

# Sur le régime des déformations et des contraintes d'une enveloppe métallique d'un type spécial: tube culotte d'une conduite forcée avec renforcements par brode elliptique et circulaire

Autor(en): **Dumas, Antoine**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **65 (1939)**

Heft 23

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-50018>

## **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, 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 & C<sup>ie</sup>, 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: M. IMER, à Genève; secrétaire: J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres: *Fribourg*: MM. L. HERTLING, architecte; A. ROSSIER, ingénieur; *Vaud*: MM. F. CHENAUX, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; EPITAUX, architecte; E. JOST, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; *Genève*: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. ODIER, architecte; CH. WEIBEL, architecte; *Neuchâtel*: MM. J. BÉGUIN, architecte; R. GUYE, ingénieur; A. MÉAN, ingénieur cantonal; *Valais*: M. J. DUBUIS, ingénieur, à Sion.

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

## ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,  
largeur 47 mm :  
20 centimes.

Rabais pour annonces  
répétées.

Tarif spécial  
pour fractions de pages.

Ferme des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président; G. EPITAUX, architecte; M. IMER.

SOMMAIRE: *Sur le régime des déformations et des contraintes d'une enveloppe métallique d'un type spécial: Tube culotte d'une conduite forcée avec renforcement par bride elliptique et circulaire*, par ANTOINE DUMAS, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne. — *Problèmes actuels des concours d'architecture*, par R. SCHWERTZ et H. LESEMANN, architectes, à Genève. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes: Rapport de gestion pour l'année 1938* (suite et fin). — *Cours de soudure électrique à Baden*. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — SERVICE DE PLACEMENT.

## Sur le régime des déformations et des contraintes d'une enveloppe métallique d'un type spécial :

### Tube culotte d'une conduite forcée avec renforcements par bride elliptique et circulaire,

par ANTOINE DUMAS,

Professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

#### I. Introduction.

Le laboratoire d'essais des matériaux de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne expose à l'Exposition Nationale à Zurich, en cette année 1939, une enveloppe d'un type spécial, à savoir un élément en forme de culotte d'une conduite forcée et raidi par deux nervures, l'une elliptique et l'autre circulaire. Des mesures des déformations et des contraintes ont été pratiquées sur l'objet et les résultats ont été reportés sur la pièce de la manière qui a semblé la plus convenable pour mettre ces résultats en évidence. Ce désir a certainement été satisfait; par contre, le spécialiste n'aura pas entièrement trouvé son compte. En effet, quelques courbes, même très judicieuses, tracées sur un modèle d'exposition, ne sauraient rapporter au spécialiste tout ce que l'étude de l'objet a pu mettre en évidence: seul un mémoire explicatif détaillé pourra donner des renseignements utiles sur l'élasticité et la résistance de la pièce, aussi le but de cette étude est-il de développer critiquement le mode de calcul et d'essai de la pièce en question.

Signalons pour débiter que la pièce a été fabriquée par MM. *Sulzer Frères* à Winterthur, sur le modèle d'une exécution de leurs ateliers; elle a été mise gracieusement à la disposition du laboratoire d'essais, ce dont nous les remercions aujourd'hui.

Les mesures des déformations et des tensions ont été pratiquées au laboratoire par M. *Jacques Paschoud*, ingénieur, au début de l'année 1939; une étude assez complète de la pièce a été effectuée par M. *Paschoud* et c'est lui qui aurait rédigé la note présente si les dures circonstances actuelles ne l'éloignaient pas pour longtemps de ses occupations professionnelles. Néanmoins, l'étude de l'objet en question est si riche en suggestions de tous genres qu'il sera même aisé de la reprendre sur la base des résultats exposés aujourd'hui et de faire faire encore un pas en avant dans le vaste domaine du calcul des enveloppes et des corps creux en général.

