Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 65 (1939)

Heft: 19

Artikel: Les changements d'échelle ouverts aux possibilités de la mécanique moderne par les métaux légers: introduction à l'étude comparée des charpentes, ponts et cellules en aluminium

Autor: Fleury, R. de

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-50013

65e année 23 septembre 1939 N° 19

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, 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. —

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

Les changements d'échelle ouverts aux possibilités de la mécanique moderne par les métaux légers.

Introduction à l'étude comparée des charpentes, ponts et cellules en aluminium [1],

par R. de FLEURY.

RÉSUMÉ

Il s'agit, en fonction des propriétés de matériaux nouveaux, de déterminer des règles qui permettent, ou limitent en grandeur, la transcription des dimensions d'une construction primitive.

Le tracé transcrit peut être défini par les quatre rapports des similitudes linéaires λ, σ, θ, ϵ *des longueurs, hauteurs, largeurs, épaisseurs locales du corps transposé vis-à-vis du corps primitif. De même les trois rapports* η, μ, δ *des limites élastiques, modules d'élasticité, densités, définissent les propriétés physiques du « matériau » nouveau vis-à-vis du primitif.*

Sur les bases comparées des propriétés mécaniques des ellipsoïdes d'inertie qui résultent des rapports dimentionnels et physiques, on peut à chacun des trois étages : global, sectionnel, local du charpentage, établir une relation d'équilibre sous la dépendance des résistances, et une relation de stabilité sous la dépendance des modules d'élasticité.

Soit en tout six relations — I, II ; III, IV ; V, VI — indépendantes étage par étage, qui ne sont même liées à chaque étage qu'en fonction des rapports dimensionnels qu'il nous faut préciser.

Pratiquement, selon les matériaux, les organes, les problèmes posés, les localisations dans une même pièce, c'est l'une ou l'autre des relations qui régit le problème par priorité. Il est vain de s'attacher aux autres autrement que pour vérifier qu'elles restent surabondamment remplies en valeur absolue.

En compression, les charpentes allégées présentent, pour d'excessives longueurs, une extrême dispersion de la matière par rapport aux sections minima. Ce sont les relations des stabilités II et IV qu'il faut mettre en jeu vis-à-vis d'un corps primitif supposé parfaitement réalisé, quitte à contrôler, que la relation d'équilibre nominal calculé en compression n'est pas trop déficiente et à la rectifier au besoin.

En flexion, hors les cas très particuliers de charpentes à très petit moment transversal, portées jusqu'aux limites de voilement, ce sont les relations IV et I qui sont à mettre en jeu dans les charpentes ultra-allégées. La réalisation de la relation IV, nécessaire pour assurer la sécurité fonctionnelle vraie, conduit d'ailleurs souvent à constater qu'elle entraîne une surabondance théorique, vaine pratiquement, du taux de sécurité nominale calculé selon la relation I.

Dans le cas où un minimum de robustesse purement locale est requise en rigidité, laissant surabondante la relation de stabilité sectionnelle, ce sont les relations VI et I qui déterminent la transcription.

Les relations III et V sont respectivement à mettre en jeu, la première dans les zones du contour des assemblages, la seconde quasi ponctuellement au point même d'une fixation autour de chaque rivet ou boulon.

Il est superflu d'ajouter que les données générales de la transcription sont variables avec les buts poursuivis : soit accroissement de portée pour une même surcharge utile, soit accroissement de puissance pour une même portée. Il en est de même des modifications ou des répartitions de charge qui résultent des variations des portées elles-mêmes, comme cela peut être le cas d'un pont à grande circulation, où la surcharge utile doit croître comme la portée. C'est encore le cas d'une surface d'aile d'avion, où, à même charge par mètre carré, le poids total croît comme la surface..., etc.

Divers exemples, avec chiffres à l'appui, sont donnés dans le texte.

I. Exposé.

Ce qui suit est la généralisation de perspectives que j'avais laissées en suspens dans une conférence récente [1] mais qui étaient prévues dans les conclusions.

[1] Remarquable conférence qui devait être faite lors des *Journées de l'Aluminium* à Zurich, le 11 septembre 1939 ; ces journées ont été renvoyées à une date ultérieure. (*Réd.*)

[1] *Mécanique appliquée comparée et Alliages légers.* — Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils de France. Fascicule mars-avril 1938.

Il s'agit de déterminer, en fonction des propriétés des matériaux, les règles qui permettent et limitent en grandeur la transcription des dimensions connues d'une construction primitive, supposée parfaite en toutes ses dimensions.

L'organe homologue, transposé détail par détail, à partir de l'organe primitif, doit être exécuté en principe avec un autre « matériau » que ce dernier, et de plus à une autre échelle dont nous cherchons à déterminer la limite.

Les cotes de la construction transposée doivent découler par surcroît, détail par détail dans les trois dimensions, pour le dessinateur. C'est donc en fin de compte une esthétique constructive propre aux métaux légers, qui se trouve abordée dans les domaines inséparables de l'architecture et de la mécanique.

