

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 74 (1948)
Heft: 7

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-56015>

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: 16.01.2026

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 ANNONCESLe 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 26
LAUSANNE
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 (suite et fin).* par DANIEL GADEN, ingénieur, directeur des Ateliers des Charmilles S. A., avec la collaboration de JACQUES DESBAILLETS, ingénieur. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : *Rapport du président sur l'activité de la Société et de son comité durant l'exercice du 26 mars 1947 au 19 mars 1948.* — Société suisse des ingénieurs et des architectes : *Extraits des procès-verbaux des séances du Comité central du 9 janvier et du 6 février 1948.* — **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.

(Suite et fin.)¹

XII. De la rapidité de réponse du régulateur sollicité par une modification de la charge consommée

Je supposerai, pour la simplification du calcul comparatif que je me propose de faire, que cette modification intervient brusquement, et que sa valeur ϵ est relativement faible, car ce sont, en effet, de telles *petites variations* de charge qui sont la règle permanente du fonctionnement d'un régulateur en service².

Cette modification, qui fait naître un écart de réglage $\Delta p_o = \epsilon$ provoque une accélération des masses tournantes du groupe, puis un écart de vitesse et le phénomène est régi par l'équation :

$$\frac{d}{dt} \Delta \omega = \frac{1}{T} \Delta p_o \quad (14)$$

que l'on déduit aisément du théorème des quantités de mouvement, en supposant que la différence entre couple moteur et couple résistant est uniquement due à l'écart de réglage en puissance Δp_o , autrement dit qu'il n'existe aucune influence, sur la différence de couple :

ni de l'écart de vitesse $\Delta \omega$ ³. Cette hypothèse n'est pas de nature à fausser les résultats de l'examen auquel je me propose de procéder, attendu qu'il s'agit seulement d'une comparaison entre les deux systèmes, toutes autres conditions étant égales,

ni de l'écart de pression, qui résulte, dans une turbine hydraulique, du coup de bélier provoqué par le mouvement de vannage. Je reviendrai au chapitre XIII sur cette influence.

Ajoutons encore que la constante T , homogène à un temps, figurant dans l'équation (14), caractérise l'inertie spécifique du groupe et s'exprime avec les unités pratiques par :

$$T = \frac{PD^2 \times n^2}{0,27 N} 10^{-6} \text{ sec.}$$

PD^2 en kg.m^2 n en tours/min N en ch.

Le temps T est celui nécessaire pour amener les masses tournantes du groupe de la vitesse nulle à la vitesse de régime, en leur appliquant un couple égal au couple normal.

A cette équation (14) des masses tournantes du groupe, il faut adjoindre :

dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique, l'équation (4) :

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

¹ Il peut y avoir influence de l'écart de vitesse sur le couple moteur et sur le couple résistant, mais j'admets que ces deux influences se compensent et s'annulent.

² Voir *Bulletin technique* du 13 mars 1948.

³ Voir chapitre II. Cette hypothèse d'une petite variation brusque de charge, appliquée à l'étude des deux systèmes de réglage, ne peut évidemment pas troubler le résultat de leur comparaison. D'ailleurs, toute variation progressive peut être décomposée en une série de petites variations brusques et successives.

dans le cas du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, l'équation (11) :

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

La solution générale de ce système de deux équations différentielles simultanées est de la forme :

$$\Delta \omega = A e^{-\alpha t} + B e^{-\alpha_* t} (\sin \beta_* t + \varphi) \quad (15)$$

la même d'ailleurs en $\Delta \omega$ (écart de vitesse) et en Δp_o (écart de réglage ou mouvement de vannage).

Les valeurs des constantes α , α_* et β_* (pulsation) s'obtiennent par la résolution de l'équation aux caractéristiques qui est de la forme :

$$ar^3 + br^2 + cr + d = 0 \quad (16)$$

Quant à la détermination des constantes d'intégration A , B et φ , elle s'opère à partir des conditions initiales, pour $t = 0$, à savoir :

pour le réglage accéléro-tachymétrique :

$$\Delta p_o = \epsilon \quad \Delta \omega = 0$$

pour le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire :

$$\Delta p_o = \epsilon \quad \frac{d}{dt} \Delta p_o = 0 \quad \Delta \omega = 0$$

J'ai effectué le calcul pour quatre exemples numériques correspondant aux données figurant dans le tableau ci-contre, où sont également indiquées les valeurs des différentes constantes de l'équation (15) en $\Delta \omega$, ainsi que celles de l'écart de vitesse maximum $\Delta \omega_{\max}$:

Le premier exemple concerne le réglage accéléro-tachymétrique, dont le dosage $m = 1,50$ sec et la promptitude $\omega' = 0,75$ sec sont ceux adoptés précédemment pour le diagramme de la figure 1. Ce réglage est appliqué à un groupe dont l'inertie spécifique s'élève à $T = 5,33$ sec et, dans ces conditions, l'équation (15) révèle :

une valeur de la pulsation de l'oscillation de réglage de $\beta_* = 0,4635 \text{ sec}^{-1}$;

une valeur du facteur d'amortissement de cette oscillation de $\alpha_* = 0,1875 \text{ sec}^{-1}$ qui caractérise l'effet stabilisateur de réglage.

Les deux exemples suivants concernent des réglages tachymétriques avec asservissement temporaire : $\delta' = 0,30$ et $0,25$, appliqués à un groupe doté de la même inertie spécifique $T = 5,33$ sec. Pour chacun de ces deux exemples, la rigidité ω' de l'asservissement temporaire et la promptitude effective ω_e du réglage ont été choisies de manière à réaliser les mêmes valeurs de la pulsation des oscillations $\beta_* = 0,4635 \text{ sec}^{-1}$ et de leur facteur d'amortissement $\alpha_* = 0,1875 \text{ sec}^{-1}$, par conséquent la même valeur du décrement logarithmique.

Ces deux réglages tachymétriques et le réglage accéléro-tachymétrique précédemment considéré, sont ainsi placés sur

¹ En effet, selon l'équation (5) :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{1}{\omega_e} (\Delta \omega + \Delta \omega_p) \quad (5)$$

on doit bien avoir, pour $t = 0$, $\frac{d}{dt} \Delta p_o = 0$, car :

$\Delta \omega = 0$ écart de vitesse encore nul,

$\Delta \omega_p = 0$ pas de mouvement du piston du dash-pot, puisqu'il n'y a encore eu aucun mouvement de réglage.

² Donc légèrement différente de celle $\beta_* = 0,5 \text{ sec}^{-1}$ admise pour le tracé du diagramme de la figure 1.

