans un article bibliographique<sup>1</sup> dont il m'a honoré, que cette assertion aurait mérité d'être étayée par le calcul. La remarque est exacte et fondée; je conviens qu'une démonstration plus rigoureuse, par l'analyse, aurait été d'un sérieux appui, en faveur de ma façon de voir. Un des buts de la présente étude est d'essayer de combler cette lacune et d'apporter, en même temps, une correction à la proposition que je viens de rappeler. Je me suis en effet rendu compte depuis, que pour traiter sur le même pied les deux systèmes de régulateur, ce n'était pas à promptitude égale, mais à effet stabilisateur égal, qu'il fallait comparer leurs rapidités respectives de réponse.

D'autres de mes correspondants ont reconnu cette supériorité du réglage accéléro-tachymétrique, mais sont restés d'avis que le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire était plus stable. C'est ici un second aspect du problème du réglage, celui de la stabilité: lorsque après une perturbation, provenant d'une modification de la charge

<sup>1</sup> Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse. Considérations sur le problème de la stabilité. La Concorde, 1945 (voir chapitre 3, paragraphe 24).

<sup>2</sup> Voir plus loin chapitre III.

<sup>1</sup> Bulletin de l'Association suisse des électriciens 1945, n° 25.

consommée, celle-ci demeure ensuite constante, le réglage doit tendre vers l'établissement des valeurs du degré d'ouverture et de la puissance produite correspondant au nouveau régime, en d'autres termes vers le rétablissement de la vitesse de consigne, ceci le plus rapidement possible, sinon selon une loi apériodique, du moins par des oscillations suffisamment amorties, jamais entretenues, ni à fortiori amplifiées. Or, à ce point de vue de la stabilisation d'un réglage, j'ai montré que le mieux qu'on puisse dire d'un asservissement temporaire, c'est qu'il a le même effet qu'un accéléromètre et que, par conséquent, s'il y a une condition de stabilité à respecter, notamment dans le cas des turbines hydrauliques, du fait de l'incidence du phénomène du coup de bélier, cette condition doit être de même forme pour les deux modes de réglage : accéloro-tachymétrique ou tachymétrique avec asservissement temporaire. J'ai effectué cette démonstration en considérant un asservissement temporaire agissant sur le manchon du tachymètre ; je voudrais ici la renouveler sur la base d'une autre disposition qui est aussi couramment employée et où l'asservissement temporaire agit schématiquement à l'autre extrémité du balancier de commande (voir fig. 2) du tiroir de distribution. Je souhaiterais pouvoir ainsi contribuer à effacer l'impression que l'accéléromètre pourrait être parfois un agent stabilisateur moins efficace qu'un asservissement temporaire. Ce n'est, à mon avis, jamais le cas si l'accéléromètre est bien conçu, convenablement construit et son effet doté d'un dosage suffisant.

J'ai par ailleurs proposé de mesurer la promptitude du réglage, puis son dosage accélorométrique ou la rigidité de son asservissement temporaire, par la valeur des temps  $\mathcal{G}'$ ,  $m$  ou  $\mathcal{E}''$  dont j'ai donné la définition, que je reproduirai plus loin. Sans prétendre instaurer en cette matière une terminologie et une notation définitives, je voudrais encore mettre en relief l'intérêt qu'il y a à choisir, pour déterminer ces caractéristiques du réglage, des grandeurs homogènes ayant une signification physique parfaitement claire. La discussion des équations du réglage et l'interprétation de leurs résultats deviennent, me semble-t-il, de cette façon, bien plus limpides que lorsqu'on fait arbitrairement appel à des paramètres plus ou moins abstraits.

Je montrerai comment on est ainsi amené à distinguer entre la promptitude et la rapidité d'action ou de réponse d'un régulateur. Ces deux notions, étroitement liées l'une à l'autre dans le cas du régulateur accéloro-tachymétrique, ne doivent pas être confondues dans le cas du régulateur tachymétrique à asservissement temporaire ; pour ce dernier, en effet, la rapidité de réponse est aussi fonction de l'importance du statisme momentané.

J'ajoute enfin qu'ayant en vue une comparaison des effets de l'asservissement temporaire et de l'accéléromètre, je ferai généralement abstraction, dans la suite de cet exposé, de tout asservissement permanent qui peut être ajouté soit à l'un, soit à l'autre de ces deux modes de réglage.

## II. Des petits mouvements de réglage et de leurs caractères essentiels

Les mouvements de réglage de grande amplitude, effectués avec la vitesse la plus élevée dont le régulateur est capable, comme ceux consécutifs à des changements brusques et importants de la charge, constituent en service normal des exceptions. Les mouvements de réglage, au cours desquels la valeur des écarts demeure faible et leur vitesse de variation relativement lente, sont au contraire la règle permanente du fonctionnement d'un régulateur en exploitation, ceci soit pour

répondre aux petites modifications de la charge consommée, soit une fois une telle modification terminée, pour établir le nouveau régime correspondant.

La considération des petits mouvements de réglage, déterminés par de faibles différences (par rapport aux valeurs de régime) de vitesse, d'accélération et de puissance (ou de couple), est donc de beaucoup la plus importante et c'est dans ce cadre que doivent être examinés la question de la rapidité de réponse et le problème de la stabilité d'un régulateur. Voici dès lors quels sont les deux caractères essentiels de ces petits mouvements de réglage, dont je mesurerai les elongations à partir d'un régime d'équilibre défini par la valeur  $P_0$  de la puissance que la machine produit, lorsque sa vitesse est égale à la valeur de consigne  $\Omega_0$ .

a) L'elongation des mouvements de réglage (ceux du piston du servomoteur du régulateur) ou écart de réglage en course d'une part et l'écart de réglage en puissance<sup>1</sup> d'autre part :

$$\Delta p_0 = \frac{P - P_0}{P_0} \quad (1)$$

sont deux grandeurs proportionnelles dont le rapport est égal à l'inverse de la pente, au point de régime considéré, de la courbe de la puissance  $P$  fournie par la machine tournant à sa vitesse normale  $\Omega_0$ , courbe tracée en valeur relative ( $P : P_0$ ).

Par définition, l'écart de réglage en puissance est également l'écart de réglage en couple moteur.

b) La vitesse des mouvements de réglage, ou ce qui revient au même : la vitesse  $\frac{d}{dt} \Delta p_0$  de variation de l'écart de réglage en puissance, est proportionnelle au déplacement du tiroir de distribution du servomoteur.

En effet, lorsque les écarts sont faibles, la course de ce tiroir n'atteint jamais sa valeur maximum correspondant à la vitesse la plus élevée dont le régulateur est capable ; la valeur de cette course détermine donc celle des lumières de passage offertes au flux d'huile, c'est-à-dire celle du débit d'alimentation ou d'échappement du servomoteur et finalement la vitesse de déplacement de son piston. Ce résultat est d'ailleurs confirmé par l'expérience.

C'est cette proportionnalité que doit traduire l'équation du mouvement du régulateur.

## III. De la promptitude de réglage

Puisqu'il s'agit d'un réglage de vitesse, le déplacement du tiroir de distribution dépend tout d'abord de la valeur relative de l'écart de vitesse :

$$\Delta \omega = \frac{\Omega - \Omega_0}{\Omega_0} \quad (2)$$

$\Omega$  désignant la valeur absolue instantanée de la vitesse de la machine. En vue de la stabilisation du réglage, ce déplacement est encore fonction des indications d'un accéléromètre ou des mouvements d'un mécanisme d'asservissement temporaire ; mais je laisserai, pour le moment, de côté l'action de ces organes stabilisateurs.

Je ne considérerai donc que les déplacements du tiroir de distribution commandés uniquement par le tachymètre, en admettant en outre que ses indications donnent sans retard<sup>2</sup> la mesure de l'écart de vitesse et entraînent des déplacements

<sup>1</sup> L'écart de réglage en puissance  $\Delta p_0$  peut différer de l'écart de puissance  $\Delta p$  proprement dit, du fait de l'influence, sur la puissance générée, de l'écart de vitesse et, dans le cas d'une turbine hydraulique, de celle de l'écart de pression (coup de bélier). Je ferai pour le moment abstraction de ces deux influences.

<sup>2</sup> Du moins sans retard appréciable par rapport à la période des oscillations de réglage auxquelles on peut s'attendre.

du tiroir proportionnels à la valeur  $\Delta\omega$  du dit écart, ce qui doit être régulièrement le cas d'un tachymètre de qualité.

