

Les coups de bélier d'ouverture brusque dans les conduites à caractéristiques linéairement variables

Autor(en): **Favre, Henri**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **71 (1945)**

Heft 18

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-54103>

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.

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 13.50 francs
Etranger : 16 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 11 francs
Etranger : 13.50 francs

Prix du numéro :
75 centimes

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rouge & C^{ie}, à Lausanne.

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.

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.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE. — *Les coups de bélier d'ouverture brusque dans les conduites à caractéristiques linéairement variables*, par HENRY FAVRE, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : Procès-verbal de l'assemblée des délégués du samedi 28 avril 1945 ; Communiqué du Secrétariat ; Invitation à la 59^e assemblée générale, Zurich, 22, 23 et 24 septembre 1945.* — *Association suisse pour l'essai des matériaux : 127^e séance du 21 juillet 1945.* — *Correspondance : Note sur les aéroports.* — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — SERVICE DE PLACEMENT.

Les coups de bélier d'ouverture brusque dans les conduites à caractéristiques linéairement variables,

par HENRY FAVRE,
professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich.

Les mouvements non permanents de l'eau dans les conduites forcées constituent un des problèmes les plus actuels de la mécanique des liquides. Le cas particulier du diamètre et de l'épaisseur constants peut être considéré aujourd'hui comme entièrement résolu. Par contre, on est loin de connaître toutes les lois générales qui régissent le coup de bélier lorsque les caractéristiques du profil sont des fonctions quelconques de l'abscisse. Il est vrai que l'on peut, dans chaque cas particulier, calculer les surpressions en remplaçant la conduite par un nombre fini de tronçons à caractéristiques constantes. Cette méthode rend actuellement de grands services dans la pratique, mais permet plus difficilement de trouver les lois montrant l'influence des variations des caractéristiques sur les coups de bélier.

En 1938, nous avons publié une étude intitulée « Théorie des coups de bélier dans les conduites à caractéristiques linéairement variables le long de l'axe »¹. Grâce à la méthode analytique utilisée, il nous avait

¹ Voir les numéros 19 à 24 de la *Revue générale de l'hydraulique*, Paris 1938. Publications du Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich.

été possible d'établir un certain nombre de lois générales. Cette étude n'a d'ailleurs nullement épuisé le sujet, puisqu'on n'y considère que des caractéristiques variant linéairement et des manœuvres particulières de l'obturateur. Elle comprend trois parties. La première est relative aux équations et lois générales régissant le phénomène. La seconde étudie d'une façon aussi complète que possible les coups de bélier produits par une manœuvre linéaire lente de l'obturateur. Enfin, dans la troisième, nous avons examiné les surpressions produites par une fermeture totale brusque.

Il était donc indiqué de compléter cette théorie non seulement par une étude sur les coups de bélier d'ouverture brusque, mais aussi par l'examen des manœuvres rythmiques de l'obturateur, qui peuvent provoquer des phénomènes de résonance.

Il y a trois ans, dans un mémoire paru ici même, nous avons étudié certains phénomènes de résonance dans les conduites à caractéristiques linéairement variables¹. Nous nous proposons aujourd'hui de traiter le cas *des coups de bélier d'ouverture brusque* dans les mêmes conduites. Ces coups de bélier ne sont évidemment pas à craindre en période d'exploitation normale. Mais ils peuvent se produire accidentellement, par suite de la rupture partielle ou totale d'un organe de fermeture. On peut aussi imaginer qu'une cause quelconque — par exemple le bombardement de la centrale ou un tremblement de terre — produise une fissure au bas d'une

¹ Voir les numéros des 7 et 21 mars 1942 du *Bulletin technique de la Suisse romande*.

conduite qui aurait le même effet qu'une ouverture brusque de l'obturateur.

