

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 62 (1936)  
**Heft:** 20

**Artikel:** Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre  
**Autor:** [s.n.]  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-47604>

#### **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:** 27.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

### ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs  
Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :  
Suisse : 1 an, 10 francs  
Etranger : 12 francs

Prix du numéro :  
75 centimes.

Pour les abonnements  
s'adresser à la librairie  
F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

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 d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; A. ROSSIER, ingénieur ; *Vaud* : MM. C. BUTTICAZ, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; EPITAUX, architecte ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. ODIER, architecte ; CH. WEIBEL, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur cantonal ; *Valais* : MM. J. COUCHEPIN, ingénieur, à Martigny ; H. HAENNY, ingénieur, à Sion.

RÉDACTION : H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires, LA TOUR-DE-PEILZ.

### CONSEIL D'ADMINISTRATION DU BULLETIN TECHNIQUE

A. DOMMER, ingénieur, président ; G. EPITAUX, architecte ; M. IMER ; E. SAVARY, ingénieur.

SOMMAIRE : *Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre. — L'action des lames de tempe sur les digues maritimes à paroi verticale. — L'éclairage des grandes voies de communication. — Journées de discussion de l'« Electrodifusion ».*

NÉCROLOGIE : *Ernest Prince, architecte. — Société suisse des ingénieurs et des architectes. — BIBLIOGRAPHIE.*

### COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

Directeur : M. A. STUCKY, professeur.

## Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre.

### Chap. I. — Introduction.

La théorie générale des chambres d'équilibre a été développée d'une manière très complète dans un certain nombre d'ouvrages et d'articles de revues techniques, dont quelques-uns sont devenus classiques<sup>1</sup>. Les chambres d'équilibre de forme simple qui ont été dimensionnées correctement sur la base de ces théories n'ont, à notre connaissance, pas donné lieu à des déboires. Cependant, des observations exactes et systématiques de chambres en exploitation n'ont été publiées qu'en très peu de cas<sup>2</sup>, de sorte qu'il est difficile d'affirmer, sans autre, que les théories conduisent à des résultats suffisamment exacts. Dans ces conditions, il peut paraître intéressant de vérifier par des observations ultérieures les

<sup>1</sup> Citons parmi les principaux ouvrages traitant de ces questions :  
1. « Wasserschlossprobleme » par Prasif, Schweizerische Bauzeitung, 1908.  
2. « Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen » par R. Dubs, Berlin 1909.  
3. « Beiträge zur Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinen-Anlagen » par Thoma, Munich 1910.  
4. « The differential Surge Tank » par R.-D. Johnson, 1915.  
5. Théorie des chambres d'équilibre » par Calame et Gaden. — La Concorde et Gauthier-Villars, 1928.

<sup>2</sup> Voir à ce sujet l'article intitulé : « L'impianto Piottino delle officine elettriche ticinesi S. A. » paru dans la « Revista Técnica della Svizzera Italiana », en 1933.

calculs qui ont présidé à l'établissement des chambres d'équilibre. Ces observations faites après coup ne peuvent avoir, naturellement, qu'un intérêt rétrospectif et ne donner d'utiles renseignements que pour la construction de nouvelles chambres.

Il est possible par contre de faire en laboratoire des essais sur modèle réduit permettant de dimensionner convenablement des chambres d'équilibre de forme plus ou moins compliquée. Le but de cet article est précisément de montrer comment on peut entreprendre ces essais.

On pourrait être tenté, à première vue, de vouloir réaliser un modèle semblable en tous points à la réalité. Les galeries d'aménée étant généralement longues de plusieurs kilomètres, on serait alors conduit ou bien à des modèles avec galerie extrêmement longue et par conséquent encombrante, ou bien à une échelle de réduction beaucoup trop petite qui ne permettrait pas d'observer avec suffisamment d'exactitude les phénomènes à étudier. Nous verrons, d'autre part, au chapitre suivant, que la similitude de tous les éléments du système galerie-chambre d'équilibre n'est pas possible à cause des pertes de charges différentes dans l'un ou l'autre des systèmes. Dans ces conditions, on est amené à adopter pour le modèle un système qui n'est pas semblable à la réalité et il nous a paru intéressant de développer dans cet article les principes d'après lesquels on doit le dimensionner.

Certaines chambres (dans le cas d'usines dont le bassin de retenue est à niveau à peu près constant) possèdent deux ou plusieurs puits, servant par exemple au logement de vannes planes. La chambre possède alors plusieurs niveaux libres entre lesquels s'établit un mouvement

### ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,  
largeur 47 mm :  
20 centimes.  
Rabais pour annonces  
répétées.

Tarif spécial  
pour fractions de pages.

Régie des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

oscillatoire qui vient compliquer le mouvement général de masse. Nous avons jugé intéressant d'apporter une contribution à l'étude de ces chambres spéciales.

Nous décrirons ici les méthodes et moyens employés au *Laboratoire d'hydraulique de l'Université de Lausanne* pour l'examen de tels problèmes, et nous donnerons en détail les résultats obtenus dans le cas particulier d'une chambre d'équilibre à grands épanouissements et différentielle (déversoirs et orifices en tête des épanouissements supérieurs).

### Chap. II. — Dimensionnement des modèles de chambre d'équilibre.

#### A. Principes généraux.

Dans le cas particulier d'essais sur modèles réduits de chambres d'équilibre, on peut généralement faire abstraction de la viscosité et admettre par conséquent la loi de similitude de Froude.

L'échelle des longueurs  $1:n$  étant connue, les échelles des autres grandeurs s'en déduisent directement. (Echelle du débit  $1:n^{1/2}$  et échelle des temps et des vitesses  $1:n^{1/2}$ , etc.) En particulier, les pertes de charge par frottement, exprimées en hauteur d'eau, sont aussi réduites dans les rapports des longueurs.

Si  $P_m$  et  $P$  sont les pertes de charge correspondantes, au modèle et en réalité, le rapport  $P_m:P$  impose l'échelle, *ceci pour autant que le phénomène à étudier dépende d'une manière non négligeable de l'importance des frottements*. Dans notre cas particulier où les pertes de charge dans la galerie d'aménée jouent un rôle essentiel, il est nécessaire de satisfaire rigoureusement à cette condition

$$(1) \quad \frac{P_m}{P} = \frac{1}{n}.$$

Cette relation est une première condition qui nous permettra de dimensionner les modèles de chambre d'équilibre.

Dans ce qui suit, nous utiliserons pour l'expression des pertes de charge la formule de Strickler :

$$(2) \quad i = \frac{\sigma^2}{K^2 \rho^{4/3}}$$

$\sigma$  = vitesse en m : s

$\rho$  = rayon hydraulique de la section, en m

$K$  = coefficient caractérisant la rugosité.

Si  $K_m$  et  $K$  sont les coefficients des pertes de charge de la formule de Strickler, respectivement au modèle et en réalité, il est facile de voir que la condition (1) exprimée ci-dessus revient à

$$(3) \quad n = \left( \frac{K_m}{K} \right)^{6/5}.$$

Cette condition restreint le domaine dans lequel on peut choisir le rapport de réduction  $n$ . Le coefficient  $K$ , caractérisant la rugosité des ouvrages ordinaires de génie civil, est de l'ordre de 60 à 90. On voit, par l'application de la formule (3) ci-dessus, que les modèles de pareils

ouvrages doivent avoir des parois très lisses ( $K$  supérieur à 90), et que les échelles choisies ne pourront généralement pas être inférieures à  $1/50$  environ, puisque  $K_m$  ne peut pas dépasser pratiquement 130.

Dans l'exemple concret que nous allons étudier, les mesures ont démontré que le coefficient de rugosité de l'ensemble de la galerie est  $K = 63$ . Nous avons pour le modèle  $K = 90$ , de sorte que l'échelle de réduction est  $1:8,5$ . Un tel rapport n'est en général pas commode parce que les galeries sont beaucoup trop longues.

