Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 84 (1958)

Heft: 5

Artikel: Le réglage d'un groupe hydro-électrique en marche isolée, exprimé avec le langage et les symboles de l'automatique

Autor: Cuénod, Michel / Gardel, André / Wahl, Jean

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-63482

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: 16.08.2025

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

84e année Lausanne, 1er mars 1958 N° 5

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'E.P.U.L. (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: † G. Epitaux, arch. à Lausanne
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: Cl. Grosgurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing; A. Gardel, ing.; E. d'Okolski, arch.; Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: A. Stucky, ing.
Membres: M. Bridel; R. Neeser, ing.; P. Waltenspuhl, arch.
Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

RÉDACTION
D. Bonnard, ing.
Rédaction et Edition de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS
1 an . . . . . Suisse Fr. 26.— Etranger. . Fr. 30.—
Sociétaires . . . » » 22.— » . . » 27.—
Prix du numéro . . . » » 1.60
Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande », N° II. 57 75, Lausanne.
Adresser toutes communications concernant abonnement, changements d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29. Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:
1/1 page. . . . . Fr. 275.—
1/2 » . . . . . » 140.—
1/4 » . . . . . » 70.—
1/8 » . . . . . » 35.—
Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Le réglage d'un groupe hydro-électrique en marche isolée, exprimé avec le langage et les symboles de l'automatique, par Michel Cuénod, Dr ès sciences techniques, André Gardel, Dr ès sciences techniques, et Jean Wahl, ingénieur
Société genevoise des ingénieurs et des architectes : Rapport du président
Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Rapports des commissions et délégations
Divers — Les Congrès — Carnet des concours
Documentation générale — Documentation du bâtiment — Service de placement

LE RÉGLAGE D'UN GROUPE HYDRO-ÉLECTRIQUE EN MARCHE ISOLÉE, EXPRIMÉ AVEC LE LANGAGE ET LES SYMBOLES DE L'AUTOMATIQUE [1]

par

MICHEL CUÉNOD
Dr ès sciences techniques

ANDRÉ GARDEL
Dr ès sciences techniques

JEAN WAHL
ingénieur

I. Introduction

Le développement du réglage de vitesse des turbines hydrauliques et à vapeur est étroitement lié à l'élaboration de la théorie classique des réglages automatiques. Pour illustrer cette affirmation, qu'il nous suffise de faire allusion aux remarquables travaux du professeur Stodola. Les réseaux électriques sont en effet parmi les ensembles les plus importants à régler automatiquement, tant par l'ampleur des puissances mises en jeu que par la complexité des organes de réglage ; les exploitants des réseaux électriques peuvent considérer à juste titre avoir fait œuvre de précurseurs dans le domaine de l'« automation », aujourd'hui si actuel.

Toutefois, la résolution des problèmes que pose le réglage des turbines a été souvent le résultat du travail individuel de spécialistes, abordant ce travail avec, chacun, leurs notations et leurs méthodes d'analyse ; ce manque d'unité rend parfois difficile la compréhension des exposés présentés par ces spécialistes.

Il faut relever l'effort de normalisation entrepris à ce sujet, en particulier en Suisse par la « Commission d'étude pour le réglage des grands réseaux électriques ». Il est à souhaiter que cet effort se poursuive en étroite collaboration avec les autres milieux qui s'occupent d'automatique. Le réglage des turbines n'est en effet qu'un cas particulier de la théorie générale des servomécanismes, théorie qui, dans d'autres domaines, a pris un essor extraordinaire. La différence entre cette nouvelle théorie et la théorie classique des réglages

[1] Communication présentée à l'occasion des deuxièmes journées d'information de l'Association suisse pour l'automatique (ASPA) le jeudi 5 septembre 1957, à Zurich.

automatiques peut être essentiellement caractérisée comme suit :

— emploi d'un symbolisme et de schémas fonctionnels qui éclairent les problèmes de réglage sous un jour nouveau ;
— utilisation de nouveaux principes de stabilisation constitués en particulier par des chaînes d'anticipation et des correcteurs de stabilité non linéaires ;
— utilisation de méthodes modernes de calcul faisant un usage systématique du calcul opérationnel, de l'analyse impulsionnelle, de nouveaux critères de stabilité et de l'analyse statistique ;
— mise à profit des perspectives ouvertes par les calculateurs électroniques tant analogiques qu'arithmétiques.

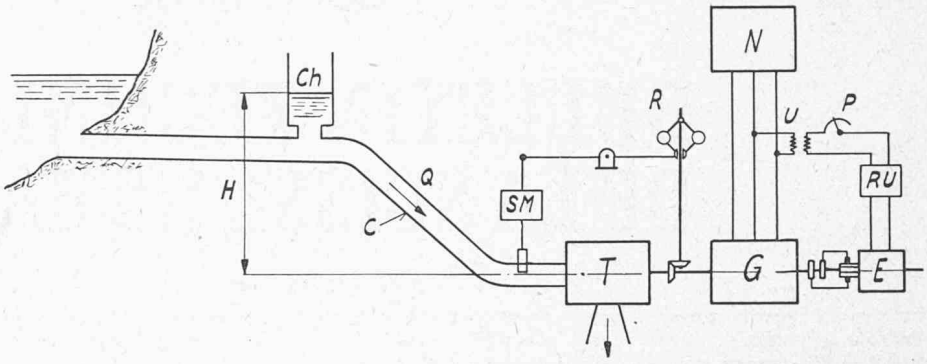


Fig. 1. — Principe de la disposition du réglage d'un groupe hydro-électrique.

Une « action en retour » de la théorie moderne des servo-mécanismes sur la théorie classique des réglages automatiques paraît très souhaitable ; l'interpénétration de ces théories se révèle particulièrement féconde ; des dispositifs de réglage modernes, qui ont fait leurs preuves dans d'autres domaines, peuvent avantageusement remplacer certains systèmes de réglage classiques, aujourd'hui dépassés. Vice versa, l'expérience acquise dans le domaine des réglages des turbines peut être utilement mise à profit ailleurs.

Un des buts de l'ASPA est précisément de faciliter les échanges d'expériences et de connaissances entre les différents spécialistes des divers domaines d'application de l'automatique.

Le but de notre exposé est de traduire dans le langage et avec les moyens actuels de l'automatique le problème classique du réglage de vitesse des turbines hydrauliques et de faire ressortir certains nouveaux aspects qui résultent de cette méthode moderne d'aborder ce problème.