Au point de vue mathématique, le calcul des enveloppes et des corps creux peut être considéré comme résolu: les équations différentielles définissant les régimes des déformations et des contraintes sont établies. Malheureusement, seuls quelques cas relativement élémentaires conduisent à des équations pouvant être résolues par des moyens relativement simples: cylindre, sphère, cône et tore, et cela, bien entendu, pour le cas de parois d'épaisseur constante. Dès que les épaisseurs sont variables, afin de se rapprocher d'une forme d'égale résistance ou que des raidissements au moyen de nervures sont envisagés, le problème devient inabordable au point de vue rigoureux, tant les équations auxquelles cela conduit sont compliquées à résoudre. L'ingénieur, néanmoins, dans

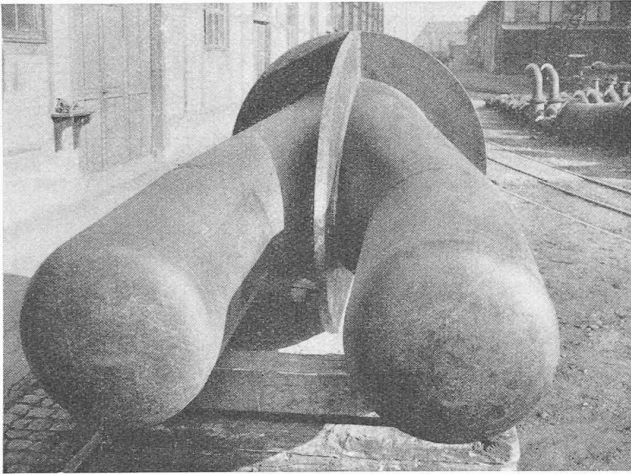


Fig. 1. — Tube culotte avant les essais.

de tels domaines, précède toujours le théoricien et certains procédés de calcul, où le flair joue le rôle prépondérant, lui permettent de donner des dimensions correctes à un objet sans avoir à attendre le résultat de laborieux calculs quasi rigoureux. Ce qui va suivre développera le calcul d'un objet d'une telle catégorie, certaines parties du calcul seront rigoureuses, d'autres approchées, afin de jeter toute la lumière possible sur le problème traité.

## II. Description de l'objet.

La pièce faisant l'objet de cette étude, et telle qu'elle a été utilisée pour les essais, est représentée par les figures 1 et 2, la première donne la pièce avant les essais, et la deuxième, telle qu'elle a été présentée à l'exposition.

Un dessin coté est donné par la figure 3.

La pièce a été complètement assemblée par soudure électrique, après quoi elle a été soigneusement recuite afin d'éliminer toutes les tensions de fabrication.

Les tôles et brides étaient en acier doux ordinaire du marché au sujet duquel rien de spécial n'est à signaler.

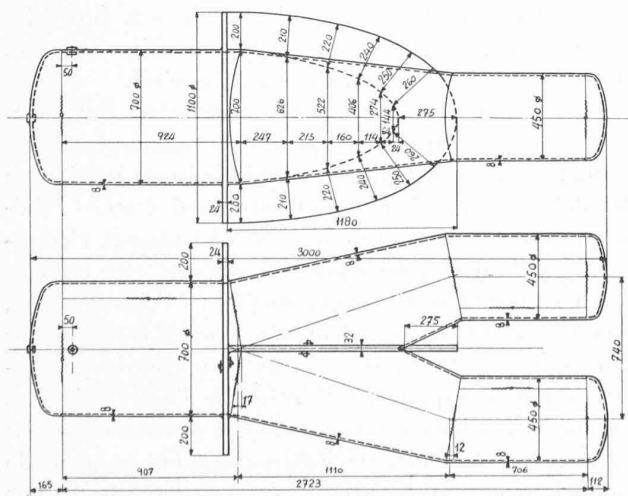


Fig. 3. — Dessin coté du tube culotte.

