

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 72 (1946)
Heft: 8

Artikel: Le barrage de la Dixence
Autor: Stucky, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-54622>

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

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 17 francs

Etranger : 20 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 14 francs

Etranger : 17 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.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; † E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; *CH. THÉVENAZ*, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, 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. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE : *Le barrage de la Dixence* (suite et fin), par A. STUCKY, professeur à l'Ecole polytechnique de Lausanne. — *Concours pour l'établissement d'un projet d'un nouveau bâtiment de la gare de Glion*. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : Extrait des procès-verbaux du Comité central* (suite et fin). — *Nécrologie : Eugène Jost, architecte*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — **COMMUNIQUÉS**. — **CARNET DES CONCOURS**. — **SERVICE DE PLACEMENT**.

Le barrage de la Dixence

par A. STUCKY,

professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.

(Suite et fin).¹

Observations et mesures effectuées sur le barrage.

(suite et fin).

III. Discussion des résultats des observations.

Nous avons rappelé au début du chapitre relatif aux « Observations et mesures effectuées sur le barrage », le rôle que jouent les variations de température : échauffement et refroidissement initial, puis variations annuelles et journalières de la température, pour tout barrage et spécialement pour le barrage évidé. Il est donc indiqué de chercher à se rendre compte à l'avance, par un calcul, de l'évolution de l'état thermique et de son influence sur les contraintes et l'état de l'ouvrage (zones soumises au gel).

Etant donné les épaisseurs très variables des piliers des barrages évidés, les lois du dégagement de chaleur et des déformations apparaissent si complexes que l'on peut se demander dans quelle mesure un calcul, forcément schématique, de l'état thermique ou des déformations donne une image fidèle de la réalité. Ce sera l'objet de ce chapitre, de confronter les résultats du calcul avec ceux des observations directes.

L'évolution de l'état thermique d'un massif de béton comporte deux phases distinctes. Dans la première, l'échauffement dû à la prise du ciment et le refroidissement subséquent jouent le rôle essentiel, tandis que les variations de la température extérieure ne se font pas encore sentir dans

l'ensemble de la masse. L'influence de cet état initial s'atténue peu à peu, au fur et à mesure que se dissipe la chaleur de prise. Dans la deuxième phase, les effets de la température extérieure subsistent seuls, sous forme de variations périodiques dont l'état de régime peut demander, dans les barrages-poids par exemple, plusieurs années pour s'établir.

Aux déformations d'origine thermique s'ajoutent celles qui proviennent de la poussée de l'eau, ainsi que du retrait et du gonflement du béton. Ce sont, en définitive, les déformations résultantes qui déterminent la distribution des contraintes.

1. Echauffement pendant la prise du béton.

Les températures observées au barrage pendant la prise du béton montrent, par comparaison avec ce que l'on a constaté au laboratoire au moyen de calorimètres adiabatiques, que le centre d'un mur de quelques mètres d'épaisseur atteint la même température maximum que s'il était parfaitement isolé ; l'influence du refroidissement des faces n'a pas le temps de se propager jusqu'au centre, pendant les cinq à six jours que dure pratiquement le dégagement de la chaleur de prise. Nous avons cherché à déterminer par le calcul l'épaisseur maximum pour laquelle la radiation de chaleur par les faces peut influencer la température atteinte sur l'axe du mur.

Méthode de calcul.

Nous admettons un massif d'épaisseur constante, de longueur et largeur infinies, où la circulation de chaleur ne peut donc se produire que dans la direction de l'épaisseur. Ce massif est placé dans l'air ambiant, à température supposée constante. Au début de l'échauffement interne, c'est à-dire au moment du gâchage, la température du béton est uniforme et égale à celle de l'air.

¹ Voir *Bulletin technique* du 16 février 1946, p. 37 et du 2 mars 1946, p. 53.

Publicité :

TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm.) 20 cts.
Tarif spécial pour fractions
de pages.

En plus 20 % de majoration de guerre

Rabais pour annonces
répétées.

ANNONCES-SUISSES S.A.
5, rue Centrale
LAUSANNE
& Succursales.

Le dégagement de chaleur est défini par la quantité de calories q émises à chaque instant par unité de volume et par unité de temps. A un instant quelconque t , l'équilibre thermique satisfait à l'équation différentielle

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{q}{c_p} = \frac{k}{c_p} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

où q = quantité de chaleur variable dégagée à l'époque t par unité de volume, pendant l'unité de temps
 θ = température en Cal/m³ h
 t = temps en degrés Centigrades
 x = abscisse d'un point en heures.
 c_p = poids spécifique du béton en mètres.

D'après les essais de laboratoire, on peut admettre pour les constantes de cette équation les valeurs :
 c = chaleur spécifique du béton humide 0,25 Cal/kg °C
 ρ = poids spécifique du béton 2400 kg/m³
 k = coefficient de transmission de chaleur du béton 1,5 Cal/mh °C

L'expression $\frac{q}{c_p} = \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{int}$ représente l'accroissement de température pendant l'unité de temps à un instant donné, quand le massif est soustrait à tout échange de chaleur. C'est la dérivée de la courbe des températures que l'on observerait dans un calorimètre adiabatique.

Pour simplifier l'écriture, on pose $\frac{k}{c_p} = a$. Les constantes admises ci-dessus donnent la valeur

$$a = 0,0025 \frac{m^2}{h}$$

On sait que sur les faces du mur les températures θ_o du béton et θ_{ext} de l'air ambiant ne sont en général pas égales (fig. 27). La transmission de chaleur d'un milieu à l'autre s'opère sous l'action d'une différence de température qui doit satisfaire à la condition

$$\theta_o - \theta_{ext} = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{face} \quad (2)$$

C_r = Courbe réelle des températures
 C_f = Courbe fictive représentant l'influence du coefficient de transmission au contact air-béton

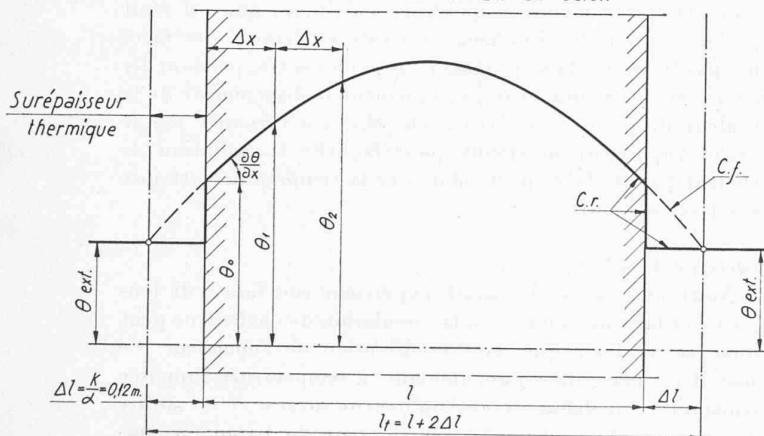


Fig. 27. — Températures au voisinage des faces d'un mur.