Réglage	Accéléro-tachymétrique	Tachymétrique avec asservissement temporaire.		
Statisme momentané =	—	30 %	25 %	20 %
Dosage accélérométrique en sec $m =$ ou Rigidité de l'asservissement temporaire en sec $\omega' =$	1,5	—	—	—
Promptitude en sec $\omega_e =$	0,75	0,283	0,443	0,655
Promptitude effective en sec $\omega'_e =$	0,75	1,006	1,357	1,889
a	0	1	1	1
b	1	1,475	0,837	0,467
c	0,375	0,664	0,424	0,287
d	0,250	0,276	0,1157	0,0465
α_* en sec^{-1}	0,1875	0,1875	0,1875	0,134
Pulsation β_* en sec^{-1}	0,4635	0,4635	0,4635	0,4635
α	0	1,100	0,462	0,199
A	0	0,067	0,242	0,229
B	0,405	0,540	0,599	0,494
φ en radians	0	-0,125	-0,417	-0,484
$\frac{\Delta \omega_{\max}}{\epsilon}$	0,232	0,299	0,343	0,395
(Proportion)	100 %	129 %	148 %	170 %

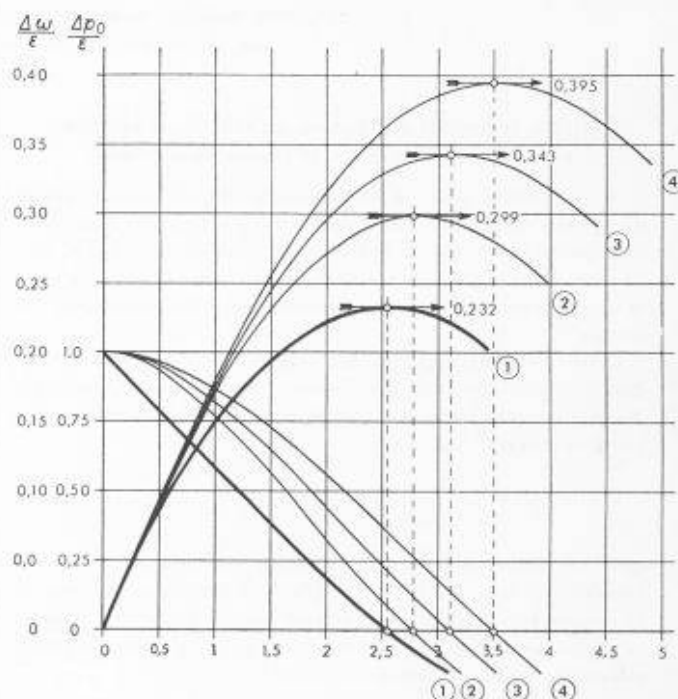


Fig. 8. — Régulateur accéléro-tachymétrique (Courbe 1) et régulateurs tachymétriques avec asservissement temporaire (Courbes 2 : $\delta' = 0,30$, 3 : $\delta' = 0,25$, 4 : $\delta' = 0,20$) sollicités par une modification de la charge consommée. Ecart de vitesse $\Delta \omega$ et Ecart de réglage Δp_o .

le même pied, au point de vue de la stabilité, puisqu'ils assurent tous le même effet stabilisateur; ils peuvent donc être équitablement comparés en ce qui concerne leurs rapidités respectives de réponse.

Le dernier exemple a trait à un réglage tachymétrique avec asservissement temporaire: $\delta' = 0,20$. Ici encore, la rigidité \mathcal{G}'' de l'asservissement temporaire et la promptitude effective \mathcal{G}'_e du réglage ont été choisies de manière à réaliser la même valeur de la pulsation des oscillations $\beta_* = 0,4635 \text{ sec}^{-1}$, puis la plus grande valeur possible de leur facteur d'amortissement. Avec ce plus faible statisme momentané $\delta' = 0,20$, on ne peut en effet plus atteindre, comme valeur du facteur d'amortissement, celle $\alpha_* = 0,1875$, mais seulement celle $\alpha_* = 0,134$. Ce dernier réglage est donc moins favorablement placé que les trois autres, du point de vue de l'effet stabilisateur, et il ne faudra pas l'oublier dans l'appréciation de sa rapidité de réponse.

Sur la figure 8 sont tracées, en fonction du temps, pour chacun des quatre réglages considérés et jusqu'au delà du point correspondant à l'écart maximum de vitesse:

la courbe de l'écart de vitesse $\Delta\omega$ pour $\epsilon = 1$, en d'autres termes, la courbe $\frac{\Delta\omega}{\epsilon}$. Cette courbe a été calculée au moyen de l'équation (15);

la courbe de l'écart de réglage Δp_o (mouvement de vannage) pour $\epsilon = 1$, en d'autres termes la courbe $\frac{\Delta p_o}{\epsilon}$. Cette courbe a été calculée au moyen d'une équation en Δp_o , analogue à celle (15).

L'examen de cette figure permet de constater que c'est la rapidité de réponse du réglage accéléro-tachymétrique qui est bien la meilleure, puis qu'en réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, elle devient de moins en moins favorable au fur et à mesure que la valeur du statisme momentané diminue et exige, en contre-partie, une plus grande rigidité de l'asservissement temporaire, ceci:

parce que l'action correctrice (mouvement de vannage) du régulateur se développe initialement de moins en moins vite (effet de l'asservissement temporaire);

parce que la valeur de l'écart maximum de vitesse devient en conséquence de plus en plus grande.

Ainsi donc, comme en matière de stabilité de réglage, le jeu d'un régulateur accéléro-tachymétrique se révèle, du point de vue de la rapidité de réponse, plus favorable que le régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire. Sans jamais égaler le jeu du régulateur accéléro-tachymétrique, celui du régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire s'en rapproche d'autant plus que son statisme momentané est important, ce qui ne peut pratiquement être réalisé sans limite pour les raisons exposées au chapitre VI.

Remarque. — Ainsi qu'il résulte des hypothèses faites pour l'établissement des équations du réglage, le tracé des courbes de la figure 8 suppose:

1° que les indications (déplacement de leur élément mobile) du tachymètre et de l'accéléromètre donnent instantanément la mesure de l'écart de vitesse et de sa dérivée. Avec des détecteurs à fréquence propre élevée, de l'ordre d'une dizaine et même de plusieurs dizaines de périodes par seconde, tels qu'on peut actuellement les construire, les retards sont en effet négligeables, par rapport au temps d'action du régulateur.

2° que les organes du vannage que le régulateur doit mettre en mouvement, n'opposent aucune force d'inertie. Cette force d'inertie est, en effet, négligeable devant les efforts hydrauliques qui s'exercent sur le vannage et que le régulateur doit être en mesure de vaincre.