II. Notations comparées du corps transposé.

Dans le cas du maximum de liberté de dimensionnement d'une charpente en caisson ou en treillis par exemple, ce qui est le cas général des constructions allégées qui nous occupent, le tracé transposé, à partir de celui du corps primitif, peut être défini partiquement par quatre rapports [1] :

$\lambda =$ Rapport des longueurs ou portées L'/L,

$\sigma =$ Rapport des dimensions dans le plan du couple fléchissant.

$\theta =$ Rapport des dimensions dans le plan perpendiculaire au couple fléchissant.

$\epsilon =$ Rapport des épaisseurs locales.

De même, le « matériau » constitutif du corps transposé peut, à partir du « matériau » constitutif primitif être défini par trois rapports :

$\eta =$ Rapport des limites élastiques ou de fatigue.

$\mu =$ Rapport des modules d'élasticité.

$\delta =$ Rapport des densités.

Dans ces conditions, les rapports du moment fléchissant, de la flèche globale, du moment résistant, transposés à ceux du corps primitif deviennent :

$$\omega_T \cdot \lambda \qquad \omega_T \frac{\lambda^3}{\mu\sigma^3\epsilon} \qquad \eta\sigma^2\epsilon.$$

Le rapport du poids propre (poids mort) du corps transposé à celui du corps primitif est pratiquement, en appelant ρ le rapport des rayons de giration

$\omega_M = \lambda\rho\epsilon\delta =$ Rapport des poids morts.

$\omega_T =$ Rapport des charges totales.

III. Six relations comparées d'équilibre et de stabilité globales, sectionnelles et locales.

Globalement, les taux de sécurité nominaux calculés $t'g$ et t_g de chacune des deux poutres sont égaux aux valeurs respectives du rapport du moment résistant au moment fléchissant de chacune d'entre elles.

[1] *Observation :* Pour un corps plein, on aurait la dépendance $\theta = \epsilon$. Pour les sections semblables dans un corps plein, on aurait de même la dépendance $\sigma = \theta = \epsilon$. Pour des contours assujettis à rester semblables dans un corps creux, mince ou en treillis, avec liberté pour l'épaisseur on a pratiquement la dépendance $\sigma = \theta$.

De même, les degrés de stabilité de forme globale, qui correspondent à des taux de sécurité fonctionnelle vrais [1] ν_g et ν'_g, sont parfaitement mesurés par les valeurs respectives de l'inverse du rapport des flèches à la longueur de chacune des poutres. On a donc :

$$\text{(I)} \quad \boxed{(t'/t)_g = \frac{1}{\omega_T}\,\eta\,\frac{\sigma^2\epsilon}{\lambda}} \qquad \text{(II)} \quad \boxed{(\nu'/\nu)_g = \frac{1}{\omega_T}\,\mu\,\frac{\sigma^3\epsilon}{\lambda^2}}$$

De tels corps comparés semblent posséder, sans limite d'après le calcul, des moments d'inertie efficaces d'autant plus grands, à section égale, que les vecteurs de giration sont plus grands et que les parois sont plus minces. Dans la réalité fonctionnelle il en est tout autrement.

En effet si l'organe est mince, les conditions de l'équilibre et de la stabilité des sections (voilement, flambement) interviennent ou encore les conditions locales (plissements) qui font apparaître de nouvelles limites fonctionnelles indépendantes des précédentes, et indépendantes entre elles.

* * *

Sectionnellement, pour proportionner convenablement λ, σ, ϵ dans la transposition, il faut assimiler tout accroissement du rapport du contour de la section à un accroissement de portée transversale parasite par rapport aux déformations critiques qui gouvernent la stabilité de forme du contour de la section. L'oubli de cette proposition suffit à expliquer l'apparition des anomalies dans l'application de la formule d'Euler.

Mais à l'accroissement de la portée transversale du contour correspond un accroissement proportionnel de son vecteur de giration. Or ce dernier est aussi le bras de levier qui équilibre les déformations des contours, par unité de longueur de la section transversale, et par rapport à des contraintes indéfinies, en fonction des épaisseurs des parois.

On peut donc tolérer à sécurité fonctionnelle égale, par unité de largeur, prise le long de deux sections transversales minces comparées, un rapport de déformations ou de flèches égal à celui de la similitude des contours, ce qui commande le rapport des épaisseurs. [2]

On obtient ainsi les rapports des taux de sécurité le long de deux tranches homologues de section des corps creux. Celui [3] $(t'/t)_s$ des moments résistants, et celui $(\nu'/\nu)_s$ des stabilités fonctionnelles.

[1] Si l'on veut que le taux ν_g ou ν'_g soit supérieur à une valeur donnée, reconnue expérimentalement nécessaire, on remarquera que cela conduit à une condition de la forme $PLW.MI/L2$ qui est exactement celle de la formule d'Euler, vis-à-vis du moment fléchissant parasite qui résulte de l'application d'une charge en bout, et qui est proportionnelle à cette dernière. Notre relation II s'applique aussi à ce cas ; seul notre rapport des taux nominaux de sécurité sera à remplacer par $(t'/t)_c = \sigma\epsilon\eta\,\frac{1}{\omega_T}$.