La *figure 1* représente le principe de la disposition d'un groupe hydro-électrique en marche isolée avec chambre d'équilibre. La turbine T est alimentée, par l'intermédiaire d'une galerie sous pression, d'une chambre d'équilibre et d'une conduite forcée, à partir d'un bassin d'accumulation de grande capacité. Elle entraîne l'alternateur G qui débite son énergie sur le réseau N. La vitesse de rotation du groupe est mesurée par le régulateur tachymétrique R qui commande au moyen du servo-moteur SM l'ouverture de la turbine. La tension U est mesurée par le régulateur de tension RU qui commande l'excitation de l'excitatrice E.

Nous nous proposons de rappeler les relations fonctionnelles qui relient les différentes variables caractérisant ce dispositif de réglage, de montrer comment ces relations peuvent être mises en évidence au moyen de « diagrammes fonctionnels » et comment ces diagrammes permettent de déduire les conditions de stabilité, d'indiquer comment le principe des chaînes d'anticipation peut être appliqué dans notre cas particulier et de dégager certaines conclusions que l'on peut en tirer pour le choix de la valeur du moment d'inertie des masses tournantes du groupe et du volume de la chambre d'équilibre.

Nous laissons de côté le problème de la détermination de la variation de la grandeur à régler à la suite d'une perturbation agissant sur le dispositif de réglage ainsi que celui de la « précision » du réglage compte tenu du caractère aléatoire des fluctuations de charge. Il est prévu d'aborder ces sujets à une autre occasion dans le cadre de l'ASPA.

II. Détermination des relations fonctionnelles entre les différentes grandeurs de réglage d'un groupe hydro-électrique

Les huit équations différentielles qui relient les neuf variables (une variable libre : la charge, et huit variables semi-libres) du circuit de réglage pris en considération, sont les suivantes en première approximation (1 à 5) [1] :

1. Turbine : $m_t = q + \frac{1}{2}(h + s) + nk_{nmt}$.
2. Masses tournantes : $T_a \frac{dn}{dt} = m_t - m_e$.
3. Le réseau : $m_e = k + nk_{nme} + uk_{ume}$.
4. Dispositif de réglage de la tension :
$$u = n(k_{nu} + K_{nu}) + hK_{hu}.$$
5. Dispositif de réglage de la vitesse :
$$\frac{dl}{dt} = -\left(b\frac{dn}{dt} + \frac{n}{T_r}\right).$$
6. Vannage : $q = l + \frac{1}{2}(h + s)$.
7. Chambre d'équilibre :
$$h_o\left(T_g^2 \frac{d^2h}{dt^2} + 2p_oT_g\frac{dh}{dt} + h\right) = -\left(T_g\frac{dq}{dt} + 2p_oq\right).$$
8. Conduite forcée : $s = -2\,T_c\frac{dq}{dt}$.

Dans ce système d'équations, les paramètres constituent un cas particulier du système de paramètres défini par le professeur Borel dans son exposé (6) ; les variables sont exprimées sous forme d'écart relatif par rapport au régime initial pris comme régime de référence. Les symboles de ce système ont la signification suivante :

n = Variation relative de la vitesse (grandeur à régler).
k = Variation relative de la charge (perturbation).
l = Variation relative de l'ouverture de la turbine (mesurée en variation de puissance de la turbine).

[1] Les chiffres entre parenthèses se réfèrent à la bibliographie donnée en fin d'article.

q = Variation relative du débit de l'eau en aval de la conduite.
s = Surpression de l'eau due au coup de bélier en aval de la conduite forcée.
h = Variation du plan d'eau dans la chambre d'équilibre.
m_t = Variation relative du couple moteur.
m_e = Variation relative du couple résistant.
u = Variation relative de la tension aux bornes de l'alternateur.
T_a = Constante d'accélération du groupe $= \frac{PD^2\, n^2}{366N}$ (s),
PD^2 = en tm².
N = Puissance nominale du groupe en kW.
n = Vitesse nominale en t/mn.
T_c = Constante de temps de la conduite forcée $= \frac{L_c v_o}{2_g H_o}$ (s) avec :
L_c = Longueur de la conduite (m).
v_o = Vitesse nominale de l'eau dans la conduite pour la puissance nominale (m/s).
H_o = Hauteur statique du plan d'eau (m).
g = Accélération de la pesanteur = 9,81 (m/s²).
T_g = Temps caractéristique de la galerie $= \sqrt{\frac{L_g F_c}{g F_g}}$ avec :
L_g = Longueur de la galerie (m).
F_c = Section de la chambre d'équilibre (m²).
F_g = Section de la galerie d'amenée (m²).
p_o = Perte de charge relative dans la galerie d'amenée, $(P_o + E_o)/Z_*$.
h_o $= \frac{H_o}{Z_*}$ = Hauteur relative.
Z_* = Grandeur de référence $= Q_o \sqrt{\frac{L_g}{g F_c F_g}}$ (m).
Q_o = Débit de régime (m³/s).
P_o = Perte de charge en valeur absolue (m).
E_o = Hauteur représentative de l'énergie cinétique à l'insertion de la chambre pour le débit nominal (m).
T_r = Constante de temps du dispositif de réglage (s).
$T_r = \tau'$ = Promptitude de réglage, pour un réglage avec accéléromètre (s).
$T_r = \delta_t . T_s$ pour un réglage avec statisme passager (s).
δ_t = Statisme passager.
T_s = Temps de relaxation du dash-pot (s).
b = Facteur de stabilisation.
$b = \frac{m}{T_r}$ pour une stabilisation avec accéléromètre (m = dosage accélérométrique).
$b = \frac{1}{\delta_t}$ pour une stabilisation avec asservissement passager.
k_{nme} = Sensibilité de la charge aux écarts de fréquence (pente aux environs du point de régime de la courbe du couple résistant en fonction de la vitesse).
k_{ume} = Sensibilité de la charge aux écarts de tension (pente aux environs du point de régime de la courbe du couple résistant en fonction de la tension).
k_{nmt} = Pente aux environs du point de régime de la courbe du couple moteur en fonction de la vitesse.
k_{nu} = Sensibilité du régulateur de tension aux écarts de fréquence.
K_{nu} = Coefficient d'asservissement de la tension à la fréquence.
K_{hu} = Coefficient d'asservissement de la tension au niveau d'eau.

