

LES FORCES HYDRAULIQUES

Nouvelle contribution à l'étude des Barrages en arc

ÉTUDE ANALYTIQUE

Par J. BOUDET, *Ingénieur A. & M., Membre de la Société des Ingénieurs civils de France et de l'« Associazione Elettrotecnica Italiana » (Sez. di Torino).*

Il y a quelque temps déjà, sollicité par la « Houille Blanche » à l'effet de présenter à ses lecteurs l'analyse succincte d'un ouvrage sur les barrages en arc, récemment édité chez Hoepli par notre distingué camarade Ippolito, nous avons cru devoir ajourner longtemps avant de déférer à son désir, afin de.... leur présenter mieux que cela.

Examiné de près, le travail de M. Ippolito nous parut, en effet, d'un intérêt tel qu'il ne pourrait être rendu par analyse « sommaire », et que deux alternatives seulement s'offraient à nous : ou en donner une étude détaillée, minutieuse, équivalente à un traduction, mais d'une importance telle qu'elle eut forcément dépassé le cadre de la Revue ; ou nous borner à signaler, en trois lignes, l'apparition de cet ouvrage, dont la consultation n'eût été profitable qu'aux initiés de la langue de Dante...

La première de ces solutions s'avérant impossible, l'autre sans intérêt pour la grande masse de nos lecteurs, nous avons recouru à une troisième qui, espérons-nous, aura leur agrément, et qui consiste à faire éditer en France, d'accord avec l'auteur, une traduction complètement adaptée, de son ouvrage, ainsi mis facilement à la disposition des techniciens français.

L'ouvrage traduit va paraître incessamment à la Librairie éditrice Ch. Béranger (15, rue des Saints-Pères, à Paris, VI^e) et c'est de ce dernier que nous nous efforcerons, aujourd'hui, de donner à nos lecteurs une analyse qui, pour s'être fait attendre, n'en sera, pensons-nous, que meilleure et plus profitable.

Sans doute, d'aucuns vont s'écrier : « encore un traité sur les Barrages en Arc ! ... » Non. Pas un traité, et mieux qu'un « traité » tout à la fois ; l'auteur est un savant modeste : il appelle cela une « brochure », mais nous devons ajouter : une brochure « magistrale », qui vient à son heure, malgré la crise et le ralentissement observé dans le domaine hydraulique, et qui, si elle n'a la prétention de clore toute controverse sur la question, peut, pour le moins, donner à son auteur la satisfaction d'y avoir apporté — ainsi qu'il l'indique dans son titre — une nouvelle et très importante contribution d'ordre pratique.

L'ouvrage de M. Ippolito est, en effet, d'ordre essentiellement pratique et vise à deux buts :

D'abord, l'établissement d'une méthode directe, très simple, à l'aide de laquelle on puisse déterminer les dimensions d'un ouvrage sur la base des conditions d'économie maximum dans lesquelles peut se présenter sa construction.

Ensuite, la mise en relief de l'importance des efforts dus aux variations de température, à la prise du ciment, au retrait du béton, et également, dans la mesure du possible, l'établissement d'une méthode pratique pour le calcul de ces efforts.

Il convient de louer hautement notre Camarade pour les résultats pratiques qu'il a obtenus et ainsi mis à la portée de tous les techniciens.

CHAPITRE I

Dans le chapitre I, après avoir rappelé les méthodes les plus récentes employées pour le calcul des barrages en arc, s'attachant essentiellement à la simplification des raisonnements et des procédés de calcul dans toute la mesure conciliable avec l'approximation exigée par la pratique courante de ces ouvrages, il aboutit à l'obtention des formules (5) et (6)

$$(5) \quad \sigma_1 = P_e \times \frac{h^3 C_3 + h^2 r C_4 + h r^2 \times 3 C_3 + r^3 C_4}{h^3 C_2 + h r^2 C_1}$$

$$(6) \quad e = \frac{h^2 r C_5}{h^2 \times 2 C_3 + r^2 C_1}$$

dans lesquelles : σ_1 = l'effort unitaire intérieur à l'intrados (positif en compression) ;

e = l'excentricité de la courbe des pressions, aux naissances ;

P_e = la pression hydrostatique unitaire sur l'estrados ;

R = le rayon de l'arc baricentrique (1) dans un anneau du barrage ;

h = l'épaisseur de cet anneau ;

et C_1, C_2, C_3, \dots sont tous quantités dépendant seulement de l'amplitude ($2\tau_0$) — ou angle au centre — de l'anneau considéré.