La théorie générale des chambres d'équilibre montre que les phénomènes à étudier sont de nature telle qu'il est possible, par un artifice, de contourner une pareille difficulté et de construire un modèle qui sans être semblable à la réalité dans tous ses éléments pourra néanmoins servir de base à une étude expérimentale *quantitative*. Dans leur ouvrage classique<sup>1</sup>, MM. Calame et Gaden ont montré que les différentes chambres d'équilibre d'un même type peuvent être caractérisées par un seul paramètre : le rapport entre l'amplitude maximum  $Z_*$  du mouvement dans la chambre lors d'une manœuvre instantanée complète, sans tenir compte des pertes de charge, et la valeur de la perte de charge correspondant au débit maximum

$$(4) \quad \frac{Z_*}{P_o} = \frac{1}{p_o} \quad \text{où}$$

$$(5) \quad Z_* = W_o \sqrt{\frac{Lf}{gF}} \quad \text{et}$$

$$(6) \quad P_o = \delta W_o^2$$

$L$  = longueur de la galerie d'aménée

$F$  = section horizontale de la chambre

$f$  = section de la galerie d'aménée

$W_o$  = vitesse maximum dans la galerie d'aménée.

Deux chambres d'équilibre ayant même valeur du rapport  $p_o$  seront le siège de phénomènes identiques, à la condition que dans chacune d'elles, les longueurs et les temps soient mesurés en prenant pour unité respective  $Z_*$  et leur période d'oscillation propre  $T$ .

$$(7) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{gf}}$$

Dès lors si l'on convient d'affecter de l'indice  $m$ , les grandeurs mesurées sur le modèle, la deuxième condition de similitude sera

$$(8) \quad \frac{Z_{*m}}{P_{om}} = \frac{Z_*}{P_o}$$

c'est dire que toute hauteur du plan d'eau dans la chambre elle-même et dans son modèle pourra se déterminer par une même et seule valeur *relative* ( $z$ ). Pour trouver les grandeurs *réelles*, il suffira de multiplier les valeurs relatives correspondantes respectivement par  $Z_{*m}$  ou par  $Z_*$ .

La combinaison des équations 1 et 8 conduit aux deux conditions suivantes :

<sup>1</sup> Nous nous servirons en général des mêmes symboles que MM. Calame et Gaden.

$$(9) \quad \frac{Z_{*m}}{Z_*} = \frac{1}{n} \quad \text{et} \quad \frac{P_{om}}{P_o} = \frac{1}{n}.$$

L'échelle  $\frac{1}{n}$  sera donc l'échelle des longueurs que l'on doit adopter pour le modèle de la chambre d'équilibre proprement dite. Ces deux conditions (9) sont nécessaires et suffisantes pour que la similitude des mouvements du plan d'eau soit réalisée. Le terme  $P_o$  comprend la perte de charge par frottement et la perte pour mise en vitesse. La valeur  $P_o$  peut se mettre sous la forme

$$(10) \quad P_o = Li + \frac{W_o^2}{2g} = W_o^2 \left[ \frac{L}{K_s^2 \rho^{4/3}} + \frac{1}{2g} \right].$$

Cette perte de charge totale peut s'exprimer par une formule semblable à celle de Strickler, mais dans laquelle le coefficient  $K$  introduit diffère quelque peu du coefficient  $K_s$  de Strickler qui ne caractérise que la rugosité des parois. On a

$$(11) \quad P_o = \frac{LQ_o^2}{\varphi K^2 f^{4/3}} \quad \text{où}$$

$$(12) \quad K^2 = \frac{K_s^2}{1 + \frac{1}{2g} \cdot \frac{K_s^2 \cdot f^{2/3} \cdot \varphi}{L}}$$

$\varphi$  = coefficient qui ne dépend que de la forme de la section,  $\varphi = \frac{\rho^{4/3}}{f^{2/3}} = 0,185$  pour un cercle.

Si l'on introduit le débit dans les conditions de similitude (9) on obtient :

$$(13) \quad \frac{Q_m}{f_m} \cdot \sqrt{\frac{L_m f_m}{g F_m}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{f} \cdot \sqrt{\frac{L}{g F}}$$

et

$$(14) \quad \frac{L_m Q_m^2}{\varphi K_m^2 f_m^{4/3}} = \frac{1}{n} \frac{L Q^2}{\varphi K^2 f^{4/3}}.$$

On a en outre  $F = n^2 F_m$ , puisque la chambre proprement dite est à l'échelle  $1 : n$ .

Des égalités (13) et (14) on tire :

$$(15) \quad \frac{f_m}{f} = \left( \frac{K^2}{K_m^2} \cdot \frac{1}{n^3} \right)^{1/5}$$

ou, si l'on introduit les diamètres de la galerie

$$(16) \quad \frac{D_m}{D} = \sqrt{\frac{f_m}{f}} = \left( \frac{K}{K_m} \right)^{3/5} \cdot \frac{1}{n^{9/10}}.$$

Cette équation (16) détermine le diamètre de la galerie du modèle. Il est indépendant de la longueur de la galerie.

On déduit, d'autre part, des mêmes égalités (13) et (14)

$$(17) \quad \frac{L_m Q_m^2}{L Q^2} = \left( \frac{K}{K_m} \right)^{6/5} \cdot \frac{1}{n^{29/10}}.$$

L'une des grandeurs, longueur de la galerie ou débit, peut donc être choisie arbitrairement, l'autre se déduisant de (17).

L'échelle des débits est définie par cette même égalité (17)

$$(18) \quad Q_m = Q \left( \frac{K}{K_m} \right)^{3/5} \cdot \left( \frac{L}{L_m} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{n^{29/10}} = \frac{1}{\eta} Q.$$

L'échelle des temps sera :

$$t_m = \frac{T_m}{T} t.$$

Si l'on tient compte de

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{L_m F_m}{g f_m}} \quad \text{et} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{L F}{g f}}$$

on obtient

$$(19) \quad t_m = \left( \frac{K_m}{K} \right)^{3/5} \left( \frac{L_m}{L} \right)^{1/2} \frac{1}{n^{1/10}} = \frac{1}{\theta} t.$$

En résumé, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser pour l'expérience un modèle de chambre en tous points semblable, on pourra recourir à un modèle où l'échelle de la chambre proprement dite et de la galerie n'est pas la même.

Si  $n$  est le rapport des longueurs de la chambre proprement dite, les formules (17) ou (18) donnent le débit  $Q_m$  ou la longueur  $L_m$  de la galerie — l'une de ces deux grandeurs étant arbitraire, — la formule (16) donne enfin le diamètre  $D_m$  de la galerie.

#### B. Cas particulier d'une chambre munie de déversoirs et d'orifices en tête des épanouissements supérieurs.

(Chambre différentielle.)

Il ressort du paragraphe précédent qu'étant donné un modèle de chambre à épanouissements, construit dans ses dimensions générales (longueurs et hauteurs des puits et épanouissements) à l'échelle 1 :  $n$  et alimentée par une galerie d'amenée de caractéristique  $L_m$ ,  $D_m$  et  $K_m$ , l'échelle des débits entrant et sortant de la chambre à chaque instant, à la partie inférieure est bien déterminée.

Dans le cas où le mouvement dans la chambre dépend uniquement des conditions d'alimentation de l'ouvrage par sa base et de ses sections horizontales aux différents niveaux (chambres non déversantes, non différentielles et sans étranglement), ce qui précède est rigoureux.

S'il s'agit, au contraire, d'une chambre du type différentiel, il n'en est plus ainsi. Supposons ici que les épanouissements supérieurs soient masqués par un mur déversoir muni d'un orifice à sa base. Les niveaux, différents, dans le puits principal et dans les épanouissements sont fonction, à chaque instant, non seulement du débit entré ou sorti de la chambre et des sections horizontales de l'ouvrage, mais encore des dimensions pour des déversoirs et des orifices.

