

# Influence de la loi de variation de la puissance sur la condition de stabilité de Thoma

Autor(en): **Gaden, D. / Borel, L.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **77 (1951)**

Heft 9

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-58149>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

**Abonnements :**  
Suisse : 1 an, 24 francs  
Etranger : 28 francs  
Pour sociétaires :  
Suisse : 1 an, 20 francs  
Etranger : 25 francs  
Pour les abonnements  
s'adresser à :  
**Administration**  
du « Bulletin technique  
de la Suisse romande »,  
Case postale Ripone 21,  
Lausanne  
Compte de chèques pos-  
taux II. 5775, à Lausanne  
Prix du numéro : Fr. 1,40

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. Epitoux, architecte, à Lausanne ; Secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg : MM. P. Joye, professeur ; E. Latelün, architecte — Vaud : MM. F. Chenaux, ingénieur ; E. d'Okolski, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte — Genève : MM. L. Archinard, ingénieur ; Cl. Groscurin, architecte ; E. Martin, architecte ; V. Rochat, ingénieur — Neuchâtel : MM. J. Béguin, architecte ; G. Furter, ingénieur ; R. Guye, ingénieur — Valais : MM. J. Dubuis, ingénieur ; D. Burgener, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration de la Société anonyme du Bulletin Technique : A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; G. Epitoux, architecte ; R. Neeser, ingénieur.

## 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. 223328  
Lausanne et succursales

**SOMMAIRE :** *A propos de chambres d'équilibre : Influence de la loi de variation de la puissance sur la condition de stabilité de Thoma*, par D. GADEN, ingénieur, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, et L. BOREL, ingénieur E. P. U. L. — **DIVERS :** *Droit et urbanisme*. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : *Rapport du président*. — **BIBLIOGRAPHIE**. — **LES CONGRÈS :** *Congrès international de métallurgie ; 9<sup>e</sup> congrès international de l'organisation scientifique*. — **SERVICE DE PLACEMENT**. — **NOUVEAUX,** **INFORMATIONS DIVERSES.**

## A propos de chambres d'équilibre

### INFLUENCE DE LA LOI DE VARIATION DE LA PUISSANCE SUR LA CONDITION DE STABILITÉ DE THOMA

par D. GADEN, ingénieur, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne,  
et L. BOREL, ingénieur E. P. U. L.

#### I. Introduction

L'étude de la stabilité de fonctionnement du réglage automatique de vitesse d'une installation hydraulique, munie d'une chambre d'équilibre, repose sur une hypothèse simplificatrice, qui fut toujours admise par les différents auteurs ayant traité de ce problème. L'hypothèse en question est d'ailleurs, d'une façon très générale, parfaitement motivée et ce n'est que dans des cas bien particuliers qu'elle pourrait appeler certaines réserves.

Cette hypothèse permet de dissocier l'étude de la stabilité de la chambre d'équilibre du problème de la stabilité du réglage de vitesse proprement dit. Elle résulte de la remarque que l'on peut faire au sujet de la vitesse avec laquelle évoluent les phénomènes dont le système « galerie d'amenée-chambre d'équilibre » est le siège et de celle des phénomènes ayant pour origine l'action du régulateur de vitesse, l'inertie des masses tournantes du groupe<sup>1</sup> et l'effet du coup de bélier dans la conduite forcée qui l'alimente. Les premiers de ces phénomènes, caractérisés par la période propre  $T$  du système « galerie-chambre » de l'ordre de plusieurs minutes, sont *beaucoup plus lents* que les seconds, caractérisés par la période propre du système « régulateur-groupe-conduite » qui ne dépasse pas une dizaine de secondes. En conséquence ces

seconds phénomènes peuvent, vis-à-vis des premiers, être considérés comme instantanés.

Dans des termes plus précis, il faut dire que pour l'étude, en régime transitoire, du mouvement de l'eau dans le système « galerie-chambre », on peut supposer que le système « régulateur-groupe-conduite » n'est, lui, jamais en régime transitoire, mais passe par une série de régimes stationnaires d'équilibre pour lesquels :

- 1° la valeur instantanée de la vitesse de rotation du groupe est toujours égale à sa valeur de consigne ;
- 2° les accélérations des masses tournantes sont nulles (ou du moins négligeables) et par conséquent la puissance motrice engendrée par le groupe toujours égale à la puissance résistante consommée dans le réseau ;
- 3° la suppression que subit la turbine ne résulte que de la dénivellation produite dans la chambre.

Le circuit de régulation peut, dès lors, être représenté par le schéma de la figure 1, qui ne comporte que deux éléments :

- A. Le système « galerie-chambre ».
- B. Le système « régulateur-groupe-réseau de consommation », dont les trois éléments sont réunis en un seul du fait des considérations 1° et 2° et où il a été fait abstraction de la « conduite » pour la raison 3°.

La grandeur d'entrée du premier élément A, le système « galerie-chambre », est un écart du débit  $\Delta u$  soutiré du dit

<sup>1</sup> Ou des groupes, si l'installation considérée en comporte plusieurs.

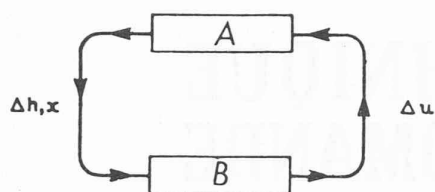


Fig. 1. — Schéma du circuit de régulation, en chaîne fermée, d'une installation hydraulique munie d'une chambre d'équilibre.

A — Système « galerie-chambre ».  
B — Système « régulateur-groupe-réseau ».

système, écart de débit qui constitue la grandeur de sortie du deuxième élément B, le système « régulateur-groupe-réseau ». La grandeur de sortie du premier élément A est un écart de pression  $\Delta h$  correspondant à la dénivellation  $x$  produite dans la chambre, écart de pression qui constitue la grandeur d'entrée du deuxième élément B.

Nous reviendrons plus loin sur les rapports de transmission de ces deux éléments. Toutefois, remarquons encore ici que :

1° Dire que la valeur instantanée de la vitesse de rotation du groupe est toujours égale à sa valeur de consigne, ne veut pas dire que cette valeur soit invariable. Elle peut être fonction d'une des grandeurs du réglage :

soit de l'écart de débit  $\Delta u$ , plus exactement, par une loi de statisme, de l'écart de course  $\Delta y$  du vannage, dont l'écart de débit  $\Delta u$  est lui-même fonction ;

soit de l'écart de pression  $\Delta h$ , plus exactement de la dénivellation  $x$ , selon la proposition récemment émise par MM. Gardel et Cuénod<sup>2</sup>.

2° Dire que la puissance motrice et la puissance résistante sont toujours égales, ne veut pas dire que leur valeur commune soit constante, même lorsque le nombre, les caractéristiques et le réglage des appareils de consommation demeurent invariables. Cette valeur commune des puissances peut être fonction d'une des grandeurs du réglage :

soit de la valeur de consigne de la vitesse de rotation du groupe, ceci du fait des caractéristiques de certains appareils de consommation (moteurs) qui absorbent une puissance dépendant de la fréquence de la tension qui leur est appliquée ;

soit de l'écart de débit  $\Delta u$ , plus exactement de l'écart de course  $\Delta y$  du vannage dont l'écart de débit  $\Delta u$  est lui-même fonction ;

soit de l'écart de pression  $\Delta h$ , plus exactement de la dénivellation  $x$ , selon la proposition récemment émise par MM. Gardel et Cuénod.

En fait et comme nous le montrerons plus loin, seule est essentielle la loi de variation de la puissance, soit en fonction de l'écart de course  $\Delta y$  du vannage :

$$\Delta p = f(\Delta y) \quad (1)$$

( $\Delta p$  étant l'écart de puissance), soit en fonction de l'écart de pression  $\Delta h$  :

$$\Delta p = f(\Delta h) \quad (2)$$

Le recours à une variation de la valeur de consigne de la vitesse, soit en fonction de  $\Delta y$ , soit en fonction de  $\Delta h$ , variation dont il a été question ci-dessus sous 1°, ne constitue en réalité qu'un moyen de réaliser les lois de variation de puissance (1) ou (2). Un autre moyen consiste à mettre à profit le fait que la puissance absorbée par certains appareils de consommation (de caractéristique ohmique) est fonction de la valeur de la tension qui leur est appliquée et à asservir, par le jeu du régulateur de tension, la valeur de consigne de cette tension, soit à  $\Delta y$  soit à  $\Delta h$ .

<sup>2</sup> Voir *Bulletin technique de la Suisse romande*, n° 16, du 12 août 1950.

