

# Examen des résultats de l'épreuve du Réservoir de douze mille mètres cubes au Calvaire sur Lausanne: essai de charge par remplissage unilatéral

Autor(en): **Paris, A.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **54 (1928)**

Heft 5

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-41853>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

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

La fig. 16 représente le bogie complet avec ses moteurs et leurs jous de suspension  $J_1$  et  $J_2$ .

Cette disposition pourrait facilement être appliquée aux automotrices, ce qui répondrait à la principale objection que l'on oppose à la généralisation de l'emploi de ces véhicules : l'importance des réactions dues au poids non suspendu relativement élevé, réactions qui fatiguent la voie et les moteurs.

\* \* \*

Lorsqu'on étudie les divers domaines de la technique, on constate qu'il existe des machines encore plus poussées que le moteur de traction, le moteur d'avion par exemple, mais tandis que la durée de ce dernier atteint dans certains cas, quelques centaines d'heures seulement, la vie d'une locomotive électrique doit être de 40 ans au moins, représentant un parcours de 4 millions de km environ, pour que son emploi soit économique.

Le problème à résoudre par le constructeur de matériel de traction est donc extrêmement complexe, mais l'application des méthodes et procédés que nous avons étudiés au cours de cet article a permis d'établir, entre les sujétions techniques et les nécessités économiques, un compromis très satisfaisant ; le moteur moderne, résultat de ces études et de nombreuses expériences est absolument au point et facilitera certainement le grand développement de la traction électrique auquel on est en droit de s'attendre.

## Examen des résultats de l'épreuve du Réservoir de douze mille mètres cubes au Calvaire sur Lausanne. Essai de charge par remplissage unilatéral,

par A. PARIS, ingénieur,  
professeur à l'Université de Lausanne.

(Suite).<sup>1</sup>

### II. Sollicitations sous la charge d'essai.

Les surfaces de déformation sont fonction des diagrammes de moments (sommes de moments), et sont conditionnées par la raideur variable et les continuités de la construction.

Le béton, supposé homogène, était caractérisé par les mesures d'élasticité et de résistance effectuées au Laboratoire de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne. Le moment d'inertie global de ses sections successives l'était par le calcul, béton tendu avec module d'élasticité admis identique.

Ce module n'a pas dû varier beaucoup en cours d'épreuve, car les mesures de déformation, classées en familles comme à la fig. 4, montrent une allure correspondant à peu près au moment de renversement dû à la charge hydrostatique. Le retour à zéro a été bon, lais-

sant une flèche permanente d'un douzième au maximum après 19 heures de charge totale.

L'épreuve pratique de l'ouvrage a donc vérifié et confirmé l'ordre de grandeur du module d'élasticité déterminé sur prismes moulés au chantier, mais étudiés au laboratoire en dehors de l'œuvre.

#### 1. Moments fléchissants.

Deux chemins s'offraient pour l'étude analytique des tensions. On pouvait d'abord évaluer le *rayon de courbure* de tranches rectilignes

$$r = E \cdot I / M = (ds/dx)^3 : (d^2f/dx^2)$$

mais cette expression s'est montrée impropre à l'étude statique, à cause de l'amplification du dessin et de la complication des formes mathématiques.

La *ligne élastique* était par contre plus accessible à l'épure, par la simplicité de son expression

$$1) \quad M = E \cdot I \times d^2f/dx^2$$

limite de

$$E \cdot I \times \Delta^2f/\Delta x^2.$$

Le tracé des dérivées est délicat, d'autant plus qu'il est double, mais il a comme correctif l'intégration par le funiculaire de Mohr, qui n'a de commun avec lui que les diagrammes de raideur  $E \cdot I$ . Ceux-ci sont une constante du problème ; toutefois, la continuité des lignes obtenues permet d'en vérifier jusqu'à un certain point les indications. Le module d'élasticité du béton a été pris à 280 000 kg/cm<sup>2</sup>, et le facteur d'amplification des armatures à  $n = 10$ .