Il est évident que les positions absolues et relatives des niveaux d'eau dans le puits principal et les épanouissements supérieurs devront, à n'importe quelle époque, comptée dès le début d'une manœuvre quelconque (compte tenu des échelles des temps et des hauteurs définies plus haut), être les mêmes au modèle qu'à l'ouvrage lui-même.

Pour obtenir au modèle un phénomène en tous points semblable à la réalité (compte tenu de l'échelle des temps définie plus haut), on devra dimensionner les déversoirs et orifices au laboratoire de telle façon que les débits échangés entre le puits principal et les épanouissements soient réduits à l'échelle de  $1 : \eta$  définie précédemment par la formule (18).

D'autre part, les hauteurs des orifices et déversoirs sont réduites dans le modèle à l'échelle des hauteurs de la chambre proprement dite, savoir  $1 : n$ . Quelle échelle

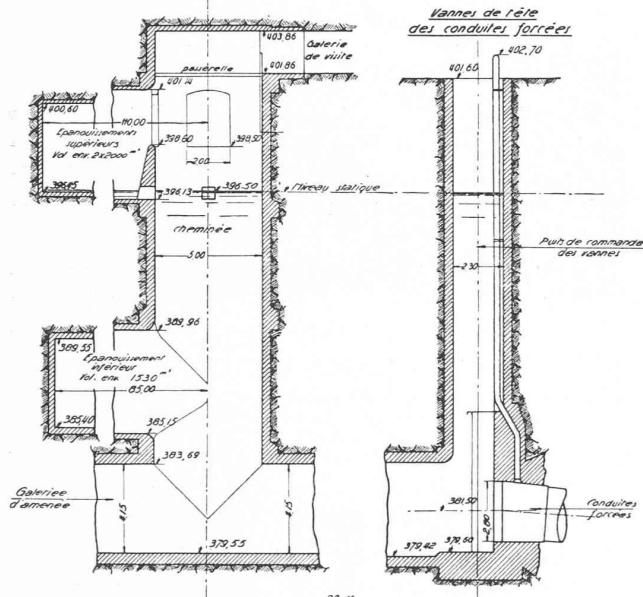


Fig. 1. — Chambre d'équilibre primitive.

faudra-t-il, dans ces conditions, adopter pour les *largeurs des déversoirs et orifices* ?

Supposons que les coefficients de débit du déversoir et des orifices soient les mêmes au modèle qu'en réalité. L'expression donnant le débit passant du puits aux épanouissements ou vice-versa aura la forme :

$$Q = m \sqrt{2gh} \cdot h \cdot b.$$

Dans cette expression

$Q$  = volume d'eau évacué en une seconde

$$\frac{Q \text{ réalité}}{Q \text{ modèle}} = \eta$$

$m$  = coefficient de débit (dépend des formes)

$$\text{par hypothèse } \frac{m \text{ réalité}}{m \text{ modèle}} = 1.00$$

$g$  = accélération de la pesanteur

$$\frac{g \text{ réalité}}{g \text{ modèle}} = 1.00$$

$h$  = hauteur d'eau par définition

$$\frac{h \text{ réalité}}{h \text{ modèle}} = n$$

$b$  = largeur des orifices ou déversoirs.

$$(20) \text{ Posons } \frac{b \text{ réalité}}{b \text{ modèle}} = v$$

Ce dernier rapport est l'inconnue, il résulte immédiatement de l'équation suivante :

$$\frac{Q \text{ réalité}}{Q \text{ modèle}} = \frac{m \text{ réalité}}{m \text{ modèle}} \cdot \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{2g}} \cdot \frac{h \text{ réalité}}{h \text{ modèle}} \cdot \frac{b \text{ réalité}}{b \text{ modèle}}$$

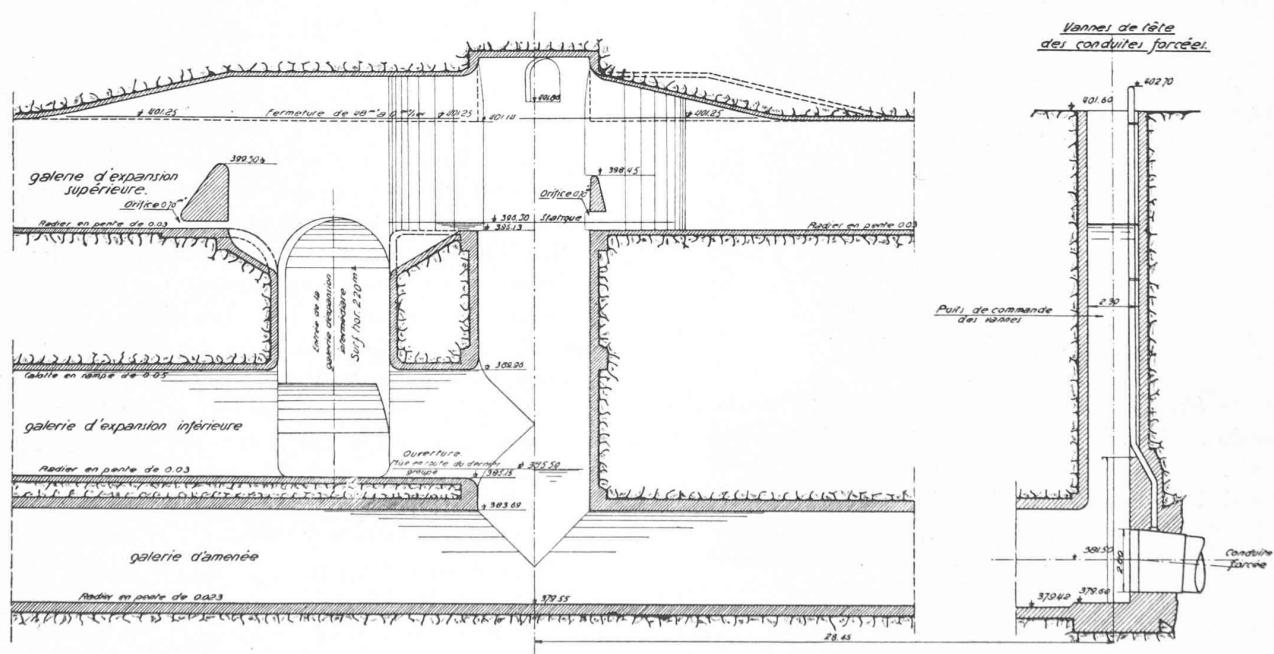


Fig. 2. — Chambre d'équilibre transformée (solution proposée).

qui peut s'écrire :  $\eta = n^{3/2} v$  d'où

$$(21) \quad v = \frac{\eta}{n^{3/2}}$$

(voir applications de ces considérations au chap. III).

*Remarque* : Quelle que soit l'échelle adoptée pour la longueur de la galerie d'aménée, cette dernière sera constituée, au Laboratoire, par un tuyau plus ou moins long qui, pour pouvoir être installé dans les locaux habituels d'expérimentation devra généralement comporter des coudes.

Le coefficient  $K_m$  doit être déterminé par expérience directe sur le modèle ; sa valeur tient donc compte non seulement des pertes de charge dues au frottement, mais aussi des pertes dans les coudes ainsi que de la charge nécessaire à la mise en vitesse.

En régime permanent, tout se passe au modèle comme si la totalité des pertes de charge était due aux frottements. Par contre, en régime oscillatoire, alors que la masse galerie-chambre oscille, provoquant dans la galerie des écoulements de vitesse alternativement positive et négative, il n'est pas certain que par suite des coudes, le « freinage » des oscillations ne soit pas exagéré au modèle. Nous verrons plus loin, à ce sujet, les conclusions que l'on peut tirer de notre étude.