## III. Description des méthodes de contrôle et d'essais.

L'enveloppe a été soumise à la pression intérieure augmentée progressivement et accompagnée de relevés tensométriques des déformations et des tensions. Ces procédés sont suffisamment connus pour rendre superflue toute explication à leur sujet. Signalons néanmoins que ces procédés tensométriques souffrent d'un défaut essentiel : les mesures ne peuvent être pratiquées que d'un seul côté des corps creux soumis à la pression intérieure et de ce fait des flexions, provenant d'imperfections des formes, peuvent troubler les résultats des mesures et provoquer des interprétations erronées. Pour se mettre à l'abri de ce phénomène, il convient de pratiquer beaucoup de mesures, de les répéter autant de fois que possible dans un grand nombre de régions aussi semblables que possible, de manière à pouvoir éliminer l'effet parasite des flexions par le jeu des moyennes. Mais il y a toujours des régions où précisément la flexion est le phénomène essentiel, et alors il est bien difficile de dire ce qui est flexion et ce qui est extension dans une mesure tensométrique. Dans ces conditions, tout compte fait, chaque fois que des déterminations de contraintes sont à pratiquer sur un objet qui n'est accessible que d'un seul côté, le mieux est de commencer par faire une analyse aussi complète que possible du problème par voie mathématique, en accordant au corps ses formes rigoureuses définies par les dessins d'exécution, puis les relevés sont effectués aussi soigneusement que possible et sont contrôlés par le fil directeur fourni par la théorie. Il va bien sans dire qu'une mesure est quelque chose de réel, tandis que le résultat de calcul présente toujours un certain caractère spéculatif;

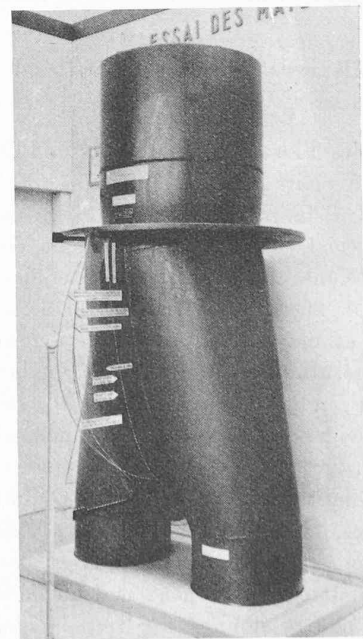


Fig. 2. — Tube culotte après les essais, tel qu'il fut exposé à l'Exposition nationale.

mais il ne faut pourtant pas omettre qu'une mesure risque toujours d'être entachée d'une certaine erreur, aussi y a-t-il bien des cas où la mesure est moins près de la réalité que le résultat d'un calcul même approché. Dans d'autres cas, par contre, c'est l'inverse qui a lieu : la capacité d'un réservoir de forme compliquée se détermine plus aisément par mesure que par calcul, tandis que des relevés tensométriques, dans tous les cas où le calcul est possible, fournissent des résultats moins rigoureusement sériés que ceux que définit la théorie. Ainsi donc le fil directeur fourni par la théorie sera-t-il pris comme base de toute discussion.

#### IV. Sur le régime théorique des contraintes de l'objet.

L'enveloppe étudiée est formée par des tôles minces par rapport aux rayons des tubes ; elle peut donc être assimilée à une membrane et calculée comme telle. C'est du reste dans cette hypothèse fondamentale que les épaisseurs des tôles ont été déterminées, en appliquant les formules simples des cylindres et des cônes de révolution. Ce qui caractérise en mécanique une enveloppe assimilée à une membrane, c'est qu'il est admis que le métal ne transmet que des forces normales aux sections (tractions) et ne transmet aucun moment fléchissant ; il est sous-entendu que la membrane ne présente aucune rigidité transversale, capable de réagir à une flexion. Certains corps creux tels que la sphère, l'ellipsoïde de révolution ou d'autres encore, satisfont rigoureusement à cette condition ; par contre, d'autres corps, tels que par exemple un tube elliptique de grande longueur, ne résistent pas à la pression intérieure si le métal ne présente aucune rigidité transversale. Ainsi donc, les contraintes fondamentales des tôles ont été calculées en assimilant l'enveloppe à une membrane, contraintes auxquelles le métal, dans le cas particulier, doit résister en tout état de cause, car dès que, pour une raison ou une autre, par exemple par suite d'une surtension locale, le métal entre dans le domaine plastique (dépassement de la limite d'élasticité apparente), c'est l'état membrane qui devient dominant. Mais le calcul effectué dans ces conditions seules est souvent insuffisant. En effet, dans le voisinage des assemblages présentant des discontinuités, par exemple au raccord des tubes coniques entre eux ou avec les brides, il s'établit des flexions locales qui peuvent être très élevées et capables de provoquer une surtension des liaisons (cordons de soudure). Il est donc de rigueur de contrôler le régime des contraintes d'une enveloppe aux deux points de vue suivants : 1° En général en l'assimilant à une membrane ne transmettant que des forces normales. 2° En recherchant l'effet des flexions dans les régions dangereuses. Cette dernière exigence conduit dans la règle à des calculs très laborieux, inextricables dans la majorité des cas, dont un rappel est donné ci-dessus, mais qui néanmoins doivent être pratiqués d'une manière ou d'une autre si l'on ne veut pas courir le risque d'accident par concentrations de tensions.