La *figure 2* représente le diagramme fonctionnel de réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique, avec indication des liaisons entre les différents organes de réglage à savoir :

— la turbine ;
— les masses tournantes ;

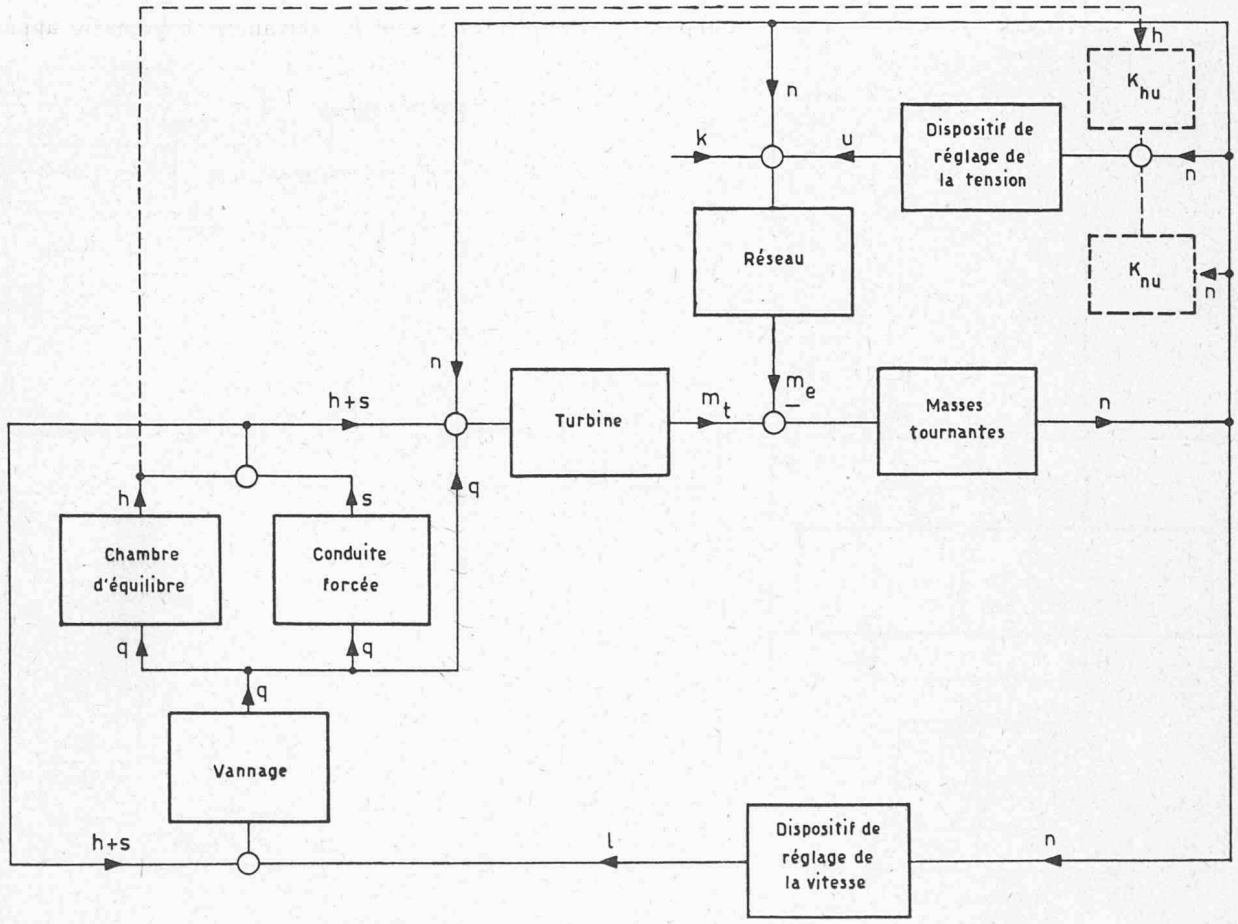


Fig. 2. — Diagramme fonctionnel détaillé du réglage d'un groupe hydro-électrique, avec indication des organes et des grandeurs de réglage.

— le réseau ;
— le dispositif de réglage de la tension ;
— le dispositif de réglage de la vitesse ;
— le vannage ;
— la chambre d'équilibre ;
— la conduite forcée.

Sur ce diagramme sont également représentées les liaisons d'asservissement de la tension en fonction de la fréquence et en fonction du niveau d'eau dans la chambre d'équilibre. Nous reviendrons par la suite sur l'opportunité de ces asservissements.

La *figure 3* représente ce même diagramme fonctionnel dans lequel ont été portées, écrites sous forme opérationnelle, les équations qui relient les différentes variables de ce système de réglage. Ce diagramme donne sous une forme claire et ramassée toutes les informations nécessaires pour analyser les conditions de marche du système de réglage pris en considération.

En résolvant partiellement le système d'équations donné ci-dessus, on peut éliminer six des neuf variables, ce qui conduit au diagramme fonctionnel représenté par la *figure 4a*, avec les trois organes de réglage suivants :

— *Dispositif de réglage de la vitesse* (grandeur d'entrée : vitesse n ; grandeur de sortie : ouverture l de la turbine).
— *Dispositif hydraulique* (galerie d'amenée et chambre d'équilibre ou canal d'amenée, conduite forcée, turbine ; grandeur d'entrée : ouverture l ; grandeur de sortie : couple moteur m_t).
— *Dispositif électrique* (générateur avec son réglage de tension, réseau et masses tournantes ; grandeurs d'entrée : couple moteur m_t et variation k de la charge du réseau ; grandeur de sortie : vitesse n).

Ce système est caractérisé par les quatre fonctions de transfert g, et réponses indicielles G suivantes dans le cas particulier où on peut admettre que le niveau d'eau en amont de la conduite forcée est constant.

— *Dispositif de réglage de la vitesse*

$$g_{nl} = -\left(b + \frac{1}{pT_r}\right)$$

$$G_{nl} = -\left(b + \frac{t}{T_r}\right)$$

— *Dispositif hydraulique*

$$g_{lm_t} = \frac{1 - 2pT_c}{1 + pT_c}$$

$$G_{lm_t} = 1 - 3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

— *Dispositif électrique*

$$g_{m_t n} = g^{*}_{kn} = \frac{1}{pT_a + a}$$

$$G_{m_t n} = G^{*}_{kn} = \frac{1}{a}\left(1 - e^{-\frac{at}{T_a}}\right)$$

avec a = coefficient d'auto-réglage = $k_{nme} - k_{nmt}$.