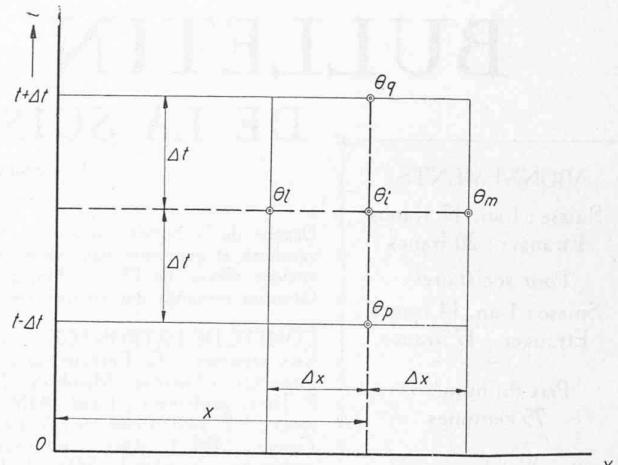


Fig. 28. — Définition des températures au voisinage d'un point, dans l'espace et dans le temps.

où θ_o = température du béton sur la face du mur.
 θ_{ext} = température de l'air ambiant.
 k = coefficient de transmission de chaleur du béton = 1,5 Cal/mh °C
 α = coefficient de transmission au contact entre l'air et le béton.
On peut admettre pour ce coefficient la valeur = 12,5 Cal/m²h °C

L'équation (2) prend ainsi la forme

$$\theta_o - \theta_{ext} = 0,12 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{face} \quad (3)$$

L'effet de cette discontinuité de la température au droit des faces réelles du mur est pratiquement le même qu'une surépaisseur de béton $\Delta l = \frac{k}{\alpha}$ dont la face extérieure serait alors à la même température que l'air. L'épaisseur de ce massif fictif, égale à $l_t = l + 2\Delta l = l + 0,24 \text{ m}$, peut être appelée épaisseur thermique du mur réel. L'intégration de l'équation différentielle (1) où q est le plus souvent donné par une courbe expérimentale, est généralement malcommode, et l'on peut effectuer plus facilement le calcul par différences finies, avec une précision suffisante, de la manière suivante :

La température $\theta = f(t, x)$, fonction des deux variables indépendantes t et x , peut être représentée par une surface.

θ est la cote d'un point de cette surface dont t et x sont l'abscisse et l'ordonnée. Soient θ_l , θ_i et θ_m des points de cette surface (fig. 28), représentant les températures à différentes profondeurs à un même instant t , et θ_p la température à l'instant $(t - \Delta t)$ d'un point situé à même distance du parement que θ_i . Un peu plus tard, à l'instant $(t + \Delta t)$, la température à cette distance est représentée par le point θ_q de la surface, et l'on a

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_q - \theta_p}{2\Delta t}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\theta_m - \theta_i}{\Delta x} - \frac{\theta_i - \theta_l}{\Delta x} = \frac{\theta_m + \theta_l - 2\theta_i}{\Delta x^2} \quad (4)$$

En portant ces valeurs dans l'équation fondamentale (1) on obtient :

$$\theta_q = (\theta_l + \theta_m - 2\theta_i) \frac{2a \Delta t}{\Delta x^2} + 2 \Delta t \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_{int} + \theta_p \quad (5)$$

De même, au moyen des différences finies, l'équation (3) s'écrit :

$$\theta_0 - \theta_{ext.} = 0,12 \frac{\theta_1 - \theta_0}{\Delta x} \quad (6)$$

Ces équations permettent de calculer de proche en proche la température θ_q d'un point, connaissant l'état thermique au voisinage de ce point aux époques antérieures.

Application numérique.

Puisqu'il s'agit de déterminer d'une manière générale l'épaisseur limite pour laquelle la température maximum atteinte par un mur est influencée par le refroidissement des faces, plutôt que d'admettre strictement les conditions de dégagement de chaleur du béton de la Dixence, nous avons cherché cette épaisseur limite pour deux cas, l'un où l'échauffement adiabatique est relativement lent, l'autre où il est au contraire très rapide, théoriquement instantané (fig. 29).

Dans le cas, par exemple, de l'échauffement lent, si l'on choisit un intervalle de temps $\Delta t = 6$ heures, et un intervalle spatial $\Delta x = 0,49$ m, et si l'on prend comme zéro des températures la température extérieure, la condition de contact (6) s'écrit :

$$\theta_0 = \theta_1 \frac{0,12}{\Delta x + 0,42}$$

A l'origine des temps $t = 0$, la température du massif est uniforme et égale à celle de l'air ambiant, choisi comme origine des températures

A temps $t_1 = 1 \cdot \Delta t$,

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \dots = 0,34^\circ/\text{h. } 6 \text{ h} = 2,04^\circ$$

$$\theta_0 = \frac{\theta_1}{5} = 0,45^\circ$$

Le calcul se poursuit de proche en proche au moyen des équations (5) et (6) jusqu'à l'âge de 120 heures. Il donne

successivement les courbes de répartition des températures de la figure 29. On constate qu'au bout de 5 jours, dans le cas d'un dégagement lent de la chaleur de prise, le refroidissement des faces se fait sentir jusqu'à une profondeur de 2,15 m. Si le mur est d'épaisseur finie mais supérieure à 4,30 m, le refroidissement de chaque face ne peut pas atteindre l'axe avant que toute la chaleur de prise soit pratiquement dégagée. Dans le cas d'un dégagement de chaleur très rapide (admis instantané à la limite) mais terminé comme le précédent au bout de cinq jours, l'effet du refroidissement s'est propagé à ce moment-là jusqu'à une profondeur de 1,90 m à partir de chaque face.

Ce calcul permet donc d'affirmer qu'avec un ciment Portland ordinaire, dont le dégagement de chaleur de prise est pratiquement achevé au bout de 5 jours, la température maximum atteinte au centre d'un mur d'épaisseur supérieure à 4 m — 4,50 m, n'est pas influencée par la radiation de chaleur sur les faces ; elle ne dépend pas de l'allure du dégagement de chaleur pendant ces cinq jours, mais uniquement du nombre total de calories dégagées par kilo de ciment.

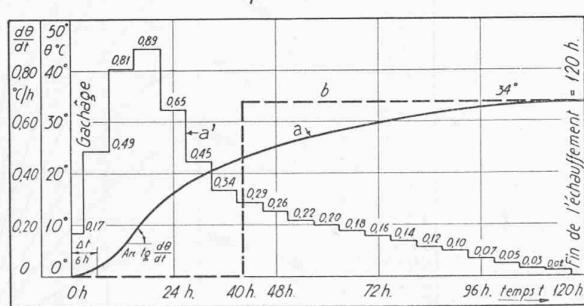
Si l'on examine la position des thermomètres du pilier 13 de la Dixence, on constate que l'appareil le plus proche d'une face extérieure en est à 2,40 m, c'est-à-dire à la limite de la zone influencée par le refroidissement pendant cette première période. Il est donc normal que les températures observées soient analogues à celles que l'on mesure dans un calorimètre parfaitement isolé.