Dans un premier paragraphe, nous établirons les formules fondamentales pour le calcul des coups de bélier d'ouverture brusque. Le second sera consacré à l'étude systématique des variations de pression produites à l'obturateur par ce coup de bélier. Dans le troisième, nous examinerons quelques répartitions de pression le long de la conduite et, dans le quatrième, nous montrerons comment le coup de bélier varie à l'extrémité aval, lorsque le temps d'ouverture passe de la valeur zéro à des valeurs très petites. Enfin, dans un dernier paragraphe, nous comparerons ces résultats à ceux d'une manœuvre de fermeture brusque.

Le présent travail a nécessité un grand nombre de calculs. Un de nos assistants, M. Gruet, les a exécutés avec soin. Nous l'en remercions sincèrement. Cette étude a été subventionnée par la Fondation Daniel Jenny.

§ 1. Formules fondamentales pour le calcul des coups de bélier d'ouverture brusque.

Nous commencerons tout d'abord à rappeler quelques formules générales¹.

Considérons une conduite, d'axe rectiligne et horizontal², dont l'extrémité amont est en communication avec un bassin à niveau constant et qui possède, à l'aval, un obturateur réglable (fig. 1). Nous supposons que le diamètre intérieur D du profil circulaire est une fonction linéaire de l'abscisse x mesurée le long de l'axe. L'origine des x est le profil (virtuel) de diamètre nul. Nous admettons en outre que l'épaisseur e et le module d'élasticité E des parois varient le long de l'axe de façon que la grandeur a définie par l'équation

$$a = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{\epsilon_0} + \frac{1}{E} \frac{D}{e}}} \quad (1)$$

soit aussi une fonction linéaire de x ³. Une telle conduite est dite « à caractéristiques linéairement variables le long de l'axe ».

Soit encore L la longueur de la conduite, x_m l'abscisse de son milieu, a_m et a_0 les valeurs de a au profil d'abscisse x_m et à l'extrémité aval, $y = \frac{p}{\gamma}$ la pression au temps t et au profil x , évaluée par la hauteur de la colonne d'eau correspondante.

Choisissons pour unité de temps la « durée de la phase »

$$T = \frac{2L}{a_m} \quad (2)$$

¹ Voir les deux publications citées.

² Ces deux conditions ne restreignent en rien la généralité des formules indiquées dans ce paragraphe, car les surpressions ne dépendent évidemment ni de la courbure ni de l'inclinaison de l'axe.

³ Dans cette formule, g désigne l'accélération de la pesanteur, γ le poids spécifique du liquide, ϵ_0 son coefficient de compressibilité.

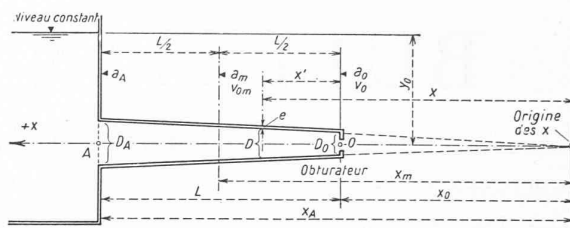


Fig. 1. — Schéma d'une conduite dont les caractéristiques varient linéairement le long de l'axe.

et convenons d'affecter de l'indice t toutes les grandeurs relatives à l'extrémité aval et au temps quelconque t .

La formule qui régit les variations de pression à l'aval de la conduite est

$$z_{t-1}^2 + z_t^2 - 2 = 2\rho_0 (\eta_{t-1} z_{t-1} - \eta_t z_t) - 2\sigma S_t^{-1} \quad (3)$$