Il résulte de cette hypothèse et des considérations relevées au chapitre précédent qu'il y a proportionnalité entre la vitesse de variation de l'écart de réglage en puissance et l'écart de vitesse, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\mathcal{T}'} \Delta\omega \quad (3)$$

le signe — traduisant le fait qu'un écart positif de vitesse provoque, par le jeu du réglage, une diminution de puissance et vice versa :

$$\begin{aligned} \Delta\omega > 0 & \quad \frac{d}{dt} \Delta p_o < 0 \\ \Delta\omega < 0 & \quad \frac{d}{dt} \Delta p_o > 0 \end{aligned}$$

L'équation (3) définit le temps  $\mathcal{T}'$  caractéristique de la promptitude du réglage<sup>1</sup> et l'on dira, par exemple :

a) que la valeur de ce temps  $\mathcal{T}'$  est de 0,1 sec :

lorsque, l'écart de vitesse étant de 0,1 %, la vitesse de variation de l'écart de réglage en puissance s'élève à 0,1 % en 0,1 sec, correspondant à un temps de 100 sec pour passer de la puissance 100 % de régime à zéro, ou inversement, ou :

lorsque, l'écart de vitesse étant de 0,2 %<sup>2</sup>, la vitesse de variation de l'écart de réglage en puissance s'élève à 0,2 % en 0,1 sec, correspondant à un temps de 50 sec pour passer de la puissance 100 % de régime à zéro, ou inversement, etc. ;

b) que la valeur de ce temps  $\mathcal{T}'$  est de 1 sec :

lorsque, l'écart de vitesse étant de 0,1 %, la vitesse de variation de l'écart de réglage en puissance s'élève à 0,1 % en 1 sec, correspondant à un temps de 1000 sec pour passer de la puissance 100 % de régime à zéro, ou inversement, ou :

lorsque, l'écart de vitesse étant de 0,2 %, la vitesse de variation de l'écart de réglage en puissance, s'élève à 0,2 % en 1 sec, correspondant à un temps de 500 sec pour passer de la puissance 100 % de régime à zéro, ou inversement, etc.

Le temps  $\mathcal{T}'$  caractéristique de la promptitude du réglage a donc une signification physique parfaitement claire. Sa valeur n'est pas directement liée à celle du temps de fermeture  $\mathcal{T}$ , mais plutôt aux dimensions du tiroir de distribution. En d'autres termes, pour une même vitesse maximum de réglage, en présence de gros écarts, on peut réaliser des promptitudes plus ou moins grandes, pour de petits écarts. Cette valeur du temps  $\mathcal{T}'$ , est d'autant plus faible que la promptitude est poussée et d'autant plus élevée que la promptitude est réduite. Certains de mes correspondants m'ont fait observer qu'il y avait là une apparence de contradiction ; mais ne dit-on pas couramment qu'un appareil quelconque est doté d'une grande rapidité de manœuvre quand le temps nécessaire à cette manœuvre est court ? Je ne crois donc pas devoir m'arrêter à cette objection.

#### IV. Du réglage accéléro-tachymétrique et de son dosage accélérométrique Diagramme vectoriel

Dans ce système de réglage, les mouvements du tiroir de distribution du servomoteur sont commandés à la fois par un tachymètre et un accéléromètre. J'admettrai, comme je l'ai fait pour le tachymètre, que les indications de l'accélé-

romètre donnent également *sans retard* la mesure de l'accélération et entraînent des déplacements du tiroir proportionnels à sa valeur  $\frac{d}{dt} \Delta\omega$ , ce qui doit être le cas d'un accéléromètre de qualité.

Il est alors besoin de schéma pour comprendre que l'équation du mouvement du régulateur s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\mathcal{T}'} \left( \Delta\omega + m \frac{d}{dt} \Delta\omega \right) \quad (4)$$

dans laquelle le facteur  $m$ , homogène à un temps, définit le dosage accélérométrique.

Il est clair, en effet, que ce facteur détermine la proportion entre les influences, sur les déplacements du tiroir, du tachymètre et de l'accéléromètre, en d'autres termes entre :

l'effet tachymétrique  $\frac{1}{\mathcal{T}'} \Delta\omega$  et

l'effet accélérométrique  $\frac{m}{\mathcal{T}'} \frac{d}{dt} \Delta\omega$

On dira, par exemple, que le dosage accélérométrique s'élève à  $m = 1$  sec :

lorsque l'effet d'un écart de vitesse  $\Delta\omega = \pm 1\%$  est égal à l'effet d'une accélération  $\frac{d}{dt} \Delta\omega = \pm 1\%$  par sec ou :

lorsque l'effet d'un écart de vitesse  $\Delta\omega = \pm 2\%$  est égal à l'effet d'une accélération  $\frac{d}{dt} \Delta\omega = \pm 2\%$  par sec etc.

ou à  $m = 2$  sec :

lorsque l'effet d'un écart de vitesse  $\Delta\omega = \pm 1\%$  est égal à l'effet d'une accélération  $\frac{d}{dt} \Delta\omega = \pm 1\%$  en 2 sec, c'est-à-dire de  $\pm 0,5\%$  par sec ou :

lorsque l'effet d'un écart de vitesse  $\Delta\omega = \pm 2\%$  est égal à l'effet d'une accélération  $\frac{d}{dt} \Delta\omega = \pm 2\%$  en 2 sec, c'est-à-dire de  $\pm 1\%$  par sec, etc.

En vue de mettre en relief, d'une façon particulièrement expressive, l'influence sur le réglage de la combinaison de l'effet tachymétrique et de l'effet accélérométrique, on peut, selon la méthode couramment employée dans l'électrotechnique des courants alternatifs, faire correspondre à l'équation (4) le diagramme vectoriel de la figure 1. Le tracé en est effectué en supposant que, par suite d'un mouvement de pompage du régulateur, de période déterminée  $T^*$ , l'écart de vitesse et, en conséquence, tous les autres écarts de réglage (accélération, couple, etc.) sont des fonctions sinusoïdales du temps (oscillations entretenues).

Le vecteur  $\vec{OA}$ , pris comme unité et comme origine de phase, représente l'écart de vitesse  $\Delta\omega$ . Le vecteur  $\vec{OB}$ , en opposition de phase avec  $\vec{OA}$ , représente l'effet tachymétrique, puis le vecteur  $\vec{OC}$ , en quadrature et en avance sur  $\vec{OB}$ , l'effet accélérométrique.

L'opération vectorielle :

$$\vec{OE} = \vec{OB} + \vec{OC}$$

traduisant l'équation (4), permet d'obtenir le vecteur  $\vec{OE}$  représentant le mouvement du tiroir de distribution, à l'échelle de la vitesse de variation  $\frac{d}{dt} \Delta p_o$  de l'écart de réglage en puissance. Or, comme je l'ai expliqué ailleurs<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Ce temps n'est pas à confondre avec le temps  $\mathcal{T}$  de manœuvre du régulateur, dont il n'est pas directement fonction.

<sup>2</sup> Un écart de vitesse de 0,2 % correspond dans le cas d'un alternateur fournissant du courant à 50 péri/sec à un écart de fréquence de  $\frac{1}{10}$  péri/sec.

<sup>3</sup> Voir *op. cit.*, chapitre VI, paragraphe 45.

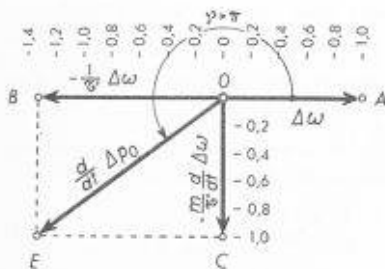


Fig. 1.  
Diagramme vectoriel  
du réglage  
accéléro-tachymétrique.

$$\zeta' = 0,75 \text{ sec.} \quad m = 1,5 \text{ sec.} \quad T'' = 12,56 \text{ sec.} \quad \beta_* = \frac{2\pi}{T''} = 0,5 \text{ s}^{-1}$$

$$\overline{OA} = 1 \quad \overline{OB} = \frac{1}{\zeta'} = 1,33 \quad \overline{OC} = \beta_* \frac{m}{\zeta'} = 1 \quad \varphi = 217^\circ$$

l'influence favorable, sur le comportement du réglage, d'un agent stabilisateur se manifeste par un *décalage*  $\varphi$  en avant, plus grand que  $\pi$ , du vecteur  $\overline{OE}$  sur le vecteur  $\overline{OA}$ . Un réglage tachymétrique pur, sans aucun asservissement, ni accéléromètre ( $\overline{OC} = 0$ ), est instable parce que le dit décalage est tout juste égal à  $\pi$ . Le jeu de l'accéléromètre (effet du vecteur  $\overline{OC} \neq 0$ ) apporte au réglage l'élément stabilisateur, en provoquant l'augmentation de ce décalage au delà de  $\pi$ .

