Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 48 (1922)
Heft: 8

Artikel: Etude sur les barrages arqués
Autor: Stucky, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-37399

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: 13.07.2025

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

48e année 15 avril 1922 N° 8

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Réd. : Dr H. Demierre, ing. Paraissant tous les 15 jours

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : *Etude sur les barrages arqués*, par A. Stucky, ingénieur (suite). — *Concours pour l'hôtel de la Banque Populaire Suisse, à Fribourg* (suite et fin). — *L'hypothèse cosmogonique de Nernst.* — *Le coefficient d'élasticité longitudinale du béton.* — *L'industrie russe.* — *Congrès international des ingénieurs-conseils.* — Bibliographie. — Sociétés : *Société Genevoise des Ingénieurs et des Architectes.*

Etude sur les barrages arqués

par A. Stucky, ingénieur.

(Suite[1].)

4. *Répartition des poussées.*

a) *Poussée des eaux.*

Pour chacun des murs considérés, le diagramme de la poussée des eaux, un triangle isocèle, est divisé en deux parts qui agissent l'une sur les arcs, l'autre sur le mur. Les tableaux des coefficients de déformation des murs permettent de calculer rapidement la déformation

$$\delta_a = \Sigma P_m \delta_{am}.$$

Pour les arcs on reporte la part des poussées qui leur revient dans les sections horizontales (fig. 19) où il est facile de construire ensuite le polygone funiculaire correspondant. La force axiale R_m varie peu dans un même arc malgré les poussées très différentes aux naissances et au sommet. On peut donc très bien calculer avec $\overline{R}$ moyen. $\overline{R}$ connu on en déduit le déplacement des points considérés au moyen de

$$\delta_m = \overline{R}.\delta_{mR},$$

les coefficients δ_{mR} se trouvant dans le tableau 6.

Le tableau ci-dessous donne le calcul des déformations de la section médiane. Les forces P_m sont les résultantes appliquées aux cotes 800, 95, 90 de la part des poussées.

Les deux dernières lignes du tableau indiquent : la première, les déplacements des points du mur calculés à l'aide des poussées agissant sur lui, soit $\Sigma P_m \delta_{mm}$, — la deuxième les déplacements des mêmes points considérés comme appartenant aux arcs et calculés à l'aide des forces annulaires livrées par les épures de la fig. 17.

La concordance des déformations a été obtenue avec une exactitude d'environ 10 %. Il serait superflu de pousser celle-ci plus loin étant donné qu'on ne saurait jamais réaliser très exactement les hypothèses mises à la base du calcul.

Le pied du mur médian supporte la poussée totale de l'eau, ceci pour la raison que ce point du mur est fixe tandis que le point correspondant de l'arc, le sommet, ne l'est pas. Pour les murs latéraux la chose est différente. Le point inférieur est à la fois pied du mur et naissance d'un arc, c'est-à-dire, parfaitement fixe dans les deux cas, la poussée est répartie sur les deux éléments.

Les quatre diagrammes des poussées sur les murs présentent à leur partie supérieure une région négative. C'est-à-dire que les arcs y subissent une poussée supplémentaire provenant de la déformation des murs. Le sommet du mur est entraîné par la déformation des régions inférieures et entraîne à son tour les arcs supérieurs qui ne se déformeraient que très peu sous la seule pression des eaux. Par réaction les arcs enrayent le mouvement du sommet des murs.

b) *Variation de température.*

Les hypothèses qu'il y a lieu de faire sur les variations de température ont été discutées au chap. III.

Lac vide, chute de température égale.

Nous avons vu que l'influence d'une chute de température égale sur les arcs peut être assimilée à celle d'une force axiale virtuelle

$$R = \beta.\Delta t.E.F.$$

[1] Voir *Bulletin technique* du 4 mars 1922, page 49.