Le but de la présente étude est de reprendre l'établissement de la condition de stabilité de Thoma par la méthode des courbes de comportement (méthode de Nyquist) puis d'utiliser la dite méthode pour retrouver certains résultats connus et pour en obtenir d'autres nouveaux, en comparant notamment les effets des lois de variations de puissance (1) et (2), dans lesquelles on peut aussi introduire, en variable, le temps :

$$\Delta p = f(\Delta y, t) \quad (1')$$

$$\Delta p = f(\Delta h, t) \quad (2')$$

de manière à leur conférer un caractère *momentané*.

Précisons enfin que nous ferons ici abstraction de l'effet de la variation du rendement de la turbine et de sa conduite forcée, effet qui a été étudié ailleurs<sup>3</sup>, et que nous supposons donc ce rendement constant.

## II. Notations

Nous emploierons, comme notations, celles généralement adoptées en cette matière<sup>4</sup> et désignerons par :

- $\omega$  la vitesse d'écoulement dans la galerie ;
- $v$  la vitesse d'écoulement dans la chambre ;
- $u$  la vitesse d'écoulement dans la conduite,

en prenant comme unité de mesure la vitesse correspondant à l'écoulement du débit  $Q_0$  de régime, dans chacun de ces éléments. La grandeur  $u$  donne la mesure du débit soutiré.

Nous désignerons encore par :

- $z$  la dénivellation comptée à partir du niveau statique ;
- $x$  la dénivellation comptée à partir du niveau piézométrique de régime ;
- $p_0$  la perte de charge de régime dans la galerie ( $y$  compris la hauteur représentative de la vitesse d'écoulement dans la galerie au point d'insertion de la chambre) ;
- $h_0$  la chute (pression) de régime à partir du niveau piézométrique,

en prenant comme unité de mesure l'amplitude  $Z_*$  de l'oscillation de niveau dans la chambre, lors d'une fermeture complète et instantanée opérée sur le débit de régime  $Q_0$  et en négligeant la perte de charge.

Nous désignerons enfin par :

- $t'$  le temps considéré comme une variable ;
- $\overline{\sigma}''$  le temps de relaxation d'un dash-pot ;
- $f_*$  la fréquence d'une oscillation sinusoidale,

en prenant comme unité de mesure la période  $T$  du mouvement oscillatoire dans le système « galerie-chambre », toujours en négligeant la perte de charge.

Tous les écarts, que nous distinguerons par la lettre  $\Delta$ , seront considérés en valeurs relatives, chacun par rapport à la valeur de régime de la grandeur à laquelle il correspond :

$$\text{Ecart de débit : } \Delta u = u - 1$$

$$\text{Ecart de pression : } \Delta h = \frac{h_0 + x}{h_0} - 1 = \frac{x}{h_0}$$

$$\text{Ecart de puissance : } \Delta p = \frac{P - P_0}{P_0}$$

$$\text{Ecart de course : } \Delta y = \frac{Y - Y_0}{Y_0}$$

$P, P_0$  puis  $Y, Y_0$  étant les valeurs instantanées et les valeurs de régime de la puissance et de la course du vannage.

<sup>3</sup> Voir *De la stabilité des installations hydrauliques munies de chambres d'équilibre*, par J. CALAME et D. GADEN, S. B. Z. des 30 juillet et 6 août 1927.

<sup>4</sup> Voir *op. cit.* sous<sup>3</sup>.

Rappelons que, pour l'étude des petits mouvements de réglage conduisant à l'établissement de la condition de stabilité, tous ces écarts peuvent être supposés de très faible valeur par rapport à l'unité, si bien qu'il est possible de négliger leurs puissances dont l'exposant est plus grand que 1. En d'autres termes, les équations en  $\Delta$  pourront toutes être rendues linéaires.

III. Principe de la méthode

Nous nous bornerons ici à un exposé laconique de la méthode, dont le principe est connu.

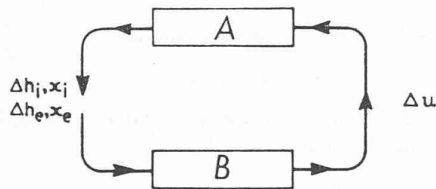


Fig. 2. — Schéma du circuit de régulation, en chaîne ouverte, d'une installation hydraulique munie d'une chambre d'équilibre.

A — Système « galerie-chambre ».  
B — Système « régulateur-groupe-réseau ».

On procède à une coupure du circuit de régulation, par exemple dans la branche allant de A vers B, et on y distingue :

A l'entrée de l'élément B, le système « régulateur-groupe-réseau », une dénivellation inductrice  $x_e$  (correspondant à un écart de pression  $\Delta h_e$ ) qui excite le jeu du réglage du dit système et provoque un écart de débit  $\Delta u$ , grandeur d'entrée de l'élément A.

A la sortie de l'élément A, le système « galerie-chambre », une dénivellation induite  $x_i$  (correspondant à un écart de pression  $\Delta h_i$ ) qui résulte du jeu du dit système, excité par l'écart de débit  $\Delta u$  précité.

Les grandeurs  $x_e$  ( $\Delta h_e$ ),  $\Delta u$  et  $x_i$  ( $\Delta h_i$ ) étant considérées en régime sinusoïdal à fréquence variable, on forme le rapport de transmission de chacun des éléments B et A :

$$\dot{R}_B = \frac{\dot{\Delta u}}{\dot{x}_e} \quad \text{et} \quad \dot{R}_A = \frac{\dot{x}_i}{\dot{\Delta u}}$$

puis leur produit :

$$\dot{R} = \frac{\dot{x}_i}{\dot{x}_e}$$

Chacun de ces rapports, notamment le rapport  $\dot{R}$ , est une fonction complexe de la fréquence  $f_*$  du régime sinusoïdal. Cette fonction  $\dot{R}$  correspond, dans le plan des nombres complexes, à une courbe qui est la courbe de comportement à fréquence variable, de la dénivellation induite  $\dot{x}_i$ , la dénivellation inductrice  $\dot{x}_e$  étant prise comme unité et origine de phase. Cette courbe est graduée en fréquence  $f_*$ .

Lorsque le réglage est à la limite de la stabilité, la courbe de comportement  $\dot{R}$  coupe l'axe des quantités réelles au point d'abscisse + 1<sup>5</sup>. Pour que le réglage soit stable, il faut que le point d'abscisse + 1 et d'ordonnée nulle soit à la gauche de l'observateur parcourant la courbe de comportement dans le sens des valeurs croissantes de la fréquence  $f_*$ .

<sup>5</sup> Les grandeurs  $\dot{x}_e$  et  $\dot{x}_i$  sont alors en effet égales et en phase et le circuit de régulation, qui peut donc être bouclé (coupure supprimée) est le siège de mouvements entretenus.

Ce processus simplifié de la méthode de Nyquist ne convient toutefois pas bien à la résolution du problème qui nous occupe. Mieux vaut, comme nous le montrerons plus loin, considérer séparément les deux composantes  $\dot{R}_A$  et  $\dot{R}_B$  du rapport  $\dot{R}$ , plus exactement, pour la facilité de la construction graphique :

$$\dot{R}_2 = -\frac{1}{\dot{R}_B} \quad \text{et} \quad \dot{R}_1 = -\dot{R}_A$$

avec :

$$\dot{R} = \frac{\dot{R}}{\dot{R}_2}$$

Les courbes  $\dot{R}_B$  ou  $\dot{R}_2$  et  $\dot{R}_A$  ou  $\dot{R}_1$  ne dépendent en effet pas des mêmes paramètres. Il est facile de voir que la limite de stabilité est atteinte lorsque les deux courbes  $\dot{R}_2$  et  $\dot{R}_1$  se coupent en un point qui occupe sur les deux graduations la même cote de fréquence.