Le diagramme de la figure 1 a été établi sur la base des données mentionnées dans la légende, notamment en tenant compte d'une oscillation de période  $T'' = 12,56 \text{ sec}$ , c'est-à-dire de pulsation  $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ . Ce n'est en effet qu'en face d'une oscillation de période bien déterminée que le pouvoir stabilisateur du réglage est également bien déterminé, je le répète, par la valeur du dépassement au delà de  $\pi$  de l'angle de décalage  $\widehat{AOE} = \varphi$ .

La période  $T''$  à considérer est dès lors celle de l'oscillation que provoque le jeu du régulateur et que celui-ci doit amortir; elle est fonction de l'inertie spécifique du groupe, caractérisée par le temps  $T^1$  (temps de lancer). S'il n'existe aucune influence sur la différence entre couple résistant et couple moteur, ni de l'écart de vitesse, ni d'un écart de pression (coup de bélier), et que l'amortissement n'est pas trop prononcé, les valeurs de la période et de la pulsation ne s'écartent guère de celles:

$$T'' = 2\pi \sqrt{\zeta' T^2} \quad \beta_* = \frac{1}{\sqrt{\zeta' T}}$$

ce qui, avec les données du diagramme de la figure 1, implique une inertie spécifique  $T = 5,33 \text{ sec}$ . Si les influences précitées ont lieu, la période  $T''$  diminue généralement en dessous de la valeur correspondant à la formule que je viens de rappeler et les données du diagramme de la figure 1 correspondraient dès lors à une inertie spécifique plus grande  $T > 5,33 \text{ sec}$ , ce qui entre également dans le cadre des possibilités de la pratique.

Quoi qu'il en soit, pour des fins de comparaisons entre le réglage accéléro-tachymétrique et le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, on est bien fondé à considérer une oscillation (à amortir) dont la période est de l'ordre de celle dont je viens de faire choix, évidemment la même dans les deux cas.

#### V. Du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, de sa rigidité et de son statisme momentané

La figure 2 donne un schéma de ce système de réglage. Les mouvements du tiroir de distribution ( $T$ ) sont fonction de

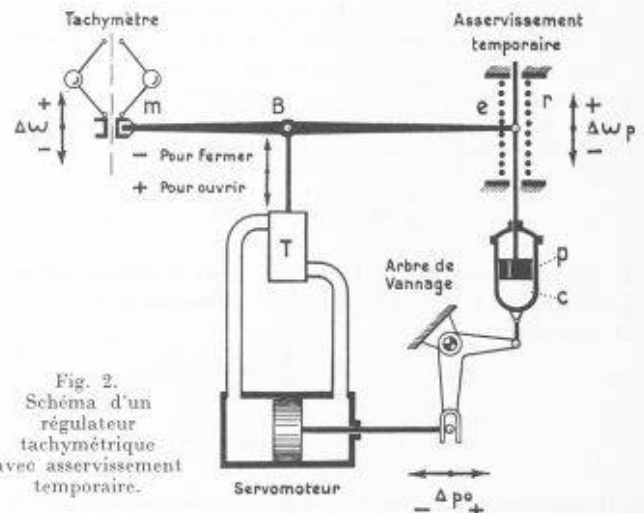


Fig. 2.  
Schéma d'un  
régulateur  
tachymétrique  
avec asservissement  
temporaire.

ceux du manchon ( $m$ ) du tachymètre, attelé à l'une des extrémités du balancier ( $B$ ), et de ceux du mécanisme d'asservissement temporaire, comportant les éléments essentiels suivants:

1° un dash-pot à huile, dont le cylindre ( $c$ ) est solidaire de la commande du vannage, actionnée par le servomoteur du régulateur, et dont le piston ( $p$ ) est relié, par sa tige, à l'autre extrémité ( $e$ ) du balancier ( $B$ );

2° une paire de ressorts ( $r$ ), montés en opposition et tendant à maintenir en place l'extrémité ( $e$ ) du balancier ( $B$ ).

Pour écrire l'équation du mouvement du régulateur d'une façon analogue à celle (4) du cas précédent, c'est-à-dire sous la forme:

$$\frac{d}{dt} \Delta p_0 = \frac{1}{\zeta'} (\Delta \omega + \Delta \omega_p) \quad (5)$$

il suffit de mesurer les déplacements  $\Delta \omega_p$  du piston du dash-pot (qui sont ceux de l'extrémité ( $e$ ) du balancier) en prenant pour unité celui qui provoque la même course du tiroir de distribution que le déplacement du manchon du tachymètre correspondant à un écart relatif de vitesse  $\Delta \omega = 1\%$ . En d'autres termes, les déplacements  $\Delta \omega_p$  du piston du dash-pot seront mesurés — en tenant compte, en outre, de leur signe algébrique — à l'échelle et avec le sens des écarts de vitesse  $\Delta \omega$ ; il en sera de même pour les déplacements  $\Delta \omega_c$  du cylindre.

Dans ces conditions, l'équation du mouvement du piston du dash-pot s'écrit:

$$\Delta \omega_p = \zeta'' \frac{d}{dt} (\Delta \omega_c - \Delta \omega_p) \quad (6)$$

Elle traduit le fait que, par suite de la présence de la paire de ressorts ( $r$ ), le déplacement  $\Delta \omega_p$  du piston est proportionnel à l'effort transmis par le dash-pot, donc à la différence de pression existant entre l'une et l'autre faces du piston et, en conséquence, au débit d'huile<sup>3</sup> passant par l'étranglement faisant communiquer l'une et l'autre de ces faces, c'est-à-dire finalement à la vitesse relative (ou différence des vitesses absolues) du cylindre par rapport au piston. Le facteur  $\zeta''$

<sup>1</sup> Voir *op. cit.*, chapitre II, paragraphe 16, et au chapitre XII de la présente étude.

<sup>2</sup> Voir *op. cit.*, chapitre III, paragraphes 18 et 21.

<sup>3</sup> Ceci en supposant que l'écoulement de l'huile, à travers l'étranglement, est laminaire (vitesse d'écoulement proportionnelle à la différence de pression).

est dès lors une constante, homogène à un temps, sur la signification de laquelle je reviendrai plus loin.

Quant à l'équation du mouvement du cylindre du dash-pot, elle s'écrit :

$$\Delta\omega_c = \delta' \Delta p_o \quad (7)$$

et exprime la proportionnalité existant entre le déplacement  $\Delta\omega_c$  du cylindre et l'écart de réglage en course du servomoteur, ou l'écart de réglage en puissance  $\Delta p_o$ . Le facteur  $\delta'$  est donc une constante sans dimensions et je vais montrer qu'elle caractérise le statisme momentané que procure le jeu de l'asservissement temporaire.

En vue de donner une interprétation physique aux deux constantes  $\overline{\omega}''$  et  $\delta'$ , dont je viens de faire emploi, je supposerai un instant que le jeu du mécanisme d'asservissement temporaire est tel qu'il assure le déplacement unité  $\Delta\omega_p = 1$  du piston du dash-pot, c'est-à-dire celui qui a sur la course du tiroir de distribution le même effet qu'un écart relatif de vitesse  $\Delta\omega = 1\%$ . En utilisant les équations (6) et (7), on peut dès lors écrire :

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_c = \frac{1}{\overline{\omega}''} \quad \text{et} \quad \frac{d}{dt} \Delta p_o = \frac{1}{\delta' \overline{\omega}''} \quad (8)$$

Il ressort de cette équation (8) que le produit du statisme momentané  $\delta'$  par le temps  $\overline{\omega}''$  — produit qui est encore homogène à un temps — détermine la vitesse  $\frac{d}{dt} \Delta p_o$  de variation de l'écart de réglage en puissance qui a, sur la course du tiroir de distribution, le même effet qu'un écart de vitesse  $\Delta\omega = 1\%$ . Pour la même valeur du statisme momentané  $\delta'$ , plus celle du temps  $\overline{\omega}''$  est grande, plus la vitesse ci-dessus définie est faible, et plus elle est petite, plus cette vitesse est élevée. En d'autres termes, plus le temps  $\overline{\omega}''$  est important, plus l'asservissement temporaire est rigide (le piston du dash-pot ne glisse que lentement dans son cylindre) et plus le temps  $\overline{\omega}''$  est réduit, plus l'asservissement temporaire est mou (le piston du dash-pot glisse plus vite dans son cylindre). Ce temps  $\overline{\omega}''$ , ainsi défini, caractérise donc la rigidité de l'asservissement temporaire.