Section médiane O. Tableau 7.

m	P_m	δ_{am}	$P_m\delta_{am}$	δ_{bm}	$P_m\delta_{bm}$	δ_{cm}	$P_m\delta_{cm}$	δ_{dm}	$P_m\delta_{dm}$	δ_{em}	$P_m\delta_{em}$	δ_{fm}	$P_m\delta_{fm}$	δ_{gm}	$P_m\delta_{gm}$	δ_{hm}	$P_m\delta_{hm}$	δ_{im}	$P_m\delta_{im}$	$\overline{R}_m$	δ_{ms}
a	−7,6	325,3	−2460	217,2	−1650	137,5	−1045	82,4	−628	46,2	−350	23,9	−182	11,1	−84	4,3	−32	1,1	−8,4	1167	18,92
b	−1,9	217,2	− 410	163,5	− 310	109,8	− 208	68,5	−130	39,4	− 75	20,8	− 39	9,8	−18	3,9	− 7	1,0	−1,9	216	12,10
c	8	137,5	+1100	109,8	+ 871	82,1	+ 657	54,6	+436	32,6	+261	17,7	+141	8,6	+69	3,5	+28	0,9	+7,2	315	8,84
d	15	82,4	1235	68,5	1030	54,6	820	40,7	610	25,8	387	14,6	220	7,3	109	3,05	46	0,8	12,0	350	6,40
e	25	46,2	925	39,4	985	32,6	815	25,8	645	19,0	475	11,5	287	6,1	152	2,6	67	0,7	17,5	362	4,65
f	40	23,9	955	20,8	830	17,7	708	14,6	584	11,5	460	8,4	336	4,8	192	2,2	88	0,6	24,0	430	3,00
g	60	11,1	665	9,8	590	8,6	515	7,3	438	6,1	366	4,8	288	3,6	216	1,8	108	0,5	30,0	533	1,63
h	90	4,3	385	3,9	350	3,5	315	3,0	275	2,6	234	2,2	198	1,8	162	1,4	126	0,4	36,0	450	1,05
i	125	1,1	145	1,0	125	0,9	112	0,8	100	0,7	87	0,6	75	0,5	62	0,4	50	0,3	37,5	320	0,50
	murs	δ_a	2540	δ_b	2821	δ_c	2688	δ_d	2330	δ_e	1845	δ_f	1324	δ_g	860	δ_h	474	δ_i	154		
	arcs	$R_a.\delta_{as}$	2210	$R_b.\delta_{bs}$	2620	$R_c.\delta_{cs}$	2780	$R_d.\delta_{ds}$	2240	$\overline{R}_e.\delta_{es}$	1680	$\overline{R}_f.\delta_{fs}$	1290	$\overline{R}_g.\delta_{gs}$	869	$\overline{R}_h.\delta_{hs}$	525	$\overline{R}_i.\delta_{is}$	160		

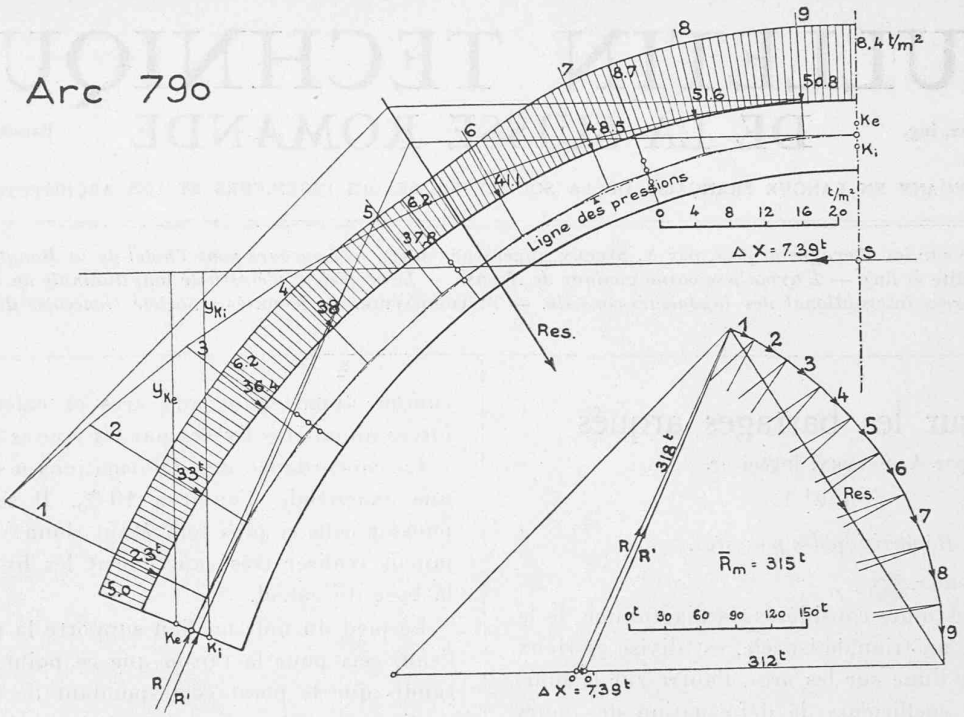


Fig. 19. — Poussées sur l'arc et ligne des pressions. Echelle 1 : 400.

t étant la chute de température. A ces forces axiales on peut faire correspondre des poussées virtuelles P_t agissant sur l'arc. Pour un arc de largeur constante la force axiale virtuelle R_t serait constante, et les poussées normales à l'arc. Pour un arc de largeur variable R_t varie en raison de l'épaisseur et les poussées virtuelles agissent obliquement sur l'arc, on peut les décomposer en forces normales et tangentielles.