Ces formules permettent le calcul d'un élément d'arc soumis à une pression hydrostatique uniforme.

De l'interprétation de ces formules très simples, ont été déduits des résultats remarquables sur l'influence de la déformabilité de l'arc dans la détermination des efforts internes, ainsi qu'une construction graphique, d'usage fort simple, permettant de tracer très rapidement le profil transversal théorique d'un barrage à corde constante.

En ce qui concerne les ouvrages à corde variable, pour moins simple qu'il se présente, leur calcul peut encore s'effectuer assez vite à l'aide des formules (5) et (6) ci-dessus, des données des tableaux IV et XI, et tout spécialement de celles du tableau XII.

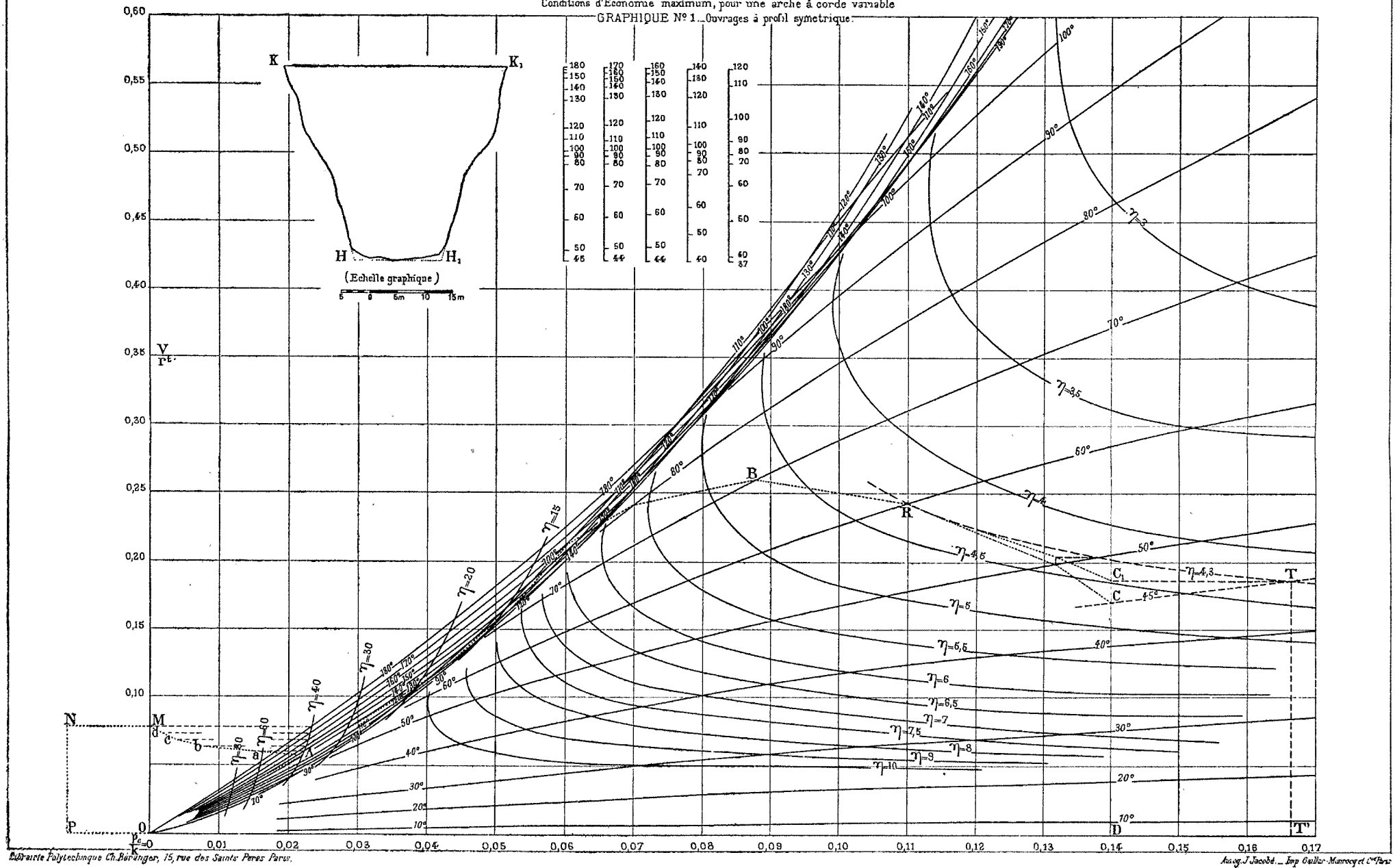
A vrai dire, pour être complète, l'étude aurait bien dû comporter un examen plus approfondi des arcs à génératrices inclinées, compte tenu de l'inégalité des pressions hydrostatiques et de la composante du poids propre ; mais, toutefois, pour cette