Si l'asservissement est infiniment rigide  $\overline{\omega}'' = \infty$ , c'est que le piston du dash-pot et son cylindre font bloc :

$$\Delta\omega_p = \Delta\omega_c = \delta' \Delta p_o \quad (9)$$

et l'équation (5) s'écrit alors :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\overline{\omega}'} (\Delta\omega + \delta' \Delta p_o) \quad (5')$$

ce qui signifie que le servomoteur est en équilibre (plus de mouvement de vannage  $\frac{d}{dt} \Delta p_o = 0$ ) lorsque :

$$\Delta\omega = -\delta' \Delta p_o \quad (10)$$

Cette équation (10) établit la relation qui doit exister en régime d'équilibre entre un écart de réglage en puissance  $\Delta p_o$  et l'écart de vitesse  $\Delta\omega$  correspondant ; elle exprime donc la loi d'un asservissement permanent de statisme  $\delta'^1$ . Toutefois, comme ce statisme  $\delta'$  n'a lieu que si l'asservissement est infiniment rigide et qu'en réalité, du fait du jeu du dash-pot, il s'agit d'un asservissement glissant<sup>2</sup>, la valeur

<sup>1</sup> Si  $\Delta p_o = -1$ , c'est-à-dire pour un écart de réglage de 100 % de la pleine charge à zéro (marche à vide),  $\Delta\omega = \delta'$  ce qui est la définition du statisme.

<sup>2</sup> Le terme d'asservissement glissant, me paraîtrait plus juste que celui couramment employé d'asservissement temporaire, qui peut faire croire que son jeu s'apparente, momentanément au moins, à celui d'un asservissement permanent. En réalité et, ainsi que la suite de ce développement le montrera, le jeu de l'asservissement temporaire est tout à fait différent.

de  $\delta'$  caractérise, comme je l'ai annoncé, le statisme momentané.

## VI. D'une forme approchée de l'équation du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, en vue de la comparaison de ses caractéristiques avec celles du réglage accéléro-tachymétrique

Maintenant que toutes les grandeurs caractéristiques du réglage sont rigoureusement définies et leur interprétation physique clairement exprimée, je peux revenir aux équations initiales (5), (6) et (7) et les combiner pour éliminer les variables  $\Delta\omega_p$  et  $\Delta\omega_c$ . On obtient ainsi l'équation du mouvement du régulateur avec asservissement temporaire :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o + \frac{\overline{\omega}'}{\overline{\omega}''} \frac{d^2}{dt^2} \Delta p_o = -\frac{1}{\overline{\omega}'} \left( \Delta\omega + \overline{\omega}'' \frac{d}{dt} \Delta\omega \right) \quad (11)$$

en posant :

$$\overline{\omega}'_c = \overline{\omega}' + \delta' \overline{\omega}'' \quad (12)$$

équation à comparer avec celle du régulateur accéléro-tachymétrique :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\overline{\omega}'_c} \left( \Delta\omega + m \frac{d}{dt} \Delta\omega \right) \quad (4)$$

Quitte à revenir plus tard sur les moyens de satisfaire plus ou moins à cette condition, je supposerai pour l'instant que la valeur du temps  $\overline{\omega}'$  est très petite par rapport à celle du temps  $\overline{\omega}'_c$  :

$$\overline{\omega}' \gg \overline{\omega}'_c \quad \text{ou} \quad \delta' \overline{\omega}'' \gg \overline{\omega}' \quad (13)$$

au point, qu'en égard à la valeur de  $\frac{d^2}{dt^2} \Delta p_o$  par rapport à celle de  $\frac{d}{dt} \Delta p_o$ <sup>1</sup>, on puisse négliger le deuxième terme du premier membre de l'équation (11) et écrire :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\overline{\omega}'_c} \left( \Delta\omega + \overline{\omega}'' \frac{d}{dt} \Delta\omega \right) \quad (11 \text{ bis})$$

Si l'on met dès lors en regard les deux équations du mouvement du régulateur :

l'équation (4), pour le réglage accéléro-tachymétrique, et

l'équation (11 bis) (approximative), pour le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire,

on constate :

1° que l'asservissement temporaire développe un effet accélérométrique, dont le dosage (temps  $m$  de l'équation (4)) est égal au temps  $\overline{\omega}''$  caractéristique de la rigidité du dash-pot,

2° que la promptitude que les dimensions du tiroir de distribution permettraient d'assurer, laquelle est caractérisée par le temps  $\overline{\omega}'$ , n'est plus la promptitude effective du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire. Cette promptitude effective est caractérisée par le temps :

$$\overline{\omega}'_c = \overline{\omega}' + \delta' \overline{\omega}'' \quad (12)$$

dont la valeur est égale à la somme :

du temps  $\overline{\omega}'$ , caractéristique de la promptitude que les dimensions du tiroir de distribution assureraient, si l'influence de l'asservissement temporaire était nulle ( $\delta' \overline{\omega}'' = 0$ ),

<sup>1</sup> Considéré du point de vue d'un phénomène périodique, pour que la valeur de la dérivée  $\frac{d^2}{dt^2} \Delta p_o$  reste faible par rapport à celle de la fonction  $\frac{d}{dt} \Delta p_o$ , il faut que la période des oscillations soit relativement grande.

du produit  $\delta' \overline{\omega}''$  des deux caractéristiques de l'asservissement temporaire, à savoir : son statisme momentané  $\delta'$  et sa rigidité  $\overline{\omega}''$ .

Comme dans l'hypothèse (13) dans laquelle je me suis placé, le deuxième terme de cette somme est prépondérant, on peut dire que la promptitude effective du réglage ne dépend que des caractéristiques du dash-pot :

$$\overline{\omega}'_e \cong \delta' \overline{\omega}'' \quad (12 \text{ bis})$$

J'insiste encore sur le fait que tandis que pour un régulateur accéléro-tachymétrique la promptitude caractérisée par le temps  $\overline{\omega}'$  et déterminée par les dimensions du tiroir de distribution, est bien la promptitude effective du réglage, il en est tout autrement dans le cas d'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire. Ce serait donc une erreur de comparer les promptitudes respectives des deux systèmes sur la base des valeurs du temps  $\overline{\omega}'$ , alors que dans le cas du régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, la promptitude effective dépend essentiellement des caractéristiques du dash-pot.

Sous les réserves ci-dessus exprimées, le processus du réglage tachymétrique, avec asservissement temporaire, serait donc exactement le même que celui du réglage accéléro-tachymétrique. N'oublions cependant pas qu'avec l'asservissement temporaire, on ne peut pas, pour telle valeur donnée du dosage accélérométrique (caractérisée par  $\overline{\omega}''$ , la rigidité du dash-pot), réaliser (en vue de satisfaire à une condition de stabilité) telle valeur également donnée de la promptitude effective :  $\overline{\omega}'_e = \overline{\omega}' + \delta' \overline{\omega}''$ , en satisfaisant, sans limite, à la condition (13) :  $\delta' \overline{\omega}'' \gg \overline{\omega}'$ . En effet :

d'une part, il est impossible de rendre la valeur de  $\overline{\omega}'$  rigoureusement nulle, ce qui nécessiterait un tiroir de distribution *infiniment grand* ;

d'autre part, pour des raisons constructives, le statisme de l'asservissement temporaire ne peut pas être poussé au delà d'une certaine importance et l'on est alors bien obligé de recourir au réglage du temps  $\overline{\omega}'$ , pour donner à celui  $\overline{\omega}'_e$  la valeur voulue.

