

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 49 (1923)
Heft: 11

Artikel: La Limite d'élasticité des métaux
Autor: H.D.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-38226>

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: 22.01.2026

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

cher en quoi que ce soit aux lauriers dont il se coiffe, j'ai fait remarquer (31 mars 1923) que son calcul ressemble singulièrement, si l'on regarde le problème dans son ensemble, à celui qui lui déplaît tant aujourd'hui et dont je me suis servi. La seule différence réside dans la technique de l'application qui peut évidemment varier à l'infini. Il surviendra peut-être demain un troisième larron qui présentera une autre variation du même thème et qui osera proclamer sa théorie encore meilleure que l'excellente théorie de M. Juillard.

Je ferai abstraction ici du fait que ses critiques sont, comme il me l'a dit lui-même, destinées à me punir d'avoir eu au sujet d'un certain projet de barrage une opinion qui ne convenait pas précisément à ses intentions, et nous examinerons cette question avec un peu de recul.

Il y a en fait trois manières d'envisager le problème des barrages arqués :

1. La méthode la plus simple, à laquelle j'ai déjà fait allusion précédemment, consiste à calculer les arcs indépendamment les uns des autres en appliquant à ces derniers les formules ordinaires des arcs, simplifiées pour le cas particulier de la forme circulaire. Cette méthode se justifie parfaitement dans certains cas, comme je l'ai montré.

2. Si l'on a la curiosité de connaître l'influence de l'interdépendance des arcs, on aura recours à la seconde méthode pour laquelle M. Hugo Ritter a ouvert la voie qui a été suivie par bien d'autres (je cite M. Résal, plusieurs auteurs américains dont M. Nœtzli, notre compatriote actuellement aux Etats-Unis, etc.). C'est dans cette catégorie que rentrent aussi les calculs exposés par M. Juillard et moi. La seconde méthode est caractérisée par le fait que l'on tient compte que des déformations dans le sens normal à la surface du barrage. La solution ne peut donc en être que grossière puisque, comme je le faisais remarquer (*Bulletin technique* 1922), nous négligeons 5 équations de déformation sur 6, c'est-à-dire que nous ne tenons pas compte en particulier de la contraction de Poisson qui joue certainement un rôle assez grand. L'écart entre le résultat obtenu et la réalité sera le plus grand le long des appuis où il peut sans doute se produire des fatigues tout autres que celles que donne le calcul ; c'est pour cela aussi que j'estime utile de renforcer le barrage sur son pourtour.

3. Si l'on veut au contraire résoudre le problème rigoureusement, il faut avoir recours à des solutions mathématiques compliquées dans le genre de celles dont se sont servis plusieurs auteurs pour étudier le cas d'une calotte sphérique, d'un tronc de cône ou d'un tore¹. Tous ces longs calculs n'ont pu être menés à bonne fin que grâce au fait que les surfaces examinées étaient simples et symétriques. Si l'on voulait appliquer ces théories aux barrages, on s'achopperait à des difficultés probablement insurmontables.

Comme il faut trouver une solution pratique on s'arrête, suivant le cas, au premier ou au deuxième groupe mais

tout en reconnaissant bien entendu qu'il ne s'agit que d'une approximation plus ou moins grossière. Une solution qui présente sur celles d'aujourd'hui un réel avantage, du moins théorique, ne peut être recherchée que par la troisième méthode, c'est-à-dire en tenant compte, non seulement des déformations radiales, mais aussi des autres.

Si l'on est bien pénétré de ce qui précède, on attache évidemment beaucoup moins d'importance aux petites divergences d'application d'une même méthode et l'on est en droit d'être surpris de la vivacité des critiques de M. Juillard.

