Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 49 (1923)
Heft: 7

Artikel: A propos des barrages arqués
Autor: Stucky, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-38214

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

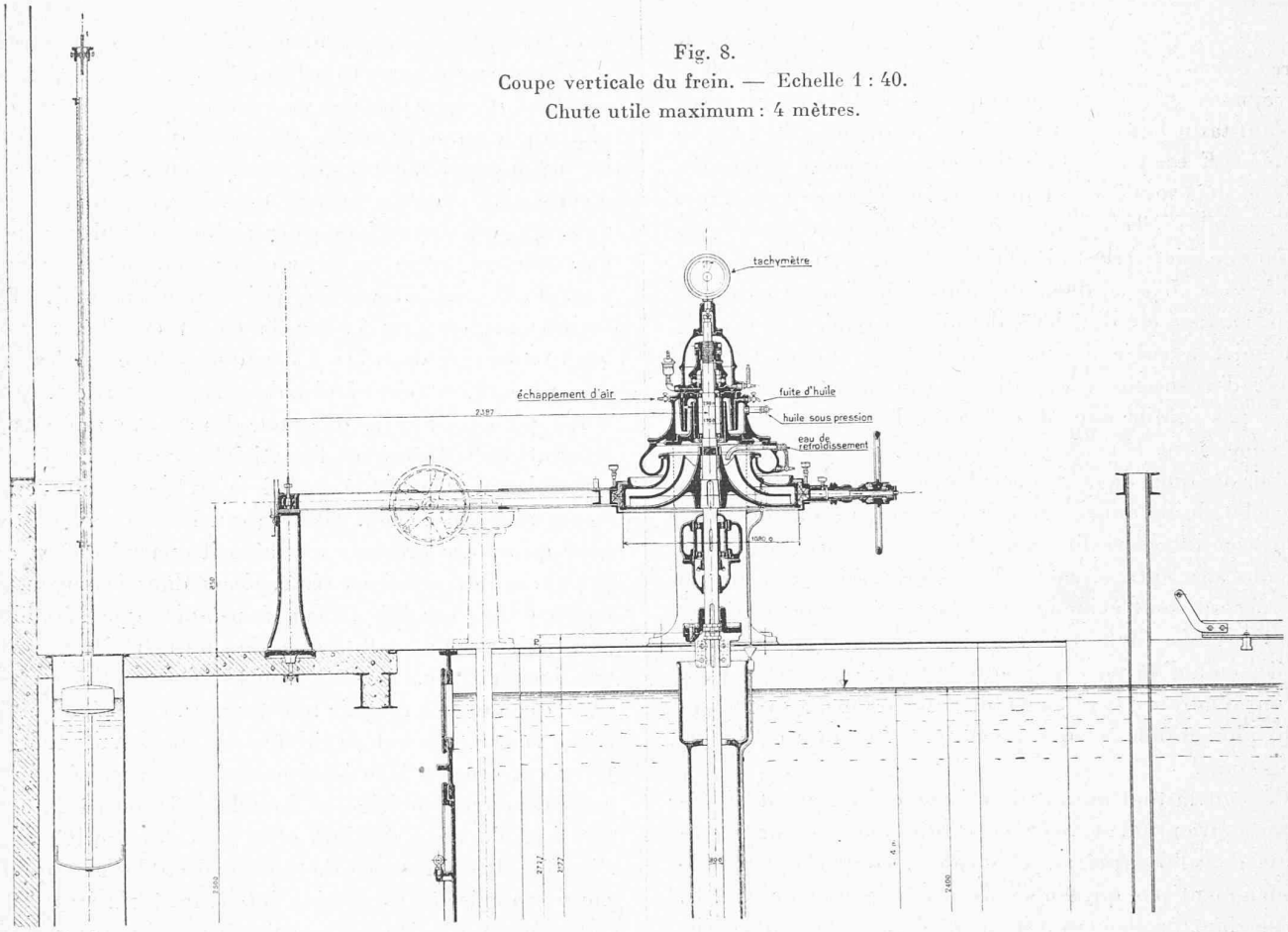
Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans 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

Fig. 8.
Coupe verticale du frein. — Echelle 1 : 40.
Chute utile maximum : 4 mètres.



deux contacts à mercure (fig. 6). Lorsque la balance n'est pas en équilibre, le circuit du voltmètre est interrompu, et celui-ci ne présente aucune déviation.