XIII. De la rapidité de réponse du régulateur sollicité par une modification de la charge consommée, en présence du phénomène du coup de bélier

L'existence d'un écart de pression $\Delta h = \frac{H - H_o}{H_o}$ (en valeur relative), modifie le couple moteur de la turbine de la quantité $\frac{3}{2} \Delta h$, de sorte qu'en présence du phénomène du coup de bélier, l'équation (14) des masses tournantes du groupe doit être retouchée et s'écrire:

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{T} \Delta p = \frac{1}{T} \left(\Delta p_o + \frac{3}{2} \Delta h \right) \quad (17)$$

Les équations (4) ou (11) du régulateur demeurent par contre inchangées.

Reste encore à calculer la variation de pression Δh et pour y procéder, je ferai les deux hypothèses suivantes, qui permettent de simplifier les calculs, mais qui ne sont pas de nature à fausser les résultats de l'étude comparative, entre les deux systèmes de réglage:

1° Le rendement de la turbine reste constant, si bien qu'au cours des petites oscillations de réglage, l'écart de réglage en débit Δq_o est toujours égal à l'écart de réglage en puissance ou en couple Δp_o .

2° La période des oscillations de réglage est suffisamment grande, par rapport à celle du coup de bélier dans le système d'alimentation de la turbine, pour que l'on puisse négliger l'élasticité du dit système (compressibilité de l'eau et dilatation des parois).

Dans ces conditions, l'équation du coup de bélier s'écrit:

$$\Delta h = -\Theta \frac{d}{dt} \Delta p_o - \frac{\Theta}{2} \frac{d}{dt} \Delta h \quad (18)$$

dans laquelle le facteur $\Theta = \frac{\Sigma LV_o}{gH_o}$ est le temps nécessaire pour amener les masses d'eau contenues dans le système d'alimentation de l'état de repos ($V = 0$) à la vitesse correspondant à l'écoulement du débit de régime ($V = V_o$), ceci sous l'effet accélérateur de la pression de la chute H_o .

Réglage accéléro-tachymétrique

Les équations à considérer sont celles (4), (17) et (18) et leur solution est de la forme:

$$\Delta\omega = A\epsilon e^{-\alpha t} + B\epsilon e^{-\alpha_* t} \sin(\beta_* t + \varphi) \quad (19)$$

la même d'ailleurs en $\Delta\omega$, Δp_o ou Δh .

Les valeurs des constantes α , α_* et β_* (pulsation) s'obtiennent par la résolution de l'équation aux caractéristiques:

$$ar^3 + br^2 + cr + d = 0 \quad (20)$$

Quant à la détermination des constantes d'intégration A , B et φ , elle s'opère à partir des conditions initiales:

$$\Delta p_o = \epsilon \quad \Delta\omega = 0 \quad \Delta h = 0$$

Réglage tachymétrique avec asservissement temporaire

Les équations à considérer sont celles (11), (17) et (18) et leur solution est de la forme:

$$\Delta\omega = A\epsilon e^{-\alpha t} + A'\epsilon e^{-\alpha' t} + B\epsilon e^{-\alpha_* t} \sin(\beta_* t + \varphi) \quad (21)$$

L'équation aux caractéristiques s'écrit:

$$a'r^4 + ar^3 + br^2 + cr + d = 0 \quad (22)$$

et les conditions initiales sont:

$$\Delta p_o = \epsilon \quad \frac{d}{dt} \Delta p_o = 0 \quad \Delta\omega = 0 \quad \Delta h = 0$$

Exemples numériques

En ce qui concerne le réglage accéléro-tachymétrique, j'ai encore repris les données adoptées pour le tracé du diagramme de la figure 1 :

$$\zeta' = 0,75 \text{ sec} \quad m = 1,5 \text{ sec}$$

J'ai conservé, pour l'inertie spécifique du groupe, la valeur $T = 5,33 \text{ sec}$ admise pour les exemples du chapitre précédent.

Enfin, j'ai choisi pour le temps Θ caractéristique de la sensibilité du système d'alimentation au phénomène du coup de bélier, la valeur $\Theta = 0,8 \text{ secondes}$ qui est à peu près la plus grande possible¹, puisque le calcul, effectué sur ces bases, révèle :

$$\begin{aligned} \text{un facteur d'amortissement} \quad \alpha_* &= 0,021 \text{ sec}^{-1} \\ \text{pour une pulsation} \quad \beta_* &= 0,605 \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

ce qui signifie que le rapport entre deux amplitudes successives de même sens s'élève à :

$$e^{-\alpha_* \frac{2\pi}{\beta_*}} = 0,804$$

La stabilité du réglage est donc assurée, mais d'une façon très peu prononcée.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des différentes constantes $\alpha, \alpha', \alpha_*, \beta_*, A, A', B$ et ϕ de l'équation en $\Delta\omega$, pour le cas du réglage accéléro-tachymétrique, comme pour celui du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire dont il sera question plus loin.

Réglage	Accéléro-tachymétrique	Tachymétrique avec asservissement temporaire
Statisme momentané =	—	25 %
Dosage accélérométrique en secm = ou Rigidité de l'asservissement temporaire en sec $\zeta'' =$	1,5	—
Promptitude en sec $\zeta' =$	0,75	0,286
Promptitude effective en sec $\zeta'_e =$	0,75	1,50
a'	0	1
a	1	3,580
b	1,750	1,388
c	0,438	1,370
d	0,625	0,338
α_* en sec^{-1}	0,021	0,0165
Pulsation β_* en sec^{-1}	0,605	0,6138
α en sec^{-1}	1,708	0,273
α' en sec^{-1}	0	3,274
A	0,0561	0,2546
A'	0	— 0,0097
B	0,442	0,4358
ϕ en radians	— 0,105	— 0,597
$\frac{\Delta\omega_{\max}}{\epsilon}$	0,419	0,510
Proportion	100 %	122 %

¹ Non pas à cause de $\zeta' T = 4$, mais à cause de $m = 1,5 \text{ sec}$.