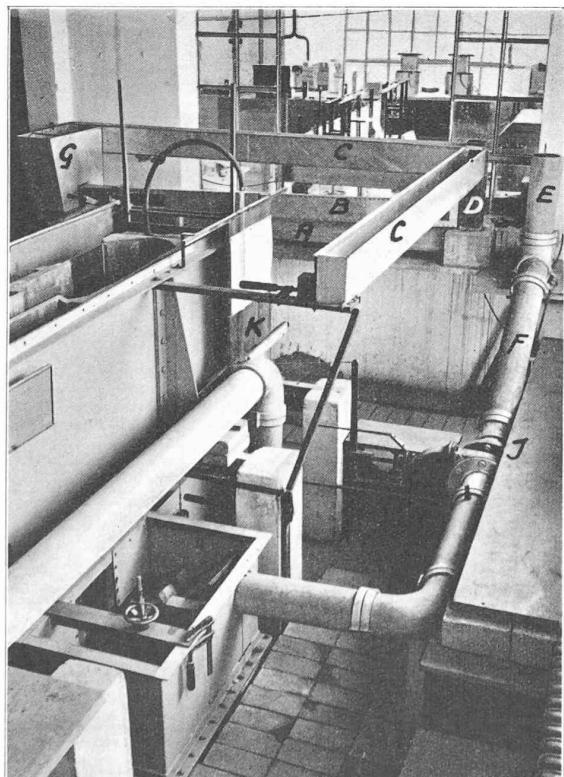


Fig. 4. — Vue générale du modèle (de l'aval).

A. Galerie d'aménée. — B. Epanouissement inférieur. — C. Epanouissements supérieurs. — D. Cheminée proprement dite. — E. Puits des vannes. — F. Conduite forcée. — G. Chambre supplémentaire en bout des épanouissements (solution intermédiaire). — J. Vanne aval (distributeur). — K. Dispositif de réglage.

### Chap. III. — Etude sur modèle d'une chambre d'équilibre particulière.

#### A. Caractéristiques de la chambre d'équilibre étudiée. Modifications envisagées.

L'étude dont nous donnons ici les résultats détaillés, a porté sur une chambre d'équilibre à grand épanouissement

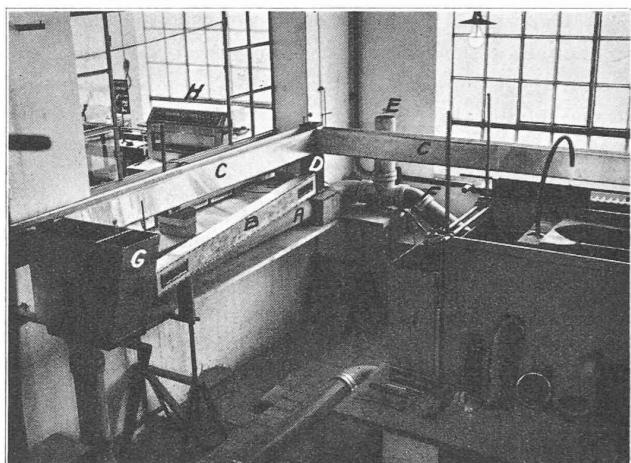


Fig. 3. — Vue générale du modèle (de l'amont).

A. Galerie d'aménée. — B. Epanouissement inférieur. — C. Epanouissements supérieurs. — D. Cheminée proprement dite (puits principal et primitif). — E. Puits des vannes. — F. Conduites forcées. — G. Chambre supplémentaire en bout des épanouissements (solution intermédiaire). — H. Chronographe (enregistrement des oscillations).

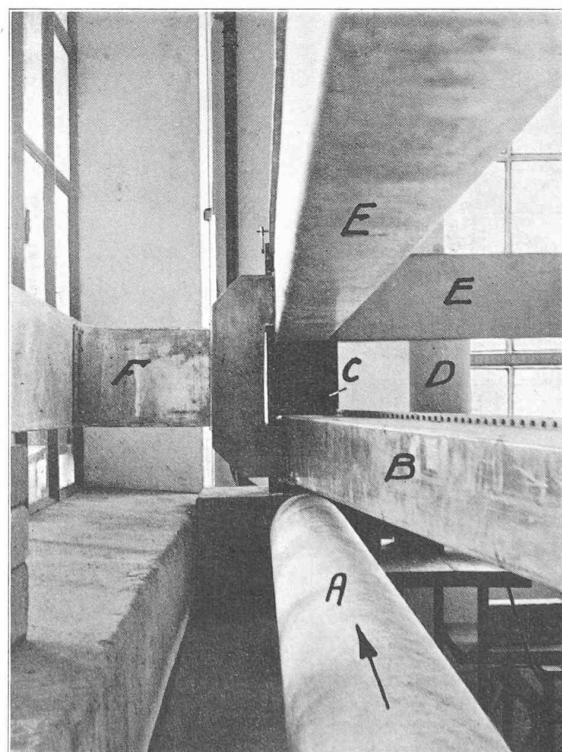


Fig. 5. — Détail de la chambre, après adjonction de l'épanouissement intermédiaire débouchant dans les galeries inférieure et supérieure, au voisinage immédiat du puits primitif (solution proposée).

A. Galerie d'aménée. — B. Epanouissement inférieur. — C. Puits primitif. — D. Puits des vannes. — E. Epanouissements supérieurs. — F. Nouvelle galerie (épanouissement intermédiaire).

avec déversoir. Les caractéristiques générales de l'aménagement sont les suivantes :

Bassin d'accumulation avec cote de retenue : 396,50.

Galerie d'amenée de 6000 m de longueur.

Chambre d'équilibre à épanouissements.

Usine équipée de 4 turbines « Francis », à axe vertical, avec cote du plan horizontal médian : 360,70.

Hauteur de chute brute : environ 40 m.

L'étude a pour but la détermination des dimensions nouvelles à donner à la chambre d'équilibre, à la suite d'une modification des machines portant le débit absorbé par chacune d'elles, de 9 à 12 m<sup>3</sup> : s pour une hauteur de chute nette de 30 m environ.

L'absorption maximum des quatre machines fonctionnant simultanément n'est toutefois passée que de 36 m<sup>3</sup> : s à 40 m<sup>3</sup> : s, du fait de l'augmentation des pertes de charges résultant de l'accroissement de débit. Néanmoins, le chiffre de : 4 × 12 = 48 m<sup>3</sup> : s a été admis, au cours de l'étude, comme débit maximum. La transformation de la chambre d'équilibre devra, en outre, amener, par la même occasion, une amélioration de la stabilité de réglage.

Les caractéristiques de la chambre d'équilibre primitive sont données à la fig. 1.

Elle se compose essentiellement : d'un puits vertical (cheminée proprement dite) d'environ 20,0 m<sup>2</sup> de section, d'un épanouissement inférieur (galerie de 1500 m<sup>3</sup> environ) de deux épanouissements supérieurs (galeries de 2000 m<sup>3</sup> environ chacune). Etant donné les déversoirs construits en tête des galeries supérieures et munis d'orifices à leur partie inférieure, la chambre est du type dit différentiel. Une galerie d'accès à la cote 401,86 fixe le niveau maximum admissible du plan d'eau. A la partie supérieure des conduites forcées un puits de section horizontale d'environ 25 m<sup>2</sup> est ménagé pour la commande des vannes.

Les modifications à apporter à cette chambre primitive consisteront principalement en une augmentation de sa section horizontale entre les épanouissements inférieur et supérieur et un nouveau dimensionnement des déversoirs et orifices supérieurs. Toutes les transformations devaient pouvoir se réaliser sans interrompre l'exploitation plus de deux jours.

Dans cet ordre d'idées diverses solutions, envisagées successivement, firent l'objet d'études analytiques et expérimentales. Voici les trois types d'ouvrages spécialement étudiés :

Fermeture complète et instantanée de 48 m<sup>3</sup>/sec à 0 m<sup>3</sup>/sec.