(1) Ou lieu des centres de gravité.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES BARRAGES EN ARC

Conditions d'Economie maximum, pour une arche à corde variable

GRAPHIQUE N° 1. Ouvrages à profil symétrique.



Edition Polytechnique Ch. Béranger, 15, rue des Saints Peres Paris.

Assoy. J. Jacobé... Imp. Gauthier-Mansuy et C^o Paris

Fig. 1. — Graphique établi par M. Ippolito, pour servir au calcul des ouvrages à profil symétrique.

dernière, les formules (19) (21) et (22) du chapitre I (4), ainsi que le tableau III, en permettent une vérification rapide, et nous sommes heureux de pouvoir annoncer à nos lecteurs la publication prochaine d'un nouveau travail de M. Ippolito, consacré à cette question, et dans lequel notre éminent Camarade donnera des formules spéciales pour le calcul direct des arcs à génératrices inclinées.

CHAPITRE II

Le chapitre II met particulièrement en relief l'ingéniosité « pratique » de la contribution apportée par le travail de M. Ippolito à l'étude des ouvrages en arc.

En premier lieu, l'application des formules :

$$(6_A) \quad \frac{K}{P_e} = \gamma + \frac{563,69}{\varphi_0} - 3,60$$

$$(11_A) \quad \left(\frac{K}{P_e} + 2,28 \right) \times (\varphi_0 - 66,77) = 259,5$$

$$(12_A) \quad \left\{ \begin{array}{l} r = \frac{l}{2 \sin \varphi_0} \\ h = \frac{l}{2 \gamma \sin \varphi_0} \\ V = \frac{0,01745 \cdot \varphi_0}{2 \gamma \sin^2 \varphi_0} l^2 \quad (*) \end{array} \right.$$

(1) Formules (19)

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \gamma_1 h r^2 C_6 \\ H = \gamma_1 h r \times \frac{C_7 + \frac{h^2}{r^2} C_3}{C_1 + \frac{h^2}{r^2} C_2} \end{array} \right.$$

Formules (21)

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \gamma_1 h r \times \frac{C_{11} + \frac{h^2}{r^2} C_{12}}{C_1 + \frac{h^2}{r^2} C_2} \\ M_1 = \gamma_1 h r^2 \times \frac{C_{13} + \frac{h^2}{r^2} C_{14}}{C_1 + \frac{h^2}{r^2} C_2} \end{array} \right.$$