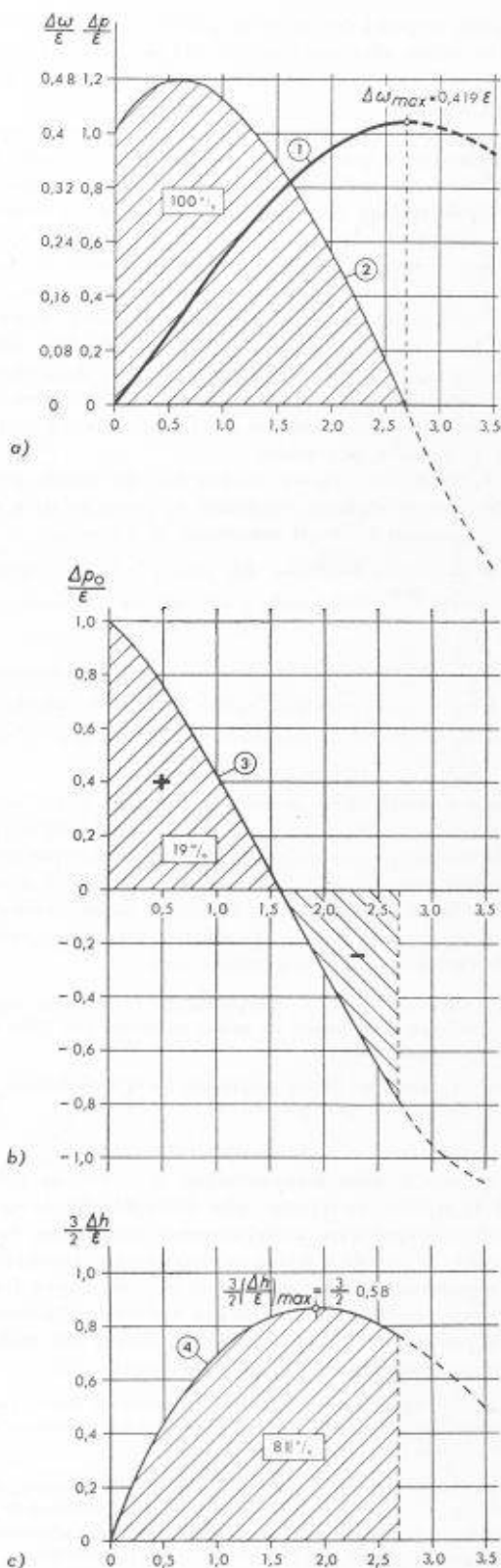


Fig. 9 a, b, c. — Régulateur accéléro-tachymétrique sollicité par une modification de la charge consommée en présence d'un phénomène de coup de bélier.

a) Ecart de vitesse $\Delta\omega$ et Ecart Δp sur la différence entre couple moteur et couple résistant (Courbes 1 et 2).

b) Ecart de réglage en couple moteur Δp_0 (Courbe 3).

c) Effet $\frac{3}{2} \Delta h$ de l'écart de pression (Courbe 4).

Sur la figure 9, relative au réglage accéléro-tachymétrique, sont tracées, en fonction du temps et jusqu'au delà du point correspondant à l'écart maximum de vitesse :

- la courbe de l'écart de vitesse $\Delta\omega$ pour $\epsilon = 1$, en d'autres termes la courbe $\frac{\Delta\omega}{\epsilon}$, la courbe de l'écart Δp sur la différence entre couple moteur et couple résistant, pour $\epsilon = 1$, en d'autres termes la courbe $\frac{\Delta p}{\epsilon}$. Cet écart résulte de l'écart de réglage en puissance Δp_0 et de l'écart de pression Δh , dont il sera question sous c),
- la courbe de l'écart de réglage en puissance Δp_0 , première composante de l'écart Δp sur la différence de couple, toujours pour $\epsilon = 1$,
- la courbe de l'effet $\frac{3}{2} \Delta h$ de l'écart de pression, seconde composante de l'écart Δp sur la différence de couple, toujours pour $\epsilon = 1$.

Ces graphiques appellent les commentaires suivants :

L'écart maximum de vitesse s'élève à 0,419 (au lieu de 0,232 sans coup de bélier) et est atteint au bout de 2,7 sec. La valeur de cet écart est proportionnelle à l'aire comprise entre les axes de coordonnées et la courbe Δp jusqu'à son point d'ordonnée nulle et d'abscisse 2,7. A remarquer que la courbe Δp comporte un maximum très prononcé, l'écart sur la différence de couple commençant par varier en sens inverse de l'écart de réglage Δp_0 , ceci du fait du coup de bélier.

L'aire dont il vient d'être question est égale à la somme des aires des graphiques b) (écart de réglage) et c) (effet de l'écart de pression). En mesurant ces aires partielles et en les rapportant à l'aire totale, on peut dire que l'écart maximum de vitesse résulte :

- pour 19 % seulement de la loi de fermeture du régulateur : Δp_0
- pour 81 % de l'effet du coup de bélier : $\frac{3}{2} \Delta h$.

En ce qui concerne le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, j'ai conservé les mêmes valeurs :

- $T = 5,33$ sec pour l'inertie spécifique
- $\theta = 0,8$ sec pour le temps caractéristique de la sensibilité au phénomène du coup de bélier,

et je me suis fixé celle :

$$\delta' = 0,25 \text{ du statisme momentané}$$

J'ai alors déterminé les autres données :

- $\mathcal{T}^* = 4,85$ sec dosage ou rigidité de l'asservissement temporaire,
- $\mathcal{T}_e = 1,50$ sec promptitude effective : $\mathcal{T}^* + \delta' \mathcal{T}^*$,
- $\mathcal{T}' = 0,286$ sec promptitude caractéristique du tiroir de distribution,

pour que les oscillations de réglage aient à peu près la même pulsation et le même facteur d'amortissement que dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique.

Le calcul effectué sur ces bases révèle en effet :

- pour la valeur de la pulsation : $\beta_* = 0,6138$ au lieu de 0,605
- pour celle du facteur d'amortissement : $a_* = 0,0165$ au lieu de 0,021
- pour le rapport entre deux amplitudes successives de même sens : 0,844 au lieu de 0,804

En vue de sa comparaison, au point de vue rapidité de réponse, avec le régulateur accéléro-tachymétrique, le régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, ainsi défini, est donc légèrement avantageux, du fait que le degré de stabilité qu'il assure est d'environ 5 % plus faible que celui du précédent. En d'autres termes, son effet stabilisateur est légèrement moindre.