Dans cette formule, $z_t = \frac{y_t}{y_0}$ et $z_{t-1} = \frac{y_{t-1}}{y_0}$ désignent les « pressions relatives » à l'extrémité aval, aux temps t et $t-1$; η_t et η_{t-1} sont les ouvertures relatives de l'obturateur aux mêmes époques, S_t est l'aire comprise entre la courbe des surpressions $\xi = z^2 - 1$, l'axe des t et les ordonnées $z_t^2 - 1$ et $z_{t-1}^2 - 1$ (fig. 2). Quant à ρ_0 et σ , ce sont les deux « caractéristiques » de la conduite. Elles ont les valeurs :

$$\rho_0 = \frac{a_0 v_0}{2g y_0} \quad (4), \quad \sigma = \left(1 + \frac{v}{2}\right) \left[\mu \left(1 + \frac{v}{2}\right) + v\right], \quad (5)$$

où a_0 , v_0 , y_0 désignent les valeurs de a , v , y au profil x_0 pour le régime permanent correspondant à $\eta = 1$, et

$$v = \frac{a_0 - a_m}{a_m} \quad (6), \quad \mu = \frac{D_A - D_0}{D_0}; \quad (7)$$

D_0 et D_A étant les diamètres aux extrémités aval et amont. Dans la pratique, ρ_0 est toujours positif, σ est positif ou nul.

Dans le cas où la manœuvre de l'obturateur est une fonction continue du temps t , la pression relative z^2 est elle-même une fonction continue et S_t a l'expression suivante

$$S_t = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{2} (z_{t-1}^2 - 1) + (z_{t-1+\frac{1}{n}}^2 - 1) + (z_{t-1+\frac{2}{n}}^2 - 1) + \dots + \frac{1}{2} (z_t^2 - 1) \right]$$

où n désigne un entier arbitraire (fig. 3).

¹ Voir le mémoire de la Revue générale de l'hydraulique, formule (28).

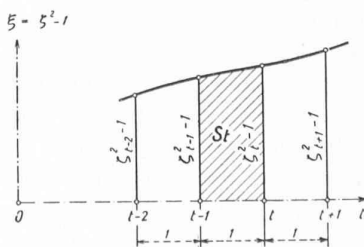


Fig. 2.

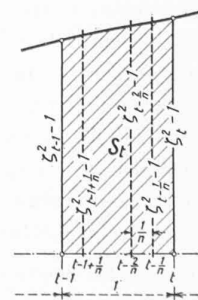


Fig. 3.

Introduisant cette expression dans (3), puis résolvant par rapport à Z_t , on obtient :

$$Z_t = -\alpha \eta_t + \sqrt{(\alpha \eta_t)^2 + 2(\alpha'' + \alpha \eta_{t-1} Z_{t-1}) - Z_{t-1}^2 - \alpha' (Z_{t-1+\frac{1}{n}}^2 + Z_{t-1+\frac{2}{n}}^2 + \dots + Z_{t-\frac{1}{n}}^2)} \quad (8)$$

où

$$\alpha = \frac{\rho_0}{1 + \frac{\sigma}{n}}, \quad \alpha' = \frac{2\sigma}{n + \sigma}, \quad \alpha'' = \frac{1 + \sigma}{1 + \frac{\sigma}{n}} \quad (9)$$

La formule de récurrence (8) permet de calculer successivement, $Z_1, Z_2, \dots, Z_{t-\frac{1}{n}}, Z_t, Z_{t+\frac{1}{n}}, \dots$ et, de là, les surpressions relatives $\xi = Z^2 - 1$.

Voyons maintenant ce que devient cette formule dans le cas où la manœuvre de l'obturateur est une fonction du temps ayant une seule discontinuité, de première espèce, à l'époque $t = 0$ (fig. 4).

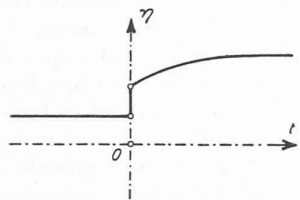


Fig. 4. — Diagramme $\eta(t)$.
Discontinuité de première espèce au temps $t = 0$.

Pour fixer les idées, nous supposons l'obturateur immobile pour $t < 0$.

