

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	95 (1969)
Heft:	1
Artikel:	Stabilité de réglage des chambres d'équilibre: étude théorique et expérimentale de l'influence de l'énergie cinétique de la galerie au droit de la chambre
Autor:	Gardel, André
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-70218

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: 26.01.2026

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

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 (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; M. Mozer, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; J. Favre, arch.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et
M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à : Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 495.—
1/2 "	» 260.—
1/4 "	» 132.—
1/8 "	» 68.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Stabilité de réglage des chambres d'équilibre: Etude théorique et expérimentale de l'influence de l'énergie cinétique de la galerie au droit de la chambre, par André Gardel, professeur EPUL, ingénieur-conseil.
Divers. — Bibliographie. — Les congrès. — Société suisse des ingénieurs et des architectes.
Documentation générale. — Informations diverses.

STABILITÉ DE RÉGLAGE DES CHAMBRES D'ÉQUILIBRE

ÉTUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE DE L'INFLUENCE DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DE LA GALERIE AU DROIT DE LA CHAMBRE¹

par ANDRÉ GARDEL, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, ingénieur-conseil

1. Introduction

Lorsqu'une usine hydro-électrique est alimentée par une galerie d'aménée sous pression, il est généralement nécessaire de munir celle-ci d'une chambre d'équilibre. Cette chambre d'équilibre, qui protège l'adduction contre le coup de bâlier et facilite le réglage des groupes, est le siège d'oscillations chaque fois que varie le débit absorbé par les turbines. De telles variations de débit peuvent provenir soit de manœuvres importantes telles que déclenchement de l'usine ou fermeture des vannes de sécurité, soit des continues et petites adaptations de la puissance fournie par l'usine à la puissance consommée par le réseau (fig. 1).

Durant un laps de temps limité, de quelques dizaines de minutes à quelques heures, on peut admettre que les variations de la puissance demandée par le réseau sont suffisamment rapides et distribuées assez au hasard pour que, vis-à-vis de la chambre d'équilibre, la puissance soit considérée comme constante. Dans cette hypothèse, les dispositifs de réglage des turbines interviennent de manière à maintenir également constante la puissance fournie par l'usine, proportionnelle en première approximation au produit du débit par la charge hydraulique sur les turbines.

¹ Etude présentée dans le cadre du symposium AIRH tenu à Lausanne du 8 au 11 octobre 1968. Voir également à ce sujet les articles parus dans les *Bulletins Techniques* N°s 19 du 21 septembre 1968, 20 du 5 octobre 1968, 22 et 23 des 2 et 16 novembre 1968.

Il apparaît alors, du fait du réglage, une possibilité d'entretien d'oscillations dans la chambre d'équilibre ; en effet, supposons que le niveau monte dans la chambre, la pression sur la turbine augmente. Pour que la puissance n'augmente pas, le régulateur intervient et diminue le débit en fermant un peu le vannage. Mais cette réduction du débit a précisément pour effet d'accentuer la montée du niveau dans la chambre. Lors d'une baisse du niveau dans la chambre, on observe le phénomène inverse. Ainsi, une petite oscillation fortuite, qui s'amortirait d'elle-même du fait des frottements et retards, est accentuée par l'effet des dispositifs de réglage et peut être entretenue ou même amplifiée. La détermination des conditions qui doivent être remplies pour que les oscillations s'amortissent constitue le problème de la « stabilité du réglage ».

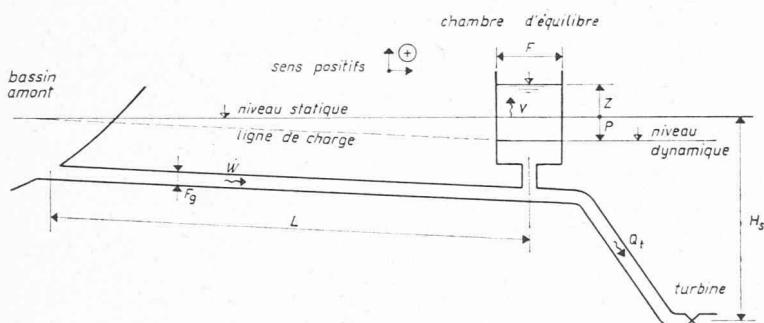


Fig. 1. — Schéma d'un aménagement hydro-électrique.

En 1910 déjà, D. Thoma a analysé ce problème et établi une formule permettant de déterminer la section horizontale de la chambre d'équilibre pour laquelle les oscillations de réglage sont entretenues, section qui doit être dépassée pour que l'amortissement soit assuré.

Depuis lors, de très nombreuses études et publications ont été faites à ce sujet, mettant en évidence l'effet d'autres facteurs que ceux envisagés par Thoma : énergie cinétique à l'insertion de la chambre d'équilibre dans la galerie d'aménée, pente de la courbe de rendement de la turbine, interconnexion du réseau, pertes de charge dans la conduite forcée, etc. On a également calculé l'amortissement de l'oscillation lorsque la section de la chambre est plus élevée que la section limite.

Dans le domaine expérimental, les faits observés sont relativement peu nombreux : des observations en nombre très limité dans des centrales anciennes où la règle de Thoma n'était pas respectée et où l'on a constaté effectivement des oscillations entretenues ; des mesures effectuées sur modèle réduit, les distributeurs des turbines étant remplacés par des vannes manœuvrées à la main et où l'on a très approximativement vérifié les résultats théoriques ; des mesures faites en Italie dans des centrales et qui semblaient infirmer les résultats de Thoma, la stabilité étant assurée avec des sections horizontales notablement inférieures. Ces faits n'ayant pas paru suffisamment probants, des réserves ont été occasionnellement formulées quant à la validité de la formule de Thoma.

Les dimensions résultant de la théorie sont parfois considérables (plusieurs centaines de mètres carrés pour des basses chutes) et ne peuvent alors être obtenues qu'à grands frais. Il est donc d'un intérêt certain de savoir si l'on doit imposer ces dimensions, ou si l'on peut, au contraire, s'écartez des valeurs théoriques, considérées comme trop pessimistes.