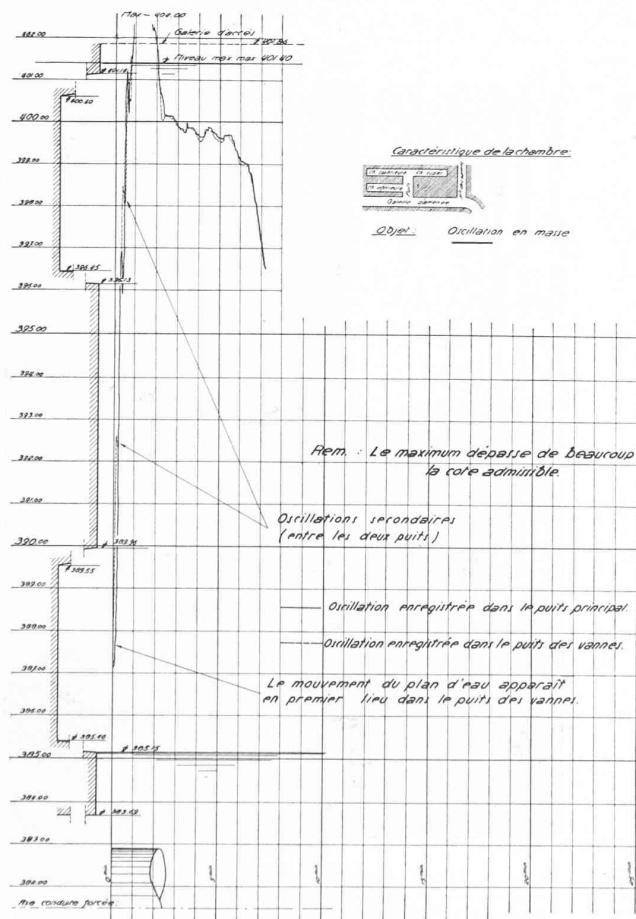


Fig. 6. — Chambre d'équilibre primitive (voir fig. 1).  
Le niveau d'eau dépasse de beaucoup la cote maximum admissible.

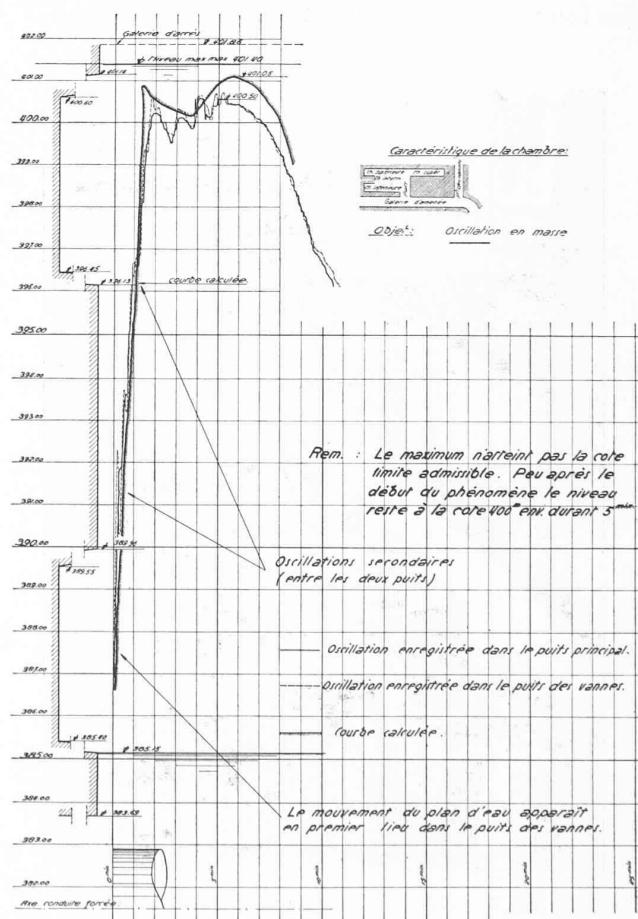


Fig. 7. — Solution proposée (voir fig. 2).  
Le niveau d'eau n'atteint pas la cote limite, il oscille autour de la cote 400 durant 5 minutes.

a) La chambre primitive, telle qu'elle est représentée à la fig. 1.

Les calculs et l'expérience (voir plus loin) ont démontré son insuffisance en cas d'augmentation du débit maximum d'exploitation, tant en ce qui concerne les niveaux extrêmes que la stabilité de réglage.

b) La chambre primitive à laquelle fut ajouté un nouveau puits de  $200 \text{ m}^2$  de section horizontale. Ce puits fut prévu à l'extrémité de l'épanouissement inférieur et en communication avec la galerie supérieure (voir fig. 3 et 4, photographies du modèles).

Cette solution envisagée au début se révéla peu satisfaisante au point de vue de la stabilité de réglage, malgré la grande surface du puits. Les essais ont mis nettement en lumière cette particularité que par ailleurs le calcul aussi laissait prévoir.

c) La chambre primitive est modifiée par excavation d'un épanouissement supplémentaire intermédiaire débouchant dans les épanouissements existant dans le voisinage immédiat du puits primitif. Cela revient à augmenter considérablement la section de ce dernier sans avoir à le démolir, ce qui n'aurait pu être fait que moyennant une longue interruption de l'exploitation.

Ouverture instantanée de  $24 \text{ m}^3/\text{sec}$  à  $48 \text{ m}^3/\text{sec}$ .  
(50 % à 100 % du débit maximum).

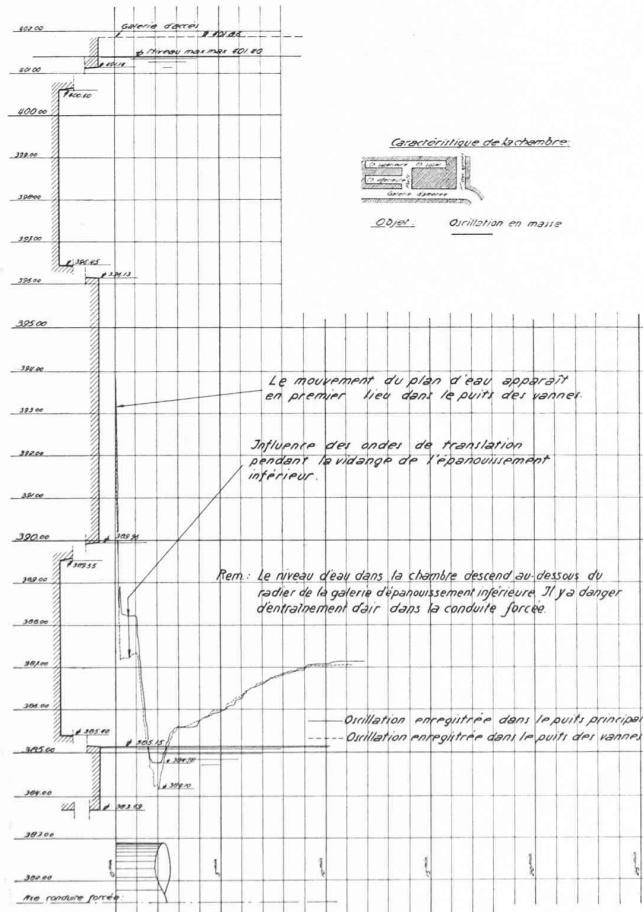


Fig. 8. — Chambre d'équilibre primitive (voir fig. 1).  
Le niveau d'eau descend nettement au-dessous du radier de l'épanouissement inférieur.

En outre, les déversoirs et orifices ont été modifiés. Cette solution (voir fig. 2) a donné satisfaction au point de vue des niveaux extrêmes atteints, de la stabilité de réglage, du coût et de la facilité d'exécution.