IV. Rapport de transmission du système galerie/chambre

L'expression analytique de ce rapport  $\dot{R}_A$  ou  $\dot{R}_1$  se déduit de l'équation classique du mouvement de l'eau dans le dit système, pour un écoulement dirigé de l'amont vers l'aval<sup>6</sup> :

$$\nu \frac{dv}{dz} + \frac{1}{2\pi} \frac{du}{dt'} + z + p_o \omega^2 = 0 \quad (3)$$

avec :

$$\omega = \nu + u \quad \text{et} \quad x = z + p_o \quad (4)$$

En éliminant  $\nu$ ,  $\omega$  et  $z$ , pour ne laisser subsister que  $x$ <sup>7</sup> et  $\Delta u$ , cette équation devient :

$$\frac{1}{(2\pi)^2} \frac{d^2}{dt'^2} x_i + \frac{p_o}{\pi} \frac{d}{dt'} x_i + x_i + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt'} \Delta u + 2p_o \Delta u = 0 \quad (5)$$

ou en écriture symbolique :

$$\dot{x}_i \left[ \frac{\dot{p}^2}{(2\pi)^2} + \frac{p_o \dot{p}}{\pi} + 1 \right] + \dot{\Delta u} \left[ \frac{\dot{p}}{2\pi} + 2 p_o \right] = 0 \quad (6)$$

ou, avec  $\dot{p} = i \cdot 2\pi f_*$  (régime sinusoïdal) :

$$\dot{x}_i \left[ -f_*^2 + i \cdot 2p_o f_* + 1 \right] + \dot{\Delta u} \left[ i \cdot f_* + 2 p_o \right] = 0 \quad (7)$$

d'où :

$$\dot{R}_1 = -\dot{R}_A = -\frac{\dot{x}_i}{\dot{\Delta u}} = \frac{2 p_o + i \cdot f_*}{(1 - f_*^2) + i \cdot 2 p_o f_*} \quad (8)$$

La courbe de comportement de la dénivellation induite  $x_i$  — l'écart de débit  $\Delta u$ , changé de signe, étant pris comme unité et origine de phase — peut être facilement construite et graduée en fréquence, à partir de l'expression analytique (8) de  $\dot{R}_1$ . Cette courbe et sa graduation ne dépendent que du paramètre  $p_o$ , caractérisant la perte de charge dans la galerie d'aménée ; elles sont indépendantes des autres paramètres

<sup>6</sup> Voir *op. cit.* sous <sup>3</sup> : équations (1) et (2).

<sup>7</sup> En réalité  $x_i$ .

dont nous aurons à tenir compte pour caractériser la loi de variation de la puissance. C'est là la raison de l'intérêt qu'il y a à considérer séparément cette courbe  $\dot{R}_1$ , puis ultérieurement la courbe  $\dot{R}_2$ .

La figure 3 donne un exemple de tracé de la courbe  $\dot{R}_1$  et de sa graduation, pour  $p_o = 0,08$ .

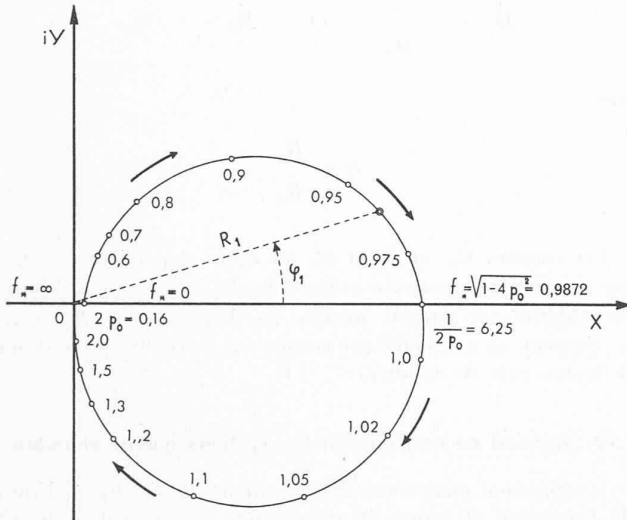


Fig. 3. — Courbe de comportement à fréquence variable du système « galerie-chambre ».  
Cas de  $p_o = 0,08$ .

Toutes ces courbes  $\dot{R}_1$  ont la même allure et le même sens de parcours, par valeurs croissantes de la fréquence  $f_*$ , indiqué par les flèches de la figure 3. Elles coupent l'axe des quantités réelles en trois points, dont le second a, comme nous le verrons, une importance particulière :

$$\begin{aligned} \dot{R}_1 &= 2p_o && \text{pour } f_* = 0 && \text{avec } \varphi_1 = 0 \\ \dot{R}_1 &= \frac{1}{2p_o} && \text{pour } f_* = \sqrt{1 - 4p_o^2} && \text{avec } \varphi_1 = 0 \\ \dot{R}_1 &= 0 && \text{pour } f_* = \infty && \text{avec } \varphi_1 = -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Nous allons maintenant aborder l'étude des courbes  $\dot{R}_2$ , c'est-à-dire du rapport de transmission (plus exactement de sa valeur inverse changée de signe) de l'élément B, le système « régulateur-groupe-réseau », ceci dans le cadre de quelques hypothèses que l'on peut faire au sujet de la loi de variation de la puissance.

#### V. Fonctionnement en isolé. — Réglage à puissance constante

Lorsque le groupe considéré (ou les groupes considérés, si l'installation en comporte plusieurs) alimente seul le réseau de consommation et que la puissance absorbée par ce réseau ne dépend :

ni directement, ni indirectement<sup>8</sup> de l'écart de course  $\Delta y$   
ni directement, ni indirectement<sup>8</sup> de l'écart de pression  $\Delta h$   
toute variation de puissance est exclue. Dès lors :

$$\Delta p = \Delta u + \Delta h = 0 \quad (9)$$

<sup>8</sup> Si par exemple la valeur de consigne de la vitesse était fonction de  $\Delta y$  (loi de statisme) ou de  $\Delta h$  et que la puissance était à son tour fonction de l'écart de vitesse (ce qui est le cas des moteurs du réseau), la puissance dépendrait indirectement de  $\Delta y$  ou de  $\Delta h$ .

et l'on tire de  $\Delta u = -\Delta h$  la valeur du rapport de transmission  $\dot{R}_2$ , puis celle de  $\dot{R}_1$  :

$$\dot{R}_2 = -\frac{\dot{x}_e}{\dot{\Delta u}} = -h_o \frac{\dot{\Delta h}_e}{\dot{\Delta u}} = +h_o \quad (10)$$

On constate que la courbe de comportement  $\dot{R}_2$  se réduit au point d'abscisse  $h_o$  et d'ordonnée nulle.

La limite de stabilité sera donc atteinte lorsque ce point tombera sur la courbe  $\dot{R}_1$ , c'est-à-dire à l'abscisse  $\frac{1}{2p_o}$  :<sup>9</sup>

$$\frac{1}{2p_o} = h_o \quad \text{ou} \quad 2p_o h_o = 1 \quad (11)$$

et l'on retombe sur la condition connue :

$$2p_o h_o > 1 \quad (12)$$

qui est une des formes (en valeurs relatives) de la condition de stabilité de Thoma.

#### VI. Fonctionnement en parallèle. — Réglage à puissance constante

Lorsque le groupe considéré alimente le réseau en parallèle avec d'autres, toujours dans l'hypothèse d'une puissance absorbée par le dit réseau de valeur constante, ce mode de fonctionnement donne lieu à une loi de variation de la puissance du groupe (ou de l'installation) considéré, car ce n'est plus sa puissance, mais la puissance totale de tous les groupes qui doit demeurer invariable.

Soit  $E$  l'énergie réglante du groupe considéré et  $E_t$  l'énergie réglante totale de l'ensemble des groupes alimentant le réseau, y compris le groupe précité. On sait que l'énergie réglante d'un groupe, ou d'une série de groupes couplés en parallèle, est le nombre de kW dont varie leur puissance pour un écart d'un Herz de la fréquence du réseau<sup>10</sup>.

$$\Delta P = -E \Delta F \quad \text{ou} \quad \Delta p = -E \frac{\Delta F}{P_o} \quad (13)$$

$\Delta F$  étant l'écart de fréquence (en valeur absolue).

A pression constante  $\Delta h = 0$  lorsque la puissance du groupe considéré varie de :

$$\Delta p = -E \frac{\Delta F}{P_o} \quad (13)$$

la puissance de l'ensemble des groupes varie concurremment de :

$$\Delta p_t = -E_t \frac{\Delta F}{P_o} \quad (14)$$

En présence d'un écart de pression  $\Delta h_e$ , les écarts de puissance (13) et (14) deviennent :

$$\Delta p = \frac{3}{2} \Delta h_e - E \frac{\Delta F}{P_o} \quad (15)$$

$$\Delta p_t = \frac{3}{2} \Delta h_e - E_t \frac{\Delta F}{P_o} \quad (16)$$

<sup>9</sup> La considération du point de la courbe  $\dot{R}_1$ , à l'abscisse  $2p_o$ , conduirait à la condition  $2p_o = h_o$ , qui correspond, on le sait, à la limite de stabilité par excès de perte de charge, circonstance naturellement évitée dans la pratique.

<sup>10</sup> Pour une valeur déterminée de la fréquence de consigne du réseau, l'énergie réglante d'un groupe est proportionnelle à sa puissance et inversement proportionnelle à son statisme.

En tenant compte du fait que la puissance totale doit rester constante, c'est-à-dire  $\Delta p_t = 0$ , on en déduit :

$$\Delta p = \frac{3}{2} \left(1 - \frac{E}{E_t}\right) \Delta h_e. \quad (17)$$

Telle est la loi de variation de la puissance du groupe considéré, qu'établit le fonctionnement en parallèle. Elle est de la forme (2), c'est-à-dire fonction de l'écart de pression  $\Delta h$ .