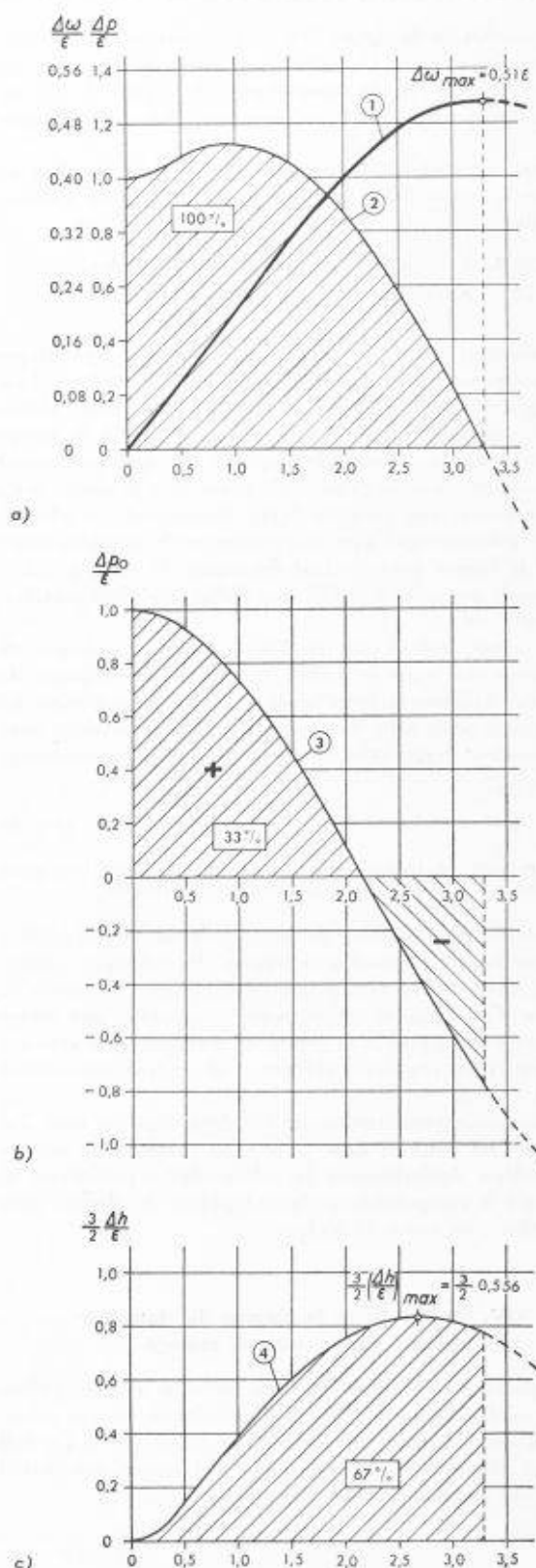


Fig. 10 a, b, c. — Régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire $\delta' = 0,25$ sollicité par une modification de la charge consommée en présence d'un phénomène de coup de bélier.

- Ecart de vitesse $\Delta\omega$ et Ecart Δp sur la différence entre couple moteur et couple résistant (Courbes 1 et 2).
- Ecart de réglage en couple moteur Δp_0 (Courbe 3).
- Effet $\frac{3}{2} \Delta h$ de l'écart de pression (Courbe 4).

Les courbes de la figure 10 a, b et c relatives au réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, sont les mêmes que celles de la figure 9 a, b et c, pour le réglage accéléro-tachymétrique. Elles appellent les commentaires suivants :

L'écart maximum de vitesse s'élève à 0,51 (au lieu de 0,343 sans coup de bélier) et il est atteint au bout de 3,30 sec. Il résulte :

pour 33 % de la loi de fermeture du régulateur : Δp_o ,

pour 67 % de l'effet du coup de bélier : $\frac{3}{2} \Delta h$.

On constate donc, en faveur du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, une réduction de l'incidence du coup de bélier sur l'écart de vitesse¹ ; mais cette réduction ne compense de loin pas l'avantage d'une loi de fermeture du réglage accéléro-tachymétrique, qui reste nettement plus favorable, comme c'était déjà le cas hors la présence du coup de bélier (voir chapitre XII). Finalement, en effet, le réglage tachymétrique avec asservissement temporaire limite l'écart de vitesse à une valeur maximum de 0,51, de 22 % plus grande que celle de 0,419, que réalise le réglage accéléro-tachymétrique².

En résumé, que ce soit en l'absence ou en présence du phénomène du coup de bélier, la rapidité de réponse du régulateur accéléro-tachymétrique est bien la meilleure. La comparaison avec celle d'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, doté d'un statisme momentané $\delta' = 25 \%$,

d'une part en laissant de côté tout phénomène de coup de bélier,

d'autre part en tenant compte du coup de bélier maximum qui amène les deux réglages à la limite de la stabilité,

fait ressortir une différence de 48 % (voir tableau page 78) à 22 % sur l'écart maximum de vitesse. En pratique, comme la mise au point du réglage doit toujours être effectuée en présence d'un coup de bélier, mais en gardant une marge suffisante par rapport à la limite de stabilité, la réalité est comprise entre ces deux chiffres, soit approximativement vers 30 à 35 %.

Je vais maintenant reprendre les deux réglages dont j'ai déterminé les données dans le présent chapitre, en vue de leur conférer équitablement le même effet stabilisateur, et procéder à la comparaison de leurs rapidités de réponse pour l'exécution d'un ordre de réglage.

XIV. De la rapidité de réponse du régulateur sollicité par un ordre de réglage

L'application au régulateur d'un ordre de réglage s'effectue en déplaçant un des points d'articulation de son mécanisme d'asservissement permanent, mécanisme dont j'ai fait jusqu'ici abstraction. On sait que le dit mécanisme établit une loi de statisme (vitesse-puissance) :

$$\Delta \omega = -\delta \Delta p_o$$

¹ Ceci sans que le maximum de surpression, $\frac{\Delta h_{\max}}{\epsilon} = 0,58$ dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique, diminue beaucoup dans le cas du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire ; il reste en effet $\frac{\Delta h_{\max}}{\epsilon} = 0,556$ (voir figure 10c).

² Une différence de 22 % (3,30 sec au lieu de 2,7 sec) existe aussi dans le temps pendant lequel l'écart de vitesse croît, avant de décroître.

δ étant la valeur du statisme permanent. Lorsque cette loi est satisfaite (en l'absence de toute accélération), le tiroir de distribution est en position moyenne et le servomoteur est en équilibre. C'est dire que le mécanisme d'asservissement permanent ajoute à l'effet tachymétrique et à l'effet accéléro-métrique un effet d'asservissement qui, mesuré à l'échelle des écarts de vitesse, s'élève à $\delta \Delta p_o$.