Si les bases théoriques de la formule de Thoma sont incontestables, il n'en reste pas moins qu'elle néglige complètement les phénomènes se passant au raccordement de la chambre d'équilibre avec la galerie d'aménée. Cependant, en période d'oscillation du niveau dans la chambre, il se produit en ce point de raccordement des échanges d'eau et d'énergie, avec perte de charge, dont le détail dépend notamment des formes de ce raccordement. L'importance de ces phénomènes dépend évidemment de la vitesse de l'eau ; or il est aisément de montrer en première approximation que plus la vitesse dans la galerie sera grande, plus il sera facile d'obtenir une stabilité de réglage suffisante avec une section de chambre faible. Dès lors, si l'on veut réaliser une chambre d'équilibre économique, on doit augmenter la vitesse de l'eau dans la galerie au point de raccordement (effet venturi), mais alors également on s'écarte de l'hypothèse de Thoma et le calcul devient erroné. La difficulté réside dans le fait que l'erreur est certainement grande, mais qu'on en ignore l'importance exacte. Même dans le calcul tenant compte en première approximation de l'énergie cinétique de l'eau en ce point, on simplifie encore beaucoup trop les choses et, ce qui est particulièrement gênant, on ne sait même plus si l'on se trouve ou non du côté de la sécurité.

C'est à cette question que la présente étude prétend apporter une réponse. Pour y parvenir, deux voies ont été suivies parallèlement, que nous appelons théorique et expérimentale, encore que la première soit elle aussi basée pour une part sur des essais.

a) Voie théorique.

Nous avons tout d'abord déterminé par des essais sur modèles, en régime permanent, la distribution des pressions et des énergies dans le raccordement en Té que constitue le point d'insertion de la chambre dans la galerie. Ces essais ont été exécutés pour divers rapports des sections des conduites et différents angles du raccordement. Les résultats obtenus ont été publiés et nous nous permettons d'y renvoyer le lecteur que le détail intéresserait¹. Il était dès lors possible de procéder à l'analyse théorique du problème et d'obtenir de nouvelles conditions de stabilité. Sans être difficile, ce calcul est rendu compliqué par le nombre des paramètres définissant le raccordement d'une part, et d'autre part du fait que les conditions d'écoulement changent selon que l'eau entre ou sort de la chambre d'équilibre ; les lois sont différentes à chaque demi-période et l'oscillation n'est plus sinusoïdale. Nous avons aussi publié ce calcul et pouvons ainsi éviter de le reprendre ici². Nous en mentionnerons toutefois quel-

¹ « Les pertes de charge dans les écoulements au travers de branchements en Té » par A. GARDEL, *Bulletin technique de la Suisse romande*, 27 avril et 11 mai 1957. Voir également : Publication n° 44 de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.

² *Chambres d'équilibre*, par A. GARDEL. Editeur: Rouge & Cie S.A. à Lausanne. 1956. Cf. p. 82 et 83, notamment formule (176), p. 97.

ques principaux résultats au chapitre 2, à l'occasion du rappel des bases théoriques du problème.

b) Voie expérimentale.

On peut éviter toute la fastidieuse analyse qui précède si l'on construit un modèle complet, allant du lac amont au vannage de la turbine, et qu'on le munit d'une commande automatique de ce vannage. On peut alors donner au raccordement de la chambre d'équilibre toute forme jugée opportune et déterminer directement les conditions limites de la stabilité du réglage. Il est cependant nécessaire que ce modèle soit réalisé à suffisamment grande échelle, et d'autre part — et l'on verra que ce n'est pas le plus facile — que la commande automatique soit de qualité telle que ses inertie, frottement et retard ne puissent perturber sensiblement le phénomène.

C'est dire qu'il fallait disposer de certains moyens. Ceux-ci ont été, à la demande du professeur A. Stucky, octroyés dès 1945 par la Confédération¹ et les essais ont pu être exécutés au Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique ; conduit par l'auteur, ce travail a été soumis à une commission dont faisaient partie MM. les professeurs D. Bonnard, D. Gaden(†) et A. Stucky. Nous souhaitons ici rendre un juste hommage à la contribution de grande valeur qu'y a notamment apportée feu le professeur D. Gaden.

La présente publication a pour premier but de rendre publics les résultats obtenus par cette voie expérimentale. Mais on y trouvera aussi, à l'occasion d'un bref rappel théorique, les principaux résultats fournis par la voie que nous avons appelée théorique. La comparaison de ces résultats fournit la base d'appréciation nécessaire et permet, pensons-nous, de déterminer avec la précision voulue l'influence de l'énergie cinétique de l'eau de la galerie au droit du raccordement de la chambre d'équilibre.

2. Rappel des bases

2.1 Equations fondamentales

Pour l'adduction représentée schématiquement à la figure 1, on peut établir aisément les relations suivantes :

a) application de la loi de Newton à la colonne d'eau de la galerie d'aménée :

$$(1) \quad \frac{L}{g} \frac{dW}{dT} + Z + P = o \quad \text{où } P = \pm P_o (W/W_o)^2$$

b) conservation du débit au raccordement de la chambre d'équilibre :

$$(2) \quad WF_g = VF + Q_t \quad \text{où } V = dZ/dT$$

¹ En application du « Règlement relatif à l'encouragement des recherches scientifiques au moyen de crédits ouverts pour procurer du travail ».

c) puissance constante :

$$(3) \quad Q_o H_o = Q_t (H_s + Z) \quad \text{où } H_o = H_s - P_o .$$

L'indice « *o* » se rapporte aux valeurs de régime.

Notons qu'il s'agit ici d'un calcul simplifié ne tenant en particulier pas compte de la perte de charge dans la conduite forcée, ni des variations du rendement autour du point de régime, ni de l'effet de l'interconnexion, etc. Nous avons montré ailleurs qu'il est possible de tenir compte de ces influences¹, de même que de celles de dimensions limitées du bassin amont². Nous admettons donc que ces divers effets sont ainsi suffisamment connus pour être laissés de côté ici.

Nous reviendrons ultérieurement sur l'influence de l'énergie cinétique de la galerie au droit de la chambre d'équilibre, influence dont la détermination constitue comme indiqué plus haut l'objet principal de la présente étude.