[2] Cela revient à dire qu'en désignant par f'/f le rapport des déformations comparées de tranches homologues de largeur égale à l'unité, et par l'inverse celui des rigidités absolues, le rapport des taux de stabilité fonctionnelle est égal à $\rho . f/f'$ avec $f/f = \rho^3/\mu\epsilon^3$ d'où la relation IV. Cette relation est exactement l'homologue de la formule d'Euler, mais dans le sens transversal. Elle définit la rigidité propre du contour par rapport à des contraintes indéfinies.

[3] Noter qu'en pratique, sauf sollicitation locale, la relation (III) n'entre pas en ligne de compte, les valeurs t'_s et t_s étant surabondantes en valeurs de compte absolues. Dans les applications que nous ferons aux sections semblables, nous aurons $\rho = \sigma$.

(III) $\boxed{(t'/t)_S = \frac{\epsilon^2\eta}{\rho}}$ et (IV) $\boxed{(\nu'/\nu)_S = \frac{\epsilon^3\mu}{\rho^2}.}$

* * *

Localement, dans une paroi encore plus mince, la matière refuse de travailler à une certaine distance des points d'application d'efforts fonctionnels ou extra-fonctionnels locaux, aux points des assemblages, par exemple, où convergent les lignes de force.

C'est alors une autre loi limitative qui joue plus ou moins localement, et fait intervenir les rapports des taux de sécurité locaux de parois trop minces, celui $(t'/t)L$ des moments résistants, sous la dépendance de celui $(\nu'/\nu)L$ des rigidités de l'unité de surface sur le corps de la pièce. Aux points d'assemblages, les mêmes rapports peuvent être fonction, non plus de sollicitations fonctionnelles, mais fonction de la force de serrage de l'organe d'assemblage tel que rivet ou boulon.

On a alors :

(V) $\boxed{(t'/t)_L = \epsilon^2\eta}$ et (VI) $\boxed{(\nu'/\nu)_L = \epsilon^3\mu.}$

* * *

Pratiquement il n'y a qu'à résoudre les valeurs λ, σ, θ, ρ ou ϵ d'après ceux des rapports (t'/t) et (ν'/ν) qui aux essais ou par raisonnement, ou par localisation, apparaissent les plus fondamentaux, quitte à vérifier que ceux qui n'apparaissent pas les plus fondamentaux (c'est-à-dire ceux dont les valeurs t' et ν' sont encore suffisantes en valeur absolue) ne sont pas diminués exagérément. [1]

Noter que σ et θ peuvent être imposés par construction, devoir même rester égaux à l'unité ; mais cela ne change pas le point de vue ni la règle.

IV. Longues membrures en treillis et jambes tubulaires très minces travaillant en compression aux limites des flambements.

Nous commencerons par ce cas qui est le plus typique et le moins prévu peut-être dans l'ordre des possibilités.

En effet, par rapport à une charge totale donnée, soit $\omega = 1$, en compression, il semble au premier abord qu'il n'y ait, pour une longueur quelconque de membrure, aucune possibilité autre que celle de conserver un rapport σ de similitude des sections comparées, en correspondance avec l'inverse des résistances admissibles, soit un rapport des taux de sécurité nominaux $(t'/t)_c = \sigma\epsilon\eta$.

Mais s'il s'agit d'une construction primitive en acier, déjà allongée à l'extrême, elle comporte par définition, pour la section primitive donnée, le maximum du moment d'inertie qui correspond à la formule de stabilité d'Euler. C'est justement notre relation N° II.

[1] On verra que, dans certains cas particuliers ces rapports peuvent, au lieu d'être diminués, se trouver accrus, ce qui n'a aucune valeur pratique, la sécurité fonctionnelle vraie n'étant que sous la seule dépendance du plus faible des six taux t' ou ν' en valeur absolue. Par exemple, la vérification devrait être plus surveillée et serrée s'il s'agissait de métaux encore inusuels et à très hauts modules tels que le glucinium et le tungstène. En transposition, on aurait un rapport η/μ petit ; c'est t' qui tendrait à devenir le taux limitatif, alors que le taux ν' tendrait à devenir surabondant en raison des hauts modules, à l'inverse de nos exemples qui suivent.

Du fait de notre même hypothèse de l'allègement extrême, dans le maximum de degré de liberté où nous nous plaçons intentionnellement, la construction primitive possèdera aussi la limite inférieure des épaisseurs admissibles du point de vue de la stabilité sectionnelle. Cette dernière correspond à notre relation N° IV.

Bref, par hypothèse, la construction primitive ne peut pas être réalisée plus légère pour sa longueur avec le matériau dont elle est constituée. C'est ainsi qu'il faut situer le problème pour estimer les vraies limites des possibilités respectives des matériaux.