L'effet des composantes tangentielles qui tendent à provoquer surtout un déplacement latéral des arcs est enrayé par les murs qui s'opposent à ce mouvement. Leur influence sur la répartition est faible, ainsi que nous le montrerons ci-après. Nous ne tiendrons compte que des composantes normales ; comme les arcs ne sont en général pas rigoureusement circulaires, ce calcul des poussées p_t se fait au mieux graphiquement.

Avec les hypothèses faites au chap. III on trouve :

Poussées virtuelles p_t. Tableau 8.

Cote	Δt_m	O	I	II	III	IV
		t/m	t/m	t/m	t/m	t/m
800	14°	18,5	17,2	14,4	12,1	11,5
795	12°	23,4	24,5	23,7	19,0	15,4
790	11°	28,0	28,0	26,7	21,0	18,4
785	10°	34,5	31,0	25,5	20,6	—
780	9°	43,4	35,0	23,4	21,7	
775	8°	53,0	44,0	25,3	24,5	
770	7°	60,0	50,0	31,5	—	
765	6°	66,0	50,0	—		
760	5°	70,0	56,0			
755	4°	75,0	—			

La manière dont ces poussées agissent sur le barrage diffère de l'action des poussées des eaux.

Si nous considérons comme précédemment les *arcs* et les *murs*, les premiers considérés isolément subiraient sous l'influence d'une variation de température une déformation correspondant aux poussées totales p_t et il naîtrait des fatigues dues aux ΔX_t correspondant à ces p_t tandis que les murs seuls ne subiraient ni déformation ni fatigue. Par suite de l'interdépendance des deux systèmes, les murs enrayent la déformation des arcs. Ceci a pour effet de soumettre les murs à des poussées p'_t réelles et les arcs aux mêmes poussées réelles $-p'_t$ donnant naissance à des forces annulaires réelles $-R'_t$ et à des forces hyperstatiques $-\Delta X_t = -kR'_t$. Les forces agissant sur les murs sont donc p'_t et celles agissant sur les arcs sont $-R'_t$ et $(\Delta X_t - \Delta X'_t)$.

Ces forces amènent les arcs et les murs à coïncider. Le calcul de la répartition s'exécute de la même façon que pour la poussée des eaux. Le diagramme des p_t (fig. 20) se divise en deux parties, p'_t et $(p_t - p'_t)$. Les premières donnent le déplacement des murs, les secondes les déplacements des arcs.

Le calcul est en principe identique à celui du tableau 7.

Lac plein, chute de température inégale.

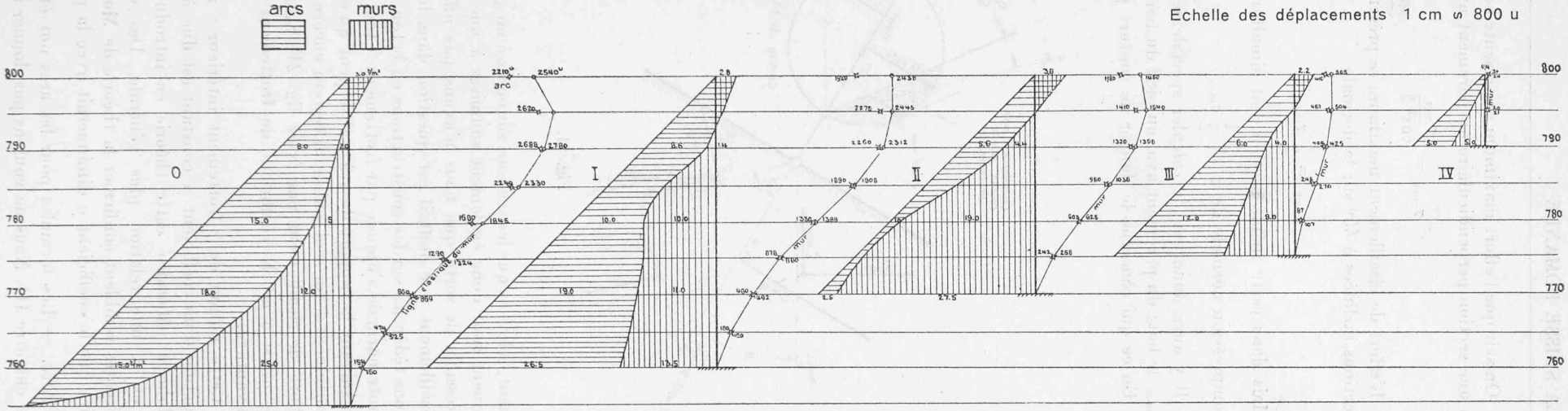
Nous étions arrivés au résultat qu'une chute de température inégale des deux côtés de l'arc se manifeste par une force axiale virtuelle : $R_{\Delta t+\Delta\tau} = E.\beta.F(\Delta t + \Delta\tau)$ et par un moment $R_{\Delta t}\,\frac{e}{6}$