2.2 Valeurs relatives

Si, pour simplifier l'écriture, nous faisons usage de valeurs relatives, nous pouvons rapporter les hauteurs Z , P , H_s à la perte de charge de régime P_o , le débit Q_t dans la conduite forcée au débit de régime Q_o , le temps à un temps de référence T_o et la section horizontale F de la chambre à S_o :

$$\begin{aligned} z &= Z/P_o & p &= P/P_o & h &= H_s/P_o & w &= W/W_o & \nu &= VF/Q_o \\ q &= Q_t/Q_o & t &= T/T_o & & & & & \text{où } T_o = W_o L/g P_o \\ s &= F/S_o & & & & & & & \text{où } S_o = W_o^2 L F_g / g P_o^2 \end{aligned}$$

Compte tenu de ce que nous n'étudierons que des oscillations autour de la valeur de régime, le double signe de la définition de P disparaît, d'où

$$(1a) \quad dw/dt + z + p = 0 \quad \text{où } p = w^2$$

$$(2a) \quad \omega = \nu + q \quad \text{où } \nu = s \cdot dz/dt$$

$$(3a) \quad h - 1 = q(h + z)$$

Mettons en évidence les écarts des variables par rapport aux valeurs de régime en remplaçant une variable quelconque y par $\Delta y + y_o$, d'où

$$z = \Delta z - 1 \quad p = \Delta p + 1 \quad w = \Delta \nu + 1$$

$$\nu = \Delta \nu \quad q = \Delta q + 1$$

et représentons par \dot{y} et \ddot{y} les dérivées première et seconde par rapport au temps. Il vient :

$$(1b) \quad \Delta \dot{\nu} + \Delta z + \Delta p = 0 \quad \text{où } \Delta p = 2 \Delta \nu$$

$$(2b) \quad \Delta \nu = \Delta \nu + \Delta q \quad \text{où } \Delta \nu = s \cdot \Delta \dot{z}$$

$$(3b) \quad \Delta z / (h - 1) = -\Delta q$$

En éliminant p , ν et q , on trouve

¹ « Influence de la partie de l'aménagement située à l'aval de la chambre d'équilibre sur les petites oscillations avec réglage automatique ». *Bulletin technique de la Suisse romande* du 28 septembre 1957.

² Chambres d'équilibre, op. cit., note 2 p. 2.

$$(4) \quad \Delta \ddot{z} + \Delta \dot{z} \left[2 - \frac{1}{s(h-1)} \right] + \Delta z \frac{h-3}{s(h-1)} = 0$$

équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants.

2.3 Condition de Thoma

Sans entrer dans le détail de la discussion de cette équation, il est facile de voir qu'elle correspond à un mouvement sinusoïdal entretenu si le coefficient de $\Delta \dot{z}$ est nul, celui de Δz étant positif (l'équation caractéristique admet alors deux racines imaginaires). Ce cas se présente si

$$(5) \quad 2s(h-1) = 1 \quad \text{avec } h \geq 3$$

La seconde condition, $h \geq 3$, soit $H_s \geq 3P_o$ étant toujours satisfaite en pratique (on ne conçoit guère un aménagement dont la perte de charge de la galerie d'aménée dépasserait le tiers de la chute brute), la première est seule déterminante. Elle n'est autre que la condition de Thoma bien connue

$$(6) \quad F_t = \frac{W_o^2}{2g} \cdot \frac{L F_g}{P_o H_o}$$

F_t désignant donc la section horizontale de la chambre d'équilibre pour laquelle les petites oscillations dues au réglage à puissance constante sont entretenues.

2.4 Calcul simplifié de l'influence de l'énergie cinétique

Il est possible, en première approximation, de tenir compte de l'énergie cinétique de l'eau de la galerie au droit du raccordement de la chambre en ajoutant cette énergie à la perte de charge P de la galerie. En effet, en régime permanent, le niveau dans la chambre joue le rôle d'un piézomètre¹ et s'abaisse de la somme $(P_o + E_o)$, où E_o est la hauteur représentative de cette énergie cinétique :

$$E = \frac{W_i^2}{2g} \quad \text{où } W_i = \text{vitesse dans la galerie au point d'insertion de la chambre}$$

$$E_o = \frac{W_{io}^2}{2g}, \quad \text{valeur de régime.}$$

Dès lors, les relations (1) et (3) sont modifiées en

$$(1') \quad \frac{L}{g} \frac{dW}{dT} + Z + P + E = 0 \quad \text{où } E = E_o (W/W_o)^2$$

$$(3') \quad Q_o H_o = Q_t (H_s + Z + E) \quad \text{où } H_o = H_s - P_o$$

En valeurs relatives et aux écarts, on trouve :

$$(1b') \quad \Delta \dot{w} + \Delta z + \Delta p + \Delta e = 0$$

où $\Delta e = 2e_o \Delta w$ avec $e_o = E_o/P_o$

¹ On suppose évidemment ici que le raccordement de la chambre ne perturbe pas l'écoulement direct ; ce serait assez exactement le cas pour un branchement en Té.

$$(3b') \quad (\Delta z + \Delta e)/(h-1) = -\Delta q.$$

(éq. (2b) inchangée)

Il en résulte l'équation différentielle du mouvement

$$(4') \quad \Delta \ddot{z} + \Delta \dot{z} \left[2(e_o + 1) - \frac{1}{s(h-1)} \right] + \Delta z \frac{h-3}{s(h-1)} = 0$$

Le mouvement est donc sinusoïdal si

$$(5') \quad 2s(e_o + 1)(h-1) = 1$$

d'où une forme amendée de la condition de Thoma

$$(6') \quad \boxed{F'_t = \frac{W_o^2}{2g} \cdot \frac{L F_g}{(P_o + E_o) H_o}} \quad \text{où } H_o = H_s - P_o$$

On sait que la section horizontale à donner à la chambre d'équilibre est d'autant plus grande que la chute est faible (ce qui ressort clairement de la présence de H_o au dénominateur de la formule). Dans ce cas, on ne saurait tolérer une perte de charge élevée dans la galerie d'aménée : P_o est petit, et le rôle de E_o en est accru d'autant. Il peut aller jusqu'à réduire la section de la chambre d'un tiers ou même de la moitié¹.