Vis-à-vis d'un changement de longueur du contour sectionnel, ou d'épaisseur locale homologue, pour une charge donnée, ce sont donc les deux relations de stabilité II et IV qui sont à assurer en premier lieu. Pour conserver les mêmes taux de sécurité fonctionnelle en stabilité, elles deviennent :

$$\frac{\mu\sigma^3\epsilon}{\lambda^2} = 1 \qquad \frac{\mu\epsilon^3}{\sigma^2} = 1$$

qui donnent les dimensions transposées :

$$\sigma = \sqrt[11]{\frac{\lambda^5}{\mu^2}} \qquad \epsilon = \sqrt[11]{\frac{\lambda^4}{\mu^5}}.$$

Pour comparer la limite accessible en portée ou en longueur avec le matériau de transposition, à poids égal de la construction, nous imposerons le poids mort, soit la relation $\lambda\sigma\epsilon\delta = 1$ qui donne :

$$\lambda = \sqrt[21]{\frac{\mu^7}{\delta^{11}}}.$$

Dans ces conditions, nos sécurités en stabilités fonctionnelles, globale et sectionnelle, sont complètement remplies, mais il faut faire l'estimation et le contrôle de notre sécurité nominale calculée $(t'/t)_c$ qui dans ce cas est égale à $\sigma\epsilon\eta$ soit :

$$(t'/t)_c = \sqrt[11]{\frac{\lambda^{10}\eta^{11}}{\mu^7}}.$$

Dans le cas de la transposition du duralumin à de l'acier à 100×120 kgs, c'est-à-dire avec la relation $\delta = \eta = \mu = 0{,}4$ il résulte :

$$\lambda = 1{,}19 \qquad (t'/t)_c = 0{,}84.$$

Par surcroît les relations constructives sont déterminées :

$$\sigma = 1{,}3 \qquad \epsilon = 1{,}62.$$

Concluons : *la longueur utile d'une jambe tubulaire mince ou d'une membrure longue en treillis, chargée en bout, peut à poids final de l'organe transposé en duralumin et maintenu égale à celui de l'organe primitif très allégé initialement en acier à 100×120 kgs, être accru de près de 20 %. Toutes les conditions de sécurité en stabilités fonctionnelles restent égales par rapport aux déformations critiques, moyennant seulement une perte de moins de un sixième sur le taux de sécurité calculé nominal.*

* * *

Nous pouvons, pour être très scrupuleux, vouloir imposer le même taux de sécurité nominal calculé au point de départ, quitte à ce que les taux de stabilité, par rapport aux déformations critiques, soient chacune excédentaire dans une même proportion $(1 + x)$ laquelle déterminera des nouvelles relations $(\rho''/\rho')_g$ et de même $(\rho''/\rho')_s$.

Il suffit en effet pour cela de nous livrer à une seconde transposition constructive (indice ″) identique à notre première transposition prise à son tour comme organe primitif (indice ′) et dans le même alliage, en imposant $(t''/t')_c = \dfrac{1}{0{,}84}$.

Voici les chiffres : *Le maintien de la sécurité nominale calculée, ajouté comme condition supplémentaire dans le cas de la compression, dans membrure transposée en duralumin et allongée de 20 % en portée, correspond à un accroissement de poids inférieur à 20 % de la membrure renforcée, la sécurité fonctionnelle en stabilité par rapport aux déformations critiques est accrue en fait de 32 %.*

* * *

Il est intéressant par comparaison de calculer l'accroissement de poids qui aurait été obtenu en conservant l'acier initial pour obtenir un supplément de longueur voisin de 20 % de la membrure.

Le problème se pose exactement comme au début, sur la base des relations de stabilité II et IV, mais avec le cas particulier défini par : $\eta = \delta = \mu = 1$; $\lambda = 1{,}19$ d'où :

l'allongement de près de 20 % d'une longue membrure ultra allégée, soumise à la compression, exige pour le maintien des taux de sécurité en stabilité, égaux à ceux de la membrure primitive en même acier, un accroissement de poids de 39 %. La sécurité nominale calculée s'y trouve accrue de 17 % au minimum. Mais dans ce cas, cela est parfaitement vain pour la tenue de l'organe en acier qui à la limite fonctionnelle des flambements s'effondrera quand même à 84 % seulement de la charge nominale.

V. Ponts et charpentes considérés sous le jour d'accroissement de trafic ou de puissance pour une même portée.

Dans une poutre dont le moment d'inertie transversal est suffisant, où la rigidité globale est assurée sans voilement par un moment d'inertie transversal assez grand, le taux ρ'_g reste surabondant en valeur absolue. Le problème de la transposition est donc commandé par les relations I et IV, la dernière commandant seule la limite de l'allègement.