En conséquence :

dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique, l'équation (4) doit être retouchée et s'écrit :

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

dans le cas du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, les équations (6) et (11) doivent être retouchées et s'écrivent :

$$\Delta \omega_p = \tau_o'' \frac{d}{dt} (\Delta \omega_c - \Delta \omega_p) + \delta \Delta p_o \quad (6a)$$

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

Comme je l'ai expliqué au chapitre XI, l'étude de la rapidité de réponse du régulateur, sollicité par un ordre de réglage, peut s'effectuer en dehors de toute considération d'écart de vitesse ou d'accélération, de sorte que les équations à considérer sont respectivement :

dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o + \frac{1}{\tau_o'} \Delta p_o = 0 \quad (23)$$

dans le cas du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire :

$$\frac{d^2}{dt^2} \Delta p_o + \frac{\tau_o' \tau_o''}{\tau_o'} \frac{d}{dt} \Delta p_o + \frac{\delta}{\tau_o' \tau_o''} \Delta p_o = 0 \quad (24)$$

Ajoutons encore que l'ordre de réglage peut être caractérisé :

soit par la valeur de l'écart de réglage à corriger à l'instant $t = 0$

$$\Delta p_o = \epsilon$$

c'est-à-dire par la variation de puissance à produire,

soit par la valeur de l'écart de vitesse correspondant :

$$\delta \Delta p_o = \epsilon_{\omega}$$

c'est-à-dire par la course donnée initialement à une des articulations du mécanisme d'asservissement, course mesurée à l'échelle des écarts de vitesse (course du dispositif de changement de vitesse).

Réglage accéléro-tachymétrique

En tenant compte de la condition initiale $\Delta p_o = \epsilon$ pour $t = 0$, la solution de l'équation (24) s'écrit :

$$\Delta p_o = \epsilon e^{-\frac{\delta}{\tau_o'} t} \quad (25)$$

ou :

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = -\frac{\epsilon_{\omega}}{\tau_o'} e^{-\frac{\delta}{\tau_o'} t}$$

Le relevé expérimental de la courbe $\Delta p_o = f(t)$ et plus particulièrement de sa pente à l'origine permet donc de déterminer la valeur de la promptitude¹:

$$\tau' = - \frac{\epsilon_\omega}{\left[\frac{d}{dt} \Delta p_o \right]_{t=0}} \quad (26)$$

Réglage tachymétrique avec asservissement temporaire

Les racines r_1 et r_2 de l'équation aux caractéristiques de l'équation (24) sont:

$$r = - \frac{1}{2} \frac{\tau'_e}{\tau' \tau''} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \delta \tau' \tau''}{\tau_e^2}} \right] \quad (27)$$

et comme pratiquement le deuxième terme placé sous le radical est relativement faible par rapport à l'unité, les deux racines sont réelles, négatives et la plus petite d'entre elles (en valeur absolue) a pour expression approchée:

$$r_2 = - \frac{\delta}{\tau'_e} \quad (28)$$

La solution de l'équation (24) est dès lors de la forme:

$$\Delta p_o = A e^{r_1 t} + B e^{r_2 t} \quad (29)$$

et ses conditions initiales sont:

$$\text{pour } t = 0, \quad \Delta p_o = \epsilon \quad \text{d'où } A + B = 1$$

et

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = - \frac{\epsilon_\omega}{\tau'_e}$$

En conséquence, comme dans le cas précédent, le relevé expérimental de la courbe $\Delta p_o = f(t)$ permet, par la mesure de sa pente à l'origine, de déterminer la valeur de la promptitude τ' au moyen de la même formule (26). Toutefois, il ne s'agit pas de la promptitude effective τ'_e du réglage, mais seulement de la promptitude τ' caractéristique du tiroir de distribution.

La promptitude effective τ'_e du réglage peut néanmoins être également déduite du relevé expérimental de la courbe $\Delta p_o = f(t)$. En effet, du fait qu'en valeur absolue:

$$r_1 \gg r_2 \quad \text{et} \quad B \gg A$$

le premier terme $A e^{r_1 t}$ de l'expression de Δp_o disparaît très rapidement devant le deuxième, si bien qu'au bout de quelques secondes la courbe $\Delta p_o = f(t)$ s'identifie avec celle:

$$y = B e^{r_2 t} = B e^{-\frac{\delta}{\tau'_e} t}$$

Or la pente de cette courbe au point $y = \epsilon$,
où: $B e^{-\frac{\delta}{\tau'_e} t} = 1$, s'élève à:

$$\frac{d}{dt} y = - \frac{\delta \epsilon}{\tau'_e} = - \frac{\epsilon_\omega}{\tau'_e} \quad (30)$$

d'où:

¹ Voir *op. cit.* Appendice III.

² Ceci résulte de l'équation (5), avec $\Delta \omega = 0$:

$$\frac{d}{dt} \Delta p_o = - \frac{1}{\tau'_e} \Delta \omega_p$$

et de l'équation (6a), pour $t = 0$

$$\Delta \omega_p = \delta \Delta p_o = \epsilon_\omega$$

$$\tau'_e = - \frac{\epsilon_\omega}{\left[\frac{d}{dt} y \right]_{y=\epsilon}}$$

Les exemples numériques suivants me permettront de mieux préciser les détails de l'opération.

Exemples numériques

Les données sont celles des exemples du chapitre précédent, auxquelles j'ajoute celle concernant le statisme permanent admis à 3 %

$$\delta = 0,03$$

Dans le cas du réglage accéléro-tachymétrique, l'équation (25) s'écrit:

$$\Delta p_o = \epsilon e^{-0,04 t}$$

et la courbe $\Delta p_o = f(t)$ correspond à celle n° 1 de la figure 11. La pente de sa tangente à l'origine s'élève à:

$$\text{tg } \tau_1 = -0,04 \epsilon$$

et cette valeur définit la promptitude τ' par la relation:

$$-0,04 \epsilon = - \frac{0,03 \epsilon}{\tau'} \quad \tau' = 0,75 \text{ sec}$$

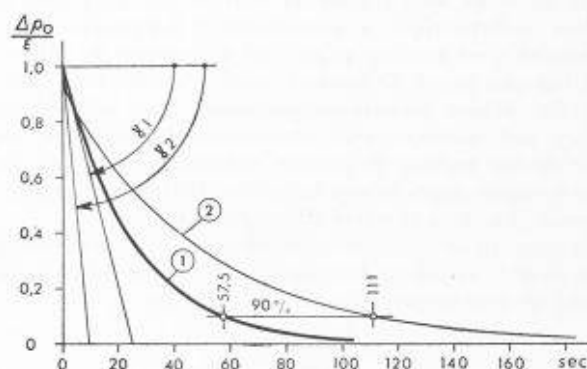


Fig. 11. — Intervention d'un ordre de réglage. Réponse d'un régulateur accéléro-tachymétrique (courbe n° 1) et réponse d'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire (courbe n° 2) $\delta' = 0,25$