Le corps schématisé, dont le calcul va suivre, est représenté par la figure 4. Les cotes reportées sur le dessin sont celles qui ont été utilisées pour les calculs : elles ont été déduites des dessins de fabrication.

Partout où les tubes sont complets et forment un cercle entier, ils se portent d'eux-mêmes et ils sont à contrôler par les formules simples des tubes circulaires, mais cela n'est pas le cas pour la région de pénétration et de raccordement des deux tubes tronçonnés que la figure 5 reproduit et qui est une épure du jeu des forces dans cette région.

Cette épure montre que l'équilibre de la membrane est rétabli si l'on fait agir dans l'ellipse de réunion des tubes coniques les forces suivantes, rapportées à l'unité de longueur de la coupe :

a) Une force  $p_y = 2 \cdot p \cdot h \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x} = 2 \cdot p \cdot h \cdot \cos \alpha$  dans le sens vertical (axe des  $y$ ) ;

b) Une force  $p_x = 2 \cdot p \cdot y \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x} = p \cdot y \cdot \sin 2\alpha$  dans le sens longitudinal (axe des  $x$ )

où  $p$  est la pression intérieure de l'enveloppe.

Or, ces deux grandeurs  $h$  et  $y$ , étant donné la forme des tubes raccordés, sont représentées, la première par une droite, et la seconde par une ellipse, semblable à la courbe d'intersection des deux tubes, ainsi que c'est dessiné sur la figure.

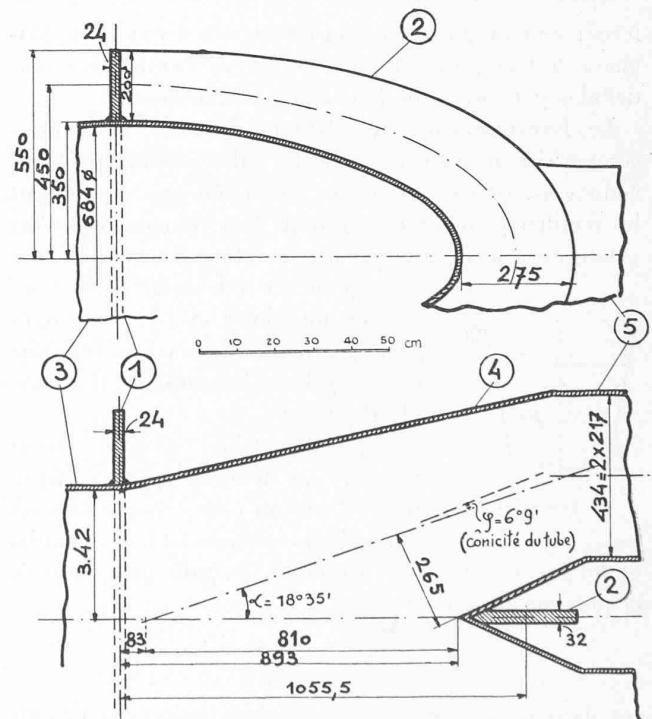


Fig. 4. — Coupe de la dérivation par des plans principaux. Les cotes reportées ci-dessus ont été utilisées pour les calculs.

Légende :

1. Bride circulaire. — 2. Bride elliptique. — 3. Tube cylindrique, diam. 684 mm. — 4. Tube conique. — 5. Tube cylindrique, diam. 434 mm. — Epaisseur des tôles : 8 mm.