Formules (22)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma' = \frac{\gamma_1 r}{C_1 + \frac{h^2}{r^2} C_2} \left[\left(C_{11} + \frac{h^2}{r^2} C_{12} \right) \mp \frac{6 r}{h} \left(C_{13} + \frac{h^2}{r^2} C_{14} \right) \right] \\ \sigma = \frac{\gamma_1 r}{C_1 + \frac{h^2}{r^2} C_2} \left[\left(C_7 + \frac{h^2}{r^2} C_8 \right) \pm \frac{6 r}{h} \left(C_9 + \frac{h^2}{r^2} C_{10} \right) \right] \end{array} \right.$$

Dans ces formules, en outre des notations indiquées ci-dessus
H = la poussée totale à la clef ;

m = le moment de H par rapport au Centre de gravité élastique du l'arc considéré ;

$\gamma_1 = \gamma \cos \alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \text{poids spécifique} \\ \alpha = \text{coefficient de dilatation linéaire} \end{array} \right.$ des matériaux constitutifs du barrage ;

N = P sin φ_0 + H cos φ_0 = pression normale dans la section de clef ;

$M_1 = H (f + e) - P \delta$ = le moment de N comme ci-dessus, avec :

P = le poids du demi-arc appliqué au milieu de sa longueur ;

f = la flèche de l'arc baricentrique ;

δ = la distance entre le centre de la section et le poids (P) ;

(*) Dans lesquelles : K = le coefficient de sécurité à la compression, du matériau constitutif de l'ouvrage ;

combinée avec l'utilisation, fort simple, des données du tableau VI et du diagramme de la figure 8, permet d'établir les conditions d'économie maximum pour un anneau de voûte de caractéristiques données. Ces données sont tout spécialement à retenir parce qu'elles soulignent l'inexactitude des règles et instructions officielles de nombre d'Etats qui, au moins à ce jour, semblaient définitives.

En effet, l'amplitude d'économie maximum, à laquelle correspond un volume minimum, — amplitude que les américains paraissent vouloir fixer invariablement à 120° — varie, en réalité avec la charge de sécurité du matériau constitutif comme avec la pression hydrostatique, et doit être d'autant plus grande que le rapport entre ces deux quantités est plus petit.

Ensuite, et au moyen de formules tout à fait semblables, (17_A) — (18_A) (*) comme avec son graphique de la fig. 8, M. Ippolito, élargissant le cadre du problème, nous amène à la détermination de l'amplitude optima pour un arc entier de corde constante. Mais, pour ceux à corde variable, le problème est plus complexe, surtout si l'on ignore la loi analytique de cette variation. Il a été résolu, cependant, d'une manière générale, par un procédé graphique s'aidant des épures et diagrammes des planches jointes au texte — dont ci-contre une réduction — compliqué, peut-être, par endroits, mais qui n'en fournit pas moins des solutions très suffisamment approchées.

CHAPITRE III

Les problèmes étudiés dans le chapitre III, concernant les effets des manifestations thermiques d'ordres divers pouvant solliciter le barrage et les efforts en découlant pour sa structure, sont, à ce jour encore, beaucoup moins connus que les précédents, sans doute parce que plus complexes, et l'étude de M. Ippolito est, à notre connaissance, la première traitant aussi complètement la question.

Ce chapitre comporte 3 parties bien distinctes :

Dans la première, une judicieuse extension des formules (5) et (6), du chapitre précédent, conduit aux formules (2_B)-(4_B) et (7_B) (**) ainsi qu'aux données des tableaux XV et XVI, qui

l = la corde de l'arc baricentrique d'un anneau d'arc ;

V = le volume de l'anneau considéré ;

et $\gamma = \frac{r}{h}$ = le rapport du rayon moyen à l'épaisseur dans le même anneau.