Introduisons maintenant l'expression (17) de cette loi, dans celle de l'écart de puissance, en fonction de l'écart de débit :  $\Delta p = \Delta u + \Delta h_e$ ; nous obtenons :

$$\Delta u = - \left[1 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{E}{E_t}\right)\right] \Delta h_e \quad (18)$$

d'où :

$$\dot{R}_2 = - \frac{\dot{x}_e}{\Delta u} = - h_o \frac{\dot{\Delta h}}{\Delta u} = h_o \frac{1}{1 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{E}{E_t}\right)}. \quad (19)$$

En raisonnant sur la base de l'équation (19), comme nous l'avons fait au chapitre V sur la base de l'équation (10), on aboutit à la condition de stabilité connue<sup>11</sup> pour le fonctionnement en parallèle :

$$2 p_o h_o > 1 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{E}{E_t}\right). \quad (20)$$

Au fur et à mesure que l'énergie réglante  $E$  du groupe (ou de l'installation) considéré diminue, par rapport à l'énergie réglante totale, la condition de stabilité peut être satisfaite par une chambre de section de plus en plus réduite<sup>12</sup>. La condition de stabilité disparaît pour  $E = \frac{1}{3} E_t$ , c'est-à-dire lorsque le groupe considéré n'assure que le tiers des variations de puissance de l'ensemble.

**VII. Fonctionnement en isolé. — Asservissement permanent de l'écart de puissance à l'écart de pression**

La loi (de la forme (2)) d'un tel asservissement a pour expression :

$$\Delta p = k_h \Delta h_e \quad (21)$$

dont on reconnaît immédiatement la parenté avec celle (17) de la loi examinée au chapitre VI. On en déduit donc :

$$\Delta u = - (1 - k_h) \Delta h_e. \quad (22)$$

Point n'est dès lors besoin de nouveaux calculs en vue de déterminer la condition de stabilité correspondante :

$$2 p_o h_o > 1 - k_h. \quad (23)$$

Pour de mêmes valeurs de la perte de charge dans la galerie et de la pression (chute), le produit  $p_o h_o$  varie en proportion inverse de  $Z_2^2$ , c'est-à-dire proportionnellement à la section de la chambre. L'économie sur la section qui serait nécessaire sans la loi d'asservissement (21), en pour-cent de la dite section, s'élève à 100  $k_h$  %.

**VIII. Fonctionnement en isolé. — Asservissement permanent de l'écart de puissance à l'écart de course**

La loi (de la forme (1)) d'un tel asservissement a pour expression :

$$\Delta p = k_y \Delta y. \quad (24)$$

Par ailleurs, celle de l'écart de débit s'écrit :

$$\Delta u = \frac{\Delta y}{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta h_e \quad (25)$$

en désignant par  $\alpha$  l'inverse de la pente de la courbe-débit tracée (en valeurs relatives), en fonction de la course du vannage.

Introduisons maintenant ces valeurs de  $\Delta y$  (24) et de  $\Delta u$  (25) dans l'expression de l'écart de puissance, en fonction de l'écart de débit :  $\Delta p = \Delta u + \Delta h_e$ ; nous obtenons :

$$\Delta p = - \frac{3}{2} \frac{\alpha k_y}{1 - \alpha k_y} \Delta h_e. \quad (26)$$

Nous constatons que, comme il fallait s'y attendre puisque les écarts de course  $\Delta y$  et de débit  $\Delta u$  sont deux grandeurs physiquement liées l'une à l'autre, l'asservissement permanent de l'écart de puissance  $\Delta p$  à l'écart de course  $\Delta y$ , asservissement caractérisé par le facteur  $k_y$  de l'équation (24), est identique dans tous ses effets à l'asservissement de l'écart de puissance  $\Delta p$  à l'écart de pression  $\Delta h$ , asservissement caractérisé par le facteur  $k_h$  de l'équation (21), tel que :

$$k_h = - \frac{3}{2} \frac{\alpha k_y}{1 - \alpha k_y} \quad (27)$$

ou :

$$k_y = - \frac{1}{\alpha} \frac{2k_h}{3 - 2k_h}. \quad (28)$$

En d'autres termes, il n'y a pas de différence de principe entre l'utilisation de la loi d'asservissement (21) de la forme (2), c'est-à-dire en fonction de  $\Delta h$ , et l'utilisation de la loi d'asservissement (24) de la forme (1), c'est-à-dire en fonction de  $\Delta y$ .

La correspondance entre les valeurs des coefficients  $k_h$  et  $\alpha k_y$  est illustrée par la courbe en trait fort (hyperbole équilatère) de la figure 4.

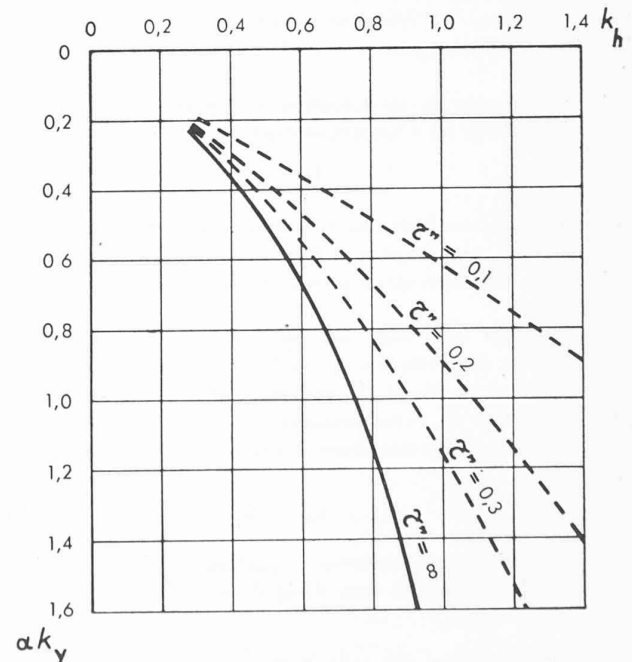


Fig. 4. — Graphique des valeurs correspondantes des coefficients  $k_h$  et  $\alpha k_y$  (importance de l'asservissement) conduisant à la limite de stabilité, pour la même valeur du temps  $T''$  (rigidité de l'asservissement).

<sup>11</sup> Voir *op. cit.* sous 3.

<sup>12</sup> Voir explications au chapitre VII.



On remarque que la valeur absolue de  $\alpha_{k_y}$  croît très sensiblement en fonction de celle de  $k_h$ , au-delà de  $k_h = 1$ . Elle deviendrait même infinie pour  $k_h = 1,5$ ; mais il ne faut pas oublier que l'adoption de  $k_h = 0,9$  correspond, avec l'asservissement permanent à une économie de 90 % sur la section de la chambre et que celle de  $k_h = 1$  entraîne dans la même hypothèse la suppression complète de toute condition de stabilité.

En outre, dans le cas d'un asservissement momentané, ces considérations numériques sur les valeurs des coefficients d'asservissement  $k_h$  et  $\alpha_{k_y}$  assurant le même effet, seront modifiées en faveur de la loi d'asservissement de la forme (1), c'est-à-dire en fonction de l'écart de course  $\Delta y$ . Nous y reviendrons plus loin.

Il y a déjà lieu de faire ressortir à l'avantage de la loi d'asservissement de la forme (1) en fonction de l'écart de course  $\Delta y$  le fait que sa réalisation n'exige aucune télémesure du niveau du plan d'eau dans la chambre d'équilibre, les liaisons à établir étant simplement à connecter au vannage. Tout le système de régulation peut donc être installé à proximité immédiate du groupe, circonstance qui sera particulièrement appréciée de la part de l'exploitant.

#### IX. Fonctionnement en isolé. — Asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de pression

Les solutions étudiées aux chapitres VII et VIII précédents ne peuvent pratiquement pas être admises, que l'asservissement permanent soit établi en fonction de l'écart de course (forme (1)) ou de l'écart de pression (forme (2)). Les variations attendues, au cours du fonctionnement normal du réglage, tant du point de vue de la course du vannage, qu'à celui des dénivellations, exigent l'emploi d'un asservissement momentané<sup>13</sup>, de manière à assurer automatiquement (sans intervention corrective manuelle) le retour au réglage à puissance constante auquel on aura admis de déroger, mais seulement à titre temporaire.

Nous traiterons tout d'abord ce problème dans le cas de l'asservissement à l'écart de pression et utiliserons ensuite le même processus pour le cas de l'asservissement à l'écart de course.