D'après les lois qui régissent la continuité de la fonction Z^3 , le diagramme des surpressions aura l'allure indiquée à la figure 5. La fonction $\xi = Z^2 - 1$ a des discontinuités de première espèce aux époques $t = 0, 1, 2, \dots, q-1, q, q+1, \dots$. A chacune de ces époques, Z passera brusquement de la valeur finie Z_{q-0} à une autre valeur finie Z_{q+0} . Pour calculer S_t , nous avons trois cas à distinguer selon que t est différent de q , égal à $q-0$ ou à $q+0$ ($q = 0, 1, 2, \dots$).

1. Pour $t = q + \frac{p}{n}$ ($p = 1, 2, \dots, n-1$) on a (fig. 5) :

$$S_{q+\frac{p}{n}} = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{2} (Z_{q-1+\frac{p}{n}}^2 - 1) + (Z_{q-1+\frac{p+1}{n}}^2 - 1) + \dots + (Z_{q-\frac{1}{n}}^2 - 1) + \frac{1}{2} (Z_{q-0}^2 - 1) + \frac{1}{2} (Z_{q+0}^2 - 1) + (Z_{q+\frac{1}{n}}^2 - 1) + \dots + (Z_{q+\frac{p-1}{n}}^2 - 1) + \frac{1}{2} (Z_{q+\frac{p}{n}}^2 - 1) \right]$$

Substituons cette expression dans (3), où l'on remplace l'indice t par $q + \frac{p}{n}$, on obtient une équation du

¹ Formule (32) du mémoire de la R. G. H.
² La manœuvre est supposée ici commencer au temps $t = 0$, mais la formule est applicable quelle que soit l'époque où elle débute.
³ Voir paragraphe 6, chapitre premier, de notre publication de la R. G. H.
⁴ Le cas où la discontinuité disparaît ne semble pas devoir se produire pour les manœuvres envisagées au paragraphe 2. C'est du moins ce qu'ont montré les nombreux diagrammes d'ouverture brusque qui ont été calculés pour cette étude.

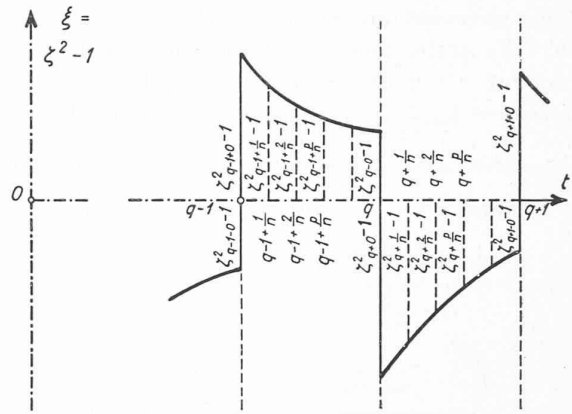


Fig. 5. — Allure du diagramme $\xi(t)$ dans le cas où $\eta(t)$ a une discontinuité de première espèce pour $t = 0$.

second degré pour $Z_{q+\frac{p}{n}}$ dont la solution s'écrit, après quelques simplifications :

$$Z_{q+\frac{p}{n}} = -\alpha \eta_{q+\frac{p}{n}} + \sqrt{(\alpha \eta_{q+\frac{p}{n}})^2 + 2(\alpha'' + \alpha \eta_{q-1+\frac{p}{n}} Z_{q-1+\frac{p}{n}}) - Z_{q-1+\frac{p}{n}}^2 - \alpha' (Z_{q-1+\frac{p+1}{n}}^2 + Z_{q-1+\frac{p+2}{n}}^2 + \dots + \frac{1}{2} Z_{q-0}^2 + \frac{1}{2} Z_{q+0}^2 + Z_{q+\frac{1}{n}}^2 + Z_{q+\frac{2}{n}}^2 + \dots + Z_{q+\frac{p-1}{n}}^2)}$$