Il me reste encore à démasquer très brièvement l'artifice qui devait me convaincre d'erreur. M. Juillard applique la formule générale des fatigues des arcs à un cas particulier de mon exemple dont la ligne médiane est encore différente de la courbe funiculaire des poussées mais dont il sait précisément que la forme doit être corrigée. Il n'est donc pas surprenant qu'avant cette correction il obtienne des fatigues anormales. C'est justement la raison pour laquelle cette correction de la forme peut dans certains cas être indispensable. Le calcul des fatigues n'intervient évidemment que pour la forme définitive du barrage. Quant aux déformations, elles sont à peu près les mêmes avant et après la correction de la forme, ce qui fait qu'un seul calcul suffit.

J'espère avoir démontré par ces deux répliques que M. Juillard s'est agité bien mal à propos puisqu'en réalité les deux calculs exposés sont si peu différents. Nos avis diffèrent par contre en un point capital, c'est l'application de ces théories aux barrages à gravité que M. Juillard a préconisée dans la *Bauzeitung*. L'exactitude problématique pour un barrage qui n'est pas très mince est certainement tout à fait insuffisante dès qu'il s'agit d'un barrage à gravité très massif ; aussi, me semble-t-il dangereux de réduire la section verticale du mur au-dessous de ce qui est strictement indispensable pour assurer la stabilité (66 à 80 % de la hauteur) si l'on ne retrouve pas dans les arcs la sécurité que l'on vient d'enlever aux sections verticales. Il est préférable de ne pas s'illusionner sur la valeur du calcul des barrages appelés semi-gravité (base 45 à 66 % de la hauteur) qui sont, comme les digues en enrochements ou en terre, du domaine de l'empirisme, c'est-à-dire d'un domaine où les extrapolations trop audacieuses ne sont point permises.

Bâle, le 18 mai 1923.

Nous considérons cette controverse, qui a d'ailleurs vivement intéressé beaucoup de nos lecteurs, comme close.

Réd.

La Limite d'élasticité des métaux.

M. A. H. Leblond expose, dans la *Revue de Métallurgie* d'avril 1923, les recherches qu'il a exécutées dans le dessin de confirmer l'hypothèse connue sous le nom de *loi de Guest* qui fait commander par la seule tension de glissement la rupture d'équilibre ou la limite d'élasticité des métaux tels que l'acier doux et le cuivre. Cette hypothèse avait déjà été énoncée par

¹ FÖPPL : *Drang und Zwang*. Tome II.

Coulomb mais avec cette restriction que pour lui la tension critique de glissement était une fonction de la composante normale au point considéré. Autrement dit Coulomb et, plus récemment Duguet, évoquent un glissement *avec* frottement tandis que les expérimentateurs modernes (Guest, Malaval, Mesnager¹) font appel au glissement *sans* frottement avec ce corollaire que, dans un barreau soumis à la traction par exemple, la rupture d'équilibre doit se produire suivant un plan orienté à 45° sur l'axe.

Pour trancher le débat entre ces deux écoles, M. Leblond, opérant par traction sur des barreaux à section carrée, eut l'idée ingénieuse de localiser la déformation au moyen de deux entailles normales à l'axe, pratiquées sur deux faces opposées du barreau et observa que « pour tous les aciers, sauf les aciers très durs, la rupture a lieu non pas dans le plan de section droite déterminé par les entailles, comme on s'y attend *a priori*, mais suivant deux plans inclinés à environ 45° sur les arêtes, dont les traces sur les faces non entaillées du barreau sont en forme de V » dont les deux branches aboutissent aux entailles et font donc avec les arêtes un angle de 45°.

Si intéressante que soit cette constatation elle vise un phénomène qui apparaît, le plus souvent, bien au delà de la limite élastique, aussi le cède-t-elle beaucoup, en force probante, à un autre phénomène, celui du « Carré de déformation » que M. Leblond décrit en ces termes : « Il s'agit du carré, très bien dessiné en creux, que l'on observe, avant rupture lorsqu'on opère la traction à la machine Maillard ou bien que l'on constate après coup lorsqu'on opère par action rapide de chute de poids. Il suffit du reste d'arrêter l'épreuve avant rupture, ou d'utiliser un poids, ou une hauteur de chute appropriés pour posséder un barreau non rompu portant ledit carré qu'on peut photographier ». (Le mémoire original contient la reproduction de plusieurs photographies sur lesquelles le carré, dont les côtés sont inclinés à 45° sur les arêtes du barreau, se dessine avec une netteté frappante. — Réd.)