Dans le cas du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, l'équation (29) s'écrit:

$$\Delta p_o = 0,082 \epsilon e^{-1,062 t} + 0,918 \epsilon e^{-0,02 t}$$

et la courbe $\Delta p_o = f(t)$ correspond à celle n° 2 de la figure 11. La pente de sa tangente à l'origine s'élève à:

$$\text{tg } \tau_2 = -0,105 \epsilon$$

et cette valeur définit la promptitude τ' caractéristique du tiroir de distribution par la relation:

$$-0,105 \epsilon = - \frac{0,03 \epsilon}{\tau'} \quad \tau' = 0,286 \text{ sec}$$

La courbe n° 2 du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire part, au début, avec une pente plus prononcée que celle de la courbe n° 1 du réglage accéléro-tachymétrique; mais au bout de quelques secondes la situation s'inverse. L'asservissement temporaire intervient et freine énergiquement l'action corrective du régulateur, qui se

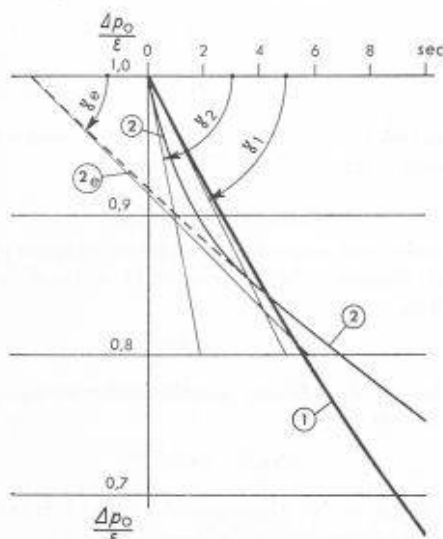


Fig. 12. — Intervention d'un ordre de réglage. Reproduction à grande échelle de la partie initiale des courbes de la fig. 11.

développe finalement bien plus lentement que celle du réglage accéléro-tachymétrique. Avec ce dernier, les 90 % de la correction sont réalisés au bout de 57,5 sec ; avec le réglage tachymétrique à asservissement temporaire, cette proportion n'est atteinte qu'au bout d'un temps de 111 sec 1,93 fois plus grand. Ce résultat confirme encore la supériorité du réglage accéléro-tachymétrique, par rapport au réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, au point de vue rapidité de réponse, naturellement lorsque les deux systèmes placés devant les mêmes difficultés de réglage, assurent tous deux le même effet stabilisateur.

La figure 12 est un agrandissement de la partie des courbes n° 1 et n° 2 voisine de l'origine. On y constate combien la courbe n° 2 se rapproche rapidement de celle

$$y = 0,918 \epsilon e^{-0,02t}$$

et se confond pratiquement avec elle au bout de 4 sec environ. Si l'on prolonge dès lors la courbe n° 2, selon la courbe n° 2_e représentant la fonction y , sa pente au point $y = \epsilon$ s'élève à :

$$\text{tg } \gamma_{2e} = -0,02 \epsilon$$

et cette valeur définit la promptitude effective ω'_{2e} par la relation :

$$-0,02 \epsilon = -\frac{0,03 \epsilon}{\omega'_{2e}} \quad \omega'_{2e} = 1,5 \text{ sec}$$

En résumé, sur un relevé expérimental de la courbe $\Delta p_0 = f(t)$ d'un réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, le rapport :

$$\frac{\text{tg } \gamma_2}{\text{tg } \gamma_{2e}} = \frac{\omega'}{\omega'_{2e}}$$

détermine celui de la promptitude effective ω'_{2e} à la promptitude ω' caractéristique du tiroir de distribution. Il permet donc de se rendre compte dans quelle mesure la condition (13) :

$$\omega'_{2e} \gg \omega'$$

dont il a été question au chapitre VI, est plus ou moins satisfaite.

Relevés expérimentaux

Les figures 13 et 14 donnent des exemples de relevés de la courbe $\Delta p_0 = f(t)$ effectués le premier avec un régulateur

accéléro-tachymétrique, le second avec un régulateur tachymétrique à asservissement temporaire.

Mon intention n'est pas de discuter ici des résultats quantitatifs que l'on peut tirer de ces relevés, du point de vue de la mesure des promptitudes de réglage. Ils ont d'ailleurs été pris sur des groupes hydro-électriques de caractéristiques toutes différentes. Je désire seulement montrer que ces relevés sont bien qualitativement conformes aux prévisions du calcul, selon les graphiques des figures 11 et 12, et apportent de ce fait une confirmation expérimentale au bien-fondé des développements analytiques ci-dessus exposés.

Si l'on trace sur la figure 14 les tangentes qui déterminent les angles γ_2 et γ_{2e} dont il a été question à propos de la figure 11, on constate que la valeur du rapport :

$$\frac{\text{tg } \gamma_2}{\text{tg } \gamma_{2e}} = \frac{\omega'}{\omega'_{2e}} = 5,20$$

est pratiquement égale à celle :

$$\frac{\omega'}{\omega'_{2e}} = \frac{1,5}{0,286} = 5,25$$

adoptée pour le régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, choisi pour les exemples numériques des chapitres XIII et XIV. Le régulateur sur lequel a été effectué le relevé de la figure 14 satisfait donc à la condition (13) : $\omega'_{2e} \gg \omega'$ dont il a été question au chapitre VI, dans la même mesure que le précédent. Il se comporterait donc de la même façon que celui que j'ai choisi comme exemple, tant du point de vue de son pouvoir stabilisateur qu'à celui de sa rapidité de réponse, toutes choses étant par ailleurs égales.

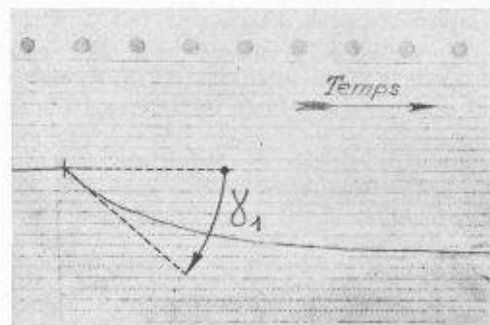


Fig. 13. — Intervention d'un ordre de réglage. Exemple de relevé de la courbe d'écart de réglage d'un régulateur accéléro-tachymétrique

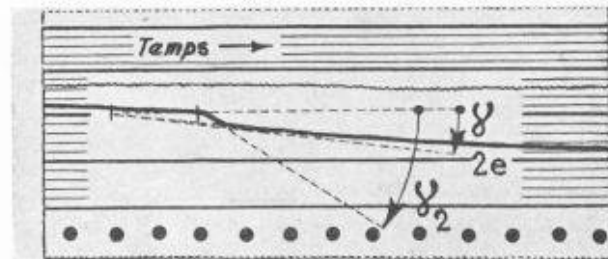


Fig. 14. — Intervention d'un ordre de réglage. Exemple de relevé de la courbe d'écart de réglage d'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire.