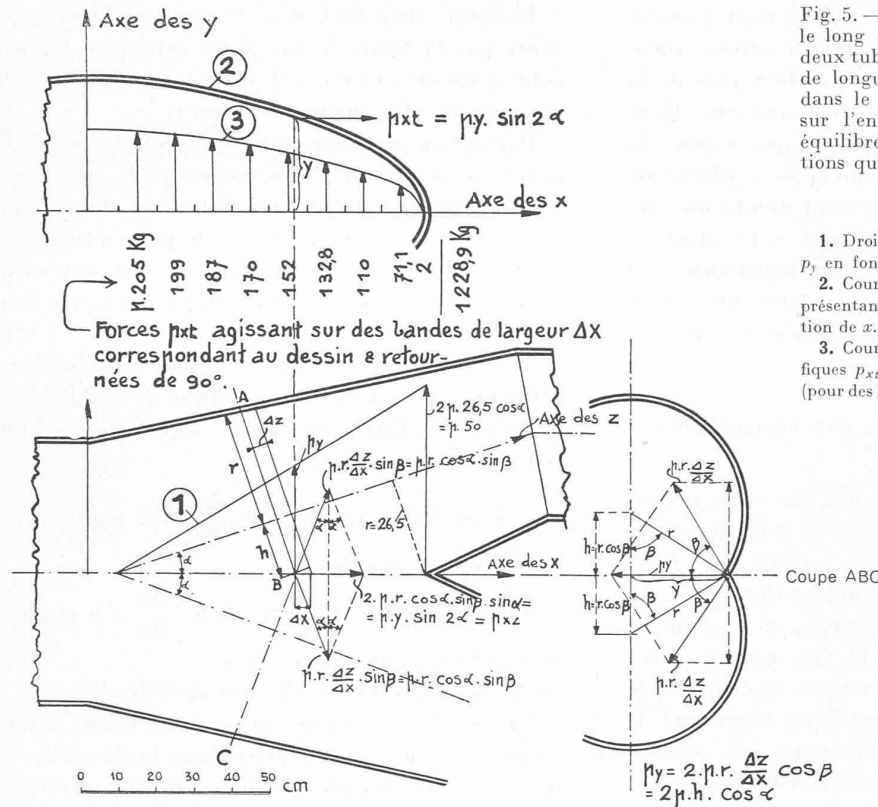


Fig. 5. — Dynamique des forces agissant le long de la courbe d'intersection des deux tubes coniques, rapportées à l'unité de longueur  $x$ . Les flèches sont dirigées dans le sens où les forces doivent agir sur l'enveloppe pour la maintenir en équilibre; les brides fourniront leurs réactions qui seront dirigées en sens inverse.

Légende :

1. Droite représentant la charge spécifique  $p_y$  en fonction de l'abscisse  $x$ .
2. Courbe d'intersection des deux tubes représentant la charge spécifique  $p_{xt}$  en fonction de  $x$ .
3. Courbe représentative des charges spécifiques  $p_{xt} = p \cdot y \cdot \sin 2\alpha \Delta x$  en fonction de  $x$  (pour des largeurs  $\Delta x$  correspondant au dessin).

Quant au terme  $\frac{\Delta z}{\Delta x} = \cos \alpha$  il provient du fait que les forces sont rapportées en fin de compte à l'unité de longueur de l'axe des  $x$ , tandis que les forces effectives sont définies par l'unité de longueur de l'axe des  $z$ .

Les forces dont il vient d'être question ont été calculées comme si l'on avait à faire à des tubes cylindriques. Or, comme on est en présence de tubes coniques, il faudrait les rectifier pour tenir compte de leur conicité. Dans ces conditions, il faudrait multiplier tous les termes par  $\frac{1}{\cos \varphi}$ , où  $\varphi$  est le demi angle d'ouverture du cône; or ce terme, dans le cas particulier, est si voisin de l'unité que son rôle est insignifiant; il a donc été négligé.

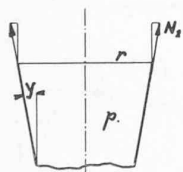


Fig. 6.