En imposant même portée, soit $\lambda = 1$ et même poids total (poids utile plus poids mort) vis-à-vis des piles du pont ou des supports de la charpente, soit $\omega_T = 1$, les relations I et IV deviennent :

$$\eta\sigma^2\epsilon = 1 \qquad \text{et} \qquad \mu\,\frac{\epsilon^3}{\sigma^2} = 1.$$

Résolues en σ et ϵ elles donnent la détermination exacte des relations constructives.

$$\sigma = \sqrt[8]{\frac{\mu}{\eta^3}} \qquad \text{et} \qquad \epsilon = \sqrt[4]{\frac{1}{\eta\mu}}\,.$$

Le rapport $\omega_M = \sigma\epsilon\lambda\delta$ des poids morts des deux charpentes devient :

$$\omega_M = \sqrt[8]{\frac{\mu}{\eta^5}\,\delta^8} = 0{,}63.$$

Voici l'interprétation vis-à-vis de l'accroissement du trafic :

La substitution du duralumin à l'acier dans la construction d'un pont transposé à partir d'un pont d'acier permet, moyennant des relations constructives définies, et sans que le poids total en charge sur les appuis ou les piles en soit accru, une augmentation de trafic ou de puissance égale à plus d'un tiers du poids mort du pont primitif en acier.

On remarquera que l'avantage est d'autant plus important que le pont est de plus grande portée, c'est-à-dire que le poids mort prend une valeur plus prépondérante par rapport au poids total en charge.

Pour les charpentes de faibles portées, le gain de puissance est négligeable dans le cadre des conditions imposées mais le poids propre de l'appareil est réduit de plus d'un tiers ce qui constitue un avantage considérable pour un appareil mobile ou portatif.

VI. Ponts et charpentes de très longues portées et très allégés considérés sous le jour de l'accroissement supplémentaire de portée pour un même poids total.

Nous supposerons comme cas extrême d'une excessivement grande portée, que la proportion de la charge utile en valeur absolue vis-à-vis du poids total, dans les ponts comparés, reste pratiquement assez petite pour être négligée dans une estimation en grandeur à la limite. De plus, la condition de ne pas surcharger les piles, mêmes réduites en nombre, vis-à-vis d'un terrain nécessitant des fondations difficiles et coûteuses, nous impose donc avec notre approximation : [1]

$$\omega_T = \omega_M = \lambda\sigma\epsilon\delta.$$

Dans ces conditions, de surcharge négligeable, il semblerait que deux sections identiques puissent être équivalentes pour une même portée, pour peu que la proportionnalité soit assurée entre les densités, les résistances, et les modules élastiques des deux matériaux constitutifs comparés, ce qui est le cas entre le duralumin et les aciers à *100 × 120 kg*.

Pratiquement, pour un pont, il faut que la condition sectionnelle de stabilité soit réalisée vis-à-vis des concentrations d'efforts dues aux emplacements variés des surcharges ou aux chocs accidentels. Un pont n'est pas fait pour être mis sous verre.

[1] Le chapitre suivant montrera qu'il est facile de serrer le problème de plus près, par rapport à la surcharge utile. Mais cela ne changerait rien aux conclusions, en ordre de grandeur, par rapport aux hypothèses introduites ici aux limites.

Ce sont donc bien les relations I et IV qu'il faut mettre en œuvre. Elles deviennent :

$$\eta\,\frac{\sigma^2\epsilon}{\lambda} = 1 \qquad \text{et} \qquad \frac{\mu\epsilon^3}{\sigma^2} = 1.$$

Résolues en λ avec la relation précédente du poids total, elles donnent :

$$\lambda = \sqrt[13]{\frac{\eta^5\mu}{\delta^8}} \qquad \text{soit} \quad 1,15.$$

D'où l'on peut tirer par surcroît les relations constructives exactes σ et ϵ. Bref :

L'accroissement d'une portée d'un pont transposé en duralumin à partir d'un pont primitif en acier à 100×120 kilos déjà poussé à son extrême limite de portée et de légèreté peut, pour un même poids total de charpente, et pratiquement une même surcharge, et moyennant des relations constructives complètement définies, encore atteindre 15 %.

* * *

Il est intéressant, à titre de comparaison, de savoir quel accroissement de portée donnerait l'utilisation dans la charpente transposée, d'un alliage supérieur dont la résistance aurait été accrue de 50 %, mais de même métal, c'est-à-dire de même module et de même densité. Ce serait le cas de la mise en œuvre d'un acier de 150 × 180 kgs, au lieu de 100 = 120 kgs ou d'un superduralumin à 60 × 72 kgs au lieu d'un duralumin à 40 × 48 kgs. Dans ces conditions, on a comme cas particulier $\delta = \mu = 1$ et $\eta = 1,5$. La valeur de λ devient :

$$\lambda = 1,03.$$

L'accroissement de portée d'un pont transposé en acier à 150 kgs, à partir d'un pont primitif en acier à 100 kgs déjà poussé à ses extrêmes limites de légèreté et de portée, ne saurait avec le même poids total de charpente dépasser 3 %.

Ce dernier chiffre donne par surcroît la mesure exacte des illusions que peuvent se faire les ingénieurs non rompus à l'emploi de matériaux extrêmement divers, lorsqu'ils voient apparaître sur le marché des alliages à résistance excessivement accrue, en progression continuelle, alors que les modules d'élasticité restent constants.