2. Pour $t = q - 0$, on aura :

$$S_{q-0} = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{2} (Z_{q-1+0}^2 - 1) + (Z_{q-1+\frac{1}{n}}^2 - 1) + \dots + (Z_{q-\frac{1}{n}}^2 - 1) + \frac{1}{2} (Z_{q-0}^2 - 1) \right]$$

d'où, en substituant dans (3), où l'on remplace l'indice t par $q - 0$, et résolvant l'équation obtenue par rapport à Z_{q-0} :

$$Z_{q-0} = -\alpha \eta_{q-0} + \sqrt{(\alpha \eta_{q-0})^2 + 2(\alpha'' + \alpha \eta_{q-1-0} Z_{q-1-0}) - \frac{Z_{q-1-0}^2}{1 + \frac{\sigma}{n}} - \alpha' \left(\frac{1}{2} Z_{q-1+0}^2 + Z_{q-1+\frac{1}{n}}^2 + \dots + Z_{q-\frac{1}{n}}^2 \right)}$$

3. Pour $t = q + 0$, l'expression de S_{q+0} est la même que celle de S_{q-0} . En substituant dans (3), où l'on remplace l'indice t par $q + 0$, on obtient en résolvant par rapport à Z_{q+0} :

$$Z_{q+0} = -\rho_0 \eta_{q+0} + \sqrt{(\rho_0 \eta_{q+0})^2 + 2(1 + \sigma + \rho_0 \eta_{q-1+0} Z_{q-1+0}) - Z_{q-1+0}^2 - \frac{2\sigma}{n} \left(\frac{1}{2} Z_{q-1+0}^2 + Z_{q-1+\frac{1}{n}}^2 + \dots + Z_{q-\frac{1}{n}}^2 + \frac{1}{2} Z_{q-0}^2 \right)}$$

Voici comment on appliquera ces résultats. La formule (12), écrite pour $q = 0$, donnera d'abord z_{+0} ; en faisant $q = 0$ dans (10) on obtiendra ensuite successivement $z_{\frac{1}{n}}$, $z_{\frac{2}{n}}$, ... $z_{1-\frac{1}{n}}$; les formules (11) et (12), écrites pour $q = 1$, donneront z_{1-0} et z_{1+0} ; en faisant $q = 1$ dans (10) on obtiendra alors $z_{1+\frac{1}{n}}$, $z_{1+\frac{2}{n}}$, ... $z_{2-\frac{1}{n}}$; et ainsi de suite.

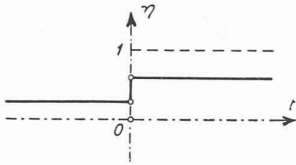


Fig. 6. — Augmentation brusque de l'ouverture de l'obturateur.

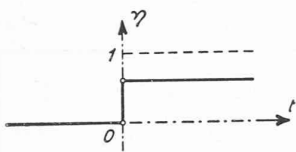


Fig. 7. — Ouverture brusque partielle.

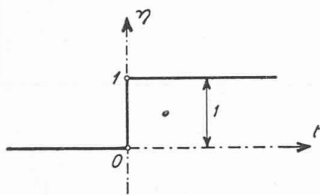


Fig. 8. — Ouverture brusque totale.

Les formules (10), (11) et (12) sont valables pour une fonction $\eta(t)$ quelconque, mais ayant une seule discontinuité de première espèce, au temps $t = 0$. Ces formules sont donc directement applicables au cas d'une *ouverture brusque*¹ succédant à un régime permanent, l'obturateur gardant une position constante après la manœuvre (fig. 6, 7 et 8). Elles sont également applicables aux fermetures brusques. Dans le cas d'une fermeture brusque et totale, elles se simplifient considérablement et deviennent les formules indiquées au chapitre III de notre mémoire de la *Revue générale de l'Hydraulique*.