**VII. De la forme exacte de l'équation du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire. Diagrammes vectoriels**

Revenant donc à l'équation exacte (11) du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, il s'agit maintenant d'examiner quelle est l'influence du deuxième terme du premier membre, négligé jusqu'ici en première approximation. Pour y procéder, j'utiliserai les diagrammes vectoriels de la figure 3, établis dans les mêmes conditions et de la même manière que celui de la figure 1. Ils traduisent l'équation (11), en réalisant l'opération :

$$\overrightarrow{OE}' + \overrightarrow{E'E} = \overrightarrow{OB} + \overrightarrow{OC}$$

Les données de ces diagrammes correspondent à celles du diagramme de la figure 1 au point de vue :

de la promptitude du réglage :  $\overline{\omega}'_e = 0,75 \text{ sec}$  à comparer avec  $\overline{\omega}' = 0,75 \text{ sec}$

du dosage accélérométrique (rigidité de l'asservissement) :  $\overline{\omega}'' = 1,5 \text{ sec}$  à comparer avec  $m = 1,5 \text{ sec}$

de la période de l'oscillation :  $T'' = 12,56 \text{ sec}$   $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ .

Ils ne diffèrent les uns des autres que par la valeur du statisme momentané :  $\delta' = 20 \%$ ,  $25 \%$  et  $30 \%$ , que réalise l'asservissement temporaire, ce qui implique pour le temps caractéristique :

$$\overline{\omega}' = \overline{\omega}'_e - \delta' \overline{\omega}''$$

les valeurs de :  $0,45$ ,  $0,375$  et  $0,30 \text{ sec}$ .

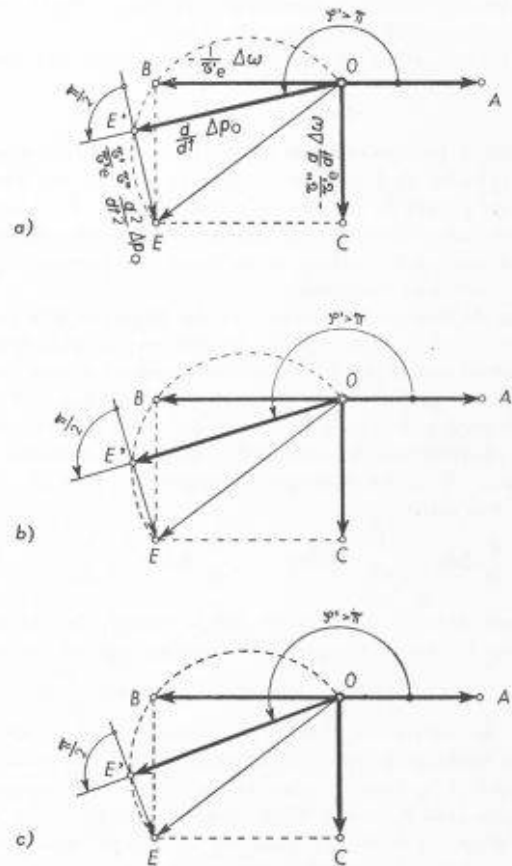


Fig. 3. — Diagrammes vectoriels du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire.

Cas a) :

$$\overline{\omega}'_e = 0,75 \text{ sec} \quad \overline{\omega}'' = 1,5 \text{ sec} \quad T'' = 12,56 \text{ sec} \quad \beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$$

$$\delta' = 20 \%$$

$$\overline{\omega}' = 0,45 \text{ sec}$$

$$OA = 1 \quad OB = \frac{1}{\overline{\omega}'} = 1,33 \quad OC = \beta_* \frac{\overline{\omega}''}{\overline{\omega}'_e} = 1$$

$$EE' = \beta_* \frac{\overline{\omega}'}{\overline{\omega}'_e} \overline{\omega}'' \overline{OE}' = 0,45 \overline{OE}'$$

Cas b) :

$$\overline{\omega}'_e = 0,75 \text{ sec} \quad \overline{\omega}'' = 1,5 \text{ sec} \quad T'' = 12,56 \text{ sec} \quad \beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$$

$$\delta' = 25 \%$$

$$\overline{\omega}' = 0,375 \text{ sec}$$

$$OA = 1 \quad OB = \frac{1}{\overline{\omega}'} = 1,33 \quad OC = \beta_* \frac{\overline{\omega}''}{\overline{\omega}'_e} = 1$$

$$EE' = \beta_* \frac{\overline{\omega}'}{\overline{\omega}'_e} \overline{\omega}'' \overline{OE}' = 0,375 \overline{OE}'$$

Cas c) :

$$\overline{\omega}'_e = 0,75 \text{ sec} \quad \overline{\omega}'' = 1,5 \text{ sec} \quad T'' = 12,56 \text{ sec} \quad \beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$$

$$\delta' = 30 \%$$

$$\overline{\omega}' = 0,30 \text{ sec}$$

$$OA = 1 \quad OB = \frac{1}{\overline{\omega}'} = 1,33 \quad OC = \beta_* \frac{\overline{\omega}''}{\overline{\omega}'_e} = 1$$

$$EE' = \beta_* \frac{\overline{\omega}'}{\overline{\omega}'_e} \overline{\omega}'' \overline{OE}' = 0,30 \overline{OE}'$$

Il suffit d'un coup d'œil sur ces diagrammes pour se rendre compte que, par rapport au jeu d'un accéléromètre, celui

d'un asservissement temporaire introduit un retard (décalage en arrière) du vecteur  $\vec{OE}'' = \frac{d}{dt} \Delta p_0$  des diagrammes de la figure 3, à comparer au vecteur  $\vec{OE}$  du diagramme de la figure 1, vecteur  $\vec{OE}$  qui coïncide avec celui des diagrammes de la figure 3, puisque la promptitude, le dosage et la période sont restés les mêmes. Ce retard provient de l'incidence du deuxième terme, en  $\frac{d^2}{dt^2} \Delta p_0$ , du premier membre de l'équation (11), terme que l'équation (4) du réglage accéléro-tachymétrique ne possède pas et qui se traduit par le vecteur  $\vec{E'E}$ . Il diminue le dépassement, au delà de  $\pi$ , de l'angle  $\widehat{AOE} = \varphi'$  par lequel se manifeste le pouvoir stabilisateur du réglage.

La considération des diagrammes a), b) et c) de la figure 3 montre en outre que pour réduire ce retard, il est nécessaire d'augmenter la valeur du statisme momentanée  $\delta'$ ; le dit retard diminue en effet en passant du diagramme a) avec  $\delta' = 20\%$ , au diagramme b) avec  $\delta' = 25\%$ , puis au diagramme c) avec  $\delta' = 30\%$ . Ceci revient à choisir la valeur du temps  $\overline{\omega}'$  relativement faible, c'est-à-dire à respecter au mieux la condition (13):  $\delta' \overline{\omega}' \gg \overline{\omega}'$ . Dans ce but, il est indiqué, selon un principe bien connu des constructeurs de régulateurs tachymétriques, de disposer d'un tiroir de distribution dont les arêtes réglantes aient un grand développement, de manière que le dit tiroir soit susceptible d'assurer, par lui-même, une grande promptitude (faible valeur du temps  $\overline{\omega}'$ ), laquelle vu la présence de l'asservissement temporaire, n'est cependant plus la promptitude effective du réglage<sup>1</sup>.

Quoi qu'il en soit, le retard en question ne peut jamais être entièrement évité, ne fût-ce que par l'impossibilité de réaliser un statisme momentanée  $\delta'$  trop poussé, ou un temps  $\overline{\omega}'$  trop petit ( $\overline{\omega}' = 0$ , tiroir de distribution infiniment grand). Dès lors, à promptitude effective égale et pour le même dosage accélérométrique (rigidité de l'asservissement temporaire  $\overline{\omega}'' = m$ ), le pouvoir stabilisateur du réglage accéléro-tachymétrique est toujours supérieur à celui du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire.

#### VIII. De la comparaison entre le pouvoir stabilisateur des deux systèmes, pour des oscillations de réglage de fréquence variable. Courbes de comportement.