En dérivant deux fois la ligne élastique, on trouve donc, après multiplication par le module de raideur locale, l'expression du moment fléchissant probable de tension, à l'instant de l'essai. La rigueur du résultat dépend de celle du tracé ; les figures 14 et 16 montrent qu'un peu de soin évite de grosses erreurs entre les lignes élastiques de mesure et celles données par le polygone de Mohr ; le planimétrage des surfaces de déformation n'indique qu'une erreur maximum de 4 % après rectification des lignes de moments. Le double procédé graphique est donc capable de fournir une évaluation suffisamment fidèle des sollicitations probables du système.

Les relations entre flèches et moments dépendent des échelles. L'épure porte les flèches à 10 cm. par millimètre, et les longueurs au vingtième par 5 cm. au mètre. La majoration de l'épure résulte par

$$2) \quad \mu = 100 \times 20 = 2000.$$

Les unités de calcul étant le kilo et le centimètre, nous mesurons les tangentes sur la base

$$\Delta x = 100 \text{ cm ;}$$

la mesure  $y''$  de  $d^2y$  donne alors

$$3) \quad M(\text{cm} \times \text{kg}) = E \cdot I(\text{cm}^2 \times \text{kg}) \times y''(\text{cm}) : 2000 \cdot 100^2 \text{ cm}^2.$$

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* du 11<sup>e</sup> février 1928, page 29.

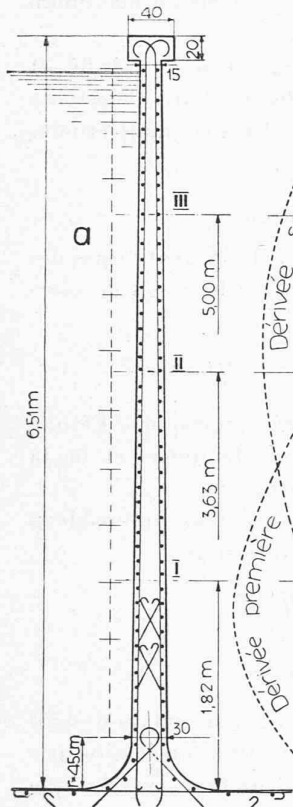


Fig. 10.

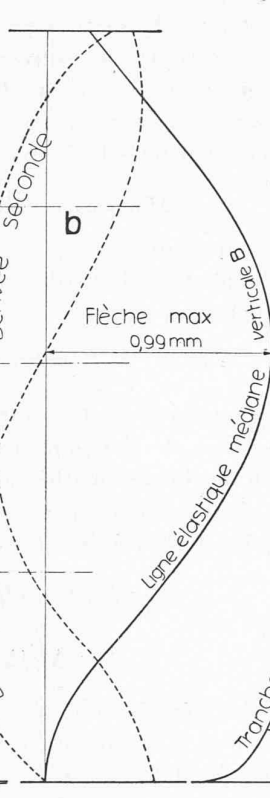


Fig. 11.

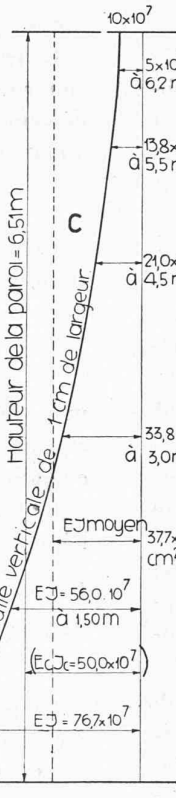


Fig. 12.