Pour examiner la modification à apporter à l'expression analytique de la loi d'asservissement :

$$\Delta p = k_h \Delta h_e \quad (21)$$

en vue de lui conférer un caractère momentané, nous raisonnerons en supposant que l'on ait recours à un dispositif à dash-pot, ceci bien qu'on puisse envisager d'autres systèmes à relaxation.

Le dash-pot aura donc son cylindre relié à l'appareil de mesure de la dénivellation  $x_e$  (ou de la course du vannage  $y_e$ ) correspondant à l'écart de pression  $\Delta h_e$ . Son piston effectuant la course  $x_p$ , correspondant à l'écart fictif de pression  $\Delta h_p$ , actionnera le mécanisme d'asservissement pour réaliser la loi :

$$\Delta p = k_h \Delta h_p \quad (29)$$

qu'il s'agit de combiner avec l'équation du dash-pot, dont le temps de relaxation sera désigné par  $\tau''$  :

$$x_p = \tau'' \frac{d}{dt'} (x_e - x_p) \quad \text{ou} \quad \Delta h_p = \tau'' \frac{d}{dt'} (\Delta h_e - \Delta h_p) \quad (30)$$

<sup>13</sup> Nous formulerons, au chapitre XI, une autre condition.

ou encore en écriture symbolique :

$$\dot{\Delta h}_p (1 + \tau'' \dot{p}) = \tau'' \dot{p} \dot{\Delta h}_e \quad (31)$$

ou enfin avec  $\dot{p} = i \cdot 2 \pi f_*$  (régime sinusoïdal) :

$$\dot{\Delta h}_p = \frac{i \cdot 2 \pi \tau'' f_*}{1 + i \cdot 2 \pi \tau'' f_*} \dot{\Delta h}_e \quad (32)$$

L'expression analytique de la loi d'asservissement momentané de l'écart de puissance s'obtient en remplaçant, dans l'équation (29),  $\Delta h_p$  par sa valeur (32) :

$$\dot{\Delta p} = k_h \frac{i \cdot 2 \pi \tau'' f_*}{1 + i \cdot 2 \pi \tau'' f_*} \dot{\Delta h}_e \quad (33)$$

Comme par ailleurs :

$$\dot{\Delta p} = \dot{\Delta u} + \dot{\Delta h}_e$$

il s'ensuit que :

$$\dot{\Delta u} = - \frac{1 + i(1 - k_h) 2 \pi \tau'' f_*}{1 + i \cdot 2 \pi \tau'' f_*} \dot{\Delta h}_e \quad (34)$$

et que :

$$\dot{R}_2 = - \frac{\dot{x}_e}{\dot{\Delta u}} = - h_o \frac{\dot{\Delta h}_e}{\dot{\Delta u}} = h_o \frac{1 + i \cdot 2 \pi \tau'' f_*}{1 + i(1 - k_h) 2 \pi \tau'' f_*} \quad (35)$$

La courbe de comportement  $\dot{R}_2$  n'est dès lors plus un point, comme précédemment, mais une demi-circonférence<sup>14</sup> dont le centre est situé sur l'axe des quantités réelles et dont les deux extrémités sur le dit axe correspondent, selon la figure 5

au point d'abscisse  $h_o$ , pour  $f_* = 0$  et (36)

au point d'abscisse  $\frac{h_o}{1 - k_h}$ , pour  $f_* = \infty$ .

La graduation de cette demi-circonférence, qui se développe, par valeurs croissantes de la fréquence  $f_*$ , dans le sens indiqué par la flèche de la figure 5, s'obtient à partir de l'angle au centre  $\psi_2$ . On démontre en effet que :

<sup>14</sup> L'autre demi-circonférence correspond à  $\tau'' < 0$ , ce qui n'a aucune signification physique.

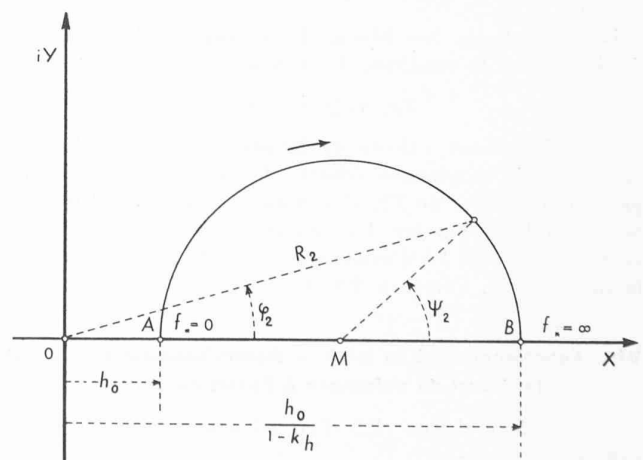


Fig. 5. — Courbe de comportement à fréquence variable du système « régulateur-groupe-réseau » dans le cas de l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de pression.

1° Si  $0 < k_h < 1$  :

$$\psi_2 = \pi - 2 \operatorname{arctg} 2 \pi (1 - k_h) \overline{\tau}'' f_* \quad (37)$$

$$\text{d'où } \overline{\tau}'' = \frac{\operatorname{tg} \frac{\psi_2}{2}}{2 \pi (1 - k_h) f_*}$$

2° Si  $1 < k_h < \infty$  :

$$\psi_2 = 2 \operatorname{arctg} 2 \pi (k_h - 1) \overline{\tau}'' f_* \quad (38)$$

$$\text{d'où } \overline{\tau}'' = \frac{\operatorname{tg} \frac{\psi_2}{2}}{2 \pi (k_h - 1) f_*}$$

Pour  $k_h = 1$ , la demi-circonférence dégénère en une droite parallèle à l'axe des quantités imaginaires, à l'abscisse  $h_o$ .

La construction graphique, selon la figure 6, est dès lors la suivante. Elle s'effectue :

- a) pour une valeur déterminée de  $2p_o$  (perte de charge), ce qui définit une courbe de comportement  $\dot{R}_1$  et sa graduation ;
- b) pour une valeur déterminée de  $h_o$  (pression ou chute) — donc une valeur déterminée de  $2p_o h_o$  — ce qui définit une famille de courbes de comportement  $\dot{R}_2$  : demi-circonférences partant toutes du point A d'abscisse  $h_o$  sur l'axe des quantités réelles.

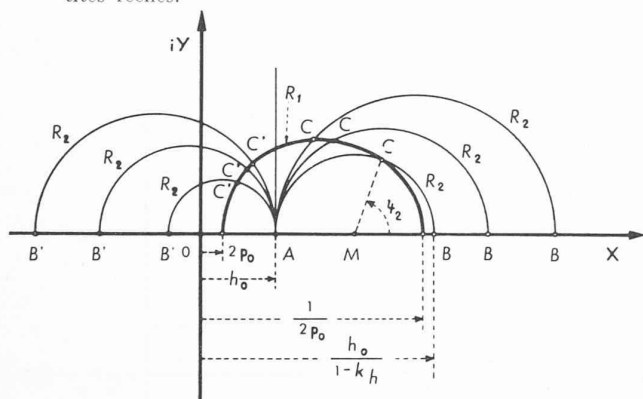


Fig. 6. — Détermination graphique des valeurs du temps  $\overline{\tau}''$  (rigidité de l'asservissement) correspondant à la limite de stabilité pour différentes valeurs du coefficient  $k_h$  (importance de l'asservissement).

Les demi-circonférences aboutissant aux points B, situés à droite de A, correspondent aux cas où  $k_h < 1$ . Celles aboutissant aux points B', situés à gauche de A, correspondent aux cas où  $k_h > 1$ . La valeur du facteur  $k_h$  se calcule à partir de la distance séparant les points A et B (voir (36)), laquelle est indépendante du temps de relaxation  $\overline{\tau}''$  du dash-pot.

Pour calculer ce temps  $\overline{\tau}''$ , il suffit de se rappeler que l'un quelconque des points d'intersection C entre la courbe  $\dot{R}_1$  et les demi-circonférences  $\dot{R}_2$ , points correspondant à la limite de stabilité, doit avoir la même cote  $f_*$  en fréquence sur les deux courbes  $\dot{R}_1$  et  $\dot{R}_2$  considérées. Or, cette cote  $f_*$  est connue par la graduation de la courbe  $\dot{R}_1$  et il suffit donc d'appliquer l'une des formules (37) ou (38) pour obtenir la valeur de  $\overline{\tau}''$ , à partir de celle de l'angle au centre  $\psi_2$ .