Je viens de faire ressortir l'avantage d'un meilleur pouvoir stabilisateur du régulateur accéléro-tachymétrique, en considérant une oscillation de réglage (à amortir) de période bien déterminée. Il est intéressant d'étudier comment le dit avantage évolue en fonction de la valeur de cette période, en d'autres termes d'étendre la comparaison effectuée au moyen des diagrammes des figures 1 et 3, à toute une gamme des valeurs possibles de la fréquence ou de la pulsation  $\beta_*$  des oscillations de réglage. L'intérêt de cette extension est motivé par le fait que pour un groupe déterminé, à chaque régime de marche, c'est-à-dire à chaque valeur de la puissance engendrée, correspond une valeur différente de la période des oscillations de réglage. Ceci provient notamment du fait que lorsque la puissance engendrée varie, la valeur de l'inertie spécifique<sup>2</sup> du groupe est modifiée puis également, dans le cas des turbines hydrauliques, l'importance des effets du coup de bélier.

En vue de procéder à la comparaison, je conserverai

encore ici, pour les deux systèmes, des valeurs égales de la promptitude effective d'une part et du dosage accélérométrique d'autre part. Pour placer le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire dans des conditions qui lui soient favorables et satisfaire pour cela au mieux à l'inégalité (13):  $\delta' \overline{\omega}'' \gg \overline{\omega}'$ , je ferai choix d'un statisme momentanée  $\delta = 30\%$ , que je crois déjà poussé et je procéderai à la comparaison en partant des diagrammes des figures 1 et 3 e), correspondant tous deux à une promptitude effective de 0,75 sec et à un dosage de 1,5 sec.

Ces diagrammes ont été établis en considérant une oscillation de pulsation  $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ ; mais il va sans dire qu'ils peuvent l'être également pour différentes autres valeurs de la pulsation, comprise par exemple entre  $\beta_* = 0$  et  $\beta_* = 1$ . L'extrémité du vecteur représentatif de la course du tiroir de distribution:  $\frac{d}{dt} \Delta p_0$ , à savoir le point:

- E pour le réglage accéléro-tachymétrique ou
- E' pour le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire.

se déplace alors sur son lieu géométrique, qui est la courbe de comportement<sup>1</sup> du régleur de l'un et l'autre systèmes.

Ces courbes de comportement, tracées sur la figure 4, correspondent, pour le régleur accéléro-tachymétrique, à la droite BE parallèle à l'axe des ordonnées et, pour le régleur tachymétrique avec asservissement temporaire, à la courbe BE' qui, vers le bas, s'éloigne par la gauche de la précédente. On peut démontrer que la courbe BE' est une demi-circconférence de diamètre  $\left(\frac{1}{\overline{\omega}'} - \frac{1}{\overline{\omega}''}\right)$  (dans le cas particulier  $\frac{1}{0,3} - \frac{1}{0,75} = 3,33 - 1,33 = 2$ ), qui rejoint l'axe des abscisses pour une valeur infinie de la pulsation ( $\beta_* = \infty$ ,  $T^* = 0$ , voir aussi la fig. 5).

Ces courbes de comportement, dont on cotera les points en les marquant de la valeur de la pulsation  $\beta_*$ , constituent le critère, par excellence, de la qualité du régulateur. Leur considération permet de formuler les conclusions suivantes relatives à la comparaison du comportement de l'un et l'autre systèmes.

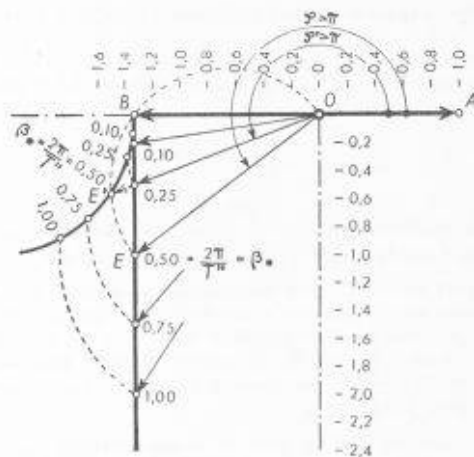


Fig. 4. — Courbes de comportement du régleur accéléro-tachymétrique et du régleur tachymétrique avec asservissement temporaire.

<sup>1</sup> Pour plus de détails, voir *Etude de la stabilité d'un réglage automatique de vitesse par des diagrammes sectoriels en vue de l'utilisation du critère de Nyquist. Exemple de relevé de la courbe de comportement d'un régleur*, par D. GADEN, avec la collaboration de A. GRAMOND, TH. BOYER et J. DESBAILLETS, Ing. Informations Techniques Charmilles - n° 2.

<sup>1</sup> Voir plus haut, chapitre VI.

<sup>2</sup> Voir la définition de l'inertie spécifique au chapitre XII.

En face d'une oscillation de pulsation très petite, c'est-à-dire de période très grande ( $\beta_* = 0,1$ ,  $T^* = 62,8$  sec), le pouvoir stabilisateur du réglage, caractérisé par le dépassement au delà de  $\pi$  de l'angle  $\widehat{AOE}$  ou  $\widehat{AOE'}$  est à peu de chose près le même pour les deux systèmes, mais d'importance réduite; un léger avantage se révèle cependant déjà en faveur du réglage accéléro-tachymétrique.

Lorsque l'oscillation de réglage devient de pulsation plus grande, le pouvoir stabilisateur augmente, mais ceci toutefois d'une façon plus marquée dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique que dans l'autre. En d'autres termes, dans la gamme des valeurs croissantes de la pulsation pour lesquelles l'un et l'autre systèmes sont bien adaptés, l'avantage d'un meilleur pouvoir stabilisateur du réglage accéléro-tachymétrique s'affirme et prend une importance très nette.

La présente comparaison doit, à mon avis, être raisonnablement limitée à une valeur voisine de celle  $\beta_* = 1$  de la pulsation, car non seulement pour les données numériques choisies, mais également pour d'autres correspondant aussi aux possibilités de la pratique, cette valeur constitue bien à peu près un maximum.

#### IX. De la comparaison des courbes de comportement du régleur accéléro-tachymétrique et du régleur tachymétrique avec asservissement temporaire, avec celle du régleur tachymétrique avec asservissement permanent

Bien des ingénieurs croient que l'asservissement temporaire est assimilable à un asservissement permanent dont l'effet disparaîtrait avec le temps, et qu'en conséquence les deux systèmes d'asservissement sont assez voisins l'un de l'autre dans leur jeu. Or, ce n'est là, à mes yeux, qu'une fausse apparence et la comparaison des courbes de comportement me semble le meilleur moyen de faire la lumière à ce sujet.

Sans entrer dans le détail des démonstrations relatives à la courbe de comportement d'un régleur tachymétrique avec asservissement permanent, question que j'ai exposée ailleurs<sup>1</sup>, je rappellerai seulement que cette courbe correspond à une demi-circonférence passant par l'origine, située dans le troisième quadrant et dont le diamètre est égal à l'inverse  $\frac{1}{\mathcal{T}'}$  du temps caractéristique de la promptitude. En vue de coter ses points  $E''$ , pour différentes valeurs de la pulsation  $\beta_*$ , il suffit d'appliquer la relation :

$$\text{tang. } \widehat{BOE''} = \frac{1}{\mathcal{T}'} \frac{\delta}{\beta_*}$$

$\delta$  étant le statisme permanent réalisé par l'asservissement.

J'ai tracé sur la figure 5 cette demi-circonférence :

d'une part en  $OE''B$ , pour un statisme permanent  $\delta = 0,3$  de même valeur que le statisme momentané  $\delta' = 0,3$  précédemment considéré, et pour une promptitude  $\mathcal{T}' = 0,75$  de même valeur que celle choisie:  $\mathcal{T}' = 0,75$  sec pour le régleur accéléro-tachymétrique ou  $\mathcal{T}'_e = 0,75$  sec pour le régleur tachymétrique avec asservissement temporaire,

d'autre part en  $OE''E_f$ , pour le même statisme permanent  $\delta = 0,3$  et pour une promptitude  $\mathcal{T}' = 0,3$  sec égale à celle  $\mathcal{T}' = 0,3$  sec que le tiroir de distribution du régleur tachymétrique avec asservissement temporaire serait en mesure de réaliser, si le statisme momentané était nul, plus exactement si  $\delta'\mathcal{T}' = 0$ .

J'ai en outre reproduit sur la figure 5 les courbes de comportement reprises de la figure 4 :

<sup>1</sup> Voir *op. cit.*, renvoi 11, page 67.