Ayant calculé le coup de bélier à l'extrémité aval, la recherche de la *répartition des surpressions le long de la conduite* se fera sans difficulté, comme il a été indiqué dans le mémoire cité².

(A suivre.)

¹ Pour simplifier le langage, nous qualifierons de *brusque* toute manœuvre dont la durée est quasi nulle ($\Theta = 0$). Le sens où nous prenons l'adjectif brusque est donc ici légèrement différent de celui défini au chapitre III de notre publication de la *R. G. H.*, où il désignait une manœuvre de durée inférieure à la phase.

² *Loc. cit.*, paragraphe 4, chapitre premier.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Procès-verbal

de l'assemblée des délégués du samedi 28 avril 1945,
à 9 h. 15, dans la salle du Grand Conseil, à Aarau.

(Suite et fin¹.)

5. Approbation du tarif d'honoraires provisoire pour les plans d'aménagement de régions, de localités, de quartiers et pour les plans de situation.

(Suite.)

M. J.-P. Vouga, arch., approuve, au nom de la section vaudoise, les dispositions proposées à titre provisoire. L'usage permettra de les éprouver et de les modifier si besoin est. Il remarque que ces dispositions s'apparentent d'ailleurs à celles adoptées en France.

Un certain nombre de modifications, dont le détail serait long à exposer, devraient être apportées à la présentation de l'ensemble. Certaines expressions françaises sont, de plus, défectueuses. Il relève toutefois qu'une distinction nette doit être faite entre les catégories I et II et la catégorie III du tarif, qui ne sont pas traitées sur les mêmes bases.

M. F. Lodewig, arch. : La section de Bâle s'est occupée à fond de la question, mais elle ne voudrait pas voir une discussion au sujet des chiffres du tarif. Il faut d'abord en faire l'expérience. La section bâloise proposerait que ce tarif porte la suscription suivante : « Ce tarif n'a pas force obligatoire ; il doit servir de directive pour le calcul des honoraires probables ». D'après certains exemples de calculs il semble qu'il y a des erreurs dans le tarif présenté, erreurs qu'il n'est pas facile de déceler pour l'instant. Le travail de M. Steiger est excellent, mais on n'est pas encore allé jusqu'au fond de la question. C'est ainsi que l'emploi de ces normes donne des différences jusqu'à 50 % pour des communes de même importance. Pour cette raison, le titre du tarif devrait être modifié. Mais de toute façon il doit être mis en vigueur le plus vite possible. Dans le canton de Bâle-Campagne, il est déjà appliqué.

M. R. Christ, arch. : Ce tarif servira aussi pour le calcul des prix des concours d'idées. Il est nécessaire que les organisateurs des concours soient rendus attentifs à ce document. Au cas où ils sont appelés à fonctionner dans les jurys, les délégués devront se référer à ces normes.

M. P. Soutter, ing., fait remarquer qu'un tarif n'engage les membres de la S. I. A. que si sa force obligatoire est décrétée par l'assemblée générale. Il suggère pour le titre la rédaction suivante : « Instructions en vue du calcul des honoraires pour les plans d'aménagement de régions, de localités et de quartiers et pour les plans de situation » ; ce titre dirait implicitement qu'en conformité avec les dispositions des statuts, le tarif n'a pas force obligatoire.

M. F. Lodewig, arch. : La section bâloise adhérerait à cette proposition, si l'on joignait un amendement d'après lequel le calcul des honoraires effectifs se ferait après exécution des travaux, d'après le temps effectivement employé.

M. M. Kopp, président, estime inopportun d'établir des normes qui seraient annihilées d'avance par une nouvelle clause. Lors des tractations avec les autorités et les communes, on peut exprimer le désir de vérifier les honoraires d'après le temps employé, mais cela ne doit pas être inséré comme exigence dans les instructions. Ce mot « Instructions » sous-entend déjà que le tarif est adopté à titre d'essai.

¹ Voir *Bulletin technique* du 18 août 1945, p. 245.