Ainsi, pour une valeur déterminée de  $p_o$ , caractérisant la perte de charge dans la galerie, et une valeur déterminée du produit  $2p_o h_o$ , caractérisant l'économie  $100 (1 - 2p_o h_o) \%$  réalisée sur la section de chambre correspondant à la formule de Thoma, la construction graphique ci-dessus exposée permet de calculer une série de paires de valeurs de  $k_h$  et de  $\overline{\tau}''$

définissant l'importance et la rigidité de l'asservissement momentané à employer pour atteindre la limite de stabilité. Ces paires de valeurs correspondent, dans un diagramme cartésien en  $\overline{\tau}''$ ,  $k_h$ , à une courbe à côté de laquelle il est possible d'en tracer d'autres, obtenues de la même manière, pour diverses valeurs de  $2p_o h_o$  (économie), mais toujours pour la même valeur de  $p_o$  (perte de charge).

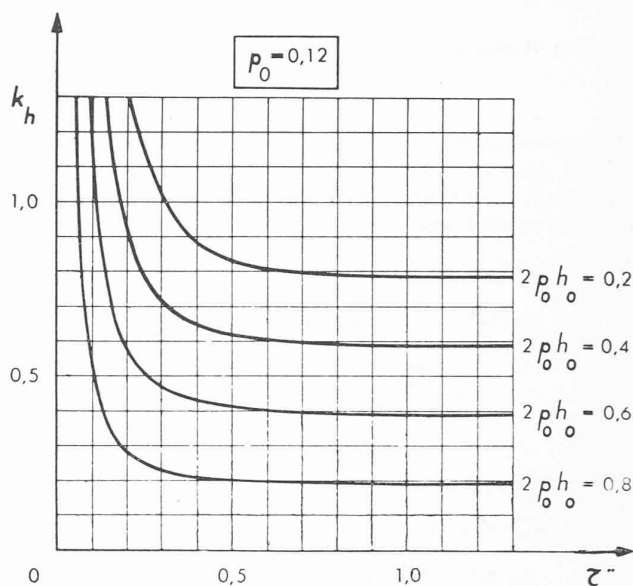


Fig. 7. — Diagramme du coefficient  $k_h$  et du temps  $\overline{\tau}''$  correspondant à la limite de stabilité dans le cas de l'asservissement momentané de puissance à l'écart de pression.

Cas de  $p_o = 0,12$ .  
Paramètre :  $2p_o h_o = 0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,8$  et  $1,0$ .

Le graphique de la figure 7 a été établi de cette façon pour  $p_o = 0,12$ . Ceux correspondant à d'autres valeurs de  $p_o$  ont la même allure. Ils permettent de constater que, pour une valeur déterminée de l'économie à réaliser (valeur de  $2p_o h_o$ ), l'importance de l'asservissement momentané (valeur de  $k_h$ ) augmente au-delà de celle de l'asservissement permanent<sup>15</sup>, au fur et à mesure que diminue la rigidité (valeur de  $\overline{\tau}''$ ) du dit asservissement momentané.

#### X. Fonctionnement en isolé. — Asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de course

Les expressions (33) de l'écart de puissance  $\Delta p$ , (34) de l'écart de débit  $\Delta u$  et (35) du rapport de transmission  $\dot{R}_2$  deviennent dans ce cas les suivantes :

$$\dot{\Delta p} = k_y \frac{i \cdot 2 \pi \overline{\tau}'' f_*}{1 + i \cdot 2 \pi \overline{\tau}'' f_*} \Delta y, \quad (39)$$

$$\dot{\Delta u} = - \frac{1 + i \left(1 + \frac{\alpha k_y}{2}\right) 2 \pi \overline{\tau}'' f_*}{1 + i (1 - \alpha k_y) 2 \pi \overline{\tau}'' f_*} \Delta h_e, \quad (40)$$

$$\dot{R}_2 = h_o \frac{1 + i (1 - \alpha k_y) 2 \pi \overline{\tau}'' f_*}{1 + i \left(1 + \frac{\alpha k_y}{2}\right) 2 \pi \overline{\tau}'' f_*}. \quad (41)$$

<sup>15</sup> En réalité, cette augmentation est précédée d'une légère diminution (voir fig. 7); mais elle est pratiquement négligeable. Les courbes  $2p_o h_o = 0,2 - 0,4 - 0,6$  et  $0,8$  admettent évidemment comme asymptotes les horizontales  $k_h = 0,8 - 0,6 - 0,4$  et  $0,2$ , valeurs correspondant à l'asservissement permanent, pour  $\overline{\tau}'' = \infty$ .



Ces expressions s'établissent de la même façon que celle exposée au chapitre IX, en utilisant en plus l'équation (25) de l'écart de débit.

La courbe de comportement  $\hat{R}_2$  est encore une demi-circonférence, dont le centre est situé sur l'axe des quantités réelles et dont les deux extrémités sur le dit axe correspondent :

au point d'abscisse  $h_o$ , pour  $f_* = 0$  et

au point d'abscisse  $h_o \frac{1 - \alpha k_y}{1 + \frac{\alpha k_y}{2}}$ , pour  $f_* = \infty$ .

La graduation de cette demi-circonférence qui se développe toujours dans le même sens, par valeurs croissantes de la fréquence  $f_*$ , s'obtient à partir de l'angle au centre  $\psi_2$ . On démontre en effet que :

1° si  $0 > \alpha k_y > -2$

$$\psi_2 = \pi - 2 \operatorname{arctg} 2 \pi \left( 1 + \frac{\alpha k_y}{2} \right) \overline{\tau}'' f_*$$

$$\overline{\tau}'' = \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi - \psi_2}{2}}{2 \pi \left( 1 + \frac{\alpha k_y}{2} \right) f_*}$$

2° si  $-2 > \alpha k_y > -\infty$

$$\psi_2 = -2 \operatorname{arctg} 2 \pi \left( 1 + \frac{\alpha k_y}{2} \right) \overline{\tau}'' f_*$$

$$\overline{\tau}'' = \frac{-\operatorname{tg} \frac{\psi_2}{2}}{2 \pi \left( 1 + \frac{\alpha k_y}{2} \right) f_*}$$

La construction graphique s'effectue selon le même processus que celui exposé plus haut au chapitre IX et illustré par la figure 6, toujours pour une valeur déterminée de  $p_o$  et successivement pour différentes valeurs de  $2p_o h_o$ .

Les graphiques des figure 8 pour  $p_o = 0,04$ , figure 9 pour  $p_o = 0,08$ , figure 10 pour  $p_o = 0,12$  et figure 11 pour  $p_o = 0,16$  ont été établis de cette façon. Leurs courbes  $\alpha k_y = f(\overline{\tau}'')$  ont la même allure que celles  $k_h = f(\overline{\tau}'')$  du graphique de la figure 7 relative à l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de niveau. Elles amènent à la même constatation qu'au chapitre précédent, à savoir que l'importance de l'asservissement momentané (valeur de  $\alpha k_y$ ) augmente au fur et à mesure que diminue la rigidité (valeur de  $\overline{\tau}''$ ) du dit asservissement.

Toutefois, cette augmentation n'est pas la même dans les deux cas : asservissement à l'écart de niveau et asservissement à l'écart de course.

Par exemple, pour  $p_o = 0,12$ , alors qu'en vue de réaliser une économie de 40 % ( $2p_o h_o = 0,6$ ) les valeurs des coefficients d'asservissement permanent ( $\overline{\tau}'' = \infty$ ) sont :

dans le cas de l'asservissement à l'écart de pression :  $k_h = 0,4$ ,

dans le cas de l'asservissement à l'écart de course :  $\alpha k_y = 0,364$ .

ceux-ci deviennent pour un asservissement momentané de rigidité  $\overline{\tau}'' = 0,2$ ,

dans le cas de l'asservissement à l'écart de pression :  $k_h = 0,565$  (voir fig. 7) ;

dans le cas de l'asservissement à l'écart de course :  $\alpha k_y = 0,45$  (voir fig. 10).

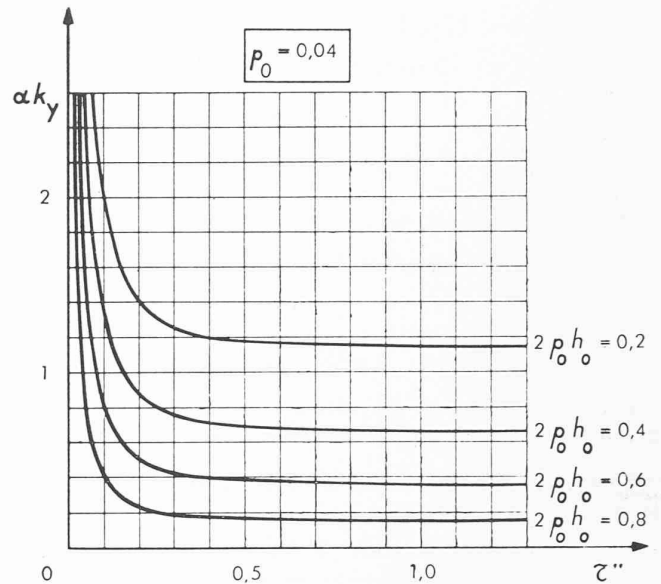


Fig. 8. — Diagramme du coefficient  $\alpha k_y$  et du temps  $\overline{\tau}''$  correspondant à la limite de stabilité dans le cas de l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de course du vannage.

