

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Détermination des trajectoires des contraintes principales dans les constructions rivées et soudées

Autor: Kayser, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-3080>

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: 15.02.2026

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

V 4

Détermination des trajectoires des contraintes principales dans les constructions rivées et soudées.

Darstellung der Hauptspannungslinien an genieteten und geschweißten Konstruktionen.

The Determination of Lines of Principal Stress in Riveted and Welded Structures.

Dr. Ing. e.h. H. Kayser,

Professor an der Technischen Hochschule, Vorstand des Ingenieurlaboratoriums
der Techn. Hochschule Darmstadt.

Le développement des constructions, l'augmentation de la portée des ponts et l'utilisation plus poussée des matériaux avec une sécurité cependant suffisante exigent un calcul statique qui tienne aussi exactement compte que possible des contraintes effectives dans l'ouvrage. Jusqu'à présent on a introduit dans le calcul des simplifications importantes. L'état de tension suivant un axe, très simple au point de vue mathématique, formait la base de toutes les investigations statiques. Cette hypothèse n'est satisfait que dans des cas très rares; en général on se trouve en présence d'états de tension suivant deux ou trois axes. Dans les sections situées dans des joints ou des assemblages, dans les angles des cadres et les éléments du même genre il est nécessaire d'admettre, dans la construction métallique, au moins, un état de tension suivant deux axes si l'on veut tenir compte *avec exactitude* des efforts normaux et de cisaillement.

La détermination mathématique des efforts, basée sur cette hypothèse, est compliquée par suite du grand nombre de conditions aux appuis. Dans la plupart des cas, cette méthode ne permet pas d'obtenir une concordance satisfaisante entre les contraintes calculées et les efforts réels, tout spécialement lorsque l'on ne se trouve pas en présence de champs simples de tension. C'est pourquoi il nous est paru très utile *de déterminer par des essais les champs de tension et la grandeur des efforts dans certaines sections spécialement intéressantes*. La connaissance exacte de la direction et de la grandeur de la contrainte permettra vraisemblablement de développer pour un grand nombre de cas pratiques des méthodes de calcul simples, d'une exactitude suffisante et dont les résultats concordent bien avec la pratique.

Différentes méthodes permettent d'exécuter des essais pour la détermination des efforts dans un état de tension suivant deux axes.

D'après une ancienne méthode, on mesure suivant différentes directions les allongements dans les angles d'un réseau situé dans le plan de tension.¹ On peut

¹ cf. Wyss: «Kraftfelder in festen elastischen Körpern.»

calculer à partir de là la grandeur et la direction des contraintes principales et l'on peut dessiner les trajectoires de ces contraintes.

Au laboratoire de l'Ecole Polytechnique de Darmstadt on a déterminé les trajectoires des contraintes principales à l'aide d'une laque fissurable que l'on étendait sur les pièces à étudier.²

Lors de la mise en charge d'une éprouvette ainsi préparée, la laque se fendille perpendiculairement à la direction des plus grands allongements et l'on obtient un système de fissures qui correspond à *un* système de trajectoires des contraintes principales. Il est possible de dessiner dans ce champ de tension un *deuxième* système grâce au fait connu que les deux systèmes de trajectoires doivent se couper à 90°. Lorsque l'on connaît les trajectoires des contraintes principales on mesure les allongements en quelques points intéressants dans la direction des fissures et l'on calcule en ces points la grandeur des contraintes principales.³

Le schéma des trajectoires de contraintes principales donne un aperçu de la déformation et de la répartition des tensions dans une éprouvette ou un élément de construction. L'allure et la forme des fissures permettent déjà, dans bien des cas, de tirer des conclusions importantes. Une répartition fortement irrégulière des trajectoires de contraintes principales montre, indépendamment des mesures, la position des points fortement sollicités et facilite le choix des sections dans lesquelles il faut effectuer des mesures. Une nouvelle détermination exacte des efforts complète le schéma des tensions acquis à l'aide des trajectoires des contraintes principales. Cette connaissance nous permet d'adopter les hypothèses nécessaires à un calcul exact.

La laque possède encore une autre propriété, elle montre très tôt les phénomènes d'écoulement par de petits écaillages, ce qui fournit un bon aperçu du comportement plastique de la pièce étudiée. Déjà pour la charge utile calculée d'après les méthodes usuelles on peut trouver quelques zones déformées plastiquement dans une faible mesure et qu'il serait impossible de découvrir sans la méthode dont nous parlons. Pour un accroissement de la charge on peut distinguer très nettement la propagation de cet écoulement. La représentation des trajectoires de contraintes principales peut s'effectuer de la même façon sur des éléments plans ou spatiaux de grandes dimensions lorsque les conditions d'essai peuvent être maintenues. Le point de départ du développement de nouvelles méthodes de calcul est ainsi l'essai effectué sur l'ouvrage lui-même ou dans certains cas sur un modèle à échelle réduite et cette étude peut se faire sur le matériau dont sera exécuté l'ouvrage lui-même.

Dans ce qui suit, nous parlerons des trajectoires de contraintes principales déterminées pour une série d'éléments de construction différents sous la charge d'essai. La fig. 1 montre ces systèmes de trajectoires pour une simple barre soumise à une traction excentrée. On voit que l'on a étudié le joint soudé bout à bout puis le joint soudé bout à bout avec couvre-joint fixé par des soudures frontales et pour terminer le joint soudé bout à bout avec couvre-joint vertical fixé par des soudures latérales.

Pour toutes les éprouvettes on a obtenu des champs de tension relativement simples. Pour la première de ces barres, avec simple joint bout à bout, les fissures

² cf. Bautechnik 1936, fasc. 23.

³ cf. Méthode des courbes d'allongement de la Maison Maybach.