« On trouve le même carré de glissement en agissant par compression sur des éprouvettes à section carrée présentant, comme lesdits barreaux, deux entailles en regard l'une de l'autre, mais, cette fois, il est en relief au lieu d'être en creux. Les côtés du carré se prolongent parfois au delà des sommets. »

« Pour les aciers très durs (acières à outils), la rupture à la traction a lieu par section droite passant par les entailles, mais auparavant, dans la plupart des cas, on voit apparaître le Carré de glissement, ou bien même on le constate ultérieurement de part et d'autre de la cassure. »

Non content de cette confirmation d'ordre, il est vrai, plutôt qualificatif, M. Leblond l'a corroborée par une preuve quantitative fondée sur les considérations suivantes.

Soit un barreau cylindrique d'acier, dont on connaît la limite d'élasticité E à la traction, soumis simultanément, d'une part sur ses bases à une traction σ_1 et, d'autre part, sur son pourtour, à une compression uniforme σ_2 . Le dispositif expérimental réalisant ces sollicitations est décrit en détail dans le mémoire. Les différentes hypothèses en présence s'expriment mathématiquement par les relations :

$$\sigma_1 + \sigma_2 = E \text{ (Lamé, hypothèse de la tension maximum).}$$

$$\sigma_1 + \frac{2}{3} \sigma_2 = E \text{ (St-Venant, hypothèse de la déformation élastique maximum, } \frac{1}{3} \text{ étant le coefficient de Poisson).}$$

$$\sigma_1 + 0,7\sigma_2 = E \text{ (Coulomb, Duguet, hypothèse du glissement avec frottement).}$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = E \text{ (Guest, Malaval, hypothèse du glissement sans frottement).}$$

Il s'agissait de constater laquelle de ces formules serait vérifiée par l'expérience ou, ce qui revient au même, si l'on écarte l'hypothèse de Lamé d'ailleurs notoirement inadmissible, les trois expressions pouvant se grouper sous l'égalité générale

$$\sigma_1 + x \sigma_2 = E$$

la valeur de x déduite des résultats expérimentaux vérifiera l'une ou l'autre des hypothèses suivant qu'elle se rapproche davantage de 0,66 (St-Venant) ou de 0,7 (Duguet) ou de 1 (Guest).

Or M. Leblond a trouvé pour x les valeurs suivantes :

$$0,93 ; 1,08 ; 0,81 ; 0,81 ; 1,10 ; 0,96 ; 0,99$$

dont la moyenne 0,95 confirme indiscutablement l'hypothèse de Guest.

M. Leblond est donc parfaitement fondé à tirer de ses remarquables recherches les conclusions suivantes :

1^o L'acier soumis à un effort de traction ou de compression se déforme, lorsque sa limite élastique est dépassée, suivant des surfaces de glissement inclinées à 45° sur la direction de l'effort.

2^o Pour l'acier dur, la rupture à la traction a lieu par arrachement suivant une section droite, mais il se produit au préalable un commencement de glissement à 45°.

3^o Le cuivre se comporte comme l'acier doux.

4^o Le phénomène du Carré de glissement observé à la traction et à la compression pour les aciers de toute nuance et pour le cuivre justifie nettement l'hypothèse dite des glissements sans frottement.

Cette hypothèse est encore justifiée par une de ses conséquences.

$$\sigma_1 + \sigma_2 = E$$

vérifiée expérimentalement.

5^o Le phénomène de glissement est indépendant de la vitesse d'action de l'effort.

6^o Les calculs de résistance des corps en acier ou en cuivre soumis à des efforts de traction et de compression doivent être basés sur la résistance au glissement pur, c'est-à-dire sur la théorie du glissement sans frottement.