Cas de  $p_o = 0,04$ .  
Paramètre :  $2p_o h_o = 0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,8$  et  $1,0$ .

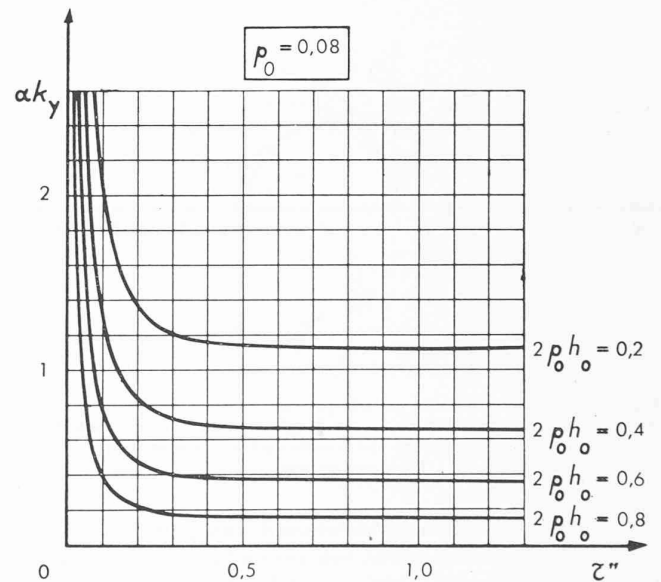


Fig. 9. — Diagramme du coefficient  $\alpha k_y$  et du temps  $\overline{\tau}''$  correspondant à la limite de stabilité dans le cas de l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de course du vannage.

Cas de  $p_o = 0,08$ .  
Paramètre :  $2p_o h_o = 0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,8$  et  $1,0$ .

Le passage de l'asservissement permanent à l'asservissement momentané  $\overline{\tau}'' = 0,2$  entraîne dans le premier cas une augmentation de 41 % du coefficient  $k_h$  et dans le second une augmentation de 23 % du coefficient  $\alpha k_y$ .

En étendant cette comparaison aux différentes courbes  $2p_o h_o$  des divers graphiques  $p_o$ , toujours avec  $\overline{\tau}'' = 0,2$ , on constate que, dans le diagramme cartésien de la figure 4 en  $k_h$  et  $\alpha k_y$ , les paires de valeurs équivalentes de ces coefficients d'asservissement déterminent une série de points pratiquement situés sur une courbe. Cette courbe est tracée en trait pointillé sur la figure 4 et porte la mention  $\overline{\tau}'' = 0,2$ . A côté d'elle sont également tracées en trait pointillé les

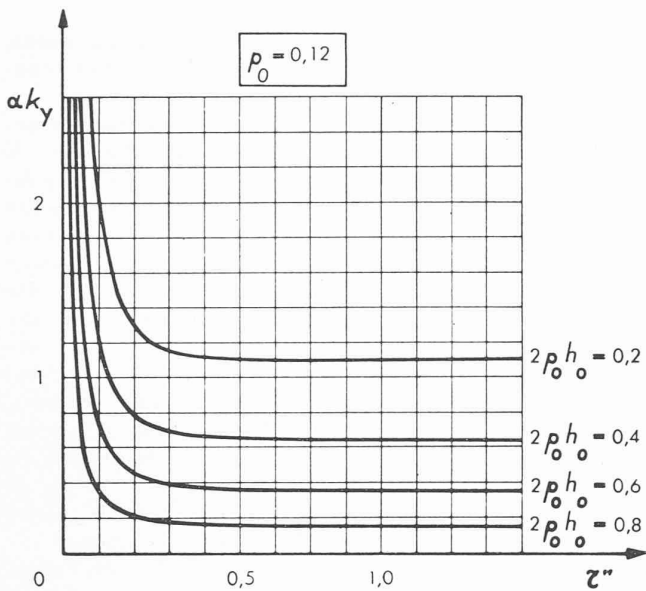


Fig. 10. — Diagramme du coefficient  $ak_y$  et du temps  $\tau''$  correspondant à la limite de stabilité dans le cas de l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de course du vannage.  
Cas de  $p_0 = 0,12$ .  
Paramètre :  $2\rho_0 h_0 = 0,2\ 0,4\ 0,6\ 0,8$  et  $1,0$ .

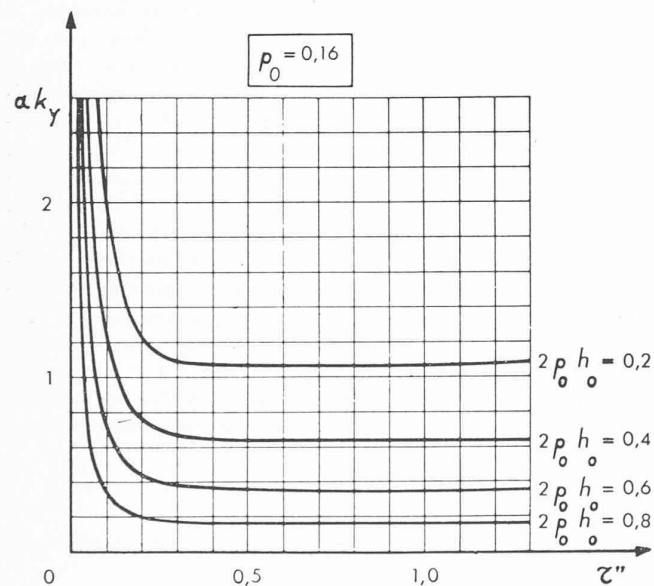


Fig. 11. — Diagramme du coefficient  $ak_y$  et du temps  $\tau''$  correspondant à la limite de stabilité dans le cas de l'asservissement momentané de l'écart de puissance à l'écart de course du vannage.  
Cas de  $p_0 = 0,16$ .  
Paramètre :  $2\rho_0 h_0 = 0,2\ 0,4\ 0,6\ 0,8$  et  $1,0$ .

courbes analogues pour  $\tau'' = 0,1$  et  $\tau'' = 0,3$ . Toutes ces courbes ont la même allure que celle  $\tau'' = \infty$  correspondant à l'asservissement permanent et la rejoignent évidemment à l'origine. Elles s'écartent d'autant plus de cette dernière, en passant au-dessus d'elle, que l'asservissement est moins rigide (faible valeur de  $\tau''$ ).

La crainte que l'on pouvait donc avoir par les considérations relatives à l'asservissement permanent (voir chap. VIII) d'être conduit à des valeurs exagérées du coefficient  $ak_y$ , par rapport à celle du coefficient  $k_h$ , n'a donc pas de raison d'être. Seules des conditions de réalisation pratique peuvent guider dans le choix à faire entre l'une et l'autre des solutions,

celle correspondant à l'asservissement momentané à l'écart de pression et celle correspondant à l'asservissement momentané à l'écart de course.

### XI. Conclusions

Il nous paraît indiqué, en vue de conclure, d'essayer de dégager la philosophie de la présente étude et d'exposer ses résultats, ainsi que leurs raisons d'être, en un langage plus accessible au simple bon sens que le langage mathématique que nous avons surtout utilisé jusqu'ici, tout en espérant ne pas lui avoir donné une tournure trop ardue.

S'il existe une condition de stabilité d'une installation munie d'une chambre d'équilibre, c'est que le réglage de la dite installation provoque une diminution, respectivement une augmentation du débit soutiré en présence d'un écart de pression positif ou négatif, c'est-à-dire d'une dénivellation de même signe du plan d'eau dans la chambre. Or, ces variations du débit soutiré tendent précisément, du fait de leur signe, à entretenir l'oscillation du plan d'eau, qui les provoque. Seuls les frottements (perte de charge) rencontrés par l'écoulement dans la galerie sont en mesure de freiner le mouvement. On conçoit que si, au contraire, on renversait le sens des variations de débit, c'est-à-dire si l'on augmentait, respectivement diminuait le débit soutiré, en présence d'un écart de pression positif ou négatif, on assurerait nécessairement la stabilité, parce que ces variations viendraient s'opposer à l'oscillation du plan d'eau<sup>16</sup> qui les provoque.