Cette disposition a l'avantage d'éviter toute surveillance de la balance pendant la mesure de la puissance, la lecture de la vitesse ne pouvant être faite que lorsque la balance est en équilibre.

Pour contrôler l'état des contacts, on dispose d'un interrupteur permettant de les shunter.

Toute cette installation a été très soigneusement étalonnée par le fournisseur, les résistances étant choisies de telle façon qu'elles correspondent aux constantes simples mentionnées plus haut.

Un compteur de tours, placé sous la petite dynamo-tachymètre, donne un signal tous les 100 tours de l'arbre de la turbine. Le temps t séparant deux signaux étant mesuré au chronographe, la vitesse est déterminée par la formule :

$$100 : t = n : 60$$

$$\text{soit} : n = \frac{6000}{t}$$

En introduisant cette valeur dans la formule du frein, on obtient :

$$N = \frac{P \,.\, 6000}{300\ t} = 20\ \frac{P}{t}$$

(A suivre.)

A propos des barrages arqués

par M. A. STUCKY, ingénieur.

La critique[1] de M. *Juillard* me donne l'occasion de revenir sur quelques points de mon mémoire[2] sur les barrages arqués, vieux aujourd'hui de quatre ans et de le compléter. Si je ne l'ai pas fait jusqu'ici c'est que je craignais d'importuner les lecteurs du *Bulletin* en revenant sur une matière dont les détails n'intéressent sans doute que les spécialistes.

Avant d'entrer dans le vif du débat il importe d'être bien au clair sur ce que peut donner le calcul d'un barrage arqué ou plus généralement d'un barrage encastré à ses deux extrémités. Tout en professant un grand respect pour la théorie, je ne me fais aucune illusion sur l'exactitude des résultats acquis surtout s'il s'agit de barrages. Il faut avoir suivi de près l'édification d'un tel ouvrage, qui dure souvent plusieurs années, pour comprendre pleinement combien tout calcul, quel qu'il soit, est entaché d'erreurs et ne peut donner que quelques points de repère pour apprécier la manière dont travaille l'ouvrage en question. Je ne parle pas ici seulement du problème statique, qui n'est pas simple ; je pense surtout aux propriétés physiques du béton (les modules E et G et ses

[1] Voir *Bulletin technique* du 3 mars 1923, page 59.

[2] Ce mémoire, qui a été publié par le *Bulletin technique*, en 1922, est en vente à la librairie *Rouge & Cie*, à Lausanne, au prix de Fr. 4.—

caractéristiques thermiques) qui jouent un rôle énorme dans le calcul ou mieux encore dans la réalité. Je relève entr'autres la variation de la qualité du béton d'un point à l'autre du barrage et le fait qu'au moment de la mise en charge, une partie du béton est âgée d'une ou plusieurs années déjà tandis que l'autre est récente, ce qui fait que les modules E et G que nous supposons constants (à défaut de mieux) sont bien loin de l'être. L'étude [1] de M. le professeur *Joye* a démontré combien l'état thermique d'un barrage est difficile à définir et combien ce dernier est sujet à subir des modifications profondes suivant l'état d'avancement des divers secteurs de travail. Il n'est pas inutile non plus de rappeler que les modules d'allongement E et de glissement G sont tout aussi mal définis dès que l'on envisage le barrage dans son ensemble. En effet, le bétonnage se fait par secteurs de sorte que l'ouvrage est en réalité constitué par les éléments collés les uns aux autres et dont les déformations, aux points de raccord, sont évidemment toutes différentes de celles d'un ouvrage coulé d'un seul jet. Ces sources d'erreurs, et il y en a d'autres encore que je ne puis pas relever ici, seront d'autant plus importantes que les masses de béton sont plus grandes et que la construction aura duré plus longtemps.

Ce sont là tout autant de raisons qui engagent l'ingénieur à être prudent, pour ne pas dire même un peu sceptique, dans l'interprétation du calcul. Tout cela ne signifie évidemment pas que l'on puisse se dispenser de calculs. Il ne faut seulement pas leur demander plus qu'ils ne peuvent donner et ne pas rechercher une exactitude superflue en sacrifiant peut-être d'autres exigences d'ordre plus pratique. Le calcul proprement dit n'est qu'une petite partie de l'activité du constructeur aussi accordons-lui l'importance qu'il mérite, mais pas davantage.