C'est cette influence très grande de E_o qui conduit à choisir une valeur élevée de W_i , vitesse à l'insertion, mais également qui nécessite de mieux assurer ce calcul.

Il n'y a pas de doute en effet que les petites oscillations dans la chambre s'accompagnent d'un faible débit vers la chambre et en provenance de celle-ci ; l'écoulement au droit du raccordement en est perturbé et ses lois sont modifiées. Il n'est dès lors plus certain que l'on puisse simplement ajouter E_o à P_o ; il est même probable que cette hypothèse de calcul est inexacte. C'est à préciser l'effet de E_o que nous allons nous efforcer, tout d'abord en rappelant les résultats obtenus par la voie que nous avons appelée « théorique » (essais d'écoulement en Té en régime permanent, puis calcul du mouvement entretenu), puis par la voie « expérimentale » (essais d'un modèle complet en simulant la condition de puissance constante).

3. Etude théorique

3.1 Coefficients résultant de mesures sur modèle

Nous supposons au départ que des essais sur modèle ont été effectués, de telle sorte que les pertes de charges au raccordement de la chambre sur la galerie sont connues pour tout partage de l'écoulement entre les trois branches du Té ainsi constitué.

¹ Avec, par exemple, un débit de 300 m³/s sous une chute brute de 30 m et une galerie de 3 km, on pourrait admettre une vitesse $W_o = 3,6$ m/s, d'où $P_o = 1,74$ m, soit environ 6 % de la chute (K Strickler = 80). La section F_t est de 2600 m². Pour $W_i = 3,6$ m/s la section F'_t est de 1890 m² ; en augmentant W_i à 6 m/s, on trouve F'_t égal à 1340 m², soit 52 % de diminution par rapport à F_t et 33 % par rapport à F'_t calculé avec $W_i = 3,6$ m/s.

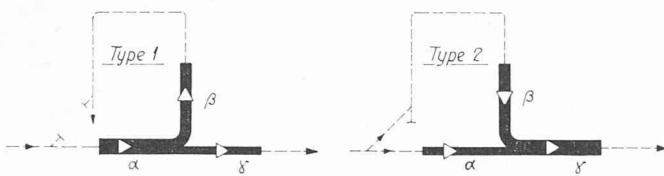


Fig. 2. — Types d'écoulements examinés.

Le schéma d'un tel essai est indiqué à la figure 2 ; les débits dans les trois branches étant Q_α , Q_β et Q_γ , on peut caractériser le fractionnement de l'écoulement en rapportant le débit Q_β (entrant ou sortant de la chambre) au débit total, soit Q_α dans le type 1 et Q_γ dans le type 2. On a ainsi

$$\begin{array}{lll} \text{1er type} & Q_\beta > 0 & q_\beta = Q_\beta/Q_\alpha \\ \text{2e type} & Q_\beta < 0 & q_\beta = Q_\beta/Q_\gamma \end{array}$$

La perte de charge entre deux branches est obtenue en prolongeant les lignes piézométriques observées à distance de la singularité, comme on le voit à la figure 3.

La charge dans la branche α étant utilisée comme valeur de référence, on peut calculer des valeurs relatives en divisant les pressions, charges et énergies cinétiques par l'énergie cinétique $V^2/2g$ de la branche où le débit est total (α pour le premier type, γ pour le deuxième). On obtient ainsi expérimentalement un diagramme semblable à celui de la figure 4.

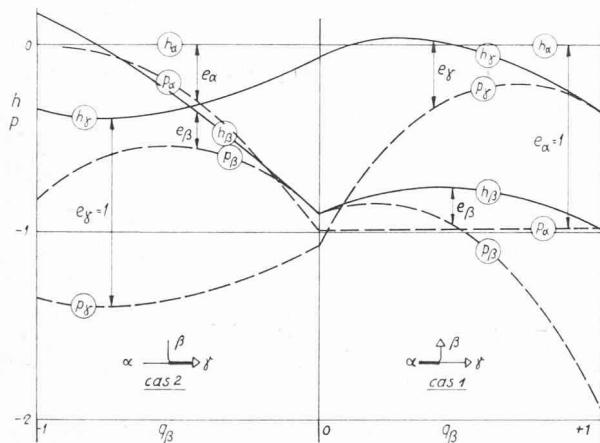


Fig. 4. — Diagramme des charges et pressions relatives.

Rappelons, à titre d'exemple, que de tels essais ont été effectués pour diverses formes de raccordement,

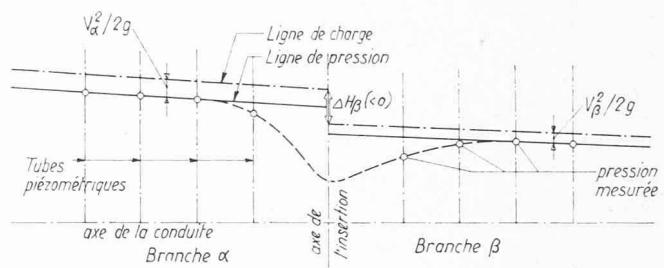


Fig. 3. — Principe de détermination de la perte de charge.

définies à la figure 5 ; ces formes sont déterminées par deux paramètres :

ϕ : rapport de la section de la branche β à celles, identiques, des branches α et γ ;
 δ : angle des branches α et β .

S'agissant ici uniquement du cas de petites oscillations, seules nous intéressent les variations des charges autour des valeurs de régime.

Dans ce cas, la charge peut être définie à partir de la valeur oh à l'origine ($q_\beta = 0$) et du coefficient angulaire $\pm m$ (+ pour $q_\beta > 0$ et — pour $q_\beta < 0$), d'où

$$(7) \quad \pm h_\psi = oh_\psi + \pm m_\psi \cdot q_\beta$$

où ψ peut être remplacé par β ou γ (ou par $\gamma\beta$ s'il s'agit de la différence entre les branches β et γ ¹).