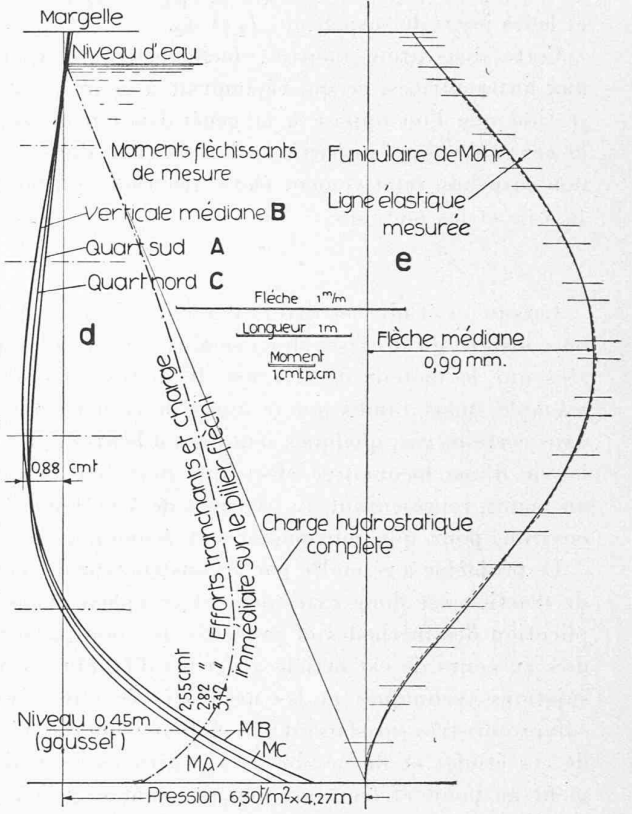


Fig. 13.

Fig. 14.

Dérivation et vérification des flexions et moments verticaux.

2. Résistance à la torsion.

Le panneau de paroi séparatrice est encasté, dans le sol de molasse, par la largeur de l'empattement et par la charge de la colonne d'eau. Le long des piliers latéraux, la continuité résultant des travées égales conduit aussi à l'encastrement parfait des tranches horizontales, réserve faite des déformations élastiques linéaires.

L'appui sur la margelle supérieure est, par contre, élastique par torsion comme par flexion. Le phénomène de torsion est décelé par les clinomètres A, B et C (fig. 7 et 8); ses diagrammes diffèrent des lignes élastiques par le fait que leurs indications sont parallèles entre elles, transversales donc à la solive et non continues. Leur traitement graphique reste toutefois analogue.

L'équation classique de l'angle de torsion

$$4) \quad \delta = M_t \cdot l : G \cdot I_t = M_t \cdot l : T$$

contient la longueur  $l$  sur laquelle le prisme est supposé homogène et de profil constant. Le module  $I_t$  de résistance à la torsion, de l'ordre du moment d'inertie, a des expressions très différentes suivant les auteurs.

Notre profil n'étant constant que sur la longueur  $\Delta l$ , nous avons

$$M_x \cdot \Delta l = T_x \cdot \Delta \delta.$$

Un dynamique, où les poids seraient les produits  $M_x \cdot \Delta l$  et la distance polaire  $T_x$ , enserrerait donc l'angle  $\Delta \delta$  entre ses deux rayons correspondants; le funiculaire

relatif serait l'enveloppe des tangentes transversales successives aux sections diverses. Le diagramme des clinomètres (fig. 18) sera la courbe intermédiaire de simple intégration; son échelle est fixée par

$$c/\mu = a \cdot e/T$$

où  $a$  est la somme relative des segments du dynamique

$$a = \sum (M_x \cdot \Delta x).$$

La dérivation donne le moment de torsion

$$M_x = \frac{\Delta c \cdot T \cdot 1}{\Delta x \cdot e \cdot \mu}$$

où, par construction de tangente,

$$\Delta c : \Delta x = b : e.$$

Il en résulte

$$5) \quad M_x = \frac{b \cdot T}{\mu \cdot e^2} = \frac{G \cdot I_t \cdot b}{\mu \cdot e^2}.$$

Si le profil varie, le calcul montre que la formule reste la même,  $I_t$  devenant simplement le module local variable  $I_x$

$$M_x = \frac{G \cdot I_x \cdot b}{\mu \cdot e^2} = C_t \cdot I_x \cdot b.$$

Partant d'une estimation préliminaire du module d'élasticité transversale de

$$G = 100\,000 \text{ kg/cm}^2$$

nous obtenons pour la constante  $C_t$  le chiffre de

$$8) C_t = G : \mu \cdot e^2 = 10^5 : 2000 \cdot 100^2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-4} \times \text{kg.}$$

On l'applique aux valeurs successives de l'ordonnée  $b$ .

3. Ligne de moments de torsion.

Notre figure 19 donne le résultat de la dérivation du diagramme des clinomètres. La courbe des moments en émane par multiplication ; les facteurs à introduire ainsi sont la constante  $C_t$  et le module de résistance à la torsion. La connaissance de ce module nous permettrait de fixer la ligne de moments, mais son expression varie suivant les auteurs, et dans de larges limites (fig. 21).