Le problème de la répartition des poussées est plus compliqué que dans le premier cas. Néanmoins, vu que les hypothèses sur les variations de température sont plus ou moins arbitraires, il est inutile de poursuivre le problème avec trop d'exactitude. On peut admettre pour le second cas la même répartition des poussées que pour le premier et réduire simplement les fatigues dues à $R_{\Delta t}$ d'après le premier cas.

Poussées sur les murs

Poussée des eaux

Echelle des déplacements 1 cm ∽ 800 u



Effets de la température

Echelle des déplacements 1 cm ∽ 4000 u

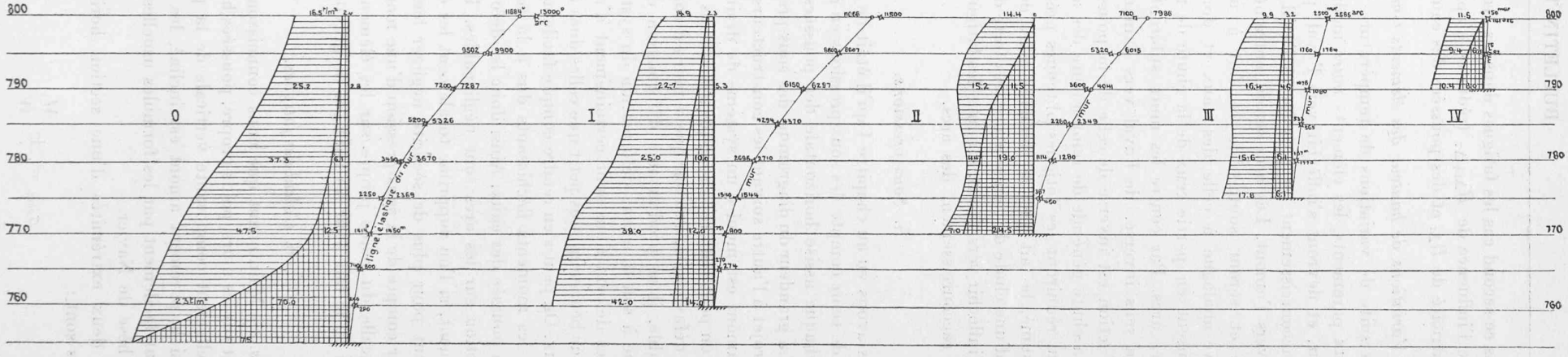


Fig 20.

Dans ce second cas les fatigues dans les arcs se composent de l'influence de $R_{\Delta t+\Delta\tau}$ (réduites d'après $R_{\Delta t}$) de l'excentricité de $R_{\Delta t}$ et des poussées des eaux.

Variations de hauteur des éléments « murs ».

A la suite de variations de température inégales sur les deux parements, les éléments *murs* modifieront leur hauteur, et devront s'infléchir vers l'aval, par exemple si le raccourcissement est plus fort à l'aval ou inversément vers l'amont. Les arcs seront entraînés par cette flexion et seront soumis de ce fait à une poussée effective analogue à celle des eaux et dont les effets compensent en partie ceux de la chute de température dans les arcs. Par contre les murs subiront des poussées en sens inverse, de l'aval vers l'amont, poussées dont l'action est inverse de celle de la poussée des eaux et de la chute générale de température des arcs, c'est-à-dire qui réduiront les fatigues obtenues précédemment. En résumé, le fait que les éléments *murs* doivent, sous l'effet d'une chute de température très forte du parement libre s'infléchir vers l'aval, diminue les fatigues produites par le raccourcissement des arcs.