Les essais susmentionnés ont fourni les valeurs suivantes :

$$oh_\beta = -0,95 \quad +m_\beta = 1,9 - 0,4 \left(1 + \frac{1}{\phi}\right) \cotg \frac{\delta}{2} \\ +m_\beta = -1,9$$

$$oh_\gamma = -0,03 \quad +m_\gamma = 0,26 \\ -m_\gamma = 1,94 - \phi$$

$$oh_{\gamma\beta} = 0,92 \quad +m_{\gamma\beta} = -1,64 + 0,4 \left(1 + \frac{1}{\phi}\right) \cotg \frac{\delta}{2} \\ -m_{\gamma\beta} = 3,84 - \phi.$$

3.2 Equation du mouvement dans la chambre d'équilibre

Il est dès lors possible d'établir à nouveau l'équation de Newton relative à la galerie d'aménée, compte tenu de la perte de charge $\pm h_\beta$ entre galerie et chambre, et

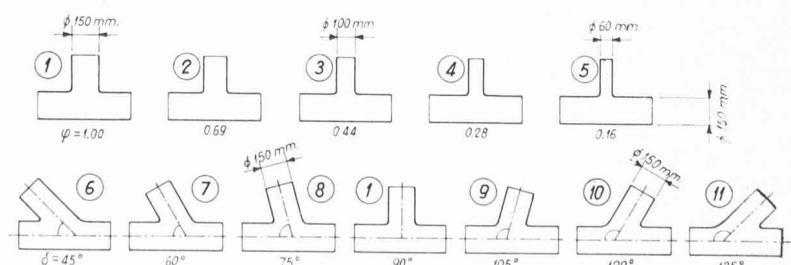


Fig. 5. — Formes de raccordement étudiées.

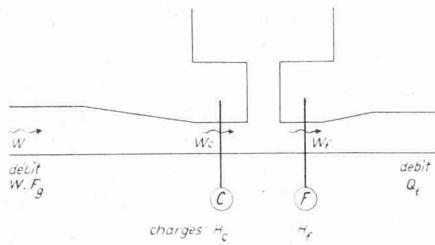


Fig. 6. — Définition des sections C et F .

des vitesses W_c et W_f dans la galerie de part et d'autre du raccordement (fig. 6) :

$$(1'') \quad \frac{L}{g} \frac{dW}{dT} + Z + P + \pm h_\beta \cdot \frac{W_{c \text{ ou } f}^2}{2g} = \begin{cases} c \text{ ou } f \\ + \text{ ou } - \end{cases} \text{ selon } v \geq 0$$

avec $\frac{W_o^2}{2g} = \frac{W_{io}^2}{2g} \left(\frac{W_c}{W_{io}} \right)^2 = E_o \left(\frac{W}{W_o} \right)^2 = E_o v^2$

et de même $W_f^2/2g = E_o q^2$

En valeurs relatives, après division par P_o

$$(1a'') \quad \dot{\psi} + z + p - \pm h_\beta e_o (\omega^2 \text{ ou } q^2) = 0$$

Comme précédemment, on peut introduire les écarts des variables par rapport aux valeurs de régime, en notant cependant que :

$$Z_o = -P_o + \pm h_\beta \frac{W_{c_o}^2}{2g} = -P_o + \pm h_\beta \cdot E_o$$

$$z = \frac{Z}{P_o} = \frac{Z_o}{P_o} + \frac{\Delta Z}{P_o} = \frac{Z_o}{P_o} + \Delta z = \Delta z - 1 + e_o \cdot \pm h_\beta$$

d'où :

$$\Delta \dot{\psi} + \Delta z + e_o \cdot \pm h_\beta + \Delta p - e_o \pm h_\beta [1 + 2(\Delta \omega \text{ ou } \Delta q)] = 0$$

et compte tenu de (7), et de $q_\beta \equiv v = \Delta \omega$

$$(1b'') \quad \Delta \dot{\psi} + \Delta z + \Delta p - 2e_o \cdot \pm h_\beta (\Delta \omega \text{ ou } \Delta q) - \pm m_\beta e_o \Delta \omega = 0$$

où $\Delta p = 2 \Delta \omega$.

La condition de conservation du débit n'est pas modifiée, soit :

$$(2b'') \quad \Delta \omega = \Delta \omega + \Delta q \quad \text{où } \Delta \omega = s \cdot \dot{\Delta z}.$$

Quant à la condition de puissance constante, elle doit maintenant tenir compte de la perte de charge existante entre les sections c et f , à savoir :

$$(8) \quad H_f = H_c + \pm h_\gamma \frac{W_{c \text{ ou } f}^2}{2g}$$

$$(9) \quad \text{avec } H_f = H_s + Z + \pm h_\gamma \frac{W_{c \text{ ou } f}^2}{2g}$$

La puissance est constante si $Q_t H_f = Q_o H_{f_o}$

$$\text{De (9) on tire } H_{f_o} = H_s + Z_o + \pm h_\gamma \beta \frac{W_{c_o}^2}{2g}.$$

En introduisant la valeur de Z_o calculée plus haut, on obtient :

$$(3'') \quad Q_t \left(H_s + Z + \pm h_\gamma \beta \frac{W_{c \text{ ou } f}^2}{2g} \right) = Q_o \left(H_s - P_o + \pm h_\gamma \beta \frac{W_{c_o}^2}{2g} \right)^2.$$

En valeurs relatives, après division par $Q_o P_o$:

$$(3a'') \quad q [h + z + \pm h_\gamma \beta e_o (\omega^2 \text{ ou } q^2)] = h - 1 + \pm h_\gamma e_o$$

et aux écarts :

$$(3b'') \quad \Delta z + \pm h_\gamma \beta 2e_o (\Delta \omega \text{ ou } \Delta q) + \pm m_\gamma \beta e_o \Delta \omega + \Delta q (h - 1 + e_o \cdot \pm h_\gamma) = 0.$$

Après remplacement de $\Delta \omega$ par $s \cdot \dot{\Delta z}$ et de Δp par $2 \Delta \omega$, on peut éliminer Δq et $\Delta \omega$ entre les trois équations (1b''), (2b'') et (3b'').