Les formules proposées actuellement diffèrent sur deux points essentiels : l'évaluation du module de torsion du rectangle et la collaboration des rectangles solidaires.

La « Hutte » donne, pour le rectangle, les formules de Saint-Venant, de Grashof et de Weber ; traitant de l'analogie hydrodynamique de Boussinesq<sup>1</sup>, le professeur Dr M. Paschoud indique la formule de Ritz. Conséquemment à cette analogie, les rectangles soudés collaborent plutôt par simple cumul de leurs modules de résistance, dès que la longueur de soudure est faible. L'extension donnée arbitrairement aux formules de Saint-Venant et de Grashof, pour englober les profils complexes, ne se justifie pas à ce point de vue théorique ; nous verrons que l'essai confirme ce résultat.

Les valeurs  $I_t$  sont les suivantes pour le rectangle

$$F = a \cdot b$$

pour lequel le rapport des côtés

$$\nu = b/a$$

est égal ou supérieur à l'unité

a) L'équation de Saint-Venant fait

$$9) I_t = \frac{F^4}{40 (I_v + I_h)}$$

b) La formule de Grashof donne

$$10) I_t = \frac{I_v \cdot I_h}{\xi (I_v + I_h)}$$

$$\xi = \frac{1}{4} \text{ de } (1,2 \text{ à } 1,5) = 0,300 \text{ à } 0,375.$$

<sup>1</sup> Bulletin technique, du 7 novembre 1925.