Les sollicitations axiales créent aussi un jeu de forces qui est à équilibrer. Dans un tube conique suivant fig. 6, la force axiale sollicitant l'unité de longueur de la coupe circulaire du tube provenant de la pression intérieure  $p$  est :

$$N_1 = \frac{p \cdot r}{\cos \varphi}$$

Or, dans le cas présent, le tube étant coupé par le plan d'intersection des deux tubes, toute la sollicitation axiale de cette région vient aboutir sur la bride elliptique à laquelle incombe la tâche de la transmettre où elle peut. Il est de rigueur de tenir compte de cet effet car l'objet a été essayé avec des fonds; et même si des joints de dilata-

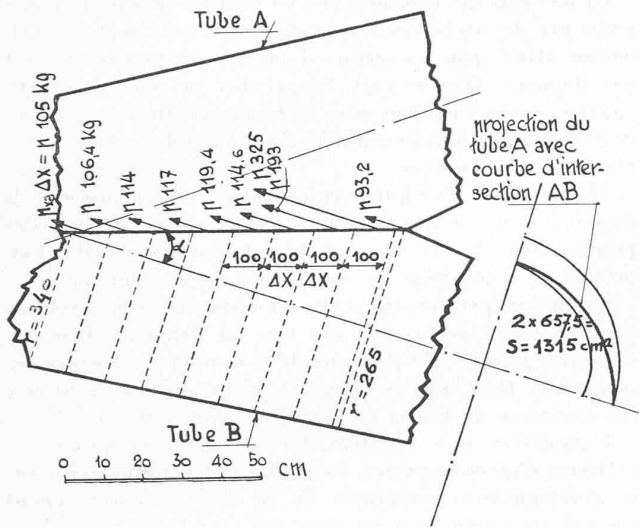
tion avaient été prévus pour éliminer certaines forces axiales, les tubes coniques n'en auraient pas été affranchis. Une telle disposition aurait conduit à un jeu de force très spécial, mais qui ne sera pas discuté ici.

La figure 7 donne le jeu des forces axiales le long de l'intersection des tubes coniques. N'entrons pas dans le détail de la manière dont ces forces ont été calculées et bornons-nous à rappeler que le total de ces forces (p. 1319, 6 kg) est égal à la section du tube limitée en plan par la courbe d'intersection des tubes et multipliée par la pression (p. 1315  $\text{cm}^2$ ).

Les forces axiales définies par la figure 5 et celles définies par la figure 7 agissent dans la même direction (mais pas dans le même sens) et sont à totaliser. On constate d'emblée que ces forces se font à peu près équilibre (p. 1228, 9 contre p. 1248, 5 kg.), ce qui s'explique très bien. Il aurait été intéressant au point de vue strictement théorique de calculer d'une manière beaucoup plus exacte les dites forces, afin de mettre en évidence la vraie valeur de leurs différences, mais ce travail n'a pas été fait étant donné qu'il est très laborieux et ne présente guère d'utilité pratique.

La figure 8 donne le rappel et la totalisation des deux systèmes de forces définis ci-dessus, ce qui fournit le régime des forces axiales agissant sur la bride elliptique.

Le régime de toutes les forces qu'il faut faire agir le long de la ligne d'intersection des deux tubes coniques, afin de rétablir l'équilibre du système assimilé à une



$p \cdot 105 \cdot \cos \alpha = p \cdot 99,6 \text{ kg}$	
106,4	» 101
114	» 108
117	» 110
119,4	» 113,2
146,6	» 137,3
193,0	» 183
325,0	» 308
93,2	» 88,4
$\Sigma = p \cdot 1319,6 \cdot \cos \alpha = p \cdot 1248,5 \text{ kg}$	

Fig. 7. — Forces axiales  $p_{xa} \Delta x$  dans les tubes coniques le long de leur ligne d'intersection. Les vecteurs ci-dessus représentent la force en kg qui doit agir sur chacune des petites bandes du réseau. Elles ont été calculées sur la base d'une épure graphique: les chiffres sont déjà doublés pour tenir compte des deux tronçons de tube. Toutes ces forces sont encore à multiplier par  $\cos \alpha$  pour avoir leur composante dans le plan de l'intersection des tubes.

membrane étant maintenant connu, il est naturel de demander que toutes ces forces soient prises par le système de brides qui a été prévu pour cela. Dans ces conditions, le système bride circulaire-elliptique est à considérer isolé et chargé par les forces qui viennent d'être définies, ainsi que le représente la figure 9.