En posant, pour simplifier l'écriture,

$$(10) \quad \begin{aligned} h_o &= h - 1 + \pm h_\gamma e_o && \text{indices} \\ \pm c_1 &= 2 \pm h_\gamma \beta \cdot (0 \text{ ou } 1) - \pm m_\gamma \beta && + \text{ ou } - \text{ et} \\ \pm c_2 &= -2 \pm h_\beta \cdot (1 \text{ ou } 0) - \pm m_\beta && \text{alternatives} \\ \pm c_3 &= -\pm m_\beta \cdot \pm h_\gamma \beta + \pm m_\gamma \beta \cdot \pm h_\beta && \text{selon } v \geq 0 \end{aligned}$$

on trouve l'équation différentielle du mouvement :

$$(11) \quad \Delta \ddot{z} \cdot s (h_o + e_o c_1) + \Delta \dot{z} [2s h_o - 1 + s e_o (2c_1 + h_o c_2 + 2e_o c_3)] + \Delta z (h_o - 2 + 2e_o \cdot \pm h_\gamma) = 0.$$

On vérifie que si $e_o = 0$ on retrouve l'équation (4) déjà établie.

Les coefficients c_1 c_2 c_3 dépendent des formes du raccordement entre galerie et chambre. Avec les valeurs de $\pm h$ et m obtenues expérimentalement et rappelées plus haut, ces coefficients peuvent être calculés. Le résultat en est donné aux abaques de la figure 7.

3.3 Condition de stabilité

Il convient tout d'abord de relever que l'équation (11) n'a pas la même forme selon que v est positif ou négatif ($+v$ ou $-v$). En d'autres termes, la loi du mouvement

¹ Par exemple $h_\gamma \beta = h_\gamma - h_\beta = (h_\gamma - h_\alpha) - (h_\beta - h_\alpha)$.

² Car $\pm h_\gamma \beta \equiv \pm h_\gamma$

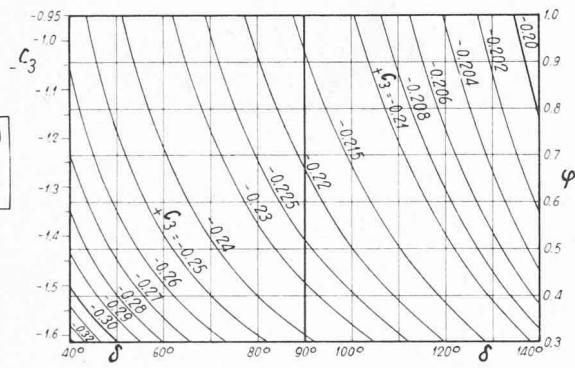
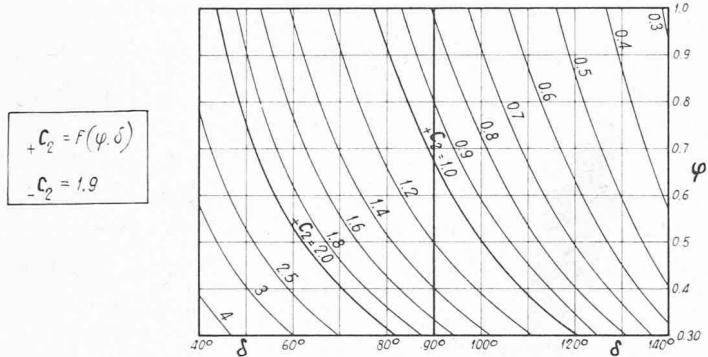
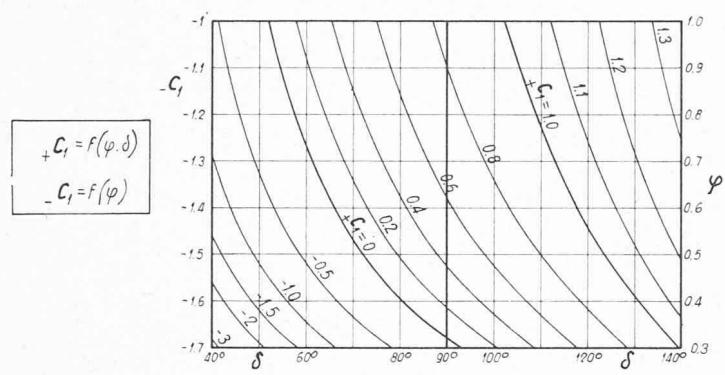


Fig. 7. — Coefficients C_1 C_2 C_3 tirés des essais et caractérisant l'influence des formes du raccordement.

est différente selon que l'eau entre ou sort de la chambre ; elle change donc à chaque demi-oscillation. Le mouvement est ainsi représenté par

$$\Delta z = c e^{+\frac{\alpha t}{\varphi}} \sin (\beta t + \mu) \text{ pour } \varphi > 0$$

$$\Delta z = c e^{-\frac{\alpha t}{\beta}} \sin(\beta t + \mu) \text{ pour } \vartheta < 0$$

c , μ , paramètres changeant à chaque demi-oscillation, selon figure 8.

On peut montrer¹ que le mouvement résultant est une oscillation isochrone de période $2\pi/\beta$ et dont l'exponentielle enveloppe a l'exposant α , tels que

$$(42) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta_+} + \frac{1}{\beta_-} \right) \\ \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta_+} + \frac{\alpha}{\beta_-} \right). \end{array} \right.$$

Le mouvement est entretenu si $\alpha = 0$

$$(13) \quad \text{d'où } \alpha \beta = -\alpha \beta.$$

L'équation différentielle (11) étant écrite sous la forme résumée

$$\Delta \ddot{z} + {}_{\pm} a_1 \Delta \dot{z} + {}_{\pm} a_0 \Delta z = 0$$

on a :

$$\alpha = -\pm a_1/2$$

$$\beta_{\pm} = \sqrt{\pm a_0 - \pm a_1^2/4}.$$

La condition (13) s'écrit donc

$$(14) \quad +a_1 \sqrt{-a_0} / -a_1 \sqrt{+a_0} = -1 .$$

En désignant par x_o le rapport de la section horizontale F_o pour laquelle les petites oscillations de réglage sont entretenues à celle de la section de Thoma F_t , on vérifie que l'on a par définition

$$(15) \quad x_o = \frac{F_o}{F_t} = 2sh_o.$$

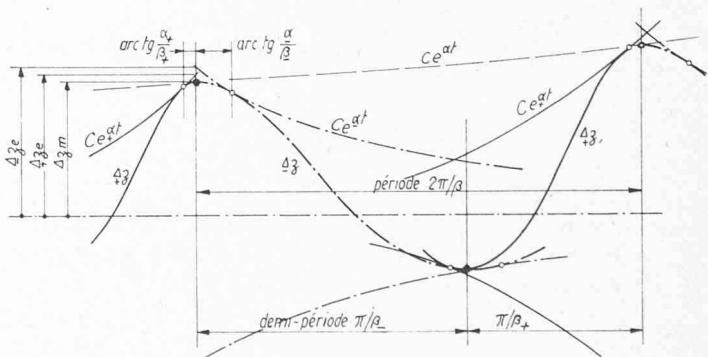


Fig. 8. — Mouvement résultant du plan d'eau dans la chambre.