Après cette parenthèse je reviens aux barrages et je prétends qu'un calcul doit avant tout prouver d'une façon indiscutable, au moyen de règles simples et suffisamment vérifiées, que l'ouvrage est capable de supporter, avec la sécurité voulue, tous les efforts qui agiront sur lui, que ce soient les poussées des eaux ou les sollicitations thermiques.

S'il s'agit par exemple d'une barrage à gravité on démontrera tout d'abord, par les règles élémentaires de la statique, cent fois vérifiées, que la stabilité et la résistance d'un élément vertical sont hors de doute. On pourra ensuite examiner les sollicitations secondaires qui résultent de l'encastrement en ne perdant pas de vue que, quelque grandes qu'elles soient, elles ne sauraient être un danger immédiat pour la conservation de l'ouvrage. Ces fatigues provoqueront peut-être des fissures verticales. Si l'on veut éviter ces dernières pour se mettre à l'abri de toute infiltration ou parce que l'on craint une destruction lente par des agents atmosphériques on établira d'emblée des fissures artificielles ou des joints qui pourront être exécutés de manière à supprimer ces dangers [2].

[1] Cette étude, a paru aussi dans le *Bulletin technique*, en 1922.
[2] Barrage du Wäggital.

Si au contraire nous sommes en présence d'un barrage où l'on désire donner la prépondérance aux arcs, il faut s'assurer que ces derniers supporteront la poussée complète des eaux avec la même sécurité que précédemment le mur à gravité. On s'attachera ensuite à éliminer les inconvénients qui résultent de l'interdépendance des arcs. La question n'est plus si simple puisque nous ne pourrons pas la trancher d'un coup d'épée comme pour le barrage à gravité (joints horizontaux). C'est maintenant qu'interviendra le calcul détaillé, afin de nous renseigner dans la mesure du possible sur les fatigues secondaires, c'est-à-dire dans le plan vertical.

L'expérience prouve que pour des arcs très minces les résultats de la théorie de l'élasticité concordent suffisamment bien avec la réalité. Pour les arcs très massifs l'expérience manque encore. Mais ce qui importe avant tout pour qu'un arc présente une sécurité parfaite c'est que la courbe des pressions reste, sinon dans le noyau, du moins dans l'arc lui-même ; c'est-à-dire que l'équilibre puisse s'établir sans l'intervention de la résistance à la traction du béton. C'est là à mon avis une condition essentielle que doivent remplir tous les arcs, condition qui n'a rien à voir avec la valeur absolue des fatigues de traction. Dans cet ordre d'idée j'estime qu'un arc satisfaisant à cette dernière condition et dont la résistance à la compression n'est pas atteinte offre plus de sécurité même s'il présente des fatigues de traction de 10 kg/cm², qu'une poutre soumise à une flexion inférieure à $\pm$ 10 kg/cm². Nous aurons d'ailleurs à revenir plus tard sur la question des fatigues admissibles. Je voulais simplement marquer d'une façon catégorique qu'il est inadmissible que les arcs soient soumis, pour maintenir leur équilibre, aux aléas de la résistance à la traction du béton. Cette condition se traduit par la nécessité de leur donner une forme élancée et une forte courbure que n'ont point les barrages trop massifs.

Passant aux détails du calcul, nous constaterons tout d'abord que le point de départ des deux méthodes est le même, c'est-à-dire que l'une et l'autre ne font emploi que d'une seule des six équations de compatibilité pour chacun des points considérés ; il est indifférent que l'on ait recours pour résoudre le problème à des méthodes graphiques ou analytiques. D'après ce que j'ai dit plus haut sur la validité des hypothèses et vu que le calcul détaillé ne sert qu'à nous renseigner sur les sollicitations dues à l'interdépendance des arcs, le lecteur voudra bien me concéder que la méthode graphique, judicieusement appliquée, donne des résultats que l'on ne saurait qualifier *a priori* d'insuffisamment exacts.