5. *Sous-pressions.*

Nous avons vu au chapitre I qu'il était de coutume en Suisse de tenir compte des sous-pressions en introduisant dans chaque assise horizontale des poussées de bas en haut. La grandeur du diagramme des sous-pressions varie d'un projet à l'autre suivant les constructeurs. Si le parement amont est muni d'un système de drainage perfectionné on peut réduire la sous-pression. Dans l'hypothèse la plus défavorable, à savoir que le mur est complètement perméable, il se produit une déformation du mur qui entraîne à son tour une déformation du système « arc », mais ces déformations sont certainement d'un ordre de grandeur beaucoup plus petit que celles dues à la poussée des eaux. On peut s'en rendre compte facilement en comparant les moments fléchissants dus à la sous-pression ou à la poussée des eaux. Ainsi donc les déformations et leur action sur les arcs sont négligeables. Il suffit par conséquent, si l'on supprime totalement les drains ou si l'on veut pour plus de sécurité négliger leur efficacité, de tenir compte de la sous-pression d'une manière analogue à celle du poids propre sur les éléments « murs », comme on le fait pour les barrages de gravitation.

6. *Calcul des fatigues.*

Murs. — Maintenant que nous connaissons les forces agissant sur les murs, poids propre, poussées horizontales, éventuellement composante verticale de la poussée des eaux, si le parement amont est incliné, les fatigues se calculent facilement par les formules usuelles basées sur l'hypothèse de Navier.

Aux deux extrémités d'une section horizontale les fatigues sont :

$$\sigma_{vert} = \pm \frac{M_k}{W}$$

On sait que l'effort maximum se présente normalement à une section perpendiculaire au parement aval :

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{vert}}{\cos^2 \theta}$$

L'effort de cisaillement maximum se présente dans les sections inclinées à 45° sur la normale

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\,\sigma_{max}\,.$$

Mais dans cette même section agit simultanément une compression normale de $\sigma' = \frac{1}{2}\,\sigma_{max}$.

Il y aura donc lieu de calculer spécialement σ_{max} et τ_{max} le long du parement aval au pied du barrage.

En ce qui concerne le danger de rupture par cisaillement, relevons que les sections soumises à un grand cisaillement sont donc également soumises à une forte compression, de sorte que nous n'avons pas affaire ici au cisaillement pur dont il est question dans les prescriptions fédérales sur les constructions en béton. La composante normale s'oppose par frottement à tout glissement et suivant le rapport de σ à τ il se peut qu'en réalité le frottement à lui seul suffise. Il restera encore un certain effort de cisaillement pur (voir fig. 21) $\tau_{cisaill.pur} = \tau_{tot} - \mu\sigma$ si μ est le coefficient de frottement — 1,00 ou davantage.

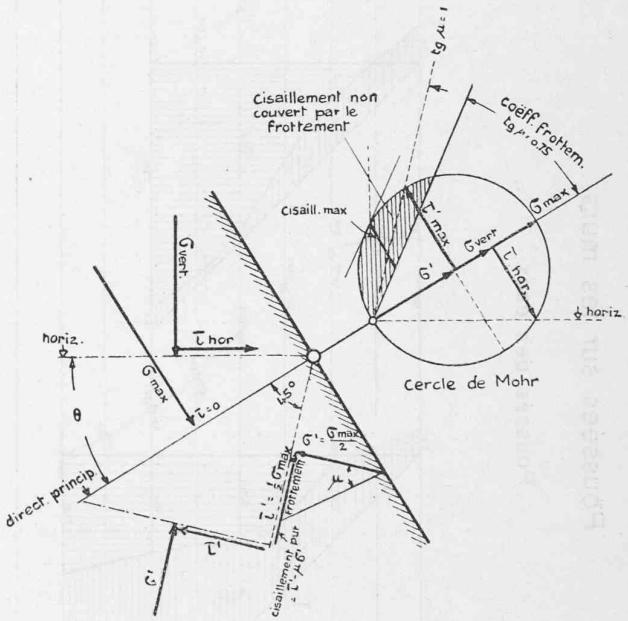


Fig. 21.