Lors du fonctionnement en isolé de l'installation considérée et dans l'hypothèse d'une puissance consommée constante, plus exactement indépendante de toute grandeur intéressant le réglage, ce réglage doit compenser *entièrement*, par une variation du débit soutiré, la variation de puissance motrice qui serait, sans cela, la conséquence de la variation de pression (oscillation du plan d'eau dans la chambre). La condition de stabilité est alors la plus sévère, parce que la variation précitée du débit soutiré est la *plus grande*.

Sans aller, comme envisagé plus haut à titre didactique, jusqu'à renverser le sens de la variation de débit par rapport à la variation de pression, on *facilitera* l'obtention de la stabilité (économie sur la section de la chambre), en *diminuant* l'importance de la variation du débit soutiré, par rapport à la variation de pression.

Le fonctionnement de l'installation considérée, en parallèle avec d'autres, constitue un premier moyen de réaliser cette diminution. Grâce à l'aide que lui apporte le réglage des groupes extérieurs à l'installation considérée, pour maintenir la puissance totale constante, le réglage de la dite installation n'a à compenser que *partiellement*, par une variation du débit soutiré, la variation de puissance motrice qui serait, sans cela, la conséquence de la variation de pression. L'importance de la variation du débit soutiré, par rapport à la variation de pression, est de ce fait diminuée et l'obtention de la stabilité en conséquence facilitée. En d'autres termes, le fonctionnement en parallèle permet à l'installation considérée de régler, non plus à puissance constante, mais avec des écarts de puissance de même sens que les écarts de pression, ce qui réduit les écarts de débit en faveur de l'obtention de la stabilité.

Il s'agit là d'un résultat confirmé par l'expérience et qui ne peut plus être remis en discussion. Or, dans l'état actuel des interconnexions entre réseaux, il se peut que telle installa-

<sup>16</sup> Une augmentation du débit soutiré, supposée provoquée par une dénivellation positive, entraîne une dénivellation négative qui tend à neutraliser la précédente.

tion nouvelle soit prévue pour fonctionner très généralement en parallèle, mais que l'on veuille lui réserver la possibilité de fonctionner exceptionnellement en isolé et ceci d'une façon stable.

Afin d'éviter que la considération de ce cas exceptionnel de fonctionnement ne conduise à un renchérissement de l'exécution de la chambre d'équilibre, à cause d'une condition de stabilité plus difficile à satisfaire, il est logique de chercher à mettre à profit le résultat précité. Toutefois, ne pouvant plus avoir recours à l'aide d'installations extérieures, pour la réalisation des écarts de puissance de l'installation considérée, ces écarts doivent être demandés à la clientèle. Il faut que celle-ci tolère de voir ou la fréquence de la tension, ou la valeur même de la tension qui est fournie à ses appareils de consommation, voire les deux à la fois, varier dans une certaine mesure. Cette variation peut s'opérer, soit en fonction des écarts de pression, comme MM. Gardel et Cuénod l'ont proposé, soit en fonction des écarts de course du vannage, ce qui, comme nous l'avons déjà signalé, ménage de meilleures facilités d'exécution<sup>17</sup>.

Ceci dit, il y a lieu de bien préciser les conditions dans lesquelles une expérience de ce genre pourrait être tentée.

Elle exige tout d'abord, à nos yeux, une connaissance approfondie et sûre de la nature de la clientèle, de la façon dont la puissance qu'elle consomme réagit à une variation de fréquence ou à une variation de tension (puisque c'est cette puissance qu'il s'agit de faire varier) et des limites dans lesquelles elle peut s'accommoder des dites variations.

Par ailleurs, si dans d'autres domaines, notamment dans celui de la stabilisation du réglage de vitesse proprement dit<sup>18</sup>, le recours à une variation imposée de la puissance consommée a été éprouvée avec succès, il ne faut pas oublier qu'il s'agissait, en l'occurrence, de phénomènes de période bien plus courte que ceux dont un système « galerie d'amenée-chambre d'équilibre » est le siège. Il s'ensuit que les oscillations amorties précédant la stabilisation, ainsi que les varia-

tions de fréquence ou de tension qui les accompagneront, seront dans le cas qui nous occupe d'une durée totale beaucoup plus longue.

Dans le même ordre d'idées, remarquons que l'asservissement momentané dont nous avons étudié, aux chapitres IX et X l'emploi, afin de conférer à la loi de variation de puissance un caractère temporaire, doit être doté d'une rigidité très élevée. Pour ne pas trop dépasser, avec l'asservissement momentané, l'importance de l'asservissement permanent assurant la même économie, le temps caractéristique de cette rigidité (temps de relaxation) doit, selon la valeur de la dite économie, être de l'ordre de  $0,2 T$  à  $0,4 T$ <sup>19</sup> ( $T =$  période propre du système « galerie-chambre »), c'est-à-dire en général de plusieurs minutes et non plus de quelques secondes, comme c'est le cas dans le domaine des régulateurs de vitesse. Ni le réglage de la vitesse, ni le réglage de la tension, ne pourraient s'accommoder d'une telle rigidité, si le jeu de l'asservissement envisagé devait s'étendre sur toute la gamme des dénivellations ou sur toute la course du vannage.

Il en résulte donc que, non seulement l'effet de l'asservissement en question devra être temporaire, mais qu'il devra être limité à des écarts relativement réduits, en pression (dénivellation) ou en course du vannage. En d'autres termes, il ne pourra surtout servir qu'à l'amortissement des oscillations de faible amplitude. Pour l'amortissement des oscillations de forte amplitude, plus exactement de celles dont les amplitudes dépasseront les limites d'action de l'asservissement, il faudra donc être assuré d'un autre moyen. Nous pensons par exemple à un dispositif à étranglement inséré dans le raccordement entre la galerie d'amenée et la chambre d'équilibre. L'effet (perte de charge) d'un tel étranglement, proportionnel au carré de la vitesse de l'écoulement qui le traverse, est négligeable dans le cas des oscillations de faible amplitude, pour lesquelles le carré de la valeur du débit entrant ou sortant de la chambre n'est, en valeur relative, que du second ordre. Cet effet peut, au contraire, devenir très appréciable et par conséquent fort bien utilisable, pour des oscillations de grande amplitude mettant en jeu des valeurs plus élevées du débit échangé avec la chambre.

Ce côté de la question nous paraît être d'une importance essentielle et devra, dans chaque cas, faire l'objet d'études ou d'essais préalables, condition nécessaire au succès du mode de réglage envisagé.

<sup>19</sup> Voir figures 7 à 11.

<sup>17</sup> Voir chapitre VIII.

<sup>18</sup> Voir entre autres :

*Considérations sur le problème de la stabilité*, par D. GADEN. La Concorde, 1945.

Rapport n° 324 à la CIGRE 1948 : *Le réglage simultané de la fréquence et de la tension des groupes générateurs. Son incidence sur la régulation du débit des turbines dans les centrales au fil de l'eau*, par R. KELLER.

Rapport n° 133 à la CIGRE 1950 : *A propos de la stabilité du réglage de vitesse d'un groupe turbo-alternateur de basse chute*, par D. GADEN et A. DÉJOU.

## DIVERS

### Droit et urbanisme

#### Le Tribunal fédéral et le plan d'aménagement du territoire de la Municipalité schaffhouseoise de Beringen

Lorsqu'un plan d'aménagement d'un territoire communal institue des zones de construction ainsi que la réglementation nécessaire, le droit des propriétaires de bâtir sur leurs terrains ne peut plus s'y exercer librement. Que devient, dès lors, la garantie constitutionnelle de la propriété privée ?<sup>1</sup> Cette question met en lumière une opposition de principes : d'un côté la collectivité communale est décidée à faire respecter le plan d'aménagement de son territoire, et, d'un autre côté,

le propriétaire privé n'entend pas renoncer à la liberté du droit de bâtir que lui accorde la loi.

Il n'existe pas de législation spéciale permettant de régler un tel conflit ; il appartient au Tribunal fédéral, par sa jurisprudence, de combler cette lacune. La loi (art. 702 C. C. S.) se borne à disposer que la Confédération, les cantons et les communes ont le droit d'apporter des restrictions à la propriété foncière dans l'intérêt public.

Le Tribunal fédéral s'est montré large à l'égard des droits de propriété privée, mais particulièrement sévère en ce qui concerne les conditions de validité à réaliser par les restrictions de droit public au droit de bâtir, instituées par les plans d'aménagement. Ces restrictions ne sont admises par le Tribunal fédéral qu'à trois conditions :

1. Le plan d'aménagement d'un territoire communal doit reposer sur des dispositions légales de droit cantonal.
2. Les restrictions de droit public limitant le droit de bâtir doivent répondre à l'intérêt général.

<sup>1</sup> La garantie constitutionnelle de la propriété privée n'est pas inscrite dans la constitution fédérale, mais dans les constitutions cantonales ; seule la constitution du canton du Tessin est muette sur cet objet.