M. Juillard préconise la méthode analytique parce que l'intégration est particulièrement simple dans le cas de l'arc de cercle d'épaisseur constante et du triangle (pour les sections verticales) Dans mes premiers travaux je me bornais aussi à des formes simples mais j'ai dû reconnaître bientôt que pour utiliser vraiment tous les avantages de la configuration topographique du terrain, — qui est souvent loin d'avoir une forme régulière, — il était préférable de ne

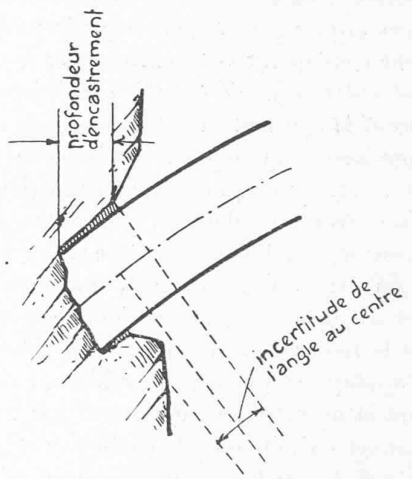
pas être limité dans le choix de la forme et des dimensions des arcs. Ce n'est en effet pas pour avoir l'occasion d'intégrer une équation que l'on édifie un barrage. C'est la raison pour laquelle j'ai abandonné les cas particuliers et que je me suis servi pour la détermination des déformations d'une méthode valable pour des arcs de forme quelconque et surtout d'épaisseur variable (comme je le faisais remarquer, il y en a d'autres). Si l'occasion se présente je ne fais pas fi des simplifications données par l'arc de cercle et dans ce but je me sers très volontiers des résultats de M. Hugo Ritter.

Jusqu'ici, M. Julliard et moi suivons le même chemin, lui pour un cas particulier, moi-même pour le cas général. La critique me reproche de ne pas avoir employé les lignes d'influence pour déterminer les coefficients des équations d'équilibre. Pour les murs c'est au contraire exactement ce que j'ai fait, pour les arcs de forme quelconque le procédé est trop compliqué, comme le dit M. Juillard lui-même. J'ai donc recherché une simplification me permettant de contourner cette difficulté. Elle est basée sur le fait que, — pour autant que l'arc soit soumis à une poussée répartie bien que légèrement variable, — la force annulaire R et les déformations restent pratiquement les mêmes. Cette approximation est dans l'ordre de grandeur de toutes celles employées en statique [1]. D'ailleurs une petite difficulté d'ordre pratique rend une trop grande exactitude inutile. C'est la détermination du point d'encastrement de l'arc. Avant d'avoir terminé les fouilles du barrage on ne connaît pas encore la profondeur d'encastrement qui joue un rôle d'autant plus grand que l'ouvrage est plus court. La figure ci-contre montre d'ailleurs que la section d'encastrement est d'autant plus difficile à déterminer que le barrage est plus épais. Cette incertitude rend évidemment superflue toute recherche d'une exactitude trop grande.

Grâce à cette simplification on peut poser facilement les équations d'équilibre dont le nombre est donné par la quantité de points que l'on désire considérer. Elles peuvent être résolues soit directement soit par essais successifs suivant les dispositions et l'habileté du calculateur [2].

Cette résolution donne une certaine répartition des poussées. Si le barrage est bien conditionné elle sera très régulière ; c'est ce que j'appelais un barrage idéal. Mais si la répartition est très irrégulière, par suite de la forme évasée du profil de la vallée par exemple, le funiculaire des poussées s'écartera beaucoup de la médiane, sortira peut-être même de l'arc, comme le prouve l'expérience. Que faire alors ? Si l'on a quelque confiance dans le calcul on est conduit fatalement à corriger la forme du barrage pour maintenir la ligne des pressions dans l'arc et donner à ce dernier la sécurité dont il a besoin. On en arrive ainsi à ne plus se limiter d'emblée et *a priori* à l'arc de cercle d'épaisseur constante. Si au contraire on conserve à tout prix la forme circulaire, avec le secret espoir qu'en réalité les choses se passeront autrement, c'est-à-dire que l'arc travaillera dans des conditions acceptables malgré le calcul, alors tout l'édifice de M. Juillard s'écroule puisqu'au moment où les mathématiques décèlent un fait désagréable on n'y croit plus qu'à moitié [1].