#### B. Caractéristiques du modèle. Installations d'essai.

Les caractéristiques de la galerie d'amenée de l'aménagement sont :  $L = 6000 \text{ m}$ ,  $f = 17,1 \text{ m}^2$ ,  $K = 63,00$ ,  $D = 4,67 \text{ m}^4$ . Pour des raisons pratiques, il n'était pas possible de monter en laboratoire une galerie dont la longueur dépasse 100 m. On choisit un tuyau dont les dimensions sont les suivantes :  $L_m = 100 \text{ m}$ ;  $f_m = 0,0177 \text{ m}^2$ ,  $K_m = 90,00$ <sup>2</sup>,  $D_m = 0,15 \text{ m}$ . Sur la base de ces données, on établit l'échelle des débits et des temps, les dimensions des déversoirs et orifices, suivant la méthode exposée en détail au chap. II. Nous ne donnerons ici que les résultats de ce calcul.

$n$  = inverse de l'échelle du modèle de la chambre proprement dite = 36

$\eta$  = inverse de l'échelle des débits = 5290

<sup>1</sup> Voir signification des indices au chap. I.

<sup>2</sup>  $K_m$  a été déterminé en mesurant dans la conduite d'amenée, une fois montée, les pertes de charge, y compris celles dues aux coudes pour divers débits, ce n'est donc pas rigoureusement un coefficient de rugosité.

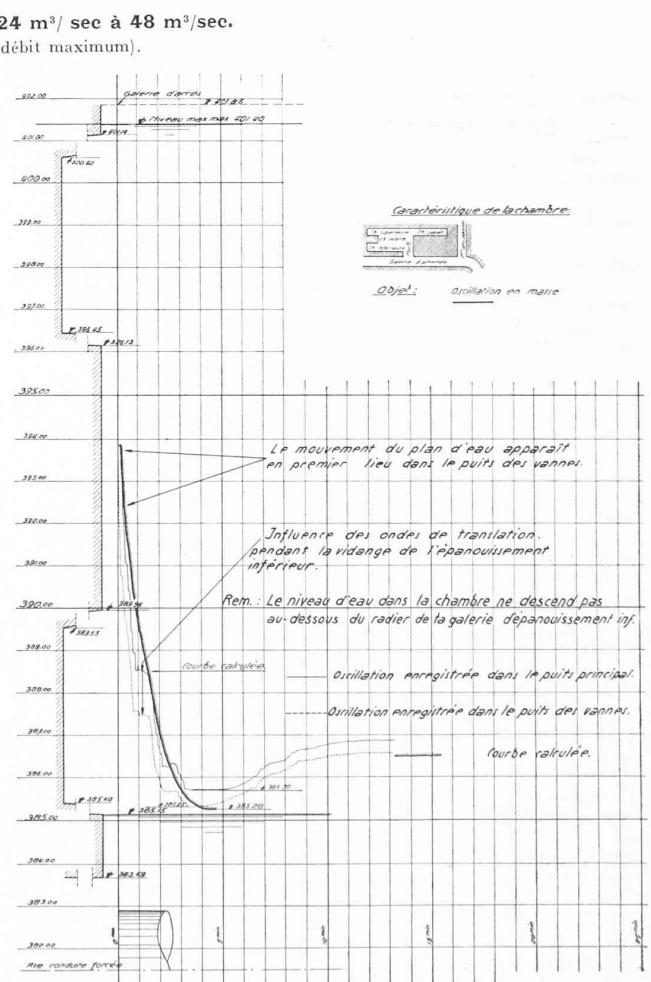


Fig. 9. — Solution proposée (voir fig. 2).  
Le niveau d'eau ne descend pas au-dessous du radier de l'épanouissement inférieur.

$v$  = inverse de l'échelle de largeur des orifices et déversoirs = 24,45

$\theta$  = inverse de l'échelle des temps = 8,95.

Ces chiffres ont permis de construire le modèle (voir fig. 3, 4 et 5) et d'interpréter à bon escient les résultats expérimentaux.

Nous avons construit le modèle de manière à permettre l'examen des diverses variantes par modifications successives de ses éléments. Le tuyau d'amenée est alimenté par un bassin où le niveau est maintenu constant à l'aide d'un déversoir de superficie. Le jaugeage des débits se fait à l'aval du modèle dans une caisse de jaugeage munie d'un déversoir à arêtes tranchantes et d'un limnimètre. Ce dispositif fut soigneusement taré au préalable.

Les conduites forcées sont remplacées, au modèle, par un tuyau unique, une vanne fait l'office des distributeurs des turbines.

En régime permanent, le fonctionnement du modèle est simple. En régime transitoire, il est nécessaire de prendre diverses précautions pour obtenir, au laboratoire, des oscillations amorties qui soient des images fidèles de la réalité. Les manœuvres, telles que fermeture ou ouverture complète et instantanée, ne présentent guère de difficultés

pour l'expérimentateur. Par contre, dès que l'on doit reproduire, au modèle, une manœuvre partielle à puissance constante, phénomène résultant en réalité de l'action d'un régulateur, il faut recourir à un dispositif spécial. Le mouvement de la vanne (distributeur) n'est plus indépendant de la position du niveau d'eau dans la chambre, mais au contraire, par une liaison mécanique appropriée, son mouvement doit compenser à chaque instant, de manière à garder une puissance constante, les variations de chute résultant des oscillations causées par la manœuvre qui vient d'être opérée. Ce dispositif régulateur est nécessaire pour permettre l'examen de la stabilité de réglage.

L'enregistrement des oscillations se fait sur chronographe de précision Amsler. Les plumes sont commandées par des flotteurs spécialement construits à cet usage et le montage effectué a permis d'obtenir le diagramme de variation des niveaux d'eau en plusieurs points simultanément (dans les divers puits en particulier).

#### C. Résultats essentiels de l'étude expérimentale.

Nous donnons ici, pour les trois chambres étudiées, les enregistrements des oscillations dans le puits primitif et

Ouverture partielle produisant une oscillation dans la région médiane de la chambre.

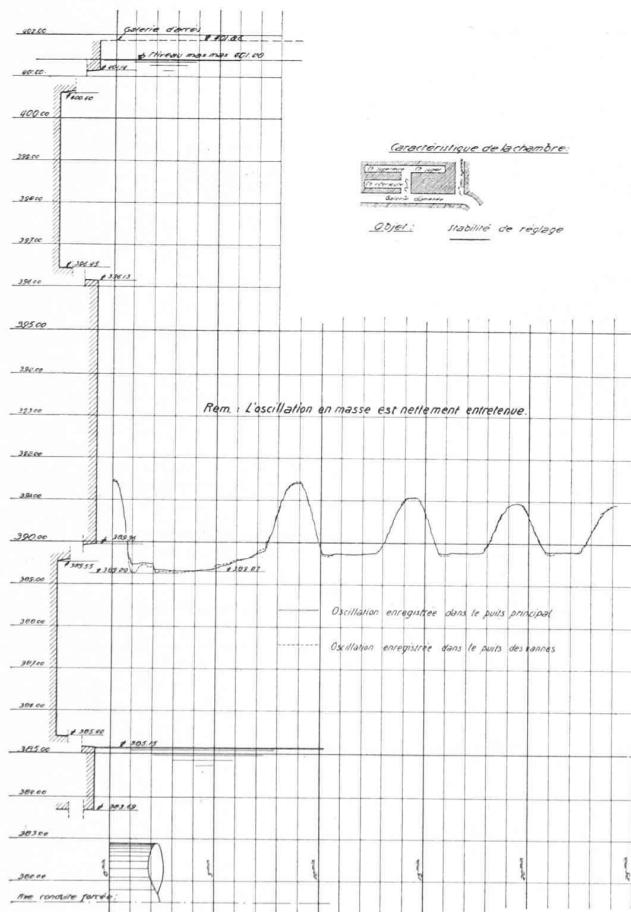


Fig. 10. — Chambre d'équilibre primitive (voir fig. 1).  
Le régulateur a tendance à entretenir l'oscillation. Il y a instabilité de réglage manifeste.