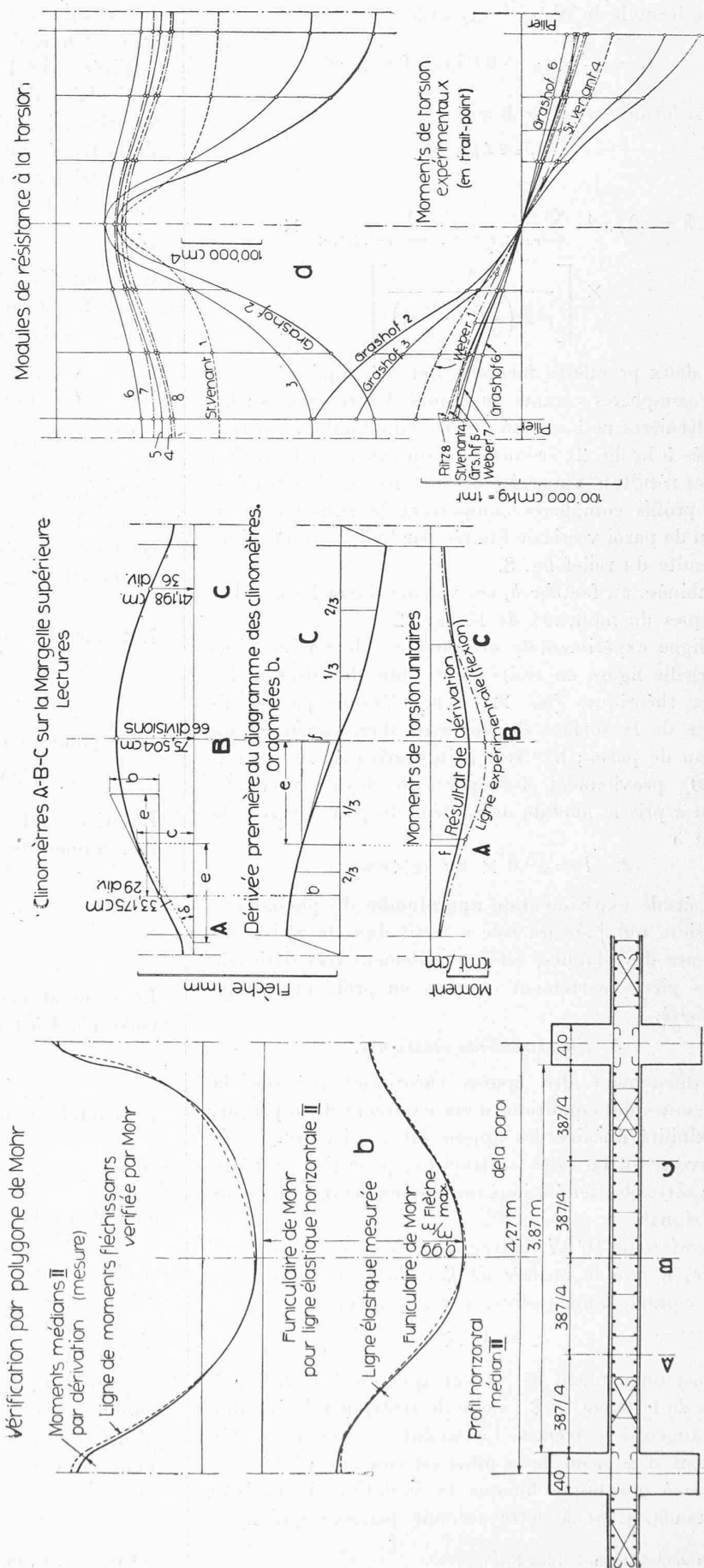


Fig. 21 et 22.

Fig. 18 à 20.

Fig. 15 à 17.

Etude de la torsion dans la margelle.

Vérification par le funiculaire de Mohr.

c) La formule de Weber<sup>1</sup> revient à

$$11) \quad I_t = \frac{a^4}{3} \times (\nu - 0,630 + 0,052/\nu^4).$$

d) La formule de Ritz donne

$$12) \quad I_t = 4k \cdot F^2$$

où

$$k = (2/\pi)^6 \cdot \sum_{r=1, 3, 5, \text{etc.}} \sum_{s=1, 3, 5, \text{etc.}} \times \left[ \frac{1}{r^2 s^2 \left( \frac{b}{a} r^2 + \frac{a}{b} s^2 \right)} \right]$$

Les deux premières formules ont été appliquées aux profils complexes comme au cumul des rectangles ; les deux dernières ne l'ont été qu'au seul cumul. Les points indiqués à la fig. 21 ressortent d'un calcul en tableaux, dont les résultats apparaissent dans les courbes tracées.

Les profils complexes comportent la margelle et la portion de paroi verticale limitée par la ligne d'inflexion qui résulte du relief fig. 8.

Combinées au facteur  $b$ , ces valeurs fixent les courbes théoriques de moments de la fig. 22.

La ligne expérimentale de moments de torsion dans la margelle figure en traits-points dans le faisceau des courbes théoriques (fig. 22). Elle s'établit par planimétrie de la surface de moments d'encastrement du panneau de paroi ; les trois points marqués  $A$ ,  $B$  et  $C$  (fig. 20), proviennent des épures de flexion verticale, où l'on a pris le module de raideur du panneau sous le gousset à

$$E \cdot I = 10,0 \times 10^7 \text{ kg} \times \text{cm}^2.$$

Une étude expérimentale approfondie du phénomène de torsion, qui joue un rôle si actif dans la résistance supérieure des plaques, est naturellement très désirable sur des pièces nettement connues en profil et module d'élasticité.

#### 4. Encastements élastiques.

L'établissement des épures théoriques présume la connaissance des conditions d'encastrement de la plaque. La flexibilité linéaire des appuis est aussi active, mais nous avons dû en faire abstraction, pour limiter notre étude ; cette élasticité a joué un rôle important, que nous avons signalé.

Le professeur Dr W. Ritter, de l'École polytechnique fédérale, a fixé le *module de flexibilité* angulaire d'un appui, comme d'une solive, par le rapport

$$13) \quad \varepsilon = M : \delta$$

où  $M$  est un moment fléchissant appliqué à l'extrémité étudiée de la barre, et  $\delta$  l'angle de rotation relative des deux tangentes extrêmes. Ce module se calcule immédiatement si le profil de la pièce est constant ; il résulte d'un tracé graphique lorsque la variation de raideur le demande. C'est à cette seconde manière que nous

avons dû recourir pour les tranches verticales très inégales le long de la paroi.

Fixées par l'intersection des tangentes extrêmes au funiculaire du triangle réduit de moments, les transversales trisectrices de la poutre contiennent les foyers de la travée en cas d'encastrement parfait<sup>1</sup>.