On peut ainsi remplacer $\pm a_1$ et $\pm a_0$ de la condition (14) par leurs valeurs prises dans (11) et remplacer s par x tiré de (15).

¹ *Op. cit.*, note 2, p. 2.

On trouve alors :¹

$$(16) \quad x_o = \frac{1 + k}{1 + k + \frac{e_o}{h_o} \left[+c_1 + k_- c_1 + \frac{h_o}{2} (+c_2 + k_- c_2) + +e_o (+c_3 + k_- c_3) \right]}$$

où $k = \sqrt{\frac{h_o + e_o + c_1}{h_o + e_o - c_1}}$.

On vérifie immédiatement que $x = 1$ si $e_o = 0$, ce qui est évident. Mais on peut également reprendre les hypothèses du calcul simplifié (§ 2.4 ci-dessus) ; elles correspondent à $\pm c_1 = 0$, $\pm c_2 = 2$ et $\pm c_3 = 0$

d'où $x_o = \frac{1}{1 + e_o/h_o}$, déjà obtenu.

La formule (6') apparaît donc comme un cas particulier de la condition (16).

3.4 Abaques

Pour le cas le plus fréquent où le raccordement en direction de la chambre a le même diamètre que la galerie en ce point ($\phi = 1,00$), et pour trois valeurs de l'angle de raccordement ($\delta = 60^\circ$, 90° et 120°), les valeurs de x_o ont été calculées à partir de la formule (16) et reportées en trois abaques (fig. 9). On trouve en ordonnée la section horizontale F_o pour laquelle les petites oscillations à puissance constante sont entretenues, section rapportée à la section de Thoma, formule (6) ($F_o/F_t = x_o$) ; en abscisse est reportée la perte de charge P_o rapportée à la chute nette $H_o = H_s - P_o$, ($P_o/H_o = 1/h_o$) ; les courbes sont tracées pour diverses valeurs de l'énergie cinétique E_o de l'eau de la galerie au droit de la chambre, rapportée à la perte de charge P_o , ($e_o = E_o/P_o$). En pointillé sont tracées les courbes pour lesquelles le rapport de l'énergie cinétique E_o à la chute nette H_o est constant ($E_o/H_o = e_o/h_o$).

3.5 Formules simplifiées

On peut tenir compte, dans la formule (16), de ce que e_o/h_o est généralement inférieur à 0,1 et négliger les termes d'ordre supérieur. On obtient ainsi :

$$(17) \quad x_o \cong \frac{1}{1 + \frac{e_o}{h_o} \left[m c_1 + \frac{h_o}{2} m c_2 + e_o m c_3 - \frac{e_o}{16} \Delta c_1 \Delta c_2 \right]}$$

où $m c_i = \frac{1}{2} (+c_i + -c_i)$ et $\Delta c_i = +c_i - -c_i$.

¹ La formule (16) corrige celle indiquée sous (176), p. 97 de l'*op. cit.*, note 2, p. 2.

Dans le cas particulier, et fréquent, où $\delta = 90^\circ$ et $\phi = 1,00$, et compte tenu de toutes les formules qui précèdent, on trouve

$$x_o \cong \frac{1}{1 + 0,68 e_o - 0,08 \frac{e_o}{h_o} - 0,59 \frac{e_o^2}{h_o}}$$

soit approximativement et en valeurs absolues

$$(18) \quad \frac{F_o}{F_t} \cong \frac{1}{1 + \frac{E_o}{P_o} \left(0,7 - 0,6 \frac{E_o}{H_o} \right)} \quad \text{pour } \begin{cases} \delta = 90^\circ \\ \phi = 1,00 \end{cases}$$

La valeur de l'énergie cinétique E_o ne dépend que de la vitesse de régime de l'eau de la galerie au point d'insertion de la chambre, soit :

$$\begin{array}{ccccccc} W_{io} & = & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \quad \text{m/s} \\ E_o & = & 0,46 & 0,82 & 1,27 & 1,84 & 2,50 \quad \text{m.} \end{array}$$

On voit que pour de basses chutes, E_o ne dépassera qu'exceptionnellement la valeur de la perte de charge P_o . Si l'on admet de surcroît que cette dernière reste inférieure au dixième de la chute, on vérifie aisément sur la figure 9 ($\delta = 90^\circ$) que l'influence de E_o/H_o est faible dès que E_o/P_o est fixé. On peut donc écrire encore plus simplement :

$$(19) \quad \frac{F_o}{F_t} \sim \frac{1}{1 + \lambda \frac{E_o}{P_o}} \quad \begin{array}{cc} \lambda \text{ pour } \delta & \\ 0,75 & 60^\circ \\ 0,65 & 90^\circ \\ 0,55 & 120^\circ \end{array} \quad \text{où}$$

3.6 Conclusion de l'étude théorique

Les pertes de charge entre les trois branches du Té, constituées par l'insertion de la chambre dans la galerie, étant supposées connues (par exemple par mesure sur modèle réduit, en régime permanent), il est possible de déterminer la section horizontale de la chambre d'équilibre pour laquelle les petites oscillations à puissance constante sont entretenues : relation (16) ci-dessus.

L'influence de la vitesse de l'eau dans la galerie au point d'insertion est importante, mais elle n'a pas la valeur calculée en première approximation au chapitre 4, relation (6'). En particulier pour un raccordement « normal » (perpendiculaire à la galerie et de même diamètre, c'est-à-dire avec $\phi = 1$ et $\delta = 90^\circ$) on trouve que l'énergie cinétique de l'eau de la galerie n'intervient qu'avec le 65 % environ de sa valeur, relation (19).