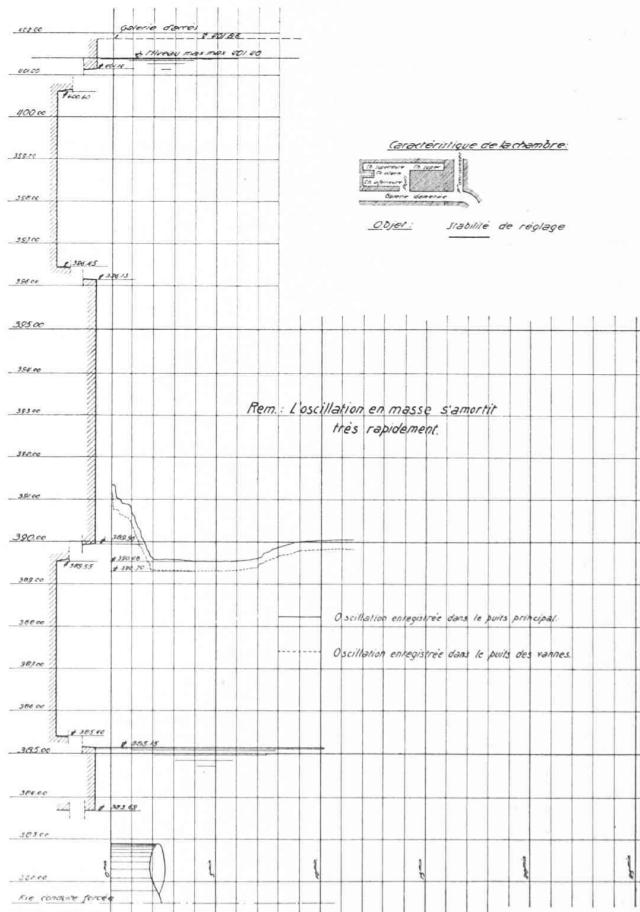


Fig. 11. — Solution proposée (voir fig. 2).  
L'oscillation s'amortit immédiatement.

le puits des vannes consécutives aux quatre manœuvres suivantes :

a) Fermeture complète et instantanée de  $48 \text{ m}^3/\text{sec}$ . à  $0 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Le niveau dynamique initial est à la cote 387,00 soit à 1,85 m au-dessus du radier de l'épanouissement inférieur. Le niveau statique final à la cote 396,50, soit au radier des épanouissements supérieurs.

b) Ouverture instantanée de  $24 \text{ m}^3/\text{sec}$ . à  $48 \text{ m}^3/\text{sec}$ . (50 % à 100 % du débit maximum). Les cotes des niveaux dynamiques initial et final étant respectivement 394,00 et 387,00.

c et d) Ouverture et fermeture partielle instantanée, occasionnant des oscillations dans la partie médiane de la chambre (région de faible section horizontale). Durant l'oscillation la puissance est maintenue constante grâce au système régulateur.

Les manœuvres a) et b) donneront les niveaux extrêmes, les manœuvres c) et d) feront ressortir les qualités ou inconvénients des divers ouvrages au point de vue de la stabilité de réglage.

Les constatations suivantes s'imposent. Dans le cas de l'ancienne chambre, les cotes extrêmes atteintes, fig. 6 et fig. 8, en cas de fermeture complète et d'ouverture

de 50 % à 100 % du débit maximum, sont inadmissibles. Le niveau d'eau dépasse dans la partie supérieure de la chambre la cote limite imposée (radier de la galerie de visite) et l'on risque, lors de l'ouverture, des rentrées d'air dans les conduites forcées, le niveau d'eau descendant au-dessous du radier de l'épanouissement inférieur.

L'insuffisance de la chambre primitive résultant d'une augmentation du débit maximum de l'usine, apparaît donc d'emblée. De plus, la stabilité de réglage n'est pas assurée, ainsi qu'il ressort des diagrammes des figures 10 et 12. Ce dernier fait s'explique par le calcul ; il avait été constaté en cours d'exploitation avant toute transformation de la chambre ; il est dû à la faible section horizontale du puits principal.

Ces premières expériences, en accord avec les faits relevés sur l'ouvrage lui-même, et les premières déductions de l'étude analytique sont un contrôle du bon fonctionnement du modèle<sup>1</sup>.

La solution intermédiaire conçue de manière à atténuer l'amplitude des oscillations et à supprimer toute action du

<sup>1</sup> Le calcul laisse supposer que les oscillations peuvent, le cas échéant, être non seulement entretenues, mais amplifiées. Nous verrons plus loin quelle est l'explication probable de cette divergence quantitative entre les résultats expérimentaux et analytiques.

Fermeture partielle produisant une oscillation dans la partie médiane de la chambre.

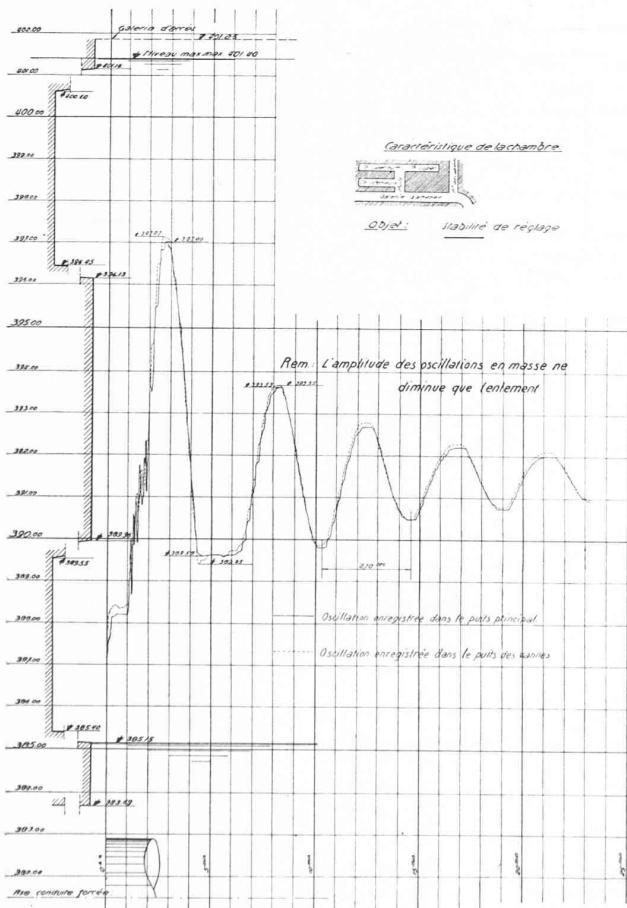


Fig. 12. — Chambre d'équilibre primitive (voir fig. 1).  
Le régulateur a tendance à entretenir les oscillations. Il y a instabilité de réglage.