2. Premier refroidissement après l'échauffement dû à la prise du béton.

A partir du moment où le dégagement de chaleur est terminé, c'est-à-dire 5 à 6 jours après le gâchage, tout le massif se refroidit plus ou moins lentement, suivant son épaisseur. La rapidité de ce refroidissement dépend dans une large mesure de la forme du massif, et plus particulièrement du rapport entre la masse à refroidir et la surface de radiation. En schématisant les éléments d'un pilier, nous pouvons distinguer :

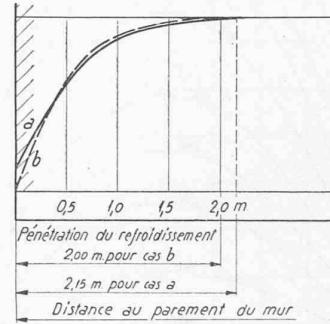
les têtes amont et aval, assimilables à des cylindres, dont la chaleur se dissipe sur tout le pourtour ;

Répartition des températures au voisinage des faces, à la fin de la phase d'échauffement (120h)



- a) Béton de ciment dégageant sa chaleur de prise de façon régulière.
- a') Dérivée de la courbe d'échauffement interne a, proportionnelle au nombre de calories dégagées par unité de volume et par unité de temps.
- b) Béton de ciment dégageant à un moment donné sa chaleur de prise de façon très rapide.

Fig. 29. — Zone influencée par le refroidissement des faces pendant l'échauffement du béton (durée 120 heures).



la partie centrale, relativement mince, assimilable à un mur de surface infinie mais d'épaisseur finie, et dont la chaleur se dissipe uniquement par les faces latérales.

a) *Premier refroidissement de la tête amont.*

Etude théorique. Un cylindre de longueur infinie, de diamètre unité, à température uniforme θ_{max} , dont on soumet à un instant donné la surface extérieure à une chute de température instantanée et permanente de 1 degré, subit à l'intérieur un abaissement progressif de température donné en chaque point et à tout instant par la relation :

$$\theta = 1^{\circ} \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0 \left(\beta_n \frac{r}{R} \right) e^{-p_n t} \quad (7)$$

où J_0 est la fonction de Bessel d'ordre zéro.

β_n = racine de l'équation $J_0(\beta) = 0$

$A_n = \frac{2}{\beta_n J_1(\beta_n)}$ où J_1 est la fonction de Bessel d'ordre 1.

Les termes en β_n , et par conséquent A_n , sont indépendants du matériau, dont les propriétés physiques n'interviennent que dans le coefficient

$$p_n = \frac{k \beta_n^2}{c_p R^2} = a \frac{\beta_n^2}{R^2}$$

Il en résulte que des cylindres de même diamètre mais de matériaux différents seront dans le même état thermique si les exposants de e sont égaux, c'est-à-dire si

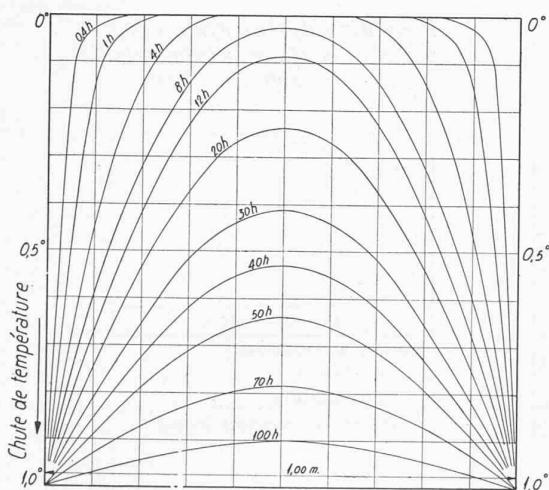
$$e^{-p_1 t_1} = e^{-p_2 t_2}$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{a_2}{a_1}$$

Les états thermiques successifs du cylindre de béton sont représentés dans la figure 30, qui peut être interprétée comme la représentation en valeurs relatives des températures d'un cylindre de diamètre quelconque D soumis à des variations de température extérieure ($\theta_{max} - \theta_{ext}$). Pour passer des valeurs relatives aux valeurs absolues, il suffit de multiplier

* Formule que l'on peut trouver par exemple dans la « Théorie de l'élasticité », de TIMOSHENKO.

Mur indéfini d'épaisseur thermique 1,00m.



Pour obtenir les états thermiques d'un massif d'épaisseur e , soumis à une variation de température T , il suffit de multiplier les longueurs par e , les temps par e^2 , les températures par T . ($a = \frac{k}{c_p} = 2,5 \times 10^{-3} \frac{m^2}{h}$)

les durées relatives par D^2 ,
les longueurs relatives par D ,
les températures relatives par $(\theta_{max} - \theta_{ext})$

En se refroidissant, le cylindre théorique, à température primitivement uniforme θ_{max} , passe à un moment donné par un état thermique pratiquement semblable à celui dans lequel se trouve la tête réelle à la fin de sa phase d'échauffement interne : faces froides et température maximum sur l'axe. Dès lors, les deux massifs abandonnés à eux-mêmes dans des conditions semblables suivent une évolution thermique identique. Il suffit donc de repérer sur la figure 30 la courbe de température (donnée par la figure 29) correspondant à la fin de la phase d'échauffement de la tête réelle et de suivre à partir de ce moment les états successifs du refroidissement.

Application numérique. Compte tenu de la surépaisseur thermique, la tête amont du pilier est assimilable à un cylindre de 13 m de diamètre, qui possède à peu près la même section et la même surface extérieure que la tête réelle. L'écart entre la température maximum (48°) mesurée au centre de la tête et la température moyenne annuelle du lieu (+ 1°) est de 47°. En supposant la surface extérieure du cylindre soumise brusquement à cette chute de température de 47°, on obtient la courbe de température reportée sur la figure 31 en regard des températures effectivement mesurées au centre de la tête (thermomètre n° 3). La concordance entre les mesures et le calcul est très bonne, bien qu'en réalité la température extérieure soit, au début du refroidissement, plus élevée que la moyenne, et en hiver inférieure à cette moyenne. La simplification qui consiste à supposer la température extérieure constamment égale à sa valeur moyenne semble dans ce cas tout à fait admissible, à cause de la grande capacité thermique du système.

b) *Premier refroidissement de l'âme.*

Etude théorique. Un mur de surface infinie, d'épaisseur unité, et température uniforme θ_{max} , dont les faces sont soumises à une chute de température instantanée mais permanente de 1 degré, subit à l'intérieur un abaissement progressif de température donné par la relation

Cylindre indéfini de diamètre thermique 1,00m.