Par l'astérisque que portent g_{kn}^{*} et G_{kn}^{*}, nous voulons signifier qu'il s'agit de la fonction de transfert et de la réponse indicielle de la fréquence par rapport à la charge dans le cas où le circuit de réglage est ouvert.

La *figure 4 b* représente le diagramme fonctionnel du système de réglage ainsi réduit avec l'indication de ses réponses indicielles ; la *figure 4 c* représente ce

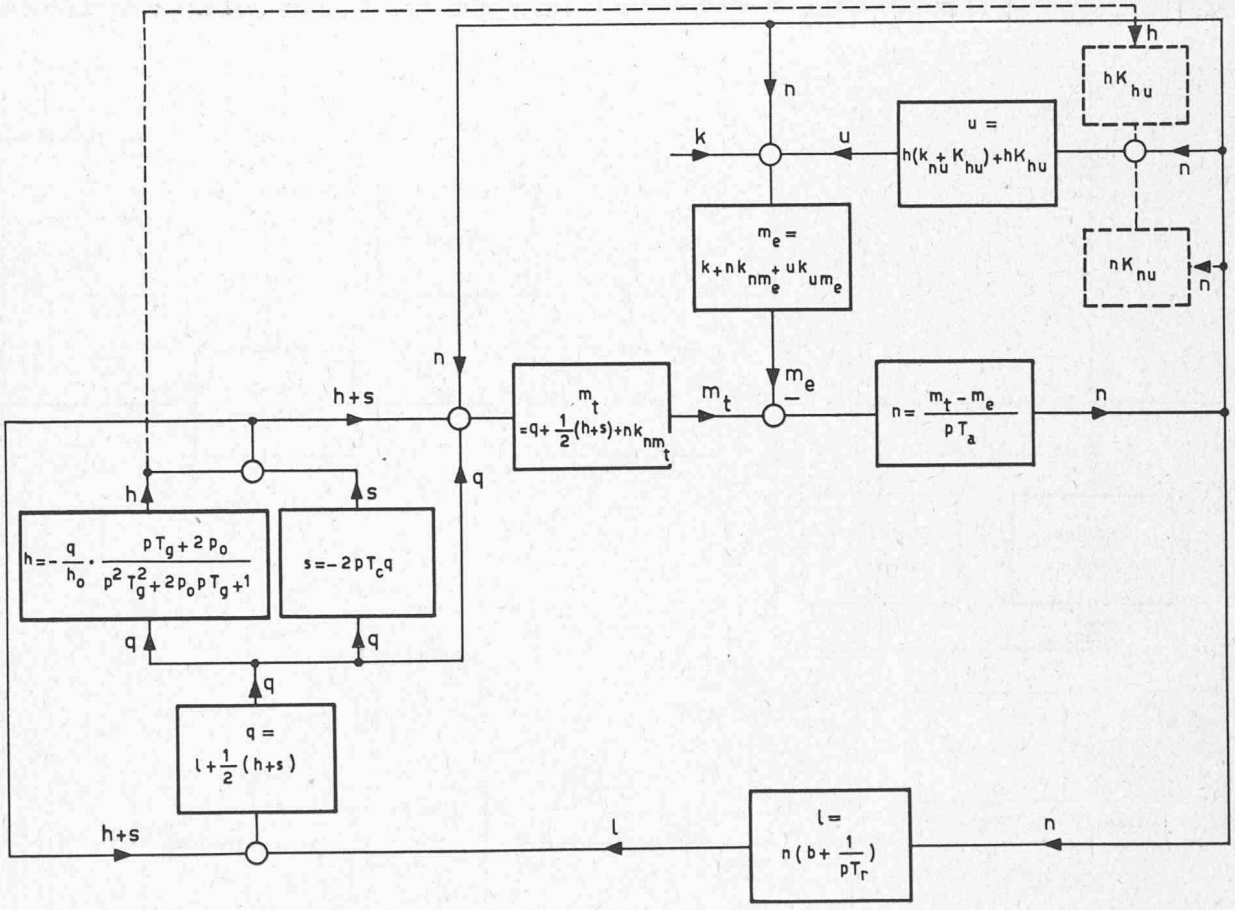


Fig. 3. — Diagramme fonctionnel détaillé du réglage d'un groupe hydro-électrique, avec indication des relations fonctionnelles.

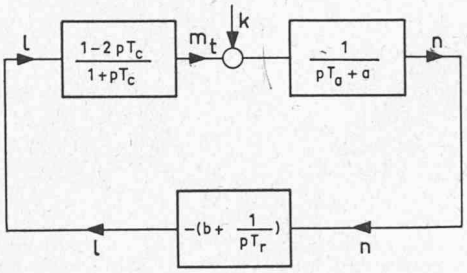


Fig. 4 a. — Diagramme fonctionnel avec l'indication des fonctions de transfert.

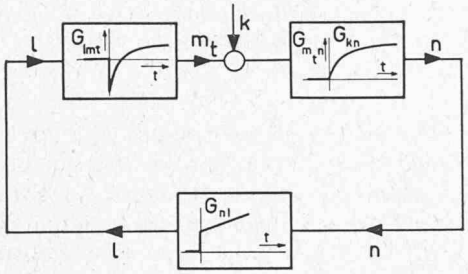


Fig. 4 b. — Diagramme fonctionnel avec l'indication des réponses indicielles.

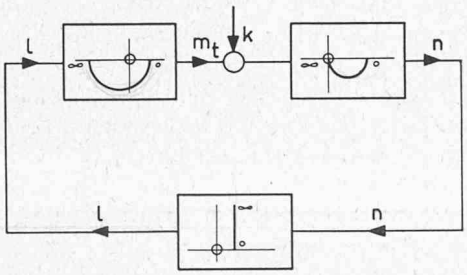


Fig. 4 c. — Diagramme fonctionnel avec l'indication des réponses harmoniques.