étaient *perpendiculaires* à l'axe de la barre; il était facile de les trouver en admettant à peu près un état de tension suivant un axe. La deuxième éprouvette montre déjà clairement l'influence du renforcement ainsi qu'on peut le voir d'après le passage des lignes dans le couvre-joint. L'allure des trajectoires de contraintes principales sur le couvre-joint lui-même est des plus intéressantes. Aux environs de la soudure frontale, l'allure de ces lignes est très irrégulière. Toutes les lignes convergent vers les coins de la soudure frontale tandis que le milieu est déchargé. En outre, une ligne d'écoulement en arc s'est formée dans la tôle devant la soudure, ce qui permet de conclure que les tensions sont très élevées

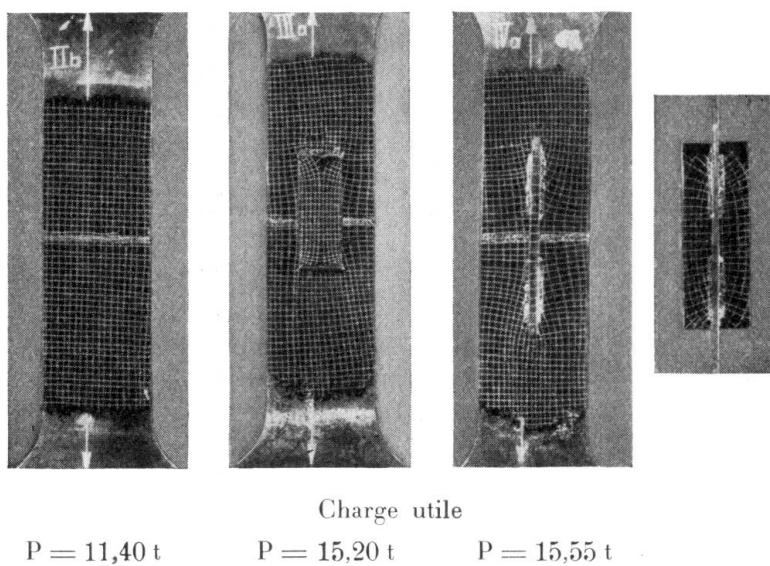


Fig. 1.

Types de joints. Trajectoires des contraintes sous l'effet de la charge utile.

dans cette zone. Ce phénomène local d'écoulement sous la charge utile pourrait très bien être la cause de la faible résistance à la fatigue de ces assemblages dont la ligne de rupture par fatigue a une allure semblable.⁴ On obtient en principe le même résultat pour la troisième éprouvette de la fig. 1. Dans ce cas aussi et malgré l'éloignement de certaines parties de la barre, le couvre-joint participe régulièrement à la transmission des forces dans la section médiane, ainsi que les mesures d'allongements l'ont également prouvé. Ce couvre-joint était frontalement agrafé lors du soudage. Au cours de l'essai on a constaté aussi un écaillage de la laque à partir des agrafes, on le voit distinctement à la fig. 2 et c'est le signe que l'on a un écoulement sous la charge utile déjà. À la rupture de ces éprouvettes (fig. 3) les zones d'écoulement se sont propagées aux environs de la rupture. La barre jointe bout à bout présente une extension beaucoup plus grande de l'écoulement d'un côté que de l'autre, par suite de l'excentricité de la charge. Un fait caractéristique du dépassement de la limite d'écoulement par traction est l'apparition de lignes d'écaillage à 45° , lignes qui correspondent à la formation de surfaces de cession.

⁴ Dr. Ing. Kommerell: Observations sur les ouvrages exécutés en Allemagne, IIId 6, Publication Préliminaire du 2^e Congrès de l'A.I.P.C., Berlin-Munich 1936.

La fig. 4 montre l'allure des trajectoires des contraintes principales dans des pièces comprimées, assemblées suivant différentes méthodes.

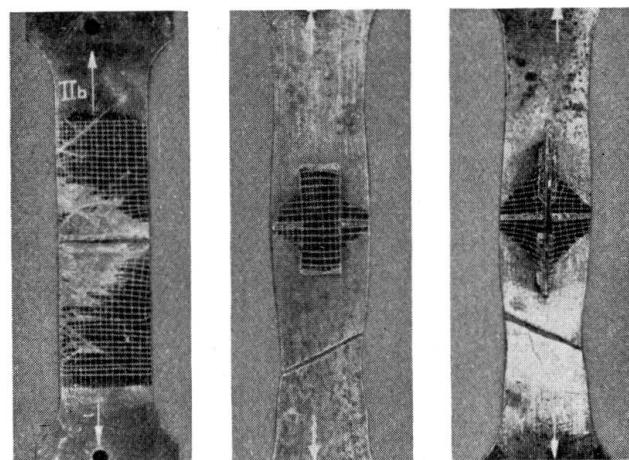
Dans une de ces éprouvettes, la semelle fut soudée à la poutre en I, dans une seconde elle fut rivée et dans la troisième elle fut rivée et soudée. Après la détermination des trajectoires de contraintes principales on a obtenu dans les semelles les champs de tension représentés à la fig. 4. La longueur des soudures de liaison est indiquée par des points sur la première et la troisième éprouvette.



Fig. 2.

Types de joints. Lignes d'écoulement formées dans la laque sous l'effet de la charge utile.

La soudure de liaison donne une transmission très irrégulière des forces dans la soudure. Toutes les lignes de tension convergent vers le début de la soudure où les contraintes doivent être élevées. La même barre rivée offre un champ de tension beaucoup plus régulier. Seul l'emploi simultané du rivetage et de la soudure produit des lignes de force d'allure vraiment régulière, ce qui permet de conclure que les deux moyens de liaison participent à la transmission des forces.



Charge de rupture