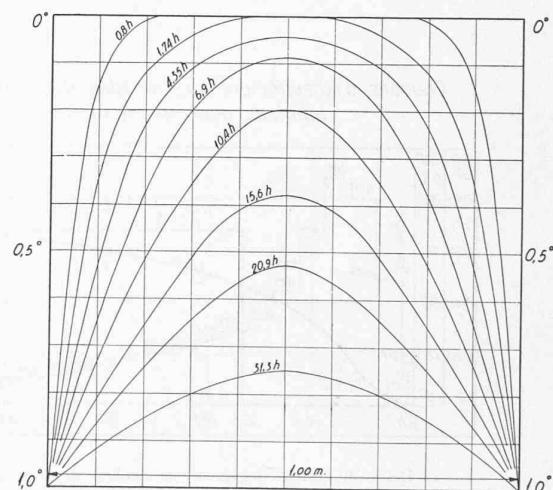


Fig. 30. — Etats thermiques successifs de massifs de béton dont les faces subissent une chute de température de 1° C à l'origine des temps.

$$\theta = \theta_{ext} \left[1 - \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \cos \frac{(1+2n)\pi x}{l} e^{-\frac{(1+2n)^2 \pi^2 a t}{l^2}} \right]^* \quad (8)$$

où $A_n = \frac{4(-1)^n}{(1+2n)\pi}$

La figure 30 qui traduit cette relation représente également en valeurs relatives les états thermiques successifs d'un mur d'épaisseur quelconque, soumis à une variation de température extérieure ($\theta_{max} - \theta_{ext}$). Le calcul au moyen de cet abaque se poursuit comme il a été dit pour le cylindre.

Application numérique. Le thermomètre n° 6 est placé au centre d'un mur de béton d'épaisseur constante. En calculant comme précédemment la variation de température en ce point, on constate bien que la chute doit être sensiblement plus rapide qu'au centre de la tête, comme le montrent aussi les mesures.

3. Variations de température annuelles.

a) Rappel des formules de calcul.

La répercussion des variations annuelles de la température extérieure satisfait aussi à l'équation (1) (paragraphe 1) dans laquelle le dégagement de chaleur interne q est nul. Le calcul des états thermiques successifs peut également se faire par différences finies. Toutefois, si les variations de la température extérieure sont sinusoïdales, ce qu'on peut généralement admettre en première approximation, l'équation s'intègre sans difficultés ** et conduit à

$$\theta = f \cos \frac{2\pi t}{T} + \varphi \sin \frac{2\pi t}{T} = \sqrt{f^2 + \varphi^2} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{f} \right) \quad (9)$$

où f et φ représentent des fonctions de x seulement, données par

$$\begin{aligned} f &= \theta_{10} (\cos \mu x \operatorname{Ch} \mu x + B_0 \cos \mu x \operatorname{Sh} \mu x + C_0 \sin \mu x \operatorname{Ch} \mu x) \\ \varphi &= \theta_{10} (-\sin \mu x \operatorname{Sh} \mu x - B_0 \sin \mu x \operatorname{Ch} \mu x + C_0 \cos \mu x \operatorname{Sh} \mu x) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{où } B_0 = \operatorname{Sh} \mu e \frac{n \cos \mu e - \operatorname{Ch} \mu e}{\operatorname{Ch}^2 \mu e - \cos^2 \mu e}$$

$$C_0 = \sin \mu e \frac{n \operatorname{Ch} \mu e - \cos \mu e}{\operatorname{Ch}^2 \mu e - \cos^2 \mu e}$$

$$n = \frac{\theta^{2.0}}{\theta^{1.0}} \quad \mu = \sqrt{\frac{\pi}{aT}}$$

* Formule que l'on peut trouver dans « Beiträge zur technischer Mechanik und Physik. Aug. Föppl zum siebzigsten Geburtstag gewidmet von seinen Schülern ».

** Voir par exemple « Régime des températures et flux des températures dans une paroi plane, chauffée périodiquement », par M. L. NISOLLE, Chaleur

$\theta^{1.0}$ = amplitude des variations de température sur le parement du côté de l'origine des x .

$\theta^{2.0}$ = amplitude des variations de température sur le parement opposé à l'origine des x .

e = épaisseur du mur.

T = période d'une oscillation complète de la température extérieure.

Pour un mur d'une certaine épaisseur, comme ce sera le cas dans les exemples qui suivent, la différence de température au contact entre l'air et le béton ne joue pas de rôle et l'on peut admettre dans ce calcul la température du parement constamment égale à celle de l'air ambiant.

b) Amplitude des variations de température annuelles.

On a constaté au barrage de la Dixence que les températures de la partie centrale des piliers varient de un à deux degrés seulement au cours de l'année ; dans le cas particulier, le barrage évidé ne se comporte pas d'une manière très différente d'un barrage massif.

Dans la partie inférieure du barrage, au niveau 2180 par exemple, la largeur de la base est assez grande pour que les variations de température au voisinage d'un parement ne soient pratiquement pas influencées par les variations sur l'autre parement. Les variations de température se propagent comme dans un mur d'épaisseur infinie, pour lequel l'amplitude maximum des oscillations est donnée par la formule

$$A = 2 \sqrt{f^2 + \varphi^2}.$$

On peut admettre qu'à la Dixence la température extérieure a varié en moyenne de -10° à $+12^\circ$ pendant les années 1936 à 1939 (fig. 23) et de -9° à $+15^\circ$ de 1940 à 1943 (fig. 24). Le calcul de l'amplitude des oscillations thermiques donne les résultats indiqués, par exemple sur la figure 22, où l'on voit que dans les masques, les amplitudes calculées pour un mur plein, d'épaisseur infinie, correspondent assez bien avec les mesures effectuées sur le barrage évidé ; pour ce qui est des masques, tout se passe à peu près comme si le barrage était plein. Dans l'âme, les amplitudes effectives sont un peu supérieures à celles que donne le calcul ; les courants de convection de l'air des cellules réduisent l'amortissement que subiraient les oscillations thermiques au centre d'un mur plein. Les amplitudes effectives ne dépassent cependant

et Industrie, Paris, n° 201, de janvier 1937, ou « Oscillation de la température et contraintes thermiques dans les murs sous l'effet de température, extérieures périodiquement variables », par M. le professeur M. RITTER, Mémoires de l'Association internationale des Ponts et Charpentes, 7^e volumes 1943/44.