La transversale de flexibilité divise l'intervalle entre antiverticale et trisectrices dans le rapport

$$14) \quad e : e' = \varepsilon_p : \varepsilon_l$$

des deux pièces en contact. Si l'appui est terminal comme ici, le foyer tombe sur la transversale.

En cas de raideur constante, on a les valeurs

$$15) \quad \begin{cases} \text{Pilier articulé ou travée} & \varepsilon_l = 2EI : l \\ \text{Pilier encastré} & \varepsilon_p = 4EI : h \end{cases}$$

L'expression du professeur Ritter s'applique également au calcul de l'encastrement par torsion, qui régit ici l'appui des tranches verticales sur la margelle supérieure. La base du calcul se trouve alors dans le diagramme d'inclinaison des clinomètres supérieurs, qui donne selon fig. 18

$$\delta = c : \mu \cdot e.$$

Le moment, connu dès réception de l'ouvrage (équation 5)

$$M_x = \frac{G I_x b}{\mu \cdot e^2}$$

correspond au moment unitaire

$$m = dM/dx = (db/dx) \times G \cdot I_x : \mu \cdot e^2.$$

La dérivée de  $b$  s'obtient par seconde dérivation du diagramme des clinomètres (fig. 20)

$$f : e = db/dx$$

faisant

$$m = \frac{f \cdot G \cdot I_x}{\mu \cdot e^3}.$$

Le moment sur la largeur  $\Delta x$  de dalle,  $M = m \cdot \Delta x$ , correspond à l'angle

$$\delta = \frac{c}{\mu \cdot e}.$$

Le module d'encastrement en résulte par

$$16) \quad \varepsilon_p = \frac{M}{\delta} = \frac{G \cdot I_x \cdot f \cdot \Delta x}{c \cdot e^2}$$

où  $c$  figure l'ordonnée du diagramme des clinomètres ; la seconde dérivée  $f/e^2$  du diagramme fait intervenir la distance  $e$  de mesure graphique des angles. Les seules valeurs non immédiatement mesurées sont dès lors le module d'élasticité transversale  $G$  et le module de résistance à la torsion  $I_x$ , en nature un moment d'inertie. Une discrimination restait possible entre les deux inconnues, parce que le module  $G$  d'élasticité doit être admis comme constant. La connaissance des moments d'encastrement fournit donc un contrôle des deux valeurs. Nous constatons ainsi la vraisemblance des courbes issues du cumul des rectangles (fig. 22), sans qu'on

<sup>1</sup> Forschungsarbeiten. Edition Ernst, Berlin.

<sup>1</sup> Prof. Dr. W. Ritter. « Der kontinuierliche Balken ».

puisse affirmer une préférence fondée pour les courbes de Ritz ou de St-Venant, vu l'incertitude du profil effectif de résistance.

En corrélation, on est conduit à ramener à

$$G = 70 \text{ ou } 80\,000 \text{ kg/cm}^2$$

la valeur probable du module d'élasticité transversale du béton mis en œuvre.

Le calcul de l'épure de construction demande une estimation préliminaire du degré d'encastrement; on l'obtient du diagramme des moments unitaires  $\dot{m} = H \cdot y$ , dont l'aire, dès la section médiane, est égale au moment de torsion à l'insertion

$$M_t = \sum_0^{l/2} (m \cdot \Delta x).$$

La forme parabolique, qui du reste ne correspond qu'imparfaitement à notre épure, donnerait le moment en un point quelconque

$$(17) \quad m_x = m_m (1 - 4x^2/l^2)$$

où  $l$  est le vide entre piliers et  $m_m$  le moment unitaire sur la tranche médiane  $x = 0$ . Le moment total en un point quelconque de la margelle sera

$$M_x = \frac{(l^2 x - x^3 \cdot 4/3) m_m}{l^2}$$

et l'angle de torsion devient

$$G \cdot I_t \cdot \partial_x = m_m \left( \frac{5}{48} l^2 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{x^4}{3l^2} \right).$$

Le module théorique de flexibilité, à l'abscisse  $x$  dès le milieu du sommier en torsion, résulte par

$$(18) \quad \varepsilon_x = m_x \cdot \Delta x : \partial_x = \frac{(l^2 - 4x^2) \cdot \Delta x \cdot G \cdot I_t}{\frac{5}{48} l^4 - \frac{l^2 x^2}{2} + \frac{x^2}{3}}$$

(A suivre.)