Fig. 4. — Diagramme fonctionnel résumé du réglage d'un groupe hydro-électrique.

même diagramme fonctionnel sur lequel ont été indiquées les réponses harmoniques obtenues en remplaçant p par $j\omega$ dans l'expression des fonctions de transfert.

Le système des huit équations différentielles se réduit aux deux équations suivantes :

$$\begin{cases} n = l g_{lmt} g_{mtn} + k g^{*}_{kn} ; \\ l = n g_{nl}. \end{cases}$$

En éliminant l entre ces deux équations, on obtient pour finir la fonction de transfert du circuit de réglage fermé qui caractérise les variations de la grandeur à régler.

$$n = k g_{kn} = k \frac{g^{*}_{kn}}{1 - g_{nl} g_{lmt} g_{mtn}}.$$

III. Détermination des conditions de stabilité

Les conditions de stabilité sont déterminées par les racines du dénominateur de la fonction de transfert du circuit de réglage fermé. En posant ce dénominateur égal à zéro, on obtient l'équation caractéristique du système, à savoir :

$$1 - g_{nl} g_{lmt} g_{mtn} = 0.$$

Cette équation caractéristique prend la forme suivante dans les deux cas que nous avons pris en considération :

— Compte tenu des variations du plan d'eau en amont de la conduite forcée :

$$1 + \left(b + \frac{1}{pT_r}\right) \cdot 2 \left(\frac{1 + pT_c + A g_{qh}}{2(1 + pT_c) - g_{qh}} - \frac{3}{2} \frac{pT_c}{1 + pT_c}\right) \cdot \frac{1}{pT_a + a} = 0$$

avec $A = 1 - K_{hu}$

et $$g_{qh} = \frac{1}{h_o} \frac{pT_g + 2p_o}{p^2 T_g^2 + 2pT_g p_o + 1}$$

— Dans l'hypothèse que le niveau du plan d'eau en amont de la conduite forcée est constant :

$$1 + \left(b + \frac{1}{pT_r}\right) \cdot \frac{1 - 2pT_c}{1 + pT_c} \cdot \frac{1}{pT_a + a} = 0.$$

Il est facile de contrôler qu'en posant $g_{qh} = 0$ dans la première expression, on retrouve bien la deuxième expression.

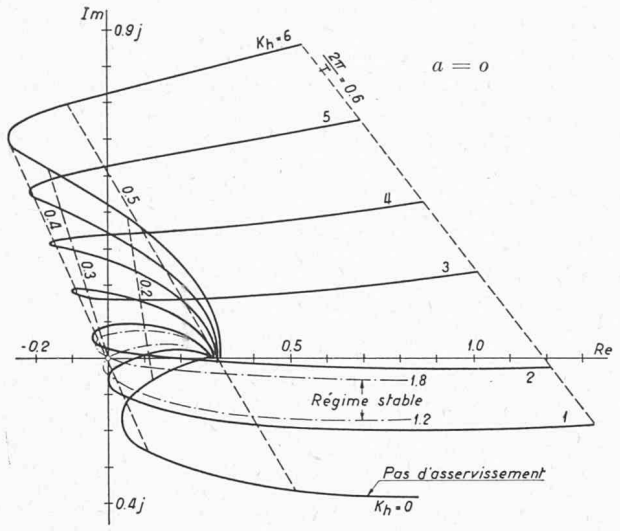
La détermination des conditions de stabilité s'effectue en appliquant à cette équation caractéristique un des critères de stabilité connus : Hurwitz, Nyquist, Leonhard, ou Routh.

Dans le circuit de réglage de nombreux éléments sont en quelque sorte imposés par les données de l'installation. Une modification de certaines de ces données, par exemple de la section de la chambre d'équilibre ou du moment d'inertie des masses tournantes, eu égard aux conditions de stabilité, peut conduire à un renchérissement appréciable de l'installation et ne paraît pas justifié lorsque cette stabilité peut être obtenue par un dispositif de réglage adéquat. De plus en plus, on considère que les données de l'installation doivent être choisies de la façon la plus économique, sans tenir compte des conditions de stabilité ; c'est ensuite aux spécialistes des réglages automatiques de faire en sorte que le réglage soit stable et réponde aux performances qui sont attendues de lui ; ils peuvent y arriver en utilisant les modes de stabilisation actuellement mis au point, en particulier le principe des *chaînes d'anticipation*, principe qui consiste à créer des asservissements judicieux, permanents ou passagers qui courtcircuitent une partie de la chaîne de réglage ; on peut prouver que ces asservissements suppriment la cause même de l'instabilité.

Dans le cas du réglage de vitesse des turbines, les paramètres à disposition du spécialiste de réglage sont les suivants :

— constante de temps du dispositif de réglage T_r ;
— facteur de stabilisation b ;
— facteur d'asservissement de la tension à la fréquence K_{nu} (qui détermine le coefficient d'autoréglage a) ;
— facteur d'asservissement de la tension au niveau d'eau K_{hu}.

Pour réduire les écarts de réglage à un minimum, on est conduit à choisir T_r aussi faible que possible ; il en résulte une valeur optimum de b. Une étude théorique qui a été confirmée ensuite expérimentalement a conduit à la conclusion qu'en créant une chaîne d'anticipation qui asservit la tension à la fréquence et au niveau d'eau dans la chambre d'équilibre, on peut garantir une marche stable pour tous les cas qui peuvent pratiquement se poser (1 à 5).



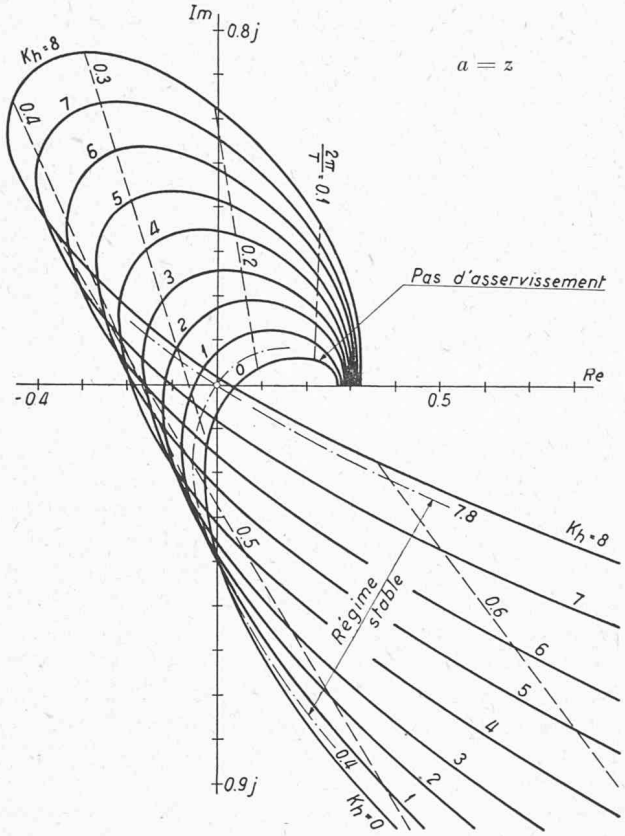


Fig. 5. — Détermination des conditions de stabilité à l'aide des courbes Leonhard.