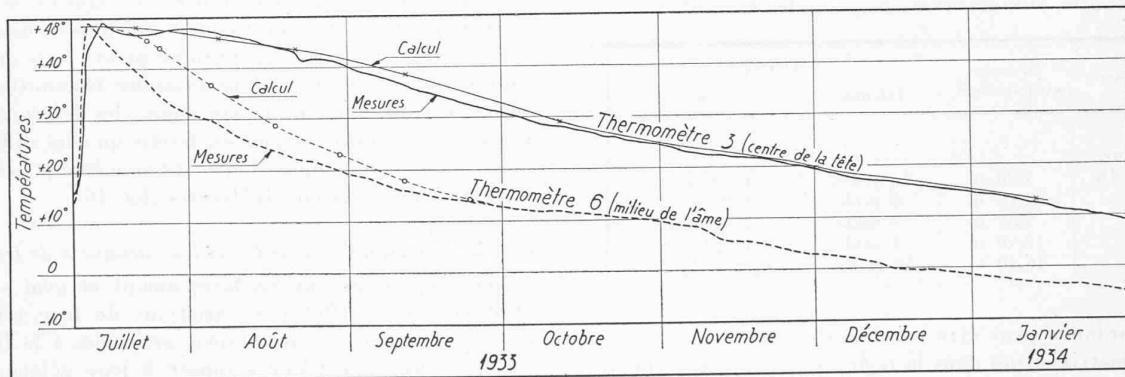


Fig. 31. — Comparaison entre les températures mesurées et les températures calculées, pendant le premier refroidissement du pilier 13.

pas un à deux degrés ; la valeur absolue de l'écart entre le calcul effectué sur un barrage plein et la réalité observée sur le barrage de la Dixence reste donc faible.

c) *Variation des températures intérieures en état de régime.*

L'application de la formule (9) au calcul des températures intérieures d'un pilier au niveau 2180, à différentes époques de l'année, sous l'effet des variations de la température extérieure assimilée à une sinusoïde, conduit aux résultats des figures 23 et 24. Leur comparaison avec les mesures effectuées montre ce qui suit :

1. Les premières années, les températures mesurées sont notablement supérieures aux valeurs calculées ; l'écart s'atténue avec le temps, et les températures se rapprochent de plus en plus de l'état de régime théorique. Il faut cinq à six ans pour que l'on puisse considérer cet état comme atteint. C'est le temps nécessaire pour que disparaîsse la majeure partie de l'effet de l'échauffement initial du béton.

A Schräh (Wäggital), des observations analogues ont été faites pour un barrage-poids ; on y a constaté qu'au centre d'un massif plein de largeur comparable au pilier de la Dixence, la dissipation de la chaleur de prise n'est complètement achevée qu'au bout de dix-huit ans, mais 80 % de cette chaleur ont déjà disparu au bout de sept ans et 90 % au bout de neuf ans.

Si l'on tient compte du fait qu'à la Dixence, la dissipation de la chaleur de prise du béton a été accélérée les deux premières années par la présence d'évidements encore ouverts, on peut admettre qu'après achèvement de l'ouvrage la capacité thermique d'un barrage évidé du genre de celui de la Dixence est relativement grande et diffère peu de celle d'un barrage plein de même hauteur.

2. En état de régime, les températures mesurées sont légèrement supérieures à celles du calcul. Ceci provient certainement du fait que le calcul ne tient pas compte de la chaleur apportée en hiver par l'eau sur le parement amont et par le sol à la base des évidements.

d) *Déphasage des variations de la température intérieure.*

Le déphasage entre les oscillations de la température à l'intérieur du béton et celles des parements est donné par

$$\Delta = \frac{T}{2\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{f}$$

où f et φ sont les fonctions définies par les formules (10).

Les déphasages ainsi calculés pour un mur d'épaisseur infinie, comparés aux observations, sont les suivants :

Thermomètres	Distance au parement	Déphasages	
		calculés	observés
Extérieur	—	0	0
12 - 14 - 18	1,20 m	26 jours	1 mois
11	3,10 m	2 mois	1 1/2 mois
6	4,50 m	3 mois	2 1/2 mois
5	12,40 m	9 mois	4 1/2 mois
4	14,10 m	10 mois	4 1/2 à 5 1/2 mois

La concordance peut être considérée comme bonne pour les thermomètres situés dans la région de la tête aval, où, à ce point de vue encore, les variations de température se manifestent à peu près comme si le barrage était plein et d'épaisseur infinie. L'âme, par contre, réagit plus rapidement qu'un massif plein sous l'effet des variations extérieures ; il faut bien noter cependant que les époques des maxima et minima sont très malaisées à définir d'après les observations, parce que l'amplitude des variations de température constatées dans l'âme est extrêmement faible.

4. *Déformations.*

a) *Généralités.*

Les déformations observées au moyen d'un pendule résultent à la fois de la flexion des piliers sous l'effet de l'eau, des variations thermiques, du retrait et du gonflement du béton, ainsi que de la rotation du rocher de fondation.

La rotation du rocher provient elle-même de deux causes : du mouvement de l'encaissement du barrage soumis à la poussée hydrostatique et de la déformation de la cuvette rocheuse, à l'amont du barrage, sous le poids de l'eau. Ces deux rotations s'opèrent en sens inverse et se compensent partiellement.

A la suite des observations faites sur d'autres barrages, on admet volontiers aujourd'hui que les effets thermiques produisent, même sur des barrages-poids, des déformations comparables à celles qu'engendre la poussée de l'eau. Pour vérifier ce fait à la Dixence, nous avons cherché à dissocier dans les déplacements observés, la part de la température et celle de l'eau.

Faute de données précises concernant le module d'élasticité E et le coefficient de dilatation α du béton, nous avons cherché, par des méthodes approximatives, à estimer les déplacements probables en fonction des coefficients E et α et contrôlé si les valeurs qu'il faudrait leur donner pour que les calculs concordent avec les observations sont plausibles.

La voie que nous avons adoptée consiste en principe à calculer la flèche pour un certain niveau du lac, minimum par exemple, en fonction d'une seule variable, l'état thermique ; la confrontation des résultats avec ceux des observations montre si la méthode de calcul est satisfaisante ; le même calcul est appliqué au cas d'un autre niveau du lac (maximum par exemple) avec le même contrôle. La méthode étant justifiée par ces recoupements, nous l'appliquons enfin à des intervalles pendant lesquels le niveau du lac a varié du minimum au maximum. L'effet des variations de température pendant ces intervalles étant connu, il est possible de le séparer des déformations totales pour déterminer l'effet de l'eau, que l'on peut comparer avec les résultats du calcul effectué d'autre part, en fonction du module d'élasticité.

Le lac n'atteignant pas toutes les années les niveaux extrêmes, nous avons choisi pour le calcul les cotés 2190 (lac presque vide) et 2230 (lac presque plein), afin de disposer d'un nombre assez élevé d'observations. On constate qu'aux mêmes saisons, pour un niveau donné, les déformations sont approximativement les mêmes, tandis qu'elles diffèrent sensiblement si l'on compare l'effet d'une même poussée hydrostatique à deux saisons différentes (fig. 16).

b) *Flèche au sommet sous l'effet des variations de température.*

Nous supposons que les têtes amont et aval se dilatent librement sous l'effet des variations de leur température moyenne, comme si elles étaient articulées à la base et au sommet, sans que l'âme s'oppose à leur déformation. La flèche au sommet se calcule alors au moyen d'une épure de Williot.

Flèches provoquées par les variations de température du béton.