Il serait évidement ridicule de vouloir adapter rigoureusement tous les arcs à leurs poussées ; ce qui ne serait d'ailleurs souvent possible qu'en donnant au barrage une forme ondulée. Il y a pourtant des cas, lorsque le profil en long est très irrégulier, où le soulagement des murs est tel que l'abandon de l'arc de cercle est indiqué (pour autant qu'on a confiance en un calcul quelconque) si l'on veut que tous les arcs travaillent d'une manière irréprochable. Je ne me dissimule pas qu'il est très difficile de déterminer cette courbe des pressions en tenant compte de tous les facteurs. Si la déviation très forte du funiculaire par rapport à la médiane est indiscutable, on recherchera un compromis qui satisfasse également le point de vue esthétique et le point de vue de l'exécution. Toute cette partie de l'activité de l'ingénieur qui consiste à chercher la forme fondamentale du barrage et ensuite à la retoucher est à mon avis plus importante que la résolution rigoureuse d'équations.



Comme je le disais plus haut, ces retouches de la forme du barrage n'interviennent que pour le cas de profils évasés et irréguliers. Pour des barrages hauts et très courts, on peut à mon avis, dès que l'on a quelque expérience de ce genre de travaux, se dispenser de faire un calcul détaillé, c'est-à-dire ne point déterminer l'action du mur qui est alors insignifiante, sauf dans le tiers inférieur. On pourra tenir compte de cette action en renforçant le pied du barrage de la manière indiquée à la fin de l'*Etude sur les Barrages arqués*.

* * *

[1] Si l'on avait affaire à une force concentrée à laquelle fait allusion M. Juillard, l'écart serait trop grand, mais ce cas n'intervient jamais dans un barrage.

[2] Il est inexact que ces équations ne puissent pas être résolues comme le prétend M. Juillard. Pour un nombre de 15 à 20 équations je suis persuadé que la résolution rigoureuse exige plus de temps.

[1] Cette contradiction apparaît déjà, sous une autre forme il est vrai, lorsque M. Juillard nous dit au début de sa critique que les déformations varient beaucoup avec la forme de la médiane de l'arc tandis que plus tard il nous déclare que les fatigues varient très peu lorsque la forme change.

Lorsqu'on parle de fatigues il importe de distinguer entre les fatigues dues à des forces extérieures (poussée des eaux, poussée de la glace éventuellement) et les sollicitations dues aux variations thermiques ou au retrait. En effet les forces extérieures sont indépendantes de l'état de déformation. Elles subsistent dans leur intensité jusqu'au moment de la destruction de l'ouvrage tandis que les forces qui naissent des variations thermiques et du fait que l'ouvrage est encastré, dépendent au contraire de l'état de déformation. Ces dernières sollicitations diminuent au fur et à mesure de la déformation.

Il nous faut encore distinguer entre les sollicitations dans le plan d'action principal (vertical pour les barrages à gravité et horizontal pour les barrages arqués) et le plan d'action secondaire, car peu nous importe, au point de vue de l'équilibre seulement, bien entendu, que le barrage à gravité soit fissuré verticalement ou le barrage arqué horizontalement ; les exemples du Salmon-Creek et d'autres barrages arqués sont là pour nous le prouver. Nous poserons par conséquent comme *condition fondamentale: que l'équilibre des arcs soit possible sans l'intervention de la résistance à la traction.* Si cette condition est remplie et si les appuis sont inamovibles, peu importe la limite des fatigues de traction puisqu'une vieille expérience démontre qu'ils ne seront pas détruits pour autant que le travail à l'écrasement ne dépasse pas une limite raisonnable.

Comme on désire non seulement que le barrage soit absolument à l'abri de la destruction, mais qu'en outre il présente le moins de fissures possible sinon point du tout, on s'appliquera à ce que les sollicitations dues à la température et au retrait ne dépassent pas une certaine limite. Pour cette limite on a le choix par exemple entre 5 et 10 kg/cm². Le chiffre de 10 kg/cm² est celui de l'Ordonnance fédérale pour le béton armé. Si nous fixons une limite inférieure, de 5 kg/cm² par exemple, c'est au détriment des constructeurs puisque l'on réduit la possibilité d'édifier des barrages arqués à quelques cas particulièrement favorables et très rares.