XIV. Conclusions

Du point de vue du *pouvoir stabilisateur*, j'ai montré que le réglage accéléro-tachymétrique correspondait à une *courbe de comportement* à fréquence variable (des oscillations de réglage) de *meilleure forme* que celle du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire (voir fig. 7). On peut toujours, pour une période déterminée des oscillations de réglage, opérer la mise au point de manière à assurer aux deux systèmes le même pouvoir stabilisateur; mais il ne faut pas oublier que la valeur de cette période varie, selon le régime de marche du groupe. Or, vis-à-vis d'oscillations de réglage de période ou plus petite ou plus grande que celle pour laquelle la mise au point a doté les deux systèmes du même pouvoir stabilisateur, le comportement du réglage tachymétrique avec asservissement temporaire évolue moins favorablement que c'est le cas pour le réglage accéléro-tachymétrique.

Du point de vue de la *rapidité de réponse*, le réglage accéléro-tachymétrique se révèle *supérieur* au réglage tachymétrique avec asservissement temporaire assurant, pour les mêmes caractéristiques de réglage, le même effet stabilisateur. Cette proposition reste vraie que la comparaison soit effectuée en considérant :

- une modification de la charge consommée, en l'absence de tout phénomène de coup de bélier;
- une modification de la charge consommée, en présence d'un coup de bélier;
- l'intervention d'un ordre de réglage.

Ceci provient de l'action de l'asservissement temporaire qui exerce une influence retardatrice sur la manœuvre de correction et qui conduit notamment à l'obligation de donner au régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, une promptitude effective moindre que celle du régulateur accéléro-tachymétrique, lorsque les deux systèmes doivent assurer le même effet stabilisateur.

Ces résultats ne sont pas nouveaux et l'expérience en a, me semble-t-il, bien témoigné. Probablement manquaient-ils, pour certains, de bases théoriques assez sûres qu'ils trouveront peut-être dans cet exposé.

Ces avantages que le réglage accéléro-tachymétrique présente, par rapport au réglage tachymétrique avec asservissement temporaire, sont d'autant plus marqués que ce dernier accuse un statisme momentané plus petit (condition (13) moins complètement satisfaite). Il est certain qu'en augmentant le statisme momentané d'un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire, au delà des valeurs que j'ai cru devoir admettre pour les exemples numériques traités, on rapproche ses qualités de celles du régulateur accéléro-tachymétrique, sans cependant *jamais les atteindre*. Je doute néanmoins que l'on puisse pousser bien plus loin le statisme momentané, sans souffrir d'inconvénients à d'autres occasions, spécialement en cas de perturbations plus importantes. C'est pourquoi je pense avoir respecté, notamment dans le choix des données des exemples numériques, mon désir d'éviter toute présentation tendancieuse aux yeux de mes lecteurs.

La qualité d'un régulateur dépend, non seulement du principe selon lequel il est établi, mais aussi de l'exécution de ses organes et il ne faut pas juger un système sur la base de telle réalisation dont le comportement s'éloignerait trop des prévisions théoriques.

Parmi les meilleurs constructeurs, l'on trouve des partisans de l'un et de l'autre des types de régulateurs envisagés, soit du fait de conviction personnelle ou simplement d'habi-

tude prise; mais tous, animés du même souci de progrès, s'appliquent à concevoir et à exécuter des appareils qui réalisent au plus près leurs conditions de fonctionnement optimum. Toutefois de telles considérations n'entrent pas dans le cadre de cette note et il revient aux utilisateurs de juger du degré de perfection auquel peut prétendre un accéléromètre et un asservissement temporaire.

Bien que j'aie à cet égard une préférence motivée par une longue expérience, je crois en avoir fait ici abstraction. J'ai admis que les dispositifs étudiés étaient de réalisation parfaite et j'ai cherché, à l'aide de développements purement mathématiques, exempts de toute autre influence, à établir le bilan des qualités que peuvent présenter les deux types de régulateurs, au sujet desquels on a déjà longuement controversé. Je souhaite ainsi avoir apporté quelque lumière sur les propriétés intrinsèques des deux systèmes en présence.

SOCIÉTÉ VAUDOISE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

(SECTION S. I. A.)

Rapport du président sur l'activité de la Société et de son comité durant l'exercice du 26 mars 1947 au 19 mars 1948

Notre société, au cours de l'année écoulée, a dû porter son effort dans deux domaines: l'activité interne et l'organisation des conférences et séances de discussion. Des dix séances et conférences, cinq seulement furent organisées par la S. V. I. A., les autres l'étant par l'E. P. U. L. ou des organisations qui nous ont aimablement invités à nous y associer. Nous les en remercions très vivement.

Le bilan des conférences strictement organisées par la S. V. I. A. est donc déficitaire quant au nombre. La raison en est que notre société, devenue organisation professionnelle, a vu ses tâches s'accroître beaucoup dans ce nouveau domaine. Il a donc fallu restreindre l'activité extérieure au profit de l'activité interne. On peut dire que dorénavant c'est cette dernière qui l'emportera, ce qui est normal. On pourrait regretter la situation d'antan où, parallèlement avec l'A³E²P. L., nous avions pour préoccupation principale de nous réunir en séance, périodiquement, et de nous entretenir de quelque sujet « autour d'une tasse de thé ». Mais les circonstances veulent que notre orientation soit plus nettement définie, que notre tâche soit de nous préoccuper en première ligne des questions professionnelles (techniques et artistiques), économiques et sociales. Seule organisation professionnelle paritaire, notre société est dans une situation particulière, en ce sens qu'elle ne peut se contenter d'étudier ces problèmes d'une façon unilatérale, mais qu'elle doit les considérer de deux points de vue au moins et trouver la solution qui donne satisfaction à chacun.

Ce changement d'orientation, déjà sensible maintenant, mais qui ira en s'accroissant, sépare donc nettement notre activité de celle de l'A³E²P. L. Loin de nuire à nos deux sociétés, ce fait les différenciera aux yeux de chacun. Elles poursuivront leur activité propre sans l'équivoque qui existe encore aujourd'hui au sujet de leurs buts qui, jusqu'ici, étaient censés être les mêmes.

Par l'adoption de ses nouveaux statuts et de ceux de son Conseil paritaire, la S. V. I. A. a procédé cette année à ce qu'on pourrait appeler une réforme de structure.