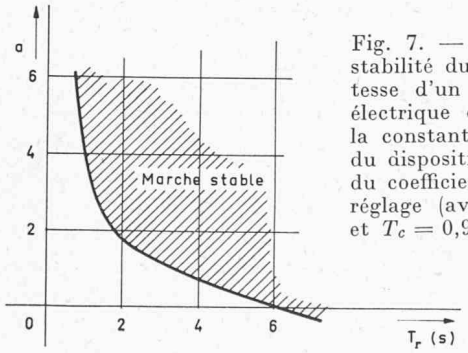


Fig. 7. — Conditions de stabilité du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en fonction de la constante de temps T_r du dispositif de réglage et du coefficient « a » d'auto-réglage (avec $T_a = 7{,}45$ s et $T_c = 0{,}9$ s).

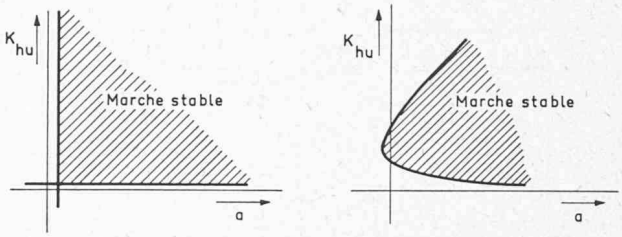


Fig. 6 a. — Diagramme lorsque les périodes propres des oscillations du réglage de vitesse et celles du plan d'eau dans la chambre d'équilibre sont très éloignées l'une de l'autre.

Fig. 6 b. — Diagramme lorsque les périodes propres des oscillations du réglage de vitesse et celles du plan d'eau dans la chambre d'équilibre sont très proches l'une de l'autre.

Fig. 6. — Conditions de stabilité du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en fonction des paramètres d'asservissement.

Lorsque l'équation caractéristique a pu être déterminée explicitement, l'utilisation du critère de Leonhard présente certains avantages. Il consiste à chasser les dénominateurs, ce qui conduit à une équation caractéristique du 6e degré, à poser $p = j\omega$, à construire la courbe figurative obtenue en donnant différentes valeurs à ω et à contrôler que cette courbe « entoure » l'origine.

Les *figures 5 a* et *5 b* représentent les familles de courbes obtenues pour différentes valeurs du paramètre $K_h \equiv K_{hu}$. Nous voyons que, pour que la courbe entoure l'origine et que la condition de stabilité soit ainsi satisfaite, le facteur d'asservissement doit être compris entre deux valeurs bien déterminées. Ces valeurs sont très proches lorsque le coefficient d'auto-réglage est faible, elles s'éloignent l'une de l'autre pour des valeurs plus élevées de ce coefficient.

Les *figures 6* représentent les conditions de stabilité en fonction des coefficients d'asservissement de la tension au niveau d'eau et à la fréquence. La *figure 6 a* concerne le cas classique pour lequel la période propre des oscillations du réglage de vitesse (15 à 20 s) peut être considéré comme négligeable par rapport à celle des oscillations du plan d'eau dans la chambre d'équilibre (5 à 10 mn). La zone de stabilité est délimitée dans ce cas par deux droites parallèles aux axes. Ces droites sont définies par les conditions suivantes :

— *Pour le réglage de vitesse* (avec niveau d'eau constant) :

$$[T_c(a - 2b) + T_a]\,[T_r(a + b) - 2T_c] - T_aT_c > 0.$$

Cette inégalité peut être résolue par rapport à T_r ; on obtient

$$T_r > \frac{4bT_c^2 - 3T_cT_a - 2aT_c^2}{2b^2T_c + b(aT_c - T_a) - a^2T_c - aT_a}.$$

En dérivant cette expression par rapport à b, et en annulant cette dérivée, on obtient la valeur optimum b_{opt} correspondant à la valeur minimum de T_r satisfaisant cette inégalité :

$$b_{opt} = \frac{2aT_c + 3T_a - \sqrt{3\,T_c^2 + 6aT_aT_c}}{4T_c}.$$

En introduisant cette valeur dans l'expression de T_r, on peut déterminer les valeurs du couple des paramètres a et T_r correspondant à la limite de la stabilité. Ces valeurs sont représentées par la *figure 7* dans le cas particulier où $T_a = 7{,}45$ s et $T_c = 0{,}9$ s. Nous voyons que si $a = 0$, T_r doit être supérieur à 6,25 s. Par contre, si $a = 2$, la valeur limite de T_r se réduit à 1,7 s, ce qui met en évidence la grande amélioration des conditions de stabilité que l'on obtient en augmentant le coefficient d'auto-réglage par un asservissement de la tension à la fréquence.