(*) Formule (17_A) :

$$\left(\frac{K}{A} + 8,787 \right) \times (2 \varphi_0 - 120^{\circ}317) = 844,33$$

Formule (18_A) :

$$\left(\frac{K}{A} + 7,906 \right) (2 \varphi_0 - 128^{\circ}042) = 632,64$$

(**) Formule (2_B) :

$$K_1 = K + E \alpha \frac{\Delta l}{2}$$

Formule (4_B) :

$$K_1 = K + E \alpha \left(\frac{\mu_1}{\gamma} t_0 + \frac{\Delta l}{2} \right)$$

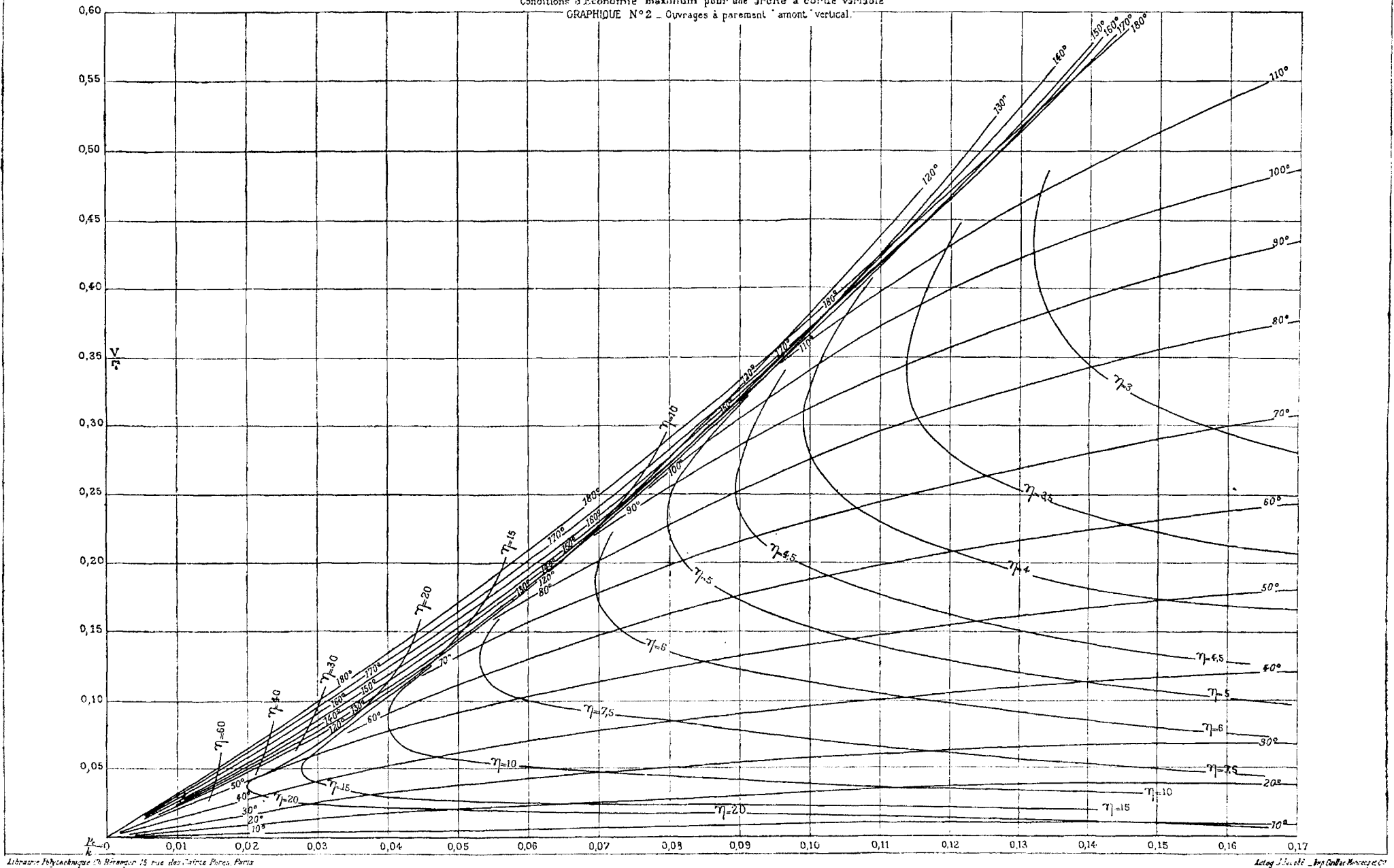
Formule (7_B) :

$$P_e \eta^2 \left\{ \left[K - a P_e + E \alpha \frac{\Delta l}{2} \right] - b P_e \right\} \eta - \left\{ \left[K - a P_e + E \alpha \frac{\Delta l}{2} \right] b + \dots + E \alpha c t_0 \right\} = 0$$

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES BARRAGES EN ARC

Conditions d'Economie maximum pour une arche à corde variable

GRAPHIQUE N° 2 — Ouvrages à parement amont vertical.