M. Malaval s'est aussi attaché à vérifier cette conséquence de l'hypothèse de Guest, à savoir que si les déformations sont dues à un glissement sans frottement elles doivent être indépendantes de la composante normale au plan de glissement. En d'autres termes, les courbes représentant les tensions spécifiques en fonction de la déformation unitaire, d'une part pour un métal sollicité à la traction, d'autre part pour le même métal sollicité à la compression, doivent se superposer. M. Malaval opérant sur du cuivre au moyen d'un outillage décrit dans *Le Génie civil* du 31 mars dernier, constata que les efforts spécifiques de traction différaient de ceux de compression, pour une même déformation, de moins de 7 %. Attribuant cet écarts au frottement des bases de l'éprouvette sur les plateaux de compression il élimina cette cause de trouble en remplaçant la compression sur les bases par la compression sur le pourtour de l'éprouvette, exercée par l'intermédiaire d'un liquide. De cette façon il substituait au frottement contre les plateaux le frottement, d'ailleurs moindre et, de plus, facilement mesurable, aux joints obturant les orifices de passage du barreau à travers les parois du récipient contenant le liquide sous pression.

Grâce à cet artifice, M. Malaval réalisa une coïncidence presque parfaite entre le diagramme de compression et celui de traction.

Ce fait, ainsi prouvé, que la composante tangentielle est le

¹ Voir *Bulletin technique* du 20 juillet 1922 et du 22 avril 1923.

seul facteur de la déformation à la traction ou à la compression, M. Malaval l'exprime en ces termes : La déformation est indépendante de la pression du milieu ambiant. C'est au surplus la confirmation d'une vérité entrevue il y a plus de cent ans. Du moment que l'application d'une pression uniforme sur tout le corps envisagé ne modifie, on le sait, que la composante normale, il est manifeste que la déformation, commandée seulement par la composante tangentielle, ne sera pas influencée par cette pression uniforme.

Soit, d'autre part, une éprouvette soumise simultanément à une traction et à une compression uniforme égale, en valeur absolue, à la traction. On voit que la résultante de ces deux sollicitations est équivalente à une compression uniforme sur le pourtour cylindrique de l'éprouvette. Mais, en vertu de la proposition démontrée plus haut, à savoir que la déformation produite par cette sollicitation est la même que la déformation due à la traction simple, celle-ci est donc indépendante de la pression du milieu ambiant.

Passant au cas général, M. Malaval énonce ce théorème : « Considérons un métal soumis à trois forces principales *A*, *B*, *C*, rangées par ordre de valeur algébrique décroissante. Appliquons au milieu ambiant une pression uniforme de valeur *B*. Nous sommes ramenés au cas de deux forces de signes contraires *A-B*, *C-B*. L'étude des déformations permanentes se ramène au cas de deux forces de signes contraires, traction et compression, agissant suivant deux directions rectangulaires. »

H. D.

Turbines Francis pour hautes chutes.

On nous écrit :

« Nous avons lu avec intérêt l'entrefilet qui a paru dans le № 8 de votre journal sur les turbines Francis pour hautes chutes, exécutées en Amérique.

» Nous pensons que vos lecteurs apprendront avec intérêt que si, dans ce domaine-là, l'industrie de la Suisse romande n'a pas réalisé des turbines pour des chutes aussi élevées que celles que vous mentionnez, elle a néanmoins construit des machines pour des pressions voisines.

» Ainsi la maison *Piccard, Pictet et Cie* a exécuté en 1916 et 1917 quatre turbines Francis à bâche spirale, à axe horizontal, qui développaient chacune 6000 chevaux sous une chute de 175 mètres. Ces turbines ont été installées dans la centrale de Saint-Lary (Hautes-Pyrénées).

» Les Ateliers des Charmilles viennent pour leur part d'élaborer des dessins de construction de deux turbines Francis, également à axe vertical, qui développeront chacune 9000 chevaux sous une chute de 210 mètres à la vitesse de 600 tours par minute. Ces unités sont destinées à une installation aux Indes Néerlandaises.

» La même maison a eu, d'autre part, l'occasion d'étudier ces derniers temps des machines plus puissantes pour des chutes s'atteignant 260 et même 280 mètres.