Cette notion de « frottement intérieur » avec introduction d'un coefficient μ constant est due à Coulomb. Mohr a généralisé cette théorie en introduisant pour τ et σ. une relation plus générale. Des expériences récentes semblent confirmer la théorie de Mohr, c'est-à-dire que le coefficient μ diminuerait avec la pression.

Arcs. — Les formules pour les arcs ont été déduites au chapitre III. Nous ne voulons pas donner ici le détail

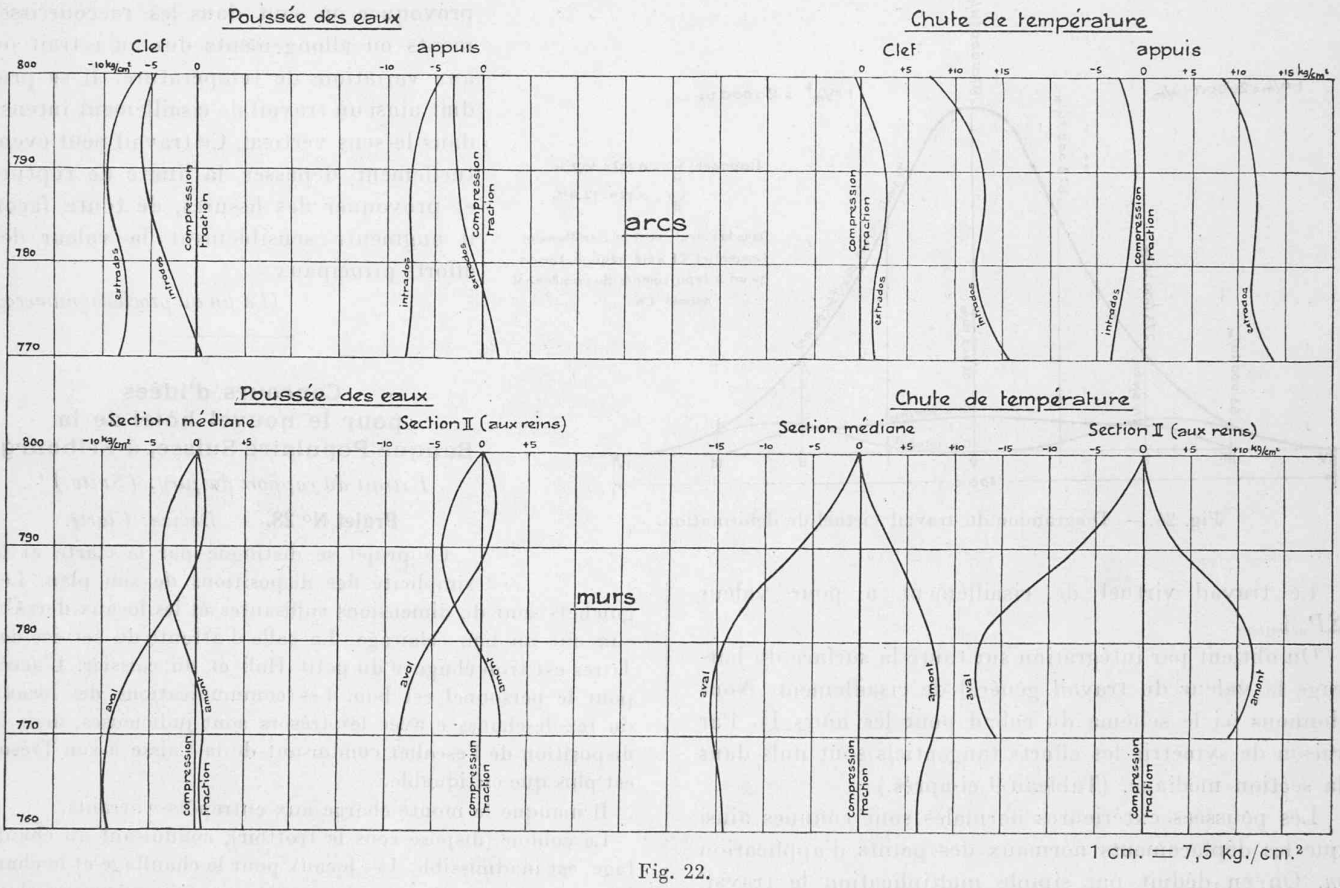


Fig. 22.

du calcul des fatigues qui ne présente pas de difficultés. Le diagramme fig. 22 donne les fatigues pour la poussée des eaux et la chute de température. Dans le cas de l'arc il se trouvera des sections qui sont soumises à un effort de traction oblique, c'est-à-dire une composante normale de traction et une composante tangentielle de cisaillement. Dans ce cas il n'y aura plus comme précédemment dans le mur une résistance au glissement par suite du frottement, mais la maçonnerie devra s'opposer au cisaillement uniquement par sa propre résistance. Il faut alors limiter le cisaillement à 4 kg/cm².