## Projet de nouvel aménagement du quartier des Terreaux du Temple, à Genève.

La destinée de Genève s'oriente, par le fait de sa mission internationale, dans une direction nouvelle.

Pour préparer la Genève de demain, une œuvre d'assainissement s'impose, contre laquelle s'opposeront vainement les amateurs de pittoresque et les conservateurs d'une époque qui n'est plus nôtre.

Le projet élaboré par M. Braillard, architecte, que nous présentons, montre ce que pourrait être la reconstruction du quartier des Terreaux du Temple.

Toutes les parties comprises entre la rue Vallin et la Place des XXII Cantons seront démolies pour faire place

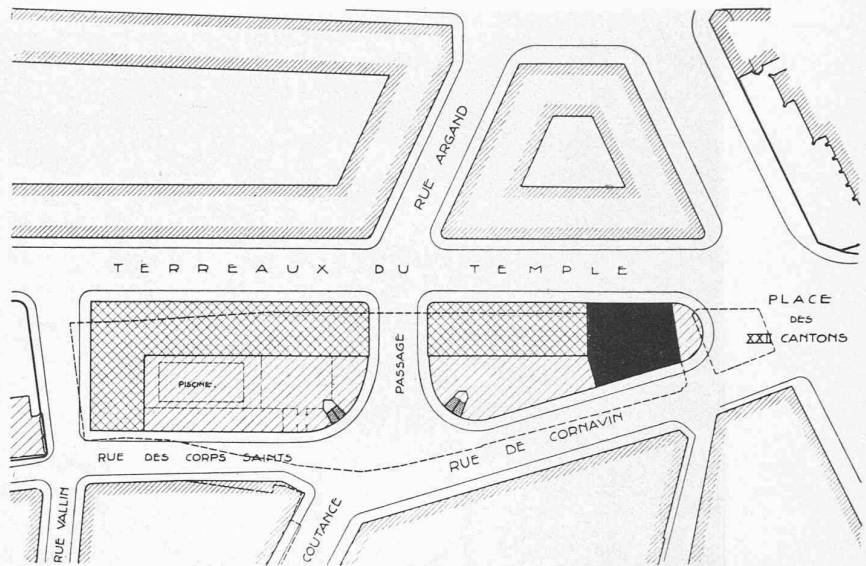


Fig. 1. — Projet d'aménagement du quartier des Terreaux du Temple, à Genève.

Auteur: M. M. Braillard, architecte.

à un ensemble monumental. La rue de Coutance sera prolongée sous les constructions projetées par un passage de dix-huit mètres de largeur; le trait d'union entre la Servette et le centre de la ville sera enfin réalisé, ainsi que l'indique le plan de situation. (Fig. 1.)

L'étude prévoit un rez-de-chaussée et un entresol destinés à des magasins, ainsi que des locaux pour bureaux, etc. Les étages seraient réservés pour des appartements ou des services administratifs suivant les besoins.

Une des particularités du projet consiste en un trottoir suspendu formant marquise et desservant les entresols; ce trottoir sera relié à la chaussée, ainsi qu'à la terrasse, par des escaliers spacieux.

Il a été également prévu dans la partie centrale, à gauche du passage, une piscine pouvant rivaliser comme dimensions et agencement pratique avec toutes celles qui ont été installées ces derniers temps dans les plus importantes villes de l'Europe.

Dominant la place des XXII Cantons, une verticale terminera cette composition de grande envergure. Cette partie de la construction est réservée pour un hôtel qui comprendra, outre 250 chambres, des salles à manger salons, salles de restaurant, de comité, etc., enfin tous les locaux indispensables à un établissement traité avec tout le confort moderne et les plus grands perfectionnements pratiques. (Fig. 2 et 3.)

## CORRESPONDANCE

### A propos de recherches sur les bétons.

Nous avons reçu de M. Ch. Bidal, ingénieur à Nyon, l'intéressante lettre suivante:

« Messieurs,

» J'ai lu avec intérêt les articles de M. Bolomey, ingénieur et professeur, sur les liants. Je me permets de présenter toutefois les observations suivantes.