Librairie Polytechnique Ch. Béranger 15 rue des Saussaies Paris

Atelier J. L. Né - Imp. Gauthier-Villars

Fig. 2. — Graphique établi par M. Ippolito, pour servir au calcul des ouvrages à parement amont vertical.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES BARRAGES EN ARC.

Influence des variations de Température. (Chap III)

Fig 1.
Graphique des effets de l'oscillation annuelle de température observés au barrage de Boonton, sur le Rockaway (U.S.A), en relation avec l'avancement du bétonnage

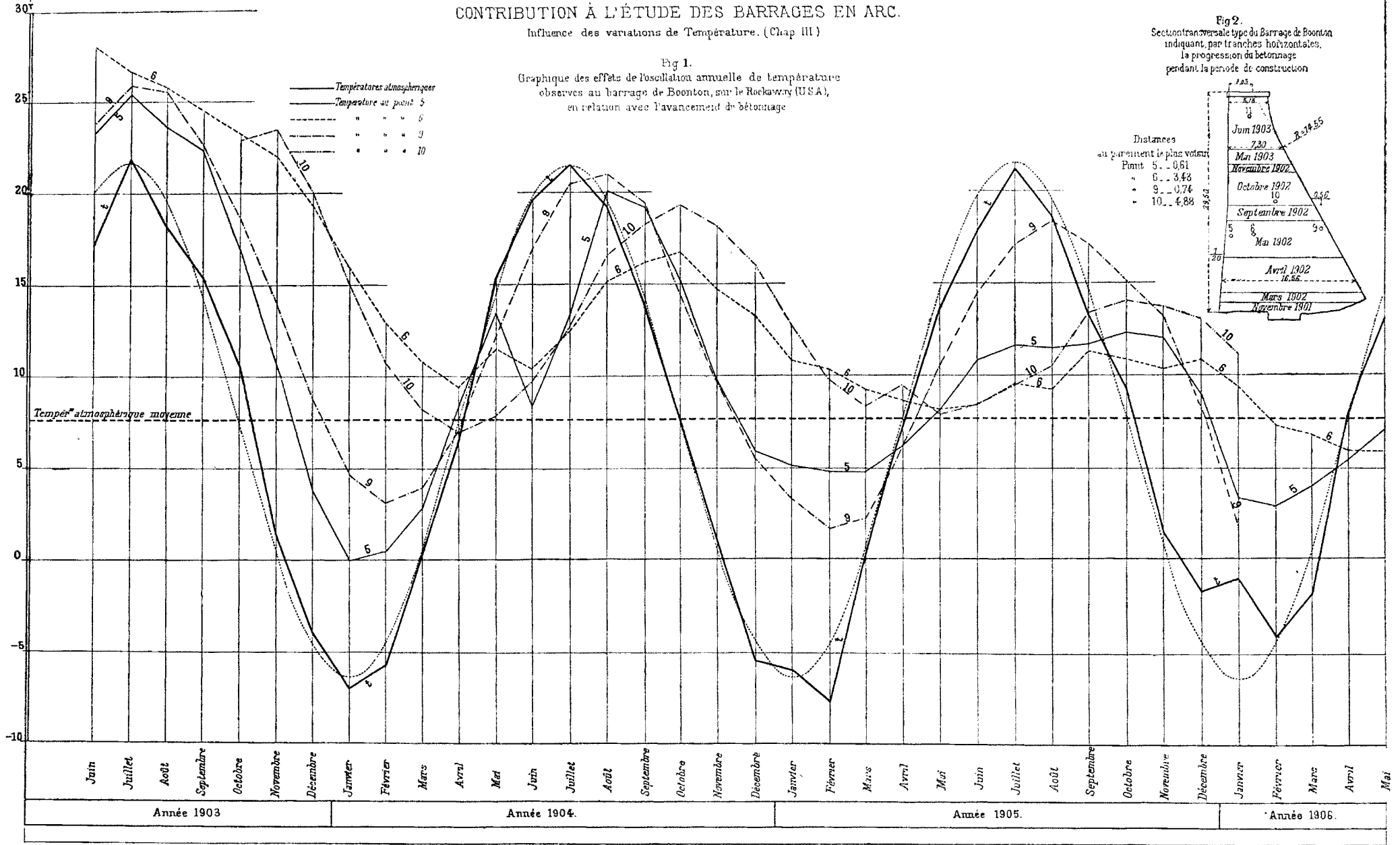


Fig. 3. - Graphique de vérification des résultats donnés par les méthodes de M. Ippolito, par rapport aux observations faites sur un ouvrage existant, pris comme témoin.

permettent le calcul direct d'un élément d'arc en tenant compte des efforts thermiques.

Dans la deuxième partie est abordé de front le problème, plus général, de la détermination des efforts internes produits par une distribution quelconque des températures dans l'intérieur de l'arc, caractérisée par une loi, également quelconque, sur une normale aux parements, mais ayant toujours les surfaces isothermiques parallèles aux dits parements. En partant d'hypothèses arbitraires, mais intuitivement acceptables, M. Ippolito aboutit à deux formules générales, (16_B) et 16'_B) (*), qui, en somme, ne sont autres que l'extension au problème général, de celles déjà données par Guidi dans un cas particulier, mais qui en définitive, sont très heureuses, car elles permettent de tirer le maximum de profit pratique de la partie du chapitre III qui comprend la recherche des lois de distribution intérieure des températures dans l'hypothèse où la température extérieure oscille suivant la loi sinusoidale, et dans les deux cas extrêmes du réservoir toujours plein et du réservoir toujours vide.