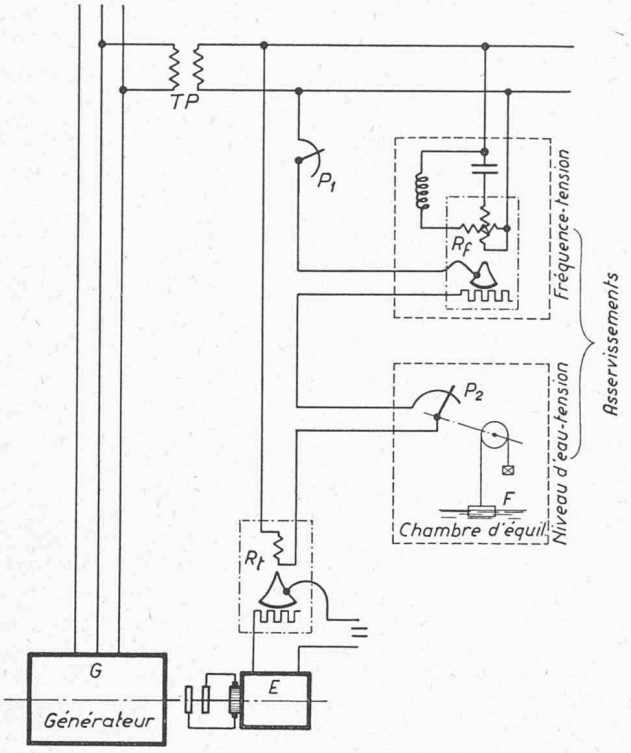


Fig. 8. — Schéma de principe des asservissements de la tension en fonction de la fréquence d'une part, et du niveau d'eau d'autre part.

— *Pour la chambre d'équilibre* (avec réglage de vitesse instantané) :

$$K_{hu} > 1 - 2p_o h_o = 1 - \frac{F_c}{F_T}.$$

F_T = section de la chambre donnée par la formule de Thoma :

$$F_T = \frac{Q^2 L_g}{(P_o + E_o)\, H_o 2g\, F_g}.$$

Lorsque l'on supprime l'asservissement au niveau d'eau, on retrouve la condition classique de Thoma :

$$2p_o h_o - 1 > 0$$

à savoir

$$F_c > \frac{Q^2\, Lg}{(P_o + E_o)\, H_o 2gFg}.$$

La *figure 6 b* se rapporte au cas où les périodes des deux oscillations sont proches l'une de l'autre. Nous voyons que la zone de stabilité prend grosso modo la forme d'un quadrant renversé et dans ce cas il existe pour chaque valeur de « *a* » une valeur optimum du coefficient d'asservissement K_{hu}. Si cet asservissement est trop fort, ou trop faible, le réglage redevient instable.

La *figure 8* montre comment les asservissements de la tension peuvent être pratiquement réalisés. Il suffit que la résistance de réglage d'un régulateur de fréquence R_f et le rhéostat P_2 entraîné par un flotteur mesurant le niveau d'eau dans la chambre d'équilibre soient insérés dans le circuit de mesure du régulateur de tension, en série avec le potentiomètre P_1 permettant d'ajuster à la main la tension aux bornes de l'alternateur. Il est à remarquer que si on bloque le régulateur de tension, la tension augmente avec le carré, voire avec le cube de la vitesse si les excitatrices principale et auxiliaire sont en bout d'arbre. Il suffit de *retarder* l'action du régulateur de tension pour obtenir un asservissement.

Nous avons pris en considération le cas le plus défavorable de marche sur une charge ohmique. Si la charge est constituée par des moteurs, la puissance qu'ils consomment est fonction non de la tension mais de la fréquence. Il faut dans ce cas asservir *la vitesse* au niveau d'eau.

Pour que la tension et la fréquence soient indépendantes des variations permanentes du plan d'eau il suffit de rendre passager leur asservissement en fonction du niveau d'eau.

L'efficacité de la stabilisation par asservissement de la tension au niveau d'eau a été confirmée expérimentalement lors des essais qui ont lieu en décembre 1951 et en juin 1952 à la centrale d'Oelberg dans le canton de Fribourg, sous la direction du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de Lausanne. Cette centrale est équipée d'une chambre d'équilibre différentielle. Lors des essais les orifices situés à la base du puits de la chambre ont été obturés, ce qui a réduit la section effective de cette chambre dans la proportion de 40 à 1 ; la section du puits est alors environ de six fois inférieure à la section minimum donnée par la condition dite de Thoma, pour obtenir une marche stable. Malgré les conditions défavorables de marche en régime séparé sur une charge purement ohmique, un régime parfaitement stable a été obtenu.

La *figure 9* représente les enregistrements de la fréquence et du vannage relevés en juin 1952. Ainsi que le montrent les courbes supérieures, lorsque les coefficients d'asservissement étaient correctement choisis, un régime stable se rétablissait spontanément, même si on troublait passagèrement la marche.

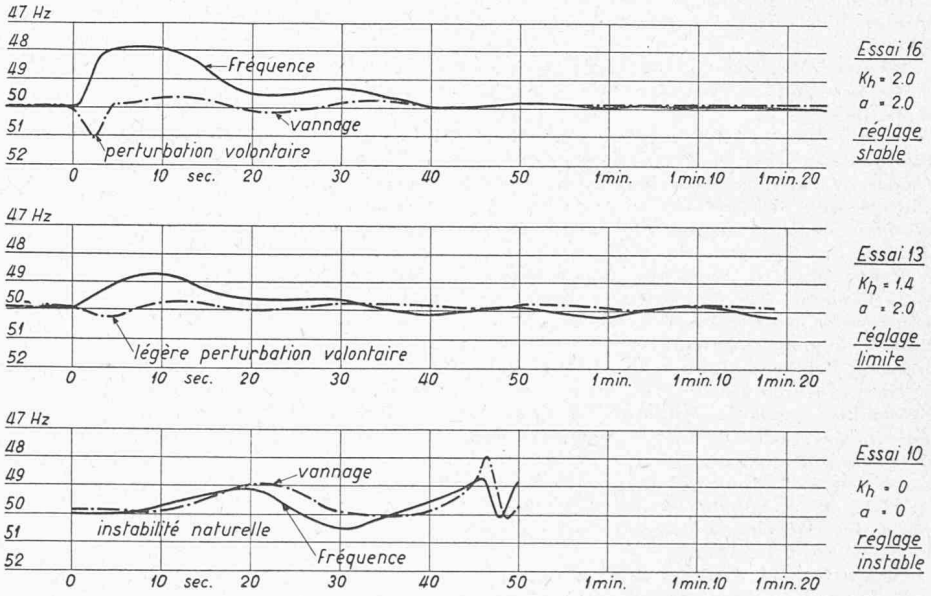


Fig. 9. — Enregistrement de la fréquence et du vannage lors des essais d'Oelberg (juin 1952).