Cette discussion sur les 5 ou 10 kg/cm² est d'ailleurs un peu académique puisque nous sommes aujourd'hui très mal renseignés encore sur les bases du calcul de la température. Le chiffre de 10 kg/cm² avait été fixé dans l'hypothèse que les variations thermiques seraient largement comptées et sous la réserve que la condition fondamentale que nous venons d'énoncer soit satisfaite [1]. Tant que nous ne possédons pas des données définitives sur les hypothèses à faire quant aux variations de température, il est oiseux de discuter le taux de travail à la traction.

* * *

En résumé la méthode préconisée par M. Juillard est un peu plus exacte (sans être irréprochable non plus, puisque des six équations par points elle ne tient compte que d'une seule) mais son application est limitée au cas d'arcs circulaires d'épaisseur constante. Ceux qui ont eu l'occasion d'étudier les barrages arqués en détail auront probablement éprouvé le besoin d'être plus libres dans le choix des formes et des épaisseurs. Dans ces conditions une méthode générale leur est peut-être plus utile. Je suis persuadé que dès l'instant où M. Juillard aura l'occasion d'appliquer sa méthode à plus d'un exemple il éprouvera, lui aussi, le besoin de l'étendre à des formes moins spéciales.

Je voudrais pour terminer relever un point sur lequel j'ai déjà insisté dans mon premier mémoire : c'est que si la théorie n'est pas rigoureuse pour des barrages minces et fortement arqués, elle le sera encore beaucoup moins pour les barrages massifs et peu incurvés où l'on ne peut plus parler d'arcs proprement dits. Les raisons, je les ai rappelées au cours de cette note : c'est tout spécialement l'incertitude dans laquelle on se trouve au sujet des formules fondamentales et c'est aussi l'influence très grande que prend la résistance du béton à la traction, toujours incertaine, même si les fatigues restent relativement basses.

Bâle, le 1er mars 1923.

[1] Il est d'ailleurs très simple d'éviter une discussion sur ce taux en faisant des hypothèses très favorables sur les variations thermiques.

La question de la gare de Genève.

Nous avons entretenu, à plusieurs reprises, nos lecteurs de la question de la gare de Genève, notamment dans notre numéro du 25 juin 1921, où sont représentés, schématiquement, les projets en concurrence. La Direction générale des CFF *vient de prendre position dans le débat par une lettre adressée, le 9 mars courant, au Conseil d'Etat du canton de Genève et dont nous reproduisons l'essentiel ci-après :*

On a proposé des gares de passage à Cornavin et aux Cropettes, ainsi que des gares terminus à Cornavin, Beaulieu et Plainpalais. Pour l'étude comparative de ces diverses solutions, vous-mêmes et le Conseil administratif de la Ville de Genève avez nommé chacun une commission d'experts. De son côté, la section genevoise de la Société suisse des ingénieurs et des architectes a confié cette étude à une commission spéciale choisie parmi ses membres. Les rapports de ces commissions ont abouti, en substance, aux conclusions suivantes :

1° Les experts que vous aviez désignés, MM. Van Bogaërt, Sabouret, Bernoulli et Lüchinger, n'ont pas pu se mettre d'accord entre eux. Les deux premiers, qui sont spécialistes en matière de chemins de fer, recommandent une gare de passage à Cornavin, tandis que MM. Bernoulli et Lüchinger donnent, pour des raisons touchant au développement de la ville, la préférence à une gare terminus à construire à Plainpalais, perpendiculairement à l'Arve. (Rapport d'expertise du 12 juillet 1920.)

2° Les experts de la ville, MM. Guyonnet, Andreae et Tissot-Favre [1], s'inspirant, eux aussi, de considérations d'urbanisme, se prononcent pour l'établissement d'une gare de passage aux Cropettes, tout en déclarant que la décision définitive devra être subordonnée à la question des frais. (Rapport d'expertise du 11 mai 1922.)

3° La section genevoise de la Société suisse des ingénieurs et des architectes [2] propose le maintien d'une gare de passage à Cornavin. (Rapport du 27 avril 1921.)

[1] Voir *Bulletin technique* 1922, page 191.
[2] Voir *Bulletin technique* 1921, page 145.