Enfin, les formules (25_B) et 30_B) (***) du même chapitre III

avec : Λ = la hauteur totale du barrage.

E = le module d'élasticité du matériau constitutif de l'ouvrage ;

Δt = la plus grande différence entre les températures estivales à l'aval et en amont ;

α = le coefficient de dilatation linéaire du matériau constitutif de l'ouvrage.

(*) Formule (16_B) :

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_e &= -E \alpha t_0 \left(\mu_e \frac{h}{r} - \varepsilon \right) \\ \varepsilon_i &= E \alpha t_0 \left(\mu_i \frac{h}{r} - \varepsilon \right) \end{aligned} \right.$$

Formule (16'_B) :

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon'_e &= E \alpha t_0 \left(\mu'_e \frac{h}{r} + \varepsilon \right) \\ \varepsilon'_i &= E \alpha t_0 \left(\mu'_i \frac{h}{r} + \varepsilon \right) \end{aligned} \right.$$

dans lesquelles : ε et ε' = les efforts unitaires maxima dans les sections de clef et de naissance ;

t_0 = la température moyenne

ε = excentricité de la distribution.

(**) Formule (25_B) :

$$t = T_e e^{-\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c}{\theta \cdot K}} \left(\frac{h}{2} - [x] \right)} \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{\theta} \tau - \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c}{\theta \cdot K}} \left(\frac{h}{2} - [x] \right) \right]$$

Formule (30_B) :

$$t = T_e \frac{1 + \frac{1}{3} (\lambda x)^4}{1 + \frac{1}{3} \left(\lambda \frac{h}{2} \right)^4} \sin \left\{ \frac{2\pi}{\theta} \tau + \sqrt{3} \log \frac{(\lambda x)^2 + \sqrt{3 + (\lambda x)^4}}{\left(\lambda \frac{h}{2} \right)^2 + \sqrt{3 + \left(\lambda \frac{h}{2} \right)^4}} \right\}$$

avec :