IV. Conclusion

Les performances des régulateurs de vitesse et de tension en l'état actuel de leur développement satisfont entièrement aux conditions normales d'exploitation et cela d'autant plus qu'en règle générale le groupe est en marche en parallèle avec d'autres centrales ; le problème de la stabilité de la chambre d'équilibre et du réglage de vitesse se trouve alors ipso facto résolu (7). Cependant, il faut toujours prendre en considération le cas exceptionnellement défavorable de marche sur un réseau isolé de caractère ohmique et un perfectionnement des régulateurs de vitesse, en augmentant par exemple leur fréquence propre, n'améliorerait que faiblement la stabilité de marche. Nous avons vu que cette stabilité pouvait être aisément obtenue en faisant usage du principe des chaînes d'anticipation par un dosage judicieux de l'asservissement de la tension au niveau d'eau d'une part et à la fréquence d'autre part. Cet asservissement supprime la cause même de l'instabilité en agissant directement sur la charge électrique. Il supprime la nécessité d'alourdir le rotor de l'alternateur ou d'agrandir la section de la chambre d'équilibre pour tenir compte des conditions de stabilité, ce qui peut conduire à d'appréciables économies.

Ce mode de stabilisation met en évidence la nécessité de ne pas isoler une partie du circuit de réglage, mais de traiter le problème dans son ensemble, ce qui permet de réaliser des asservissements entre des éléments du circuit de réglage qui paraissent très éloignés (niveau d'eau dans la chambre d'équilibre et charge d'un réseau électrique). Ainsi le dimensionnement de la chambre d'équilibre peut-il être facilité par le recours à un dispositif électrique.

Cet exemple montre la nécessité d'une collaboration toujours plus étroite entre les ingénieurs qui appartiennent à des disciplines différentes et qui apportent leur concours à la réalisation d'une œuvre commune.

BIBLIOGRAPHIE

1. M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilisation des oscillations du plan d'eau dans la chambre d'équilibre.* Bulletin technique de la Suisse romande, 1950, nº 16.
2. M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilité de la marche d'une centrale hydro-électrique avec chambre d'équilibre, compte tenu des caractéristiques dynamiques du réglage de vitesse.* Bulletin technique de la Suisse romande, 1952, nº 15.
3. M. Cuénod et A. Gardel : *Essai de stabilisation du réglage d'un groupe hydro-électrique.* Bulletin technique de la Suisse romande, 1953, nºs 16 et 17.
4. M. Cuénod et A. Gardel : *Nouveau procédé pour la stabilisation de la marche de centrales hydro-électriques avec chambre d'équilibre. Etude théorique et résultats expérimentaux.* La Houille Blanche, juin 1954.
5. R. Keller : *La stabilisation du réglage de la vitesse des groupes générateurs, à charge indépendante de la fréquence.* Revue Brown-Boveri, juin-juillet 1947.
6. L. Borel : *Essai de systématisation de l'étude du réglage d'un groupe hydro-électrique.* Bulletin technique de la Suisse romande. (A paraître incessamment.)
7. J. Calame et D. Gaden : *De la stabilité des installations munies de chambre d'équilibre.* Schw. Bauzeitung, 30 juillet 1927.

Adresse des auteurs :

M. Cuénod et J. Wahl, Société Générale pour l'Industrie, 12, rue Diday, Genève.

A. Gardel, ingénieur-conseil, 10, Av. de la Gare, Lausanne.

SOCIÉTÉ GENEVOISE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Rapport du président présenté le 27 janvier 1958 à la 110e assemblée générale clôturant l'exercice 1957 de la section genevoise de la S.I.A.

1. Activité propre à l'ensemble de notre section

Les séances ordinaires suivantes ont été organisées en 1957 :

Janvier : Conférence du colonel Privat sur quelques problèmes de la défense nationale à l'occasion de l'assemblée générale.

Février : M. Pierre Bouffard, directeur du Musée d'Art et d'Histoire, nous a entretenus de « La naissance de l'art moderne ».

Mars : « La recherche technique dans l'industrie de l'automobile », par M. Fernand Piccard, chef du service des études de la Régie nationale des automobiles Renault, et « Les grands travaux entrepris par les Pays-Bas dans le domaine de la protection des eaux », par M. le professeur Janzen, de l'Université de Delft et directeur du plan Delta.

Avril : M. J.-L. Biermann nous a parlé des « Autoroutes et urbanisme aux Etats-Unis ». Puis, en commun avec l'Interassar, nous avons eu le privilège d'entendre M. Adrien Spinnetta nous entretenir du sujet « Programme et besoin français, l'industrialisation des bâtiments ».

Enfin, toujours en avril, vous avez été convoqués à l'assemblée générale ordinaire de l'Association genevoise pour la navigation fluviale et vous avez entendu un exposé de notre collègue, M. Jacques Weber, ingénieur cantonal, sur le sujet « Liaison navigable Rhône-Léman ».

Mai : M. J. Cauchetier, ingénieur E.C.P., nous a fait le point du « Développement actuel de la métallisation et de la plastication en France ».

Septembre : M. Georges Bréra a introduit une discussion nourrie sur le sujet « Aménagement routier de la ville et du canton de Genève ».

Octobre : Une séance avec les dames nous a réunis autour de notre ancien président central, M. Eric Choisy, qui nous a entretenus des « Conséquences sociales de l'automation ».

Novembre : Sous le coup du vol des premiers « satellites artificiels », M. Pierre Bouvier nous a évoqué quelques problèmes les concernant.

Décembre : En commun avec la Classe d'industrie et de commerce de la Société des Arts, nous avons présenté trois conférenciers : MM. Jean Olivet, Emilio Kronauer et Roger Firmenich, qui nous ont entretenus de quelques problèmes des industries du bâtiment, de la métallurgie et chimique à Genève.

Votre comité s'est réuni dix fois, afin d'examiner par le menu l'activité de notre section et s'est efforcé de la conduire dans le droit chemin, ce qui n'est pas toujours facile.

Les délégués de notre section ont été rassemblés deux fois, la première en mai pour examiner et approuver le rapport de gestion du Comité central ; la seconde fois, en septembre, pour préparer l'assemblée générale de Lucerne. A cette occasion, ils ont pu entendre un rapport détaillé sur le projet d'institution de prévoyance du Comité central par le secrétaire général adjoint, M. Buclin.

Votre comité, à la suite d'une demande de M. le professeur Chodat, doyen de la Faculté des sciences à l'Université, a pris l'initiative de réunir, outre un