Périodes	Flèches mesurées mm	$\frac{10^5}{\alpha} \times$ flèches calculées mm	Coefficient de dilatation α
<i>Lac, niveau 2190.</i>			
23 avril 1938 - 7 juin 1938	- 2,9	- 4,7	$0,62 \times 10^{-5}$
23 avril 1938 - 5 juin 1940	- 3,55	- 7,8	0,46
7 juin 1938 - 28 mars 1939	+ 2,25	+ 4,65	0,48
28 mars 1939 - 6 juin 1939	- 3,0	- 6,55	0,46
6 juin 1939 - 18 mars 1940	+ 2,7	+ 5,15	0,53
18 mars 1940 - 5 juin 1940	- 2,6	- 6,2	0,42
<i>Lac, niveau 2230.</i>			
28 août 1938 - 6 déc. 1940	+ 5,45	+ 10,35	0,53
28 août 1938 - 7 déc. 1942	+ 5,00	+ 7,35	0,68
9 nov. 1938 - 20 août 1942	- 5,60	- 7,85	0,71
7 sept. 1939 - 6 déc. 1940	+ 6,05	+ 9,90	0,61
30 août 1940 - 6 déc. 1940	+ 5,00	+ 10,00	0,50
30 août 1940 - 7 déc. 1942	+ 6,85	+ 9,85	0,70
Moyenne			$\alpha = 0,56 \times 10^{-5}$

Les résultats indiqués dans le tableau ci-dessus montrent que cette hypothèse très schématique conduit cependant à des valeurs numériques cohérentes. Pour que la moyenne des flèches ainsi calculées coïncide avec la moyenne des observations, il faudrait que le coefficient de dilatation α prenne la valeur : 0,56 : 100 000. Vis-à-vis du chiffre admis par l'ordonnance fédérale et que l'on trouve couramment dans la littérature (1 : 100 000), ce coefficient paraît un peu faible ; c'est qu'en réalité les masques auraient tendance à se dilater davantage, mais que leur liaison à l'âme s'y oppose. La méthode de calcul peut être admise dans notre cas, non pas comme une image fidèle de la réalité, mais comme un moyen simple d'évaluer la flèche sous l'effet des variations de température du béton.

c) *Flèche au sommet sous l'effet de la poussée hydrostatique.*

Dans le cas du lac plein, on peut aisément calculer, au facteur E près, la flèche due à la déformation du béton : les parements amont et aval constituent des lignes isostatiques le long desquelles les contraintes normales se calculent par la méthode classique. On peut déterminer l'allongement ou le raccourcissement des parements sous l'effet de ces contraintes ; la courbure des masques étant très faible, il est admissible de confondre l'arc avec sa corde et de calculer la flèche au moyen d'un Williot.

On peut évaluer ainsi que pour le pilier 9 de la Dixence, dont la fondation se trouve à 81,50 m au-dessous de la retenue maximum, le déplacement horizontal du sommet sous l'effet de la poussée hydrostatique complète est représenté par $E\delta_{eau} = 30 300 \text{ t/m}$.

Dans le cas du lac incomplètement rempli, le calcul de la flèche est plus incertain : la répartition des contraintes est mal connue, l'hypothèse de Navier ne donnant plus alors qu'une approximation grossière ; il est difficile en particulier de tenir compte de l'entrave exercée par la partie non chargée du barrage sur les déformations de la partie chargée (coaction). C'est pourquoi nous avons eu recours à des essais sur modèle, effectués au Laboratoire de statique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, pour déterminer le diagramme des flèches au sommet en fonction du niveau du lac, tel qu'il est reproduit à la figure 32.

Considérant des périodes pendant lesquelles le niveau du lac a varié (de la cote 2190 à 2230), on peut évaluer par le

calcul la déformation due aux variations thermiques, et la soustraire des déformations totales observées pour obtenir l'effet de la poussée hydrostatique. On obtient ainsi les résultats du tableau suivant :

*Flèches au sommet du pilier 9
sous l'effet d'une variation de niveau du lac
de 2190 à 2230.*

Périodes	Flèches totales observées mm	Flèches calculées sous l'effet thermique mm	Flèches résultant de la poussée hydrostatique mm
7 juin 1938 - 6 déc. 1940	+ 10,25	+ 3,60	+ 6,65
28 août 1938 - 28 mars 1939	- 2,55	+ 5,60	- 8,15
6 juin 1939 - 30 août 1939	+ 6,00	- 1,20	+ 7,20
7 sept. 1939 - 18 mars 1940	- 2,20	+ 4,95	- 7,15
Moyenne (val. absolue)			7,3

Le signe + indique des mouvements dans le sens amont-aval.

La valeur trouvée pour cette flèche est d'une régularité satisfaisante, ce qui justifie la méthode de calcul.

Si l'on néglige la déformation du rocher, ou si l'on admet qu'elle suit une loi semblable, en fonction du niveau, à celle de la déformation du béton, on peut évaluer la flèche due à la poussée hydrostatique au moyen du graphique de la figure 32, en admettant un module d'élasticité global, fictif, E_g du système béton-rocher. Quand le lac passe de la cote 2190 à 2230, on a, d'après le graphique :

$$E_g \delta_{eau} = (140 - 4) 10^3 = 136 \times 10^3 \text{ kg/cm} \\ \delta_{eau} \text{ valant dans ce cas } 7,3 \text{ mm,} \\ E_g = 1,87 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2.$$

On peut ainsi faire la discrimination entre l'effet global de la poussée de l'eau et celui des variations de température, comme le montre par exemple la figure 34 pour les années 1936 à 1943. On constate que le sommet du pilier se déplace vers l'aval quand la température extérieure s'abaisse ou vice-versa, et que cette déformation suit de près la variation de température extérieure. C'est assez naturel, puisque les variations de température se font sentir essentiellement dans les masques, avec un déphasage relativement faible (un à deux mois d'après le tableau, page 102).

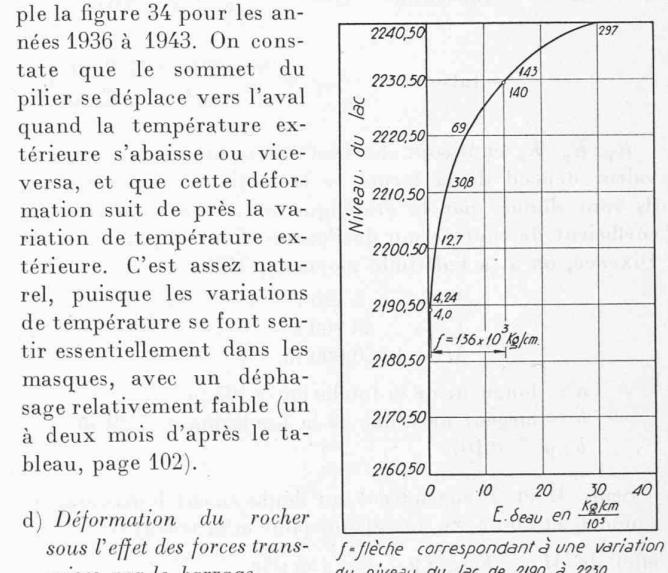


Fig. 32. — Flèche δ_{eau} au sommet du pilier 9, en fonction du niveau du lac.