» Les industriels, tout en reconnaissant la possibilité de réaliser de telles machines, préfèrent encore, pour des chutes semblables, des turbines Pelton qui, du point de vue de l'exploitant, sont plus simples. »

Un cas d'application des explosifs à base d'air liquide.

La construction, qu'exécute l'Entreprise *Zeiter et Dionisotti*, de la route de Viège à Stalden comporte l'abattement de 20 000 m³ de gneiss, près d'Ackersand. Le forage des trous de mines est

exécuté au moyen du marteau-perforateur à air comprimé, système Flottmann, du poids de 16 kg. Les trous ont un diamètre de 28 mm. et une profondeur allant jusqu'à 4 m.

L'explosif est l'oxygène liquide¹ véhiculé par des cartouches de carbène de 200 à 300 mm. de long et de 28 à 30 mm. de diamètre. L'oxygène liquide est transporté quotidiennement, dans des récipients ad hoc, d'une capacité de 15 l., de Gampel à Viège, par chemin de fer et ensuite par mullets jusqu'au chantier, distant de 6 km. de Viège. La consommation journalière, moyenne, d'oxygène liquide est de 39 l.

La mise à feu se fait au moyen de détonateurs au résorcinate et de mèches ignifugées.

D'après une investigation « contradictoire », il a été abattu du 20 novembre 1922 au 20 janvier 1923, au total 4426,9 m³ de rocher soit 87 m³ par journée de travail.

Le tableau suivant récapitule les calculs — dont le détail nous a été communiqué, mais que nous ne pouvons reproduire, faute de place — pour l'établissement du prix de revient de l'abattement à l'oxygène liquide :

	Par m ³
Total	de roche abattue
Cartouches	Fr. 1733,—
Oxygène liquide	» 2347,50
Détonateurs et mèches	» 180,—
Intérêts et amortissement des récipients pour le transport et le trempage	» 312,50
	» 0,070
	Fr. 4573,—
	Fr. 1,030

Avant de faire usage de l'oxygène liquide, l'Entreprise *Zeiter et Dionisotti* se servait, sur le même lot, d'un bon explosif courant dont le coût était de Fr. 1,30 à 1,50 par m³ d'abattement.

BIBLIOGRAPHIE

Economics of Bridgework, a Sequel to « Bridge Engineering », by J. A. L. Waddell, Doct. of Eng. XXXII et 512 p., New York 1921, John Wiley & Sons, London : Chapman & Hall. Prix rel. 6 dollars ; 36 shillings.

La réalisation d'un ouvrage important de constructions civiles est, de notre temps plus que jadis, une question de finances. La nécessité d'économiser s'est encore accentuée du fait de la crise mondiale de l'après-guerre. En ce qui concerne les sciences techniques, le problème a été étudié d'une manière méthodique et scientifique au cours de ces dernières années et un assez grand nombre de publications en font la preuve. La plupart des auteurs en étaient des ingénieurs américains. Dans la règle, ces études se sont étendues au domaine des constructions civiles en général, des constructions de machines ou de l'organisation d'usines et établissements industriels.

L'ouvrage mentionné dans le titre ci-dessus s'est appliqué à résoudre le problème de l'économie dans la partie bien spécialisée de la construction des ponts. Son auteur, lui aussi, est un ingénieur américain. Waddell, ci-devant professeur de construction civile à l'Université impériale de Tokio, dirige actuellement une étude d'ingénieur, bien connue à New York, qui s'occupe de construction de ponts et plus spécialement de ponts mobiles. Il jouit depuis longtemps dans son pays d'une grande renommée, soit comme ingénieur de ponts, soit comme écrivain de valeur. En Europe, il s'est surtout fait connaître par ses essais et études relatifs à l'emploi des aciers spéciaux dans la construction des ponts. (Voir le *Génie civil*, 1909 et

¹ Voir l'article *Sur l'emploi des explosifs à base d'air liquide*, à la page 105 du *Bulletin technique* de 1922.