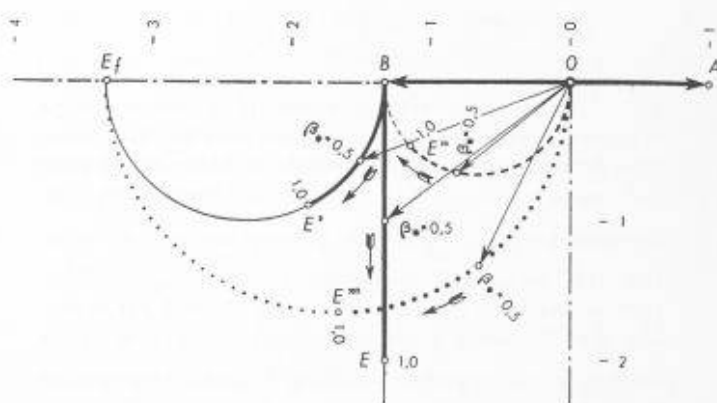


Fig. 5. — Comparaison avec la courbe de comportement du régleur tachymétrique avec asservissement permanent.

du régleur accéléro-tachymétrique avec un dosage  $m = 1,5$  sec et une promptitude  $\mathcal{T}' = 0,75$  sec: droite  $BE$ ,

du régleur tachymétrique avec asservissement temporaire, pour un statisme momentané  $\delta' = 0,3$  une rigidité (dosage)  $\mathcal{T}' = 1,5$  sec et une promptitude  $\mathcal{T}'_e = 0,75$  sec ( $\mathcal{T}' = 0,3$  sec pour le tiroir seulement): demi-circonférence  $BE'E_f$ .

Les quatre courbes sont marquées en traits forts de  $\beta_* = 0$  à  $\beta_* = 1$ , puis au delà en traits fins, et les flèches correspondent au sens croissant de la pulsation  $\beta_*$ . On constate que, dans la gamme des valeurs de la pulsation pour lesquelles le régleur tachymétrique avec asservissement temporaire est bien adapté (eu égard aux données numériques choisies), sa courbe de comportement  $BE'$  — et par conséquent son jeu — se différencie totalement de celle  $OE''$  ou  $OE''$  du régleur tachymétrique avec asservissement permanent. Ce n'est que pour de très grandes valeurs de la pulsation, tout à fait en dehors des conditions d'utilisation envisagées pour l'asservissement temporaire, que la courbe de comportement  $BE'E_f$  rejoint vers  $E_f$  la courbe de comportement du régleur tachymétrique avec asservissement permanent, de promptitude  $\mathcal{T}' = 0,3$  sec. Dans ce domaine, l'un comme l'autre des régleurs tachymétriques ne sont d'ailleurs plus bien adaptés et leur pouvoir stabilisateur très réduit.

Dans la gamme des valeurs de la pulsation que l'on doit seules pratiquement prendre en considération, la courbe de comportement du régleur tachymétrique avec asservissement temporaire se rapproche plutôt de celle du régleur accéléro-tachymétrique.

Cette comparaison, par voie graphique, illustre je crois d'une façon très expressive le fait que j'ai déjà relevé<sup>1</sup>, à savoir que dans les limites de fonctionnement pour lesquelles un asservissement temporaire est prévu, de manière à développer un effet stabilisateur satisfaisant (angle  $\widehat{AOE'}$  notablement plus grand que  $\pi$ ), son jeu n'est pas du tout le même que celui de l'asservissement permanent; il se rapproche bien plus de celui d'un accéléromètre, sans toutefois jamais l'égalier.

#### X. De la comparaison des deux systèmes de réglage, à pouvoir stabilisateur équivalent

J'ai procédé aux comparaisons développées dans les chapitres VII et VIII en conservant toujours, pour les deux systèmes, les mêmes valeurs de la promptitude et du dosage.

<sup>1</sup> Voir renvoi 2, page 65.

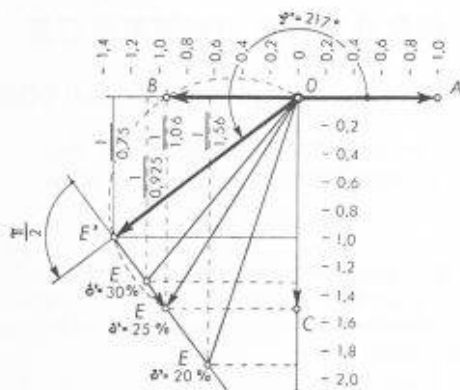


Fig. 6. — Diagramme vectoriel de trois réglages tachymétriques avec asservissement temporaire assurant le même pouvoir stabilisateur.

$$\mathcal{T}^* = \frac{1}{\beta_*} \frac{OC}{OB}$$

soit pour  $\delta' = 0,25$  :  $\mathcal{T}^* = \frac{1,51 \times 1,06}{0,5} = 3,20 \text{ sec.}$

Mais on peut aussi se placer à un autre point de vue et supposer que pour satisfaire à une condition de stabilité imposée par les dispositions du groupe à régler, il soit nécessaire de conférer aux deux systèmes le même pouvoir stabilisateur, vis-à-vis d'une oscillation de réglage à amortir, de période déterminée. Ceci revient alors à faire coïncider, avec le vecteur  $\vec{OE}$  du diagramme de la figure 1, chacun des vecteurs  $\vec{OE}'$  des diagrammes de la figure 3, quitte à adopter, pour les deux systèmes, des valeurs différentes de la promptitude et du dosage.

Cette opération fait l'objet de la figure 6 où j'ai tracé les diagrammes de trois réglages tachymétriques avec asservissement temporaire, réalisant un statisme momentané  $\delta' = 20\%$ ,  $25\%$  ou  $30\%$ , et aboutissant tous au même vecteur  $\vec{OE} = \frac{d}{dt} \Delta p_0$ , identique au vecteur  $\vec{OE}$  du diagramme de la figure 1, correspondant au réglage accéléro-tachymétrique. On constate que, tandis qu'avec le réglage accéléro-tachymétrique le dosage s'élève à  $m = 1,5 \text{ sec}$  et la promptitude à  $\mathcal{T}^* = 0,75 \text{ sec}$ , il faut pour assurer le même pouvoir stabilisateur au réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, modifier ses caractéristiques de la façon suivante :

	$\delta' = 30$	25	20 %
Augmenter la rigidité de l'asservissement temporaire de $\mathcal{T}^* = 1,5 \text{ sec}$ à :	$\mathcal{T}^* = 2,46$	3,20	6,00 sec
Diminuer la promptitude, c'est-à-dire augmenter son temps caractéristique de $\mathcal{T}^* = 0,75 \text{ sec}$ à :	$\mathcal{T}^*_e = 0,925$	1,06	1,56 sec

Ce résultat est bien le réciproque de ceux des chapitres VII et VIII. Je reviendrai plus loin sur ses conséquences, au point de vue de la rapidité de réponse du régulateur ; mais avant de passer à l'exposé de cette question, je ferai encore les deux remarques suivantes :

a) Les données des réglages tachymétriques avec asservissement temporaire  $\delta' = 0,30$ ,  $0,25$  et  $0,20$  correspondant aux diagrammes de la figure 6, leur confèrent à tous trois le même pouvoir stabilisateur que celui du réglage accéléro-tachymétrique pris comme base de comparaison, vis-à-vis

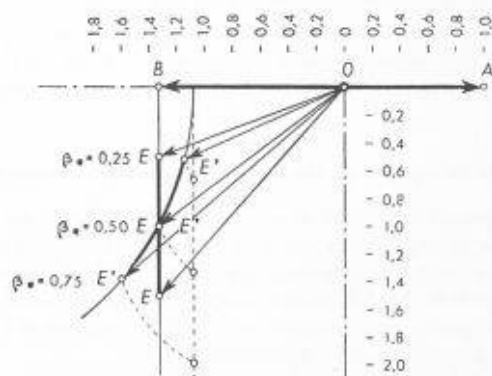


Fig. 7. — Courbes de comportement d'un régleur accéléro-tachymétrique et d'un régleur tachymétrique avec asservissement temporaire réalisant le même pouvoir stabilisateur pour  $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ .

d'une oscillation de réglage de pulsation :  $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ . Toutefois, appliqués à un groupe d'inertie spécifique déterminée, ces quatre réglages font apparaître, dans leur jeu, des oscillations de pulsations légèrement différentes. De ce fait, ils n'ont aucun exactement le même effet stabilisateur et pourtant, en vue de placer à cet égard les quatre réglages sur le même pied, il est nécessaire qu'ils réalisent, avec le même groupe réglé, des décroissements égaux pour des oscillations de pulsations égales.