(Valeurs déterminées d'après les essais sur modèle réduit effectués au laboratoire de statique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne).

Le barrage constitue une poutre encastrée dans le rocher, et qui transmet à la section de fondation un effort normal N , un moment fléchissant M et un effort

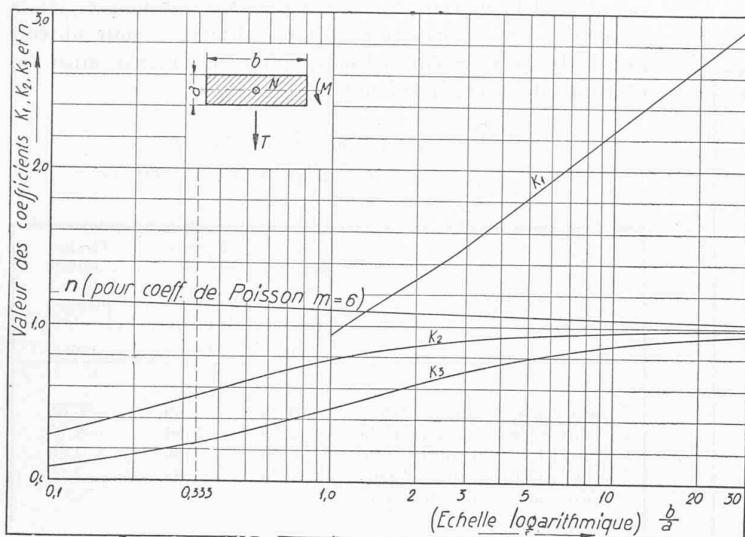


Fig. 33. — Coefficients de déformation du rocher (d'après Vogt).

tranchant T . Les déformations du rocher sous l'influence de chacun de ces efforts sont données par l'étude de Vogt* en fonction de la pression p sur le sol. Transformées en fonction des efforts eux-mêmes, ces formules deviennent :

$$\text{Effet de } N: \text{enfoncement } \Delta z = \frac{m^2 - 1}{m^2} \cdot \frac{N}{E_r b} K_1$$

$$\text{Effet de } M: \text{rotation } \Delta \gamma_M = \frac{m^2 - 1}{m^2} \cdot \frac{M}{E_r \pi a^2 b} K_2$$

$$\text{translation } \Delta x_M = \frac{(m-2)(m+1)}{m^2} \cdot \frac{M}{E_r ab} K_3$$

$$\text{Effet de } T: \text{translation } \Delta x_T = \frac{m^2 - 1}{m^2} \cdot \frac{T}{E_r b} n K_1$$

$$\text{rotation } \Delta \gamma_T = \frac{(m-2)(m+1)}{m^2} \cdot \frac{T}{E_r ab} K_3$$

K_1 , K_2 , K_3 et n sont des coefficients numériques dont la valeur dépend de la forme de la section d'encastrement ; ils sont donnés par le graphique n° 33 ; m représente le coefficient de contraction de Poisson. Pour le pilier 9 de la Dixence, on a, à l'altitude moyenne, 2159 :

$$N = 3450 \text{ t}$$

$$T = 43200 \text{ t}$$

$$M = 1050000 \text{ mt}$$

$$a = \text{longueur de la fondation} = 67 \text{ m}$$

$$b = \text{largeur moyenne de la fondation} = 7,20 \text{ m}$$

$$b:a = 0,107.$$

Seuls M et T engendrent un déplacement horizontal du sommet, et l'on a, en admettant pour m la valeur 6 :

$$\text{effet de } M \quad E_r \cdot \Delta x_M = 155 \text{ t/m}$$

$$E_r \cdot \Delta \gamma_M \cdot h = 4560 \text{ t/m}$$

$$\text{effet de } T \quad E_r \Delta x_T = 2070 \text{ t/m}$$

$$E_r \cdot \Delta \gamma_T \cdot h = 518 \text{ t/m}$$

$$\text{soit au total} \quad E_r \cdot \delta_{rocher} = 7303 \text{ t/m} = 73030 \text{ kg/cm sous}$$

* « Ueber die Berechnung der Fundamentdeformation », par F. VOGT, Oslo 1925.

l'effet de la déformation du rocher, pour le lac complètement plein. L'effet de la poussée T est proportionnel au carré de la hauteur d'eau ; celui de M , prépondérant, est proportionnel au cube de cette hauteur. Nous admettons qu'il en est de même de la flèche au sommet. Si le niveau du lac varie par exemple de 2190 à 2230, la flèche passe ainsi de

$$E_r \delta_{r1} = 73030 \left(\frac{31,0}{81,50} \right)^3 = 402 \text{ kg/cm à}$$

$$E_r \delta_{r2} = 73030 \left(\frac{71,0}{81,50} \right)^3 = 48300 \text{ kg/cm}$$

$$E_r (\delta_{r2} - \delta_{r1}) = 44280 \text{ kg/cm.}$$

La pression de l'eau sur le fond de la cuvette à l'amont du barrage tend à faire plonger la fondation vers l'amont et provoque un déplacement du sommet en sens inverse du précédent. Pour éviter un long calcul basé sur des hypothèses discutables, nous traiterons simplement deux cas extrêmes : celui où cet effet est nul, et celui où il compense la flèche provenant de la déformation du sol sous l'influence du barrage proprement dit, en examinant l'influence de ce facteur sur la valeur du module d'élasticité probable du béton.

e) *Evaluation du module d'élasticité du béton d'après les flèches mesurées.*

De la flèche totale due à l'eau, il faut soustraire celle qui provient de la déformation du rocher, pour obtenir l'effet de la déformation du béton seul et calculer le module d'élasticité de celui-ci. Faute d'indications expérimentales, on peut faire différentes hypothèses sur la rigidité du rocher :

Première hypothèse : $E_{rocher} = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ et l'effet de l'enfoncement de la cuvette en amont du barrage est négligeable. Flèche due à la déformation de la fondation :

$$\delta_{rocher} = \frac{44280 \text{ kg/cm}}{2 \cdot 10 \text{ kg/cm}^2} = 0,22 \text{ cm} = 2,2 \text{ mm.}$$

Il reste pour la flèche due à la déformation du béton $\delta_{béton} = 7,3 - 2,2 = 5,1 \text{ mm} = 0,51 \text{ cm}$. Le graphique n° 32 donne pour une variation de niveau de 2190 à 2230 :

$$E_{béton} = 136000 \text{ kg/cm}$$

$$\text{d'où} \quad E_{béton} = 2,67 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

Deuxième hypothèse : $E_{rocher} = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ et l'enfoncement de la cuvette compensate celui de la déformation de la fondation. $\delta_{rocher} = 0$.