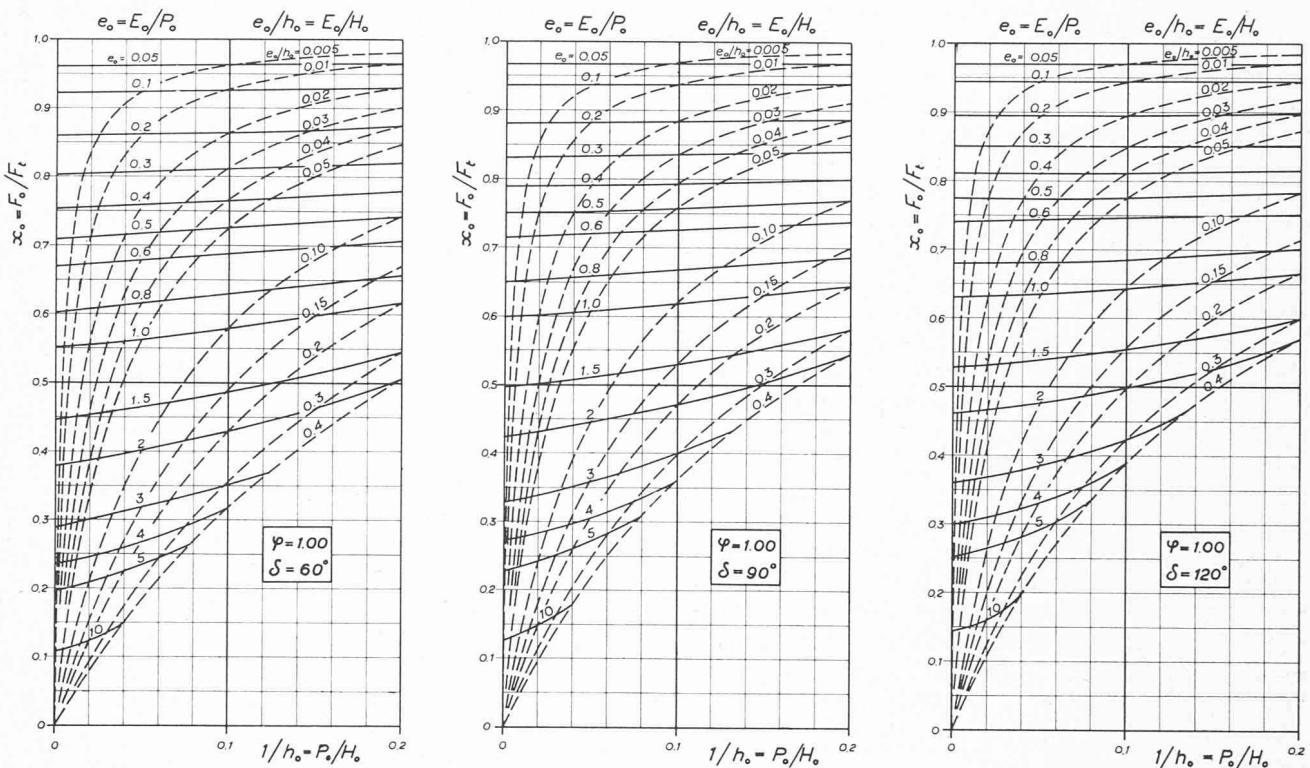


Fig. 9. — Section limite relative $x_0 = F_0/F_t$ obtenue analytiquement pour diverses orientations δ du raccordement de la chambre.

On constate donc que l'écart est important ; mais surtout le calcul plus précis qui a été effectué montre que l'effet stabilisant de l'énergie cinétique est notablement moins élevé (environ 35 %) qu'on aurait pu le supposer. Si l'on entend tenir compte de cet effet stabilisant — et pour les basses chutes, il est indispensable de le faire — on ne saurait ignorer cette réduction

par un facteur de l'ordre de 0,6 à 0,7 sans commettre une erreur fortement préjudiciable à la bonne marche de l'installation.

Il était dès lors intéressant de vérifier cette conclusion théorique par une recherche expérimentale, dont les résultats font l'objet du chapitre suivant.

(A suivre)

DIVERS

Importation et vente d'appareils électriques

Le Conseil fédéral a mis en vigueur, le 23 octobre 1968, un arrêté modifiant l'Ordonnance sur l'établissement, l'exploitation et l'entretien des installations électriques à courant fort. Cet arrêté a la teneur suivante :

I.

L'Ordonnance du 7 juillet 1933 sur l'établissement, l'exploitation et l'entretien des installations électriques à fort courant est modifiée comme il suit :

Art. 121 bis, 4^e al.

Le matériel d'installation et les appareils électriques importés sont soumis à l'épreuve obligatoire, comme le matériel de provenance suisse. Les offices de douane doivent aviser l'Inspection fédérale des installations à courant fort et lui envoyer une copie de la déclaration de douane si, lors de la vérification douanière de la marchandise, ils constatent l'absence du signe distinctif de sécurité prescrit. De plus, l'Inspection fédérale des installations à courant fort est autorisée à demander que, pendant un certain temps, l'Administration des douanes lui signale

les importations de matériel d'installation ou d'appareils bien définis.

II.

Le présent arrêté entre en vigueur le 1^{er} novembre 1968.

En application des articles 121 et suivants de l'Ordonnance fédérale du 7 juillet 1933/24 octobre 1949 sur les installations à courant fort, il y a lieu de s'assurer que le matériel et les appareils mentionnés dans la liste annexée au règlement de l'Association suisse des électriciens (ASE) sur le signe de sécurité — matériel destiné à constituer des installations intérieures et appareils destinés à leur être raccordés — sont conformes aux prescriptions de l'ASE sur les mesures de sécurité, en tant qu'elles sont approuvées par le Département fédéral des transports et communications et de l'énergie. Le matériel et les appareils reconnus conformes à ces prescriptions doivent être munis du signe de sécurité, sans lequel il n'est pas permis de les mettre sur le marché suisse. L'autorisation de les vendre est accordée par l'Inspection fédérale des installations à courant fort, à laquelle incombe aussi la tâche de veiller au respect de cette législation. C'est la raison pour laquelle l'Inspection opère, dans toute la mesure de ses