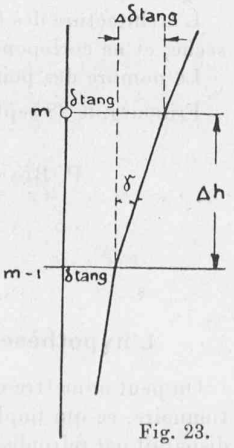


Fig. 23.

Examen des fatigues résultant des déformations tangentielles des murs.

Il nous reste maintenant à prouver que l'on peut sans grande erreur négliger l'influence de la déformation tangentielle des murs sur la répartition des poussées. Le plus simple est de comparer, en se basant sur les résultats précédemment acquis, l'ordre de grandeur des efforts qui naissent dans le barrage par suite des déformations tangentielles. On peut par exemple déterminer le rapport de la somme des travaux virtuels des efforts tranchants tangentiels à la somme des travaux virtuels des poussées extérieures. Nous relevons ici que ce rapport tel que nous allons le calculer est trop grand puisque les déformations normales et tangentielles qui nous serviront de base ont été calculées à l'exclusion des efforts tangentiels. Nous voulons précisément prouver que ces derniers sont si faibles que leur influence sur la répartition des poussées est négligeable.

Les épures des déformations des arcs nous permettent de déterminer la composante δ_{tang} des déplacements que doivent subir les points m' des murs pour $\Delta X = 1,—$ 10,— ou 100 t. Par multiplication avec le ΔX effectif on obtient la grandeur δ_{tang} recherchée. Le problème se pose ainsi : Connaissant les déformations, dues uniquement au cisaillement d'un mur de longueur variable avec la hauteur, mais d'épaisseur constante (1 m.) quelles sont les poussées qui agissent sur ce mur (ces poussées p_{tang} peuvent être supposées concentrées). C'est le problème inverse de celui de la recherche des cœfficients δ_{aa} des murs. Comme nous n'avons affaire qu'à des efforts tranchants, le calcul est le suivant :

Si Δh est la distance verticale de deux points, l'angle de glissement γ a pour valeur $\frac{\Delta\delta_{tang}}{\Delta h} = \gamma$.

$$\tau = \gamma . G ; \qquad Q_m = \tau . F = \gamma . G . F .$$

Les valeurs Q_m des efforts tranchants étant connues on en déduit facilement les poussées P_m.

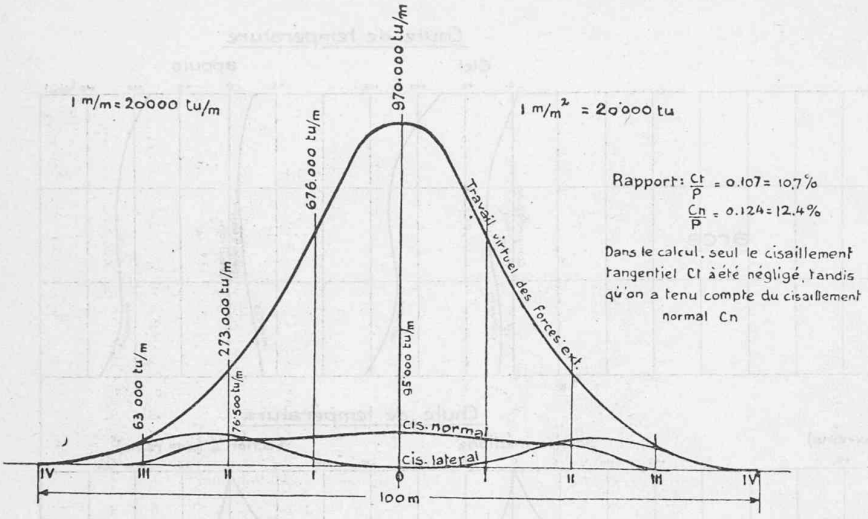


Fig. 24. — Diagramme du travail virtuel de déformation.

Le travail virtuel de cisaillement a pour valeur $\Sigma P_m \delta_{mtang}$.