Il en résulte $\delta_{béton} = 7,3 \text{ mm}$

$$E_{béton} = 1,87 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

Troisième hypothèse : $E_{rocher} = \infty$
 $\delta_{rocher} = 0$.

$$\text{Ici encore} \quad E_{béton} = 1,87 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2.$$

Les valeurs ainsi trouvées pour le module d'élasticité du béton sont de l'ordre de grandeur de celles que donnent couramment les essais de laboratoire, pour le module instantané, c'est-à-dire mesuré sous des charges variant rapidement. Il semble donc que pour des efforts, même appliqués lentement, mais répétés, comme les variations annuelles de température et les fluctuations de niveau du lac, le béton se déforme sans fluage appréciable.

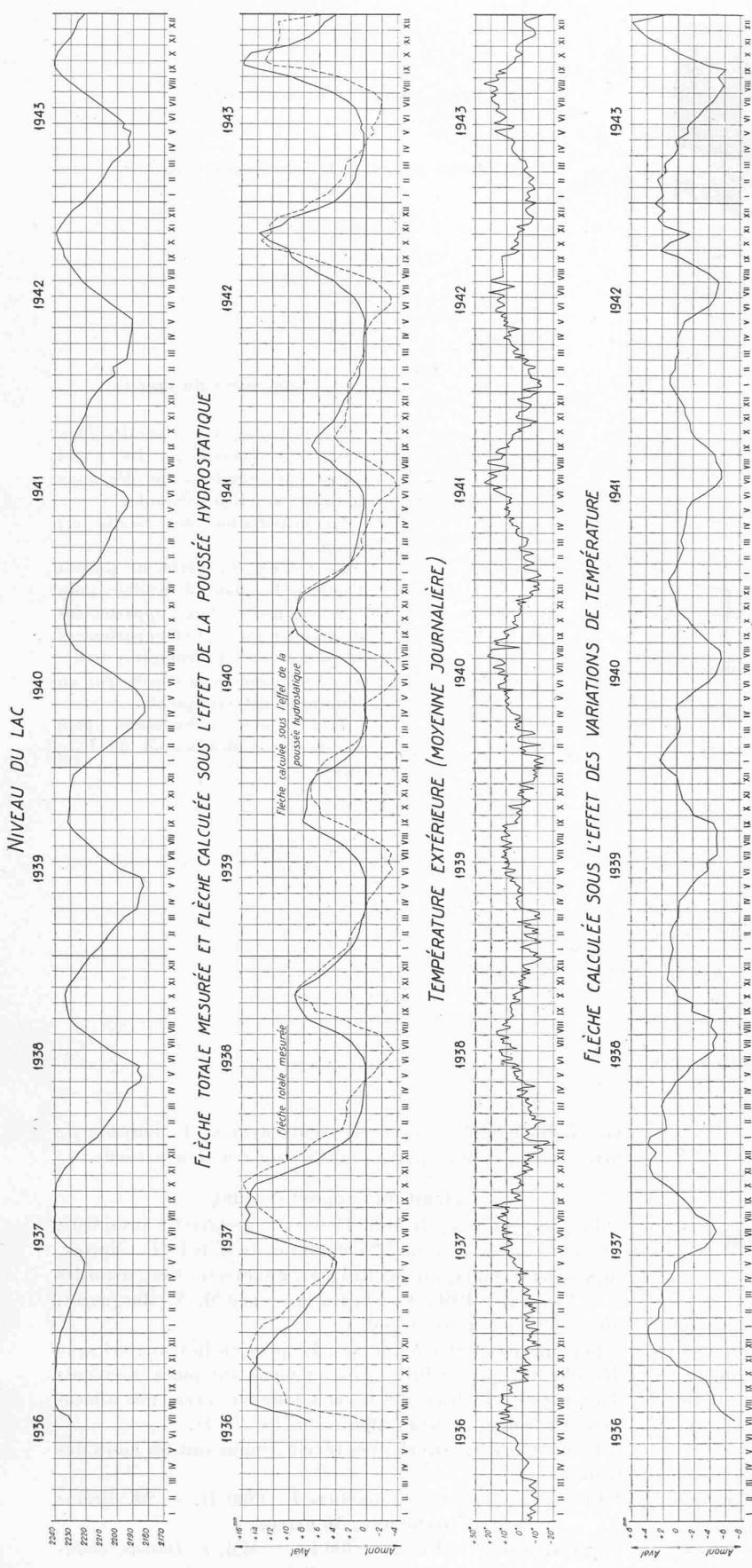


Fig. 34. — Déformations du pilier 9 sous l'effet de la poussée hydrostatique et des variations de température. (La flèche due aux variations de température a été déterminée par différence entre la flèche totale et la flèche calculée sous l'effet de la poussée hydrostatique ; son allure suit bien celle de la température extérieure.)

Conclusions.

En dehors des questions d'ordre constructif, qui sortent du cadre de cet article, l'étude approfondie d'un projet de barrage évidé ou à contreforts pose un certain nombre de problèmes techniques qu'il est utile d'étudier par des observations sur un ouvrage achevé, ainsi que par le calcul. Il s'agit en particulier de connaître les déformations de ce type de barrage sous l'effet des variations thermiques, et d'estimer leur influence sur les contraintes. On peut également se demander comment se déforme, sous l'effet de la poussée de l'eau, un tel ouvrage aux formes élégies en béton non armé. L'étude précédente montre que malgré la complexité du problème, que l'on pourrait au premier abord croire insoluble, il est tout de même possible de déterminer à l'avance l'état thermique de barrages évidés, et à plus forte raison de barrages massifs, par des calculs pas trop compliqués et moyennant quelques hypothèses convenables. L'essai de calcul proposé conduit en effet à des résultats dont la concordance avec les mesures est tout à fait satisfaisante.

On sait que pour les barrages construits à haute altitude, le refroidissement, éventuellement le gel, peuvent faire subir à l'ouvrage des dommages plus ou moins graves. On peut craindre que les barrages à contreforts et les barrages évidés soient plus sensibles aux variations de température que les barrages massifs. Il est donc intéressant de constater que pour des barrages dans le genre de celui de la Dixence, l'évolution de l'état thermique n'est pas très différente de celle d'un barrage massif. Ce fait est dû à la bonne isolation réalisée par le masque du parement aval et aux dimensions relativement fortes des contreforts, qui assurent à l'ouvrage une grande capacité thermique.

Un barrage à contreforts rectangulaires, ouvert à l'aval ou insuffisamment protégé, pourrait subir des refroidissements excessifs, susceptibles soit de provoquer des contraintes exagérées, soit même des détériorations dues au gel. Suivant le climat de la région où le barrage doit être érigé, il importe donc de vouer un grand soin à l'étude du refroidissement des contreforts et de l'isolation thermique.

Au point de vue des déformations de l'ouvrage sous la poussée de l'eau, les mesures de la Dixence et les calculs rétrospectifs ont montré que les élégissemens, lorsqu'ils sont convenablement disposés, n'entraînent aucun inconvénient, malgré l'absence d'armatures. En effet, sous l'influence de la poussée de l'eau et des variations thermiques — premier échauffement, premier refroidissement et variations annuelles — on n'a constaté aucune fissuration, ni dans l'âme, ni dans les têtes amont et aval.

Lausanne, décembre 1945.