Cela ne veut pas dire que l'accroissement sans limite de la résistance ne soit pas très précieux. Mais nos considérations localisent exactement l'emploi de tels alliages à très haute résistance : leur véritable terrain d'efficacité et de sécurité est plutôt plus que moins local, qu'il s'agisse de portées d'assemblages, de portées fonctionnelles, ou encore de nécessités d'un minimum d'encombrement, c'est-à-dire hors du cadre des problèmes des stabilités des formes et des équilibres d'un ensemble. [1]

[1] Exemples : Zones de concentration des efforts ; portées d'appui et de réaction ; butées, arbres de transmissions, engrenages, clavettes, cuvettes de roulements à billes, billes elles-mêmes, portées de boulons et boulons, etc. C'est dans les zones de concentration des efforts que jouent les relations III et V, selon les cas. Vis-à-vis des matériaux constitutifs des ensembles, des interprétations et des artifices constructifs locaux s'imposent alors ; mais ils suffisent. Quelques exemples en ont été donnés dans le mémoire de références de la Société des Ingénieurs Civils de France.

VII. Ponts robustes de grande circulation.

Dans ce cas, la stabilité, vis-à-vis des déformations critiques sectionnelles, reste par définition elle-même très surabondante. Au lieu des relations I et IV, ce sont les relations I et VI respectivement, de résistance globale, et de rigidité purement locale, qui gouvernent le problème.

Cette dernière relation VI doit être mise en œuvre dans le pont transposé, de façon à assurer en chaque point la section locale nécessaire pour y conserver la même rigidité élastique suffisante locale égale à celle du pont primitif. La relation VI donne d'emblée :

$$\epsilon = \sqrt[3]{\frac{1}{\mu}}\,.$$

Nous imposons par rapport aux piles, pour le pont transposé, le même poids total que celui du pont primitif, ce qui s'exprime par $\omega_T = 1$, ce qui détermine avec la relation I : $\sigma = \sqrt[6]{\dfrac{\lambda^3\mu}{\eta^3}}$.

Dans ces conditions, le rapport du poids mort du pont transposé à celui du pont primitif sera égal à X tel que :

$$X = \lambda\sigma\epsilon\delta = \sqrt[6]{\frac{\lambda^9\delta^6}{\eta^3\mu}}\,.$$

Si le rapport de la charge du poids mort à la charge totale du pont primitif est égal à K, on aura entre les deux ponts un rapport de charge utile égal à ω_u tel que :

$$\omega_u = \frac{1 - KX}{1 - K}\,\omega_T \qquad \text{avec} \qquad \omega_T = 1.$$

Dans un pont de grande circulation, dont la portée est accrue, le rapport des poids utiles nécessaires devient forcément pour faire face à une même intensité de circulation égal à celui λ des portées. On a donc la relation [1]

$$\frac{1 - KX}{1 - K} = \lambda.$$

A titre d'exemple, si nous admettons pour le pont primitif une valeur K égale 0,8 du rapport primitif du poids mort au poids total, et que nous fassions une transposition en duralumin à patrir de l'acier, nous obtenons un accroissement de portée de 21 % malgré l'accroissement proportionnel de la surcharge utile à la portée.

* * *

Sous le jour de l'accroissement du trafic pour une même portée, il suffit de déterminer la valeur de ω_u par la valeur $\lambda = 1$:

$$\omega_u = \frac{1 - KX}{1 - K}$$

Si nous admettons pour le pont primitif la valeur $K = 0,8$ du rapport du poids mort au poids total, et que nous fas-

[1] En y remplaçant X par sa valeur et en prenant la variable auxiliaire $Z = \sqrt{\lambda}$, l'équation de résolution devient :

$$K\,.\,\sqrt[6]{\frac{\delta^6}{\eta^3\mu}}\,.\,Z^3 + (1 - K)\,Z^2 - 1 = 0.$$

sions la transposition en duralumin du pont assujetti par surcroît à conserver le même poids total, la capacité du trafic en surcharge utile est accrue dans la proportion de 2 à 1. Elle est doublée.

Bien entendu il incombe au transpositeur de métier de savoir apprécier, presque d'instinct, selon les cas dans quelle mesure il devra appliquer des proportions constructives plus ou moins intermédiaires entre celles de ce chapitre et celles des deux précédents.

VIII. Les ailes et les cellules d'avions.

C'est en raison des allègements extrêmes requis, le cas le plus typique en flexion où la stabilité sectionnelle selon la relation N° IV gouverne tout l'équilibre des membrures et des revêtements travaillants. En effet, il faut conserver une épaisseur de revêtement suffisante, c'est-à-dire une stabilité de contours sectionnels suffisante pour que la tôle mince, en se voilant ou en se plissant, ne cesse pas de travailler à quelque distance des raidisseurs et des points d'assemblages.

Le pis est que, dans une paroi trop mince, la zone où la matière veut bien rester intéressée au travail est elle-même d'une étendue variable, incertaine et qui plus est, instable — non pas seulement sous des chocs accidentels ou sous des variations des surcharges — mais même sous l'effet de simples anomalies ou écarts probables, et même d'erreurs individuelles au cours des serrages, des montages et des assemblages. Cela est démontré par les études décevantes de l'effet des tôles rivées des revêtements sur la tenue des raidisseurs des caissons.