T_e = la 1/2 amplitude

θ = la période } de l'oscillation journalière ;

τ = le temps

λ = la valeur de l'oscillation liant entre elles la période (θ) et les 3 constantes (ρ) (c) (K) pour lesquelles :

$$(\lambda) = -\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c}{\theta \cdot K}} ;$$

x = la distance du point considéré au parement amont de l'ouvrage.

les tableaux XVIII et XIX et les graphiques des figures 13 et 15, permettent d'obtenir facilement les diagrammes de la distribution des températures dans les différents cas, et de déterminer, par suite, les efforts correspondants.

A ce sujet, M. Ippolito fait remarquer qu'à l'époque où paraissait son travail, M. le professeur Puppini publiait, presque simultanément, dans le « *Monitore Tecnico* » une solution plus rigoureuse du problème de la distribution intérieure des températures dûes à des variations extérieures sinusoidales. Nous retiendrons néanmoins, pour les besoins de la pratique, les formules de M. Ippolito, qui, bien qu'approchées, donnent des résultats presque identiques en même temps qu'elles sont d'une application beaucoup plus simple et plus rapide.

Tenant compte des caractéristiques physiques des matériaux d'usage courant, en particulier du béton de ciment, et admettant que les oscillations atmosphériques sont dûes à la superposition de deux oscillations sinusoidales, à périodes respectivement journalière et annuelle, M. Ippolito en tire encore des conclusions d'un intérêt particulier. Entre autre, ce résultat significatif que l'oscillation diurne n'intéresse qu'une couche superficielle, très subtile, de la construction et qu'on peut, en conséquence, la négliger pour tenir compte exclusivement de l'oscillation annuelle des températures journalières moyennes.

De nombreux résultats d'expériences exécutées au cours de ces dernières années, — surtout en Amérique — concordent, en effet, assez exactement avec les résultats analytiques donnés par les formules de M. Ippolito ; mais il est, toutefois, désirable qu'à la faveur d'observations nouvelles une lumière plus vive soit projetée sur ce problème, dont l'importance a été trop méconnue jusqu'à aujourd'hui. La mise en valeur des ressources hydrauliques qui, malgré la crise économique actuelle, va s'organisant un peu partout, à l'heure actuelle, fournira certainement, dans ce domaine, le meilleur champ d'expériences qui se puisse rêver.

Enfin, d'autres problèmes également trop négligés sinon méconnus, sont exposés et analysés, certains même traités complètement, dans le travail de M. Ippolito : en particulier les phénomènes de contraction — ou « retrait » — du béton, et de dégagement de chaleur accompagnant toujours la prise du ciment.

Ce dernier en particulier, très peu étudié, est cependant d'une réelle importance pour la détermination des efforts intérieurs en découlant qui agissent sur la structure, et M. Ippolito souligne fort opportunément l'intérêt qui s'attache à la mesure des quantités de chaleur développées pendant la prise du ciment alors que, jusqu'ici, on s'est toujours limité à mesurer des températures... Après avoir exposé et développé fort complètement le problème du point de vue analytique, M. Ippolito regrette que les résultats donnés par ses solutions ne puissent encore être vérifiés par des données d'expériences ; mais il promet de revenir bientôt sur la question, dans sa prochaine étude, avec, à l'appui, les résultats des expériences calorimétriques auxquelles il procède en ce moment.

Il se déclarera du reste, satisfait - dit-il - si son ouvrage récent, après avoir apporté une nouvelle contribution à cette passionnante question des barrages en arc, peut également aiguiller à la fois techniciens et laboratoires vers un ensemble de recherches expérimentales et analytiques encore nécessaires qui permettront sans doute d'en donner le dernier mot.

L'auteur a largement dépassé son but ; il convient de l'en féliciter et c'est de grand cœur qu'en toute cordialité nous le prions de trouver exprimés, ici, compliments et remerciements au nom des lecteurs de la « Houille Blanche » .