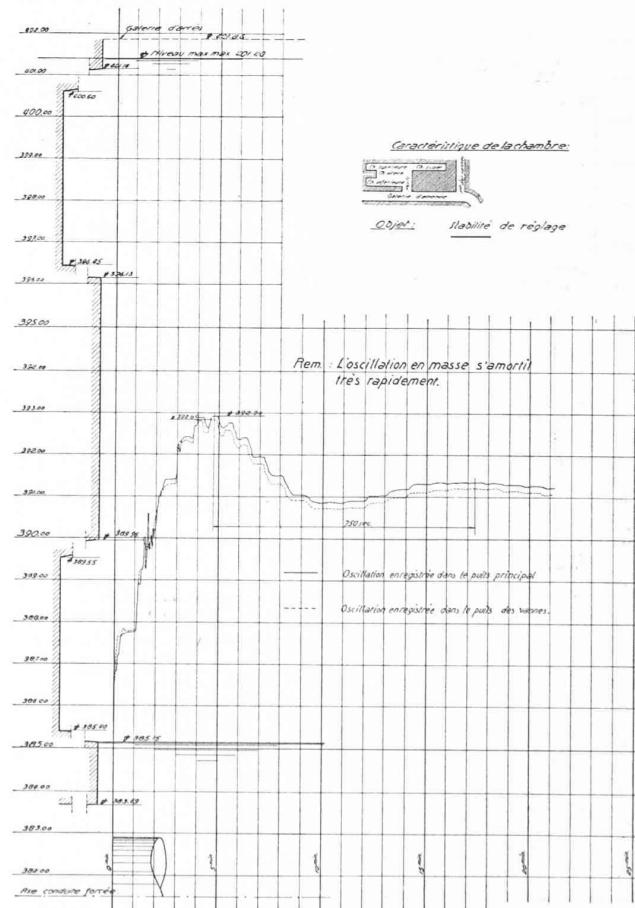


Fig. 13. — Solution proposée (voir fig. 2).  
L'oscillation s'amortit très rapidement.

régulateur sur le mouvement des masses n'a pas donné, à ce dernier point de vue, satisfaction. Dès la mise en fonction du modèle, il apparut une oscillation secondaire de période réduite se greffant sur l'oscillation principale et pouvant le cas échéant, être amplifiée par l'action du régulateur (voir fig. 14 et 15). C'est un balancement prenant naissance entre les puits primitifs d'une part et le nouveau puits projeté en extrémité des épanouissements. A un maximum du niveau d'eau dans les puits correspondait un minimum dans la nouvelle chambre et vice-versa. Cette solution dut être abandonnée.

Enfin, nous donnons en troisième lieu les résultats des expériences effectuées sur le modèle de l'ouvrage proposé en définitive. Les oscillations se produisent dans les limites requises et s'amortissent dans tous les cas rapidement. Aucune oscillation secondaire n'a été décelée au modèle (voir fig. 7, 9, 11 et 13). Lors d'une fermeture complète et instantanée, le niveau d'eau monte immédiatement à une cote voisine du maximum admis et s'y maintient pendant quelques minutes (voir fig. 7). Ce résultat ne peut être atteint que par un dimensionnement judicieux des orifices et déversoirs situés en tête des épanouissements supérieurs. Ainsi, dès le début du phénomène et

durant quelques minutes, la pression à la base du puits garde sa valeur maximum et provoque un freinage optimum de la masse en mouvement dans la galerie. Les variations secondaires du niveau de part et d'autre de la cote 400 durant cette période du phénomène sont dues au va-et-vient d'ondes de translation dans les épanouissements supérieurs. Un fait semblable a été observé en réalité.

Voir au chap. IV<sup>1</sup> de cette communication les remarques qui s'imposent lorsque l'on compare ces diagrammes aux résultats obtenus par voie analytique.

(A suivre).

### L'action des lames de tempête sur les digues maritimes à paroi verticale.

Sous ce titre, M. E. Coen Cagli, professeur à l'Université de Rome, commente, avec sagacité, dans le *Génie Civil* du 29 août dernier, la « série d'expériences sur modèles à échelle réduite, qu'il a entreprise avec la collaboration de M. le professeur A. Stucky, de l'Université de Lausanne » et dont la technique et les résultats détaillés et très révélateurs ont été publiés dans nos numéros du 29 septembre, 13 octobre 1934, 7 décembre 1935.

<sup>1</sup> Ce chapitre paraîtra dans un de nos numéros d'octobre prochain. — Réd.

#### Ouverture et fermeture partielles occasionnant des oscillations dans la partie médiane de la chambre.

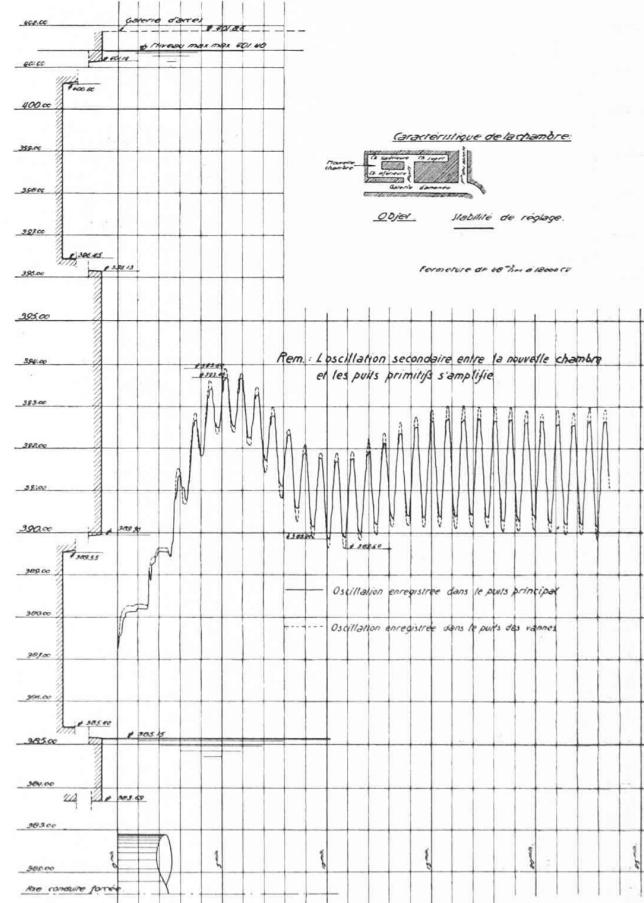
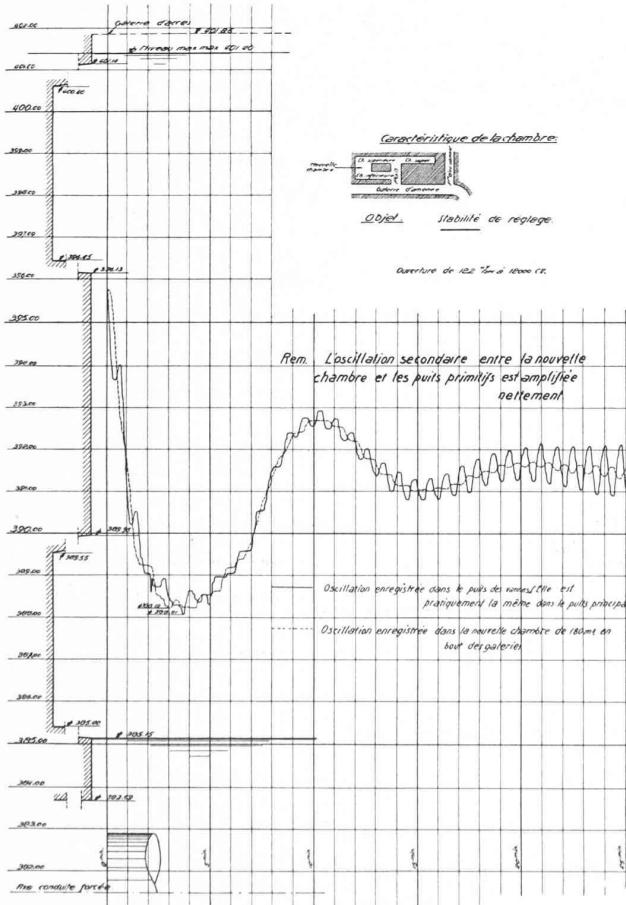


Fig. 14 et 15. — Solution intermédiaire abandonnée en définitive (voir fig. 3 et fig. 4).

Une oscillation secondaire (oscillation entre puits) vient se greffer sur l'oscillation principale, s'amplifie, il y a instabilité de réglage. Période observée pour l'oscillation secondaire : 28 sec. (D'après l'échelle du temps qui lui est propre, voir chap. IV, § D).