Bref, tout le problème de la transposition doit être basé sur les relations IV et I.

Dans le cas de la cellule d'avion, le poids propre de cette dernière est petit par rapport au poids total, de telle sorte que nous le négligerons [1] dans le problème de l'équilibre des forces. Le rapport ω_T des poids totaux sera proportionnel à celui des surfaces portantes, s'il s'agit d'avions également chargés au mètre carré.

Nous supposerons également que les voilures comparées sont munies de profils semblables dans le rapport σ des hauteurs et qui est aussi celui des profondeurs des ailes. Et nous conserverons un degré de liberté en ce qui concerne le rapport λ des envergures.

Dans ces conditions on a, en même temps que le rapport ω_T des poids totaux supportés, celui des portances totales U tel que l'on ait :

$$\omega_T = \lambda\sigma = U.$$

C'est cette valeur auxiliaire U qui déterminera précisément notre rapport des échelles de portance entre nos deux avoins comparés pour un même poids de cellule. Les relations I et IV, puis la dernière condition du même poids des cellules deviennent :

$$\frac{\sigma^3\epsilon}{U^2}\,\eta = 1 \qquad \mu\,\frac{\epsilon^3}{\sigma^2} = 1 \qquad U\epsilon\delta = 1.$$

[1] L'introduction d'un rapport K du poids mort de la cellule primitive au poids total de l'avion primitif, selon la méthode appliquée pour le pont du chapitre précédent permettrait d'ailleurs, s'il était besoin, de serrer le problème de plus près.

La résolution nous donne : $U = \sqrt[15]{\dfrac{\eta^2\mu^3}{\delta^{11}}}$.

Soit 1,46 dans le cas de la substitution du duralumin à de l'acier à 100 × 120 kgs d'où le résultat :

Une cellule d'avion transposée en duralumin, détail par détail, à partir d'une cellule en acier, est assujettie à rester de même poids que cette dernière permet de porter un avion d'un tonnage total de 46 % supérieur à celui de l'avion en acier.

On voit que, comme dans les cas précédents, les équations déterminent par surcroît avec exactitude tous les rapports des dimensions homologues des deux avions comparés en tant que charpente :

$$\lambda = \sqrt[15]{\frac{\eta^5}{\delta^5}} \qquad \sigma = \sqrt[15]{\frac{\mu^3}{\delta^6\eta^3}} \qquad \epsilon = \sqrt[15]{\frac{1}{\delta^4\mu^2\eta^3}}.$$

Elles correspondent, avec le choix de nos métaux de substitution, aux valeurs : $\lambda = 1$; $\sigma = 1{,}46$; $\epsilon = 1{,}72$.

Bref : *Une cellule d'avion d'un poids donné en duralumin, transposée à poids égal et profils semblables, à partir d'une cellule primitive déjà ultra allégée en acier à 100 × 120 kgs, doit, pour obtenir l'accroissement maximum de 46 % sur l'échelle des portances, conserver la même envergure d'aile et accroître le profil dans un rapport de similitude égal à 1,46.*

* * *

On remarquera que la transposition sur la base du choix du métal influe par interactions — et inversement — non seulement sur le rapport d'allongement de l'aile, mais même directement sur le choix du profil optimum adapté à l'aile de l'avion transposé. Cela se peut facilement pour peu que l'on disjoigne un rapport de similitude horizontal θ d'un rapport vertical σ du profil de l'aile.

Dans ces conditions, un profil d'aile étant peu épais par rapport à sa profondeur, on peut se dispenser d'avoir affaire aux fonctions elliptiques par rapport aux ellipsoïdes d'inertie comparés et la relation IV deviendrait pratiquement :

$$\mu\,\frac{\epsilon^3}{\theta^2} = 1.$$

Mais la condition supplémentaire nécessaire à la détermination des quatre variables λ, σ, θ, ϵ devrait alors être d'ordre aérodynamique, hors de notre cadre purement constructif.

* * *

Comme dans les exemples précédents, il est instructif de savoir, à titre de comparaison, quel accroissement de portance procurerait dans la cellule transposée un alliage qui aurait même densité et même module que l'alliage primitif soit $\delta = \mu = 1$, mais dont les résistances seraient accrues de 50 %, soit $\eta = 1{,}5$. On trouve par U une valeur inférieure à 1,08, ce qui veut dire :

L'accroissement de portance totale d'une cellule transposée détail par détail en acier 150 × 180 kgs, à partir *d'une cellule primitive en acier à 100 × 120 kgs, de même poids total et de profil semblable, est inférieur à 8 %.*

* * *

Il est non moins intéressant de se faire une idée des échelles accessibles aux nouveaux produits proposés pour la construction des cellules ou des fuselages, tels les fibres ou bois agglomérés avec des résines synthétiques. Les rapports des propriétés des meilleurs de ces produits vis-à-vis du duralumin semblent approximativement aujourd'hui : [1]

$$\eta = 0{,}25 \qquad \delta = 0{,}4 \qquad \mu = 0{,}125.$$

On trouve U extrêmement voisin de I, par défaut à moins de 1 % près avec une envergure transposée diminuée de 15 %, une profondeur d'aile accrue de 17 % et des épaisseurs homologues locales accrues dans la proportion de 1 à 2,5 :

Force est d'admettre qu'il n'est pas exclu de voir les bois, fibres et résines synthétiques, lorsque les procédés constructifs seront au point, intervenir dans la construction des cellules et fuselages d'avions, moyennant des rapports dimensionnels appropriés, et cela avec des avantages par rapport à l'acier, mais apparemment pas par rapport du duralumin dont ils semblent toutefois pouvoir se rapprocher.