La bride elliptique est chargée par les forces  $p_y \cdot \Delta x$  et  $(p_{xt} - p_{xa}) \Delta x = p_x \cdot \Delta x$  qui tendent à l'ouvrir, ce à quoi s'oppose d'une part la raideur de cette bride et d'autre part la réaction hyperstatique  $F$  provenant de la raideur de la bride circulaire; la liaison entre les deux brides peut être assimilée à une articulation, étant donné la faible raideur que présente la bride circulaire dans son plan. Ainsi le moment d'encastrement dans la région du raccord des deux brides peut-il être négligé.

La détermination de la force hyperstatique  $F$  se fait de la manière usuelle, à savoir comme suit :

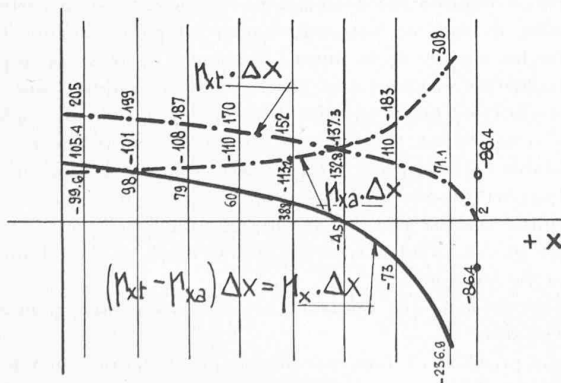


Fig. 8. — Forces axiales sollicitant la bride elliptique.

Légende :

- $p_{xt} \Delta x$ , forces définies par la figure 5 (obliquité des tubes).
- $p_{xa} \Delta x$ , forces définies par la figure 7 (forces axiales dans les tubes, multipliées par  $\cos \alpha$ ).
- $p_x \Delta x = (p_{xt} - p_{xa}) \Delta x$ , totalisation des forces définies ci-dessus, représentant la charge axiale de la bride elliptique.

La ligne élastique de la bride elliptique sous l'effet des forces  $p_y \cdot \Delta x$ ,  $p_x \cdot \Delta x$  et  $F$ , cette dernière, choisie arbitrairement, est déterminée. La ligne élastique pour la bride circulaire sous l'effet de la force  $F$  est également déterminée. Les deux flèches sont égalées, ce qui donne une équation définissant la vraie valeur de la force  $F$ .

Ceci fait, le régime des contraintes de tout le système peut être calculé puisque toutes les forces en jeu sont connues.

(A suivre.)

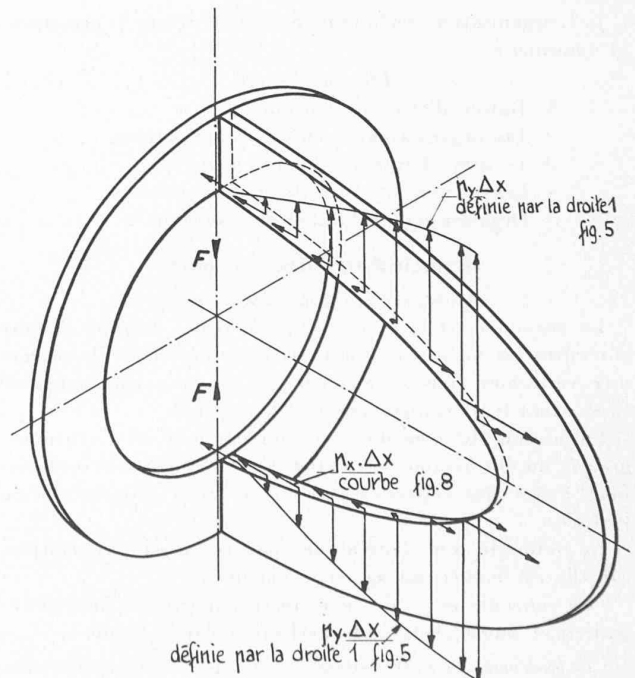


Fig. 9. — Brides circulaire et elliptique séparées des tubes, avec indication du régime des forces qui doit lui être appliqué pour maintenir les tôles des tubes en équilibre.