On obtient par intégration sur toute la surface du barrage la valeur du travail général de cisaillement. Nous donnons ici le schéma du calcul pour les murs II. Par raison de symétrie les efforts tangentiels sont nuls dans la section médiane. (Tableau 9 ci-après.)

Les poussées extérieures normales sont connues ainsi que les déplacements normaux des points d'application *m*. On en déduit par simple multiplication le travail virtuel.

Calcul du travail virtuel des efforts tangentiels dans la section II.
Tableau 9.

Cote	δ_{tang}	$\Delta\delta_{tang}$	τ	F_m	F. moyen	Q_m	P_m	$P_m\delta_{tang}$
	u	u	kg/cm²	m²	m²	t	t	t.u.
800	542			2,10			7,8	4.200
		32	0,246		3,15	7,8		
790	510			4,20			112,8	57.600
		264	2,06		5,85	120,6		
780	246			7,50			65,9	15 500
		236	1,82		10,25	186,5		
770	10			13,0			— 82,5	— 800
		10	0,77		13,5	104		
760				14,0			—104	0
								76.500 tu/m'

Nous avons reporté dans le diagramme, Fig. 24, les travaux des efforts de cisaillement tangentiels ainsi que les travaux des poussées extérieures pour les diverses sections verticales. Le rapport des deux surfaces est de 10, 7 %.

Ce même calcul exécuté pour d'autres barrages a donné un rapport plus petit, soit 3 %. Si l'on examine le diagramme fig. 24 on constate que c'est dans la région des reins des arcs que se trouve la proportion la plus défavorable. Cette proportion peut être encore aggravée si le profil en long du barrage a la forme irrégulière type III fig. 26, car les murs étant très courts sont sollicités fortement par les déformations tangentielles. D'ailleurs cette forme irrégulière du profil en long a d'autres inconvénients encore. Une variation brusque de la hauteur des murs a pour effet de provoquer un saut dans les raccourcissements ou allongements dus au retrait ou aux variations de température. Il se produit ainsi un travail de cisaillement intense dans le sens vertical. Ce travail peut éventuellement dépasser la limite de rupture et provoquer des fissures, de toute façon il augmente sensiblement la valeur des efforts principaux.

(La fin au prochain numéro.)

Concours d'idées pour le nouvel hôtel de la Banque Populaire Suisse, à Fribourg.

Extrait du rapport du jury. (Suite.) [1]

Projet N° 28. — *Devise: Clarté.*

Ce projet se distingue par la clarté et la simplicité des dispositions de son plan. Les guichets sont de dimensions suffisantes et les locaux derrière eux ont un bon éclairage. La salle d'attente du service des Titres est trop éloignée du petit Hall et du caissier. L'accès pour le personnel est bon. Les communications des locaux du rez-de-chaussée avec les trésors sont judicieuses, mais la disposition de l'escalier conduisant de la Caisse à son Trésor est plus que critiquable.

Il manque le monte-charge aux entrepôts-warrants.

Le couloir (disposé sous le trottoir), conduisant au chauffage, est inadmissible. Les locaux pour le chauffage et le charbon empiètent sur le second sous-sol, sans être prévus au plan.

Les communications du rez-de-chaussée au premier étage correspondent aux besoins, mais l'escalier principal, disposé sur la façade de l'Avenue de la Gare, est d'un effet malheureux.

Au premier étage, la salle d'attente et un des locaux pour le vice-directeur sont mal disposés.

Aux deuxième et troisième étages, toute répartition des locaux est rendue facile, mais les appartements du troisième étage et des combles ne sont, par contre, pas rationnels.

L'architecture des façades est simple de lignes, mais un peu sèche, et ne correpond pas à la situation locale.

Le nombre des points obtenus est de 92.

Fribourg, le 28 septembre 1921.

Le jury:

P. Blancpain, G. Epitaux, Albert Gerster, N. Kunzli, R. Suter.

Le secrétaire: G.-L. Fragnière.

L'hypothèse cosmogonique de Nernst.

On peut admettre que l'univers se trouve dans un état stationnaire, ce qui implique qu'il naît autant d'étoiles qu'il en disparaît par refroidissement. Mais cette hypothèse est contredite :

1° Par la doctrine de la thermodynamique qui postule l'irréversibilité des phénomènes. D'immenses quantités d'énergie se dissipent, sans compensation, par rayonnement, et comme la masse anéantie est égale à l'énergie divisée par le carré de la vitesse de la lumière, cette formidable dissipation d'énergie a

[1] Voir *Bulletin technique* du 1er avril 1922, page 78.