Bien entendu, cela ne pourra advenir que lorsque les questions locales des assemblages ou des procédés de construction auront été résolues.

* * *

Du point de vue de la construction purement métallique, il est intéressant de faire l'estimation de la marge supplémentaire qu'apporte à son tour l'emploi des alliages ultralégers vis-à-vis du duralumin. En ce qui concerne le magnésium, les rapports des propriétés comparées sont :

$$\eta = 0{,}8 \qquad \delta = 0{,}66 \qquad \mu = 0{,}66.$$

On trouve U très voisin de 1,20, *soit un nouvel accroissement d'échelle de portance de 20 % par rapport au duralumin lui-même, avec une envergure transposée accrue de 15 %, une profondeur transposée accrue de 5 %, et des épaisseurs locales homologues accrues dans la proportion de 25 % par l'emploi du magnésium.*

Là aussi interviennent, dans un ensemble, des dispositions correctives sectionnelles ou locales aux assemblages, en fonction des matériaux, selon les relations III et V. Le détail en diluerait trop notre sujet.

Conclusions.

Soulignons d'abord que la méthode comparée choisie présente un grand avantage de sécurité, même vis-à-vis des réalisations. En effet, ne faisant appel qu'à des rapports, les erreurs mêmes ne peuvent être proportionnelles qu'à des différences de dimensions, et non aux grandeurs absolues de ces dernières. C'est juste le contraire de ce qui a lieu dans les constructions abordées directement sans bases expérimentales préalables et dont chacun connaît les aléas.

C'est intentionnellement que nous nous sommes cantonnés dans les cas limites extrêmes les moins favorables. Il est évident que dans les cas intermédiaires où ne jouent plus, au titre limitatif, les stabilités des formes étendues allégées à l'extrême, nos conclusions auraient paru bien plus favorables aux métaux légers. Mais alors des transpositions inverses sur la base d'autres modes constructifs auraient pu mettre en cause la véritable portée de l'Exposé.

C'est pourquoi je me suis donné comme discipline de supposer, dans chaque exemple, que la charpente primitive était parfaitement conçue et réalisée dans le détail, et de même que la transposition constructive devait calquer l'exécution primitive de la facon la plus serrée possible à partir des bases déjà supposées parfaites. Cela seul peut donner l'estimation la plus modérée des véritables ordres de grandeur des échelles constructives accessibles par les emplois des métaux légers.

Ajoutons, à titre d'anticipation, que des matériaux à résistance poussée paradoxalement jusqu'à l'infini, mais à modules inchangés, ne bouleverseraient que les conceptions locales mais non les conceptions globales des ensembles constructifs. Par contre, des matériaux à très hauts modules et de faibles densités, comme le glucinium transposé par rapport à l'aluminium et le magnésium, ou bien le tungstène par rapport à l'acier, bouleverseraient certainement les conceptions constructives des ensembles et créeraient une nouvelle esthétique.

[1] Je ne connais pas les caractéristiques du produit dit « Duramold » de l'avion « Clarke » américain.

Quelles sont les caractéristiques du chauffage par rayonnement ?

Nous pensons intéresser nos lecteurs et spécialement les architectes en reproduisant ici l'essentiel d'un article paru dans la Revue technique Sulzer, *nº 2, 1939, sous la signature* Wth. *Pour ceux que cette question intéresse particulièrement nous leur rappelons que le* Bulletin *a déjà publié sur cette matière plusieurs articles et notes* [1]. *(Réd.)*

Dans le chauffage ordinaire par radiateurs, l'air joue le rôle de véhicule de chaleur entre la source, constituée par le radiateur, et le local qui l'absorbe. Des considérations élémentaires de physique montrent que pour réaliser ce but, l'air doit être au moins un peu plus chaud que les corps auxquels il doit céder sa chaleur, c'est-à-dire, les meubles, les parois, etc. Ce mode de chauffage est donc essentiellement indirect.

Pour éprouver un sentiment de bien-être le corps huhumain doit évacuer une quantité de chaleur bien déterminée qu'il abandonne par rayonnement et par convection. Avec le chauffage par radiateurs, cette chaleur est dissipée pour la plus grande partie par le rayonnement du corps

[1] Entre autres : *Le chauffage par rayonnement*, par M. A.-G. *Bertusi*, ingénieur, « Bulletin technique » du 7 mai 1938, p. 129.