C'est dans ce sens que seront choisies les données des différents réglages traités en exemples au chapitre XII, données qui s'écarteront donc quelque peu de celles des diagrammes de la figure 6.

b) La comparaison entre le réglage accéléro-tachymétrique et le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire  $\delta' = 30\%$ , résultant des diagrammes de la figure 6, peut être étendue à toute une gamme de valeurs de la fréquence des oscillations de réglage, comme cela a été fait, pour les diagrammes des figures 1 et 3 c, au moyen des courbes de comportement de la figure 4. On aboutit ainsi aux courbes de comportement de la figure 7, qui correspondent :

pour le réglage accéléro-tachymétrique à une droite parallèle à l'axe des ordonnées, à l'abscisse :

$$-\frac{1}{\mathcal{T}^*} = -\frac{1}{\mathcal{T}^*_e} = -\frac{1}{0,75} = -1,33$$

pour le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire à une circonférence partant de l'axe des abscisses, au point d'abscisse :

$$-\frac{1}{\mathcal{T}^*_e} = -\frac{1}{0,925} = -1,08.$$

Les deux courbes se coupent au point E,  $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$  et pour cette valeur de la pulsation des oscillations de réglage les vecteurs  $\vec{OE}$  et  $\vec{OE}'$  étant confondus, les deux systèmes développent le même pouvoir stabilisateur. Leurs promptitudes et leurs dosages sont par contre différents.

Vis-à-vis d'oscillations de réglage de période plus grande :  $\beta_* = 0,25$ , les deux vecteurs  $\vec{OE}$  et  $\vec{OE}'$  restent à peu près en phase, mais celui  $\vec{OE}'$  du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire est inutilement réduit, conséquence d'une promptitude plus faible.

Vis-à-vis d'oscillations de réglage de période plus courte :

$\beta_* = 0,75$ , les deux vecteurs  $\vec{OE}$  et  $\vec{OE'}$  restent à peu près de la même longueur, mais celui  $\vec{OE'}$  du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire est en retard sur l'autre, critère d'un pouvoir stabilisateur moins prononcé.

#### XI. De la rapidité de réponse du régulateur. Généralités

J'ai jusqu'ici procédé à un examen comparatif des deux systèmes de réglage, au point de vue de la stabilité, à savoir celui des petites oscillations qui caractérisent le retour au régime établi. Le fonctionnement du régulateur n'est alors influencé par aucun changement extérieur, puisque la charge du groupe est supposée invariable.

Il s'agit maintenant de considérer l'autre aspect du réglage, celui de la réponse du régulateur en face d'une perturbation. Celle-ci peut provenir soit d'une modification de la charge consommée, soit d'un ordre de réglage, dans les deux cas d'une cause extérieure donnant naissance à un écart que le régulateur a pour tâche de corriger.

Dans la première éventualité, l'action du régulateur est déclenchée par l'accélération et l'écart de vitesse auxquels la modification de charge consommée donne lieu, du fait du déséquilibre qu'elle entraîne entre couple moteur et couple résistant. Le phénomène est régi par l'équation des masses tournantes du groupe. La rapidité de réponse du régulateur sera d'autant meilleure qu'il modifiera plus vite l'ouverture du vannage, en vue de rétablir l'équilibre des couples, et qu'en conséquence l'écart maximum de vitesse sera de valeur plus réduite. Le régulateur est appelé à ce mode de fonctionnement, que le groupe dont il commande le vannage soit en service isolé ou en parallèle avec d'autres; dans ce dernier cas, il coopère avec les régulateurs des autres groupes pour limiter l'écart de vitesse. Afin de juger de la qualité du régulateur, au point de vue de sa rapidité de réponse, il est donc possible de le considérer en service isolé et tel résultat constaté, dans ces conditions, en sa faveur ou à son désavantage, demeurera évidemment le même dans la marche en parallèle.

La seconde éventualité, au contraire, celle de l'intervention d'un ordre de réglage, suppose généralement un fonctionnement en parallèle du groupe considéré. Bien que le régulateur contribue donc au maintien de la fréquence commune du réseau, on peut, pour étudier d'une façon distincte l'effet d'un ordre de réglage, admettre que la vitesse du groupe (fréquence) est rigoureusement maintenue par tout l'ensemble interconnecté. L'ordre de réglage est alors produit (par action sur le mécanisme d'asservissement permanent du régulateur) pour modifier la puissance fournie par le groupe. Cet ordre de réglage peut provenir soit d'une intervention à main (sur les boutons de commande du dispositif de changement de vitesse), soit du jeu d'un appareil automatique agissant en fonction d'une consigne horaire ou contrôlant la valeur de la puissance échangée par une ou plusieurs interconnexions (réglage puissance-fréquence).

Je reviendrai avec plus de détails sur ce sujet au chapitre XIV et examinerai d'abord la question de la rapidité de réponse, dans le cas d'une modification de la charge consommée. Je le ferai en premier lieu sans tenir compte d'aucun effet perturbateur, puis en introduisant celui que procure le coup de bélier dans le système d'alimentation d'une turbine hydraulique.

(A suivre).

## GRANDE DIXENCE

### Données techniques du projet EOS

par Louis FAVRAT, ingénieur en chef  
et André LIVIO, ingénieur en chef-adjoint

#### Avant-propos

L'idée de l'agrandissement du bassin d'accumulation de la Dixence, pour créer une grande réserve d'énergie d'hiver, revient au Service fédéral des eaux. (Voir publication n° 30 du S. F. E. 1945.)

Un des avantages de ce projet sur ceux qui ont déjà été étudiés dans d'autres régions de la Suisse, provient de la très forte proportion de glaciers de son bassin d'alimentation. Il en résulte que pour les années de grande sécheresse, les apports ne seront pas insuffisants grâce à la fonte de la glace.

Il convient de relever aussi qu'aucune agglomération humaine n'est touchée et qu'aucun terrain agricole de valeur n'est submergé. A côté des rochers, des éboulis et des graviers, seuls seront recouverts de maigres alpages entre les cotes 2240.00 et 2365.00.

Par la suite la S. A. l'Énergie de l'Ouest Suisse (EOS) à Lausanne, a repris ce vaste projet en l'adaptant aux conditions particulières d'exploitation de ses usines. Cet aménagement se ferait en quatorze étapes sur la base d'une augmentation de la production d'énergie d'hiver de 100 millions de kWh d'étape en étape. La réalisation de l'ensemble des ouvrages permettra d'atteindre la production totale de 1400 millions de kWh.

L'eau accumulée ne sera pas utilisée dans une seule nouvelle usine à Chandoline (Sion). Elle sera répartie entre l'usine de Chandoline d'une part et les usines existantes ou à créer le long de la Dranse et à Guercet-Martigny d'autre part.

Une des particularités les plus importantes du projet EOS est qu'il a été possible d'amener par gravité tous les apports nouveaux (soit 350 millions de m<sup>3</sup> d'eau), dans le bassin de la Dixence agrandi, cela sans aucune station de pompage, et dans de bonnes conditions de réalisation.

#### Le barrage et le bassin d'accumulation

Le nouveau barrage de la Dixence est situé à 500 m en aval et au nord du barrage existant, à un endroit où la topographie du rocher se prête admirablement bien à la construction d'un grand ouvrage (fig. 1).

Les recherches géologiques basées tant sur l'examen de l'emplacement général que sur celui des sondages déjà exécutés, soit par galeries latérales, soit par forages en profondeur, ont démontré les conditions favorables pour l'assise du nouvel ouvrage et son étanchéité.

Il s'agit d'un barrage à gravité, massif, étudié spécialement en vue de la construction par étapes successives, sans avoir à bétonner dès le début toute la largeur de la base définitive (fig. 2).

Le niveau du couronnement est à la cote 2365, soit 124 m plus haut que le barrage existant qui, lui, sera noyé.

Il n'est pas possible de surélever dans d'aussi grandes proportions le barrage actuel de la Dixence, parce qu'il n'a pas été prévu pour cela lors de sa construction et que la topographie du rocher, à cet endroit, ne s'y prête pas.

Le nouveau barrage une fois achevé permettra d'accumuler, en supplément des 50 millions de m<sup>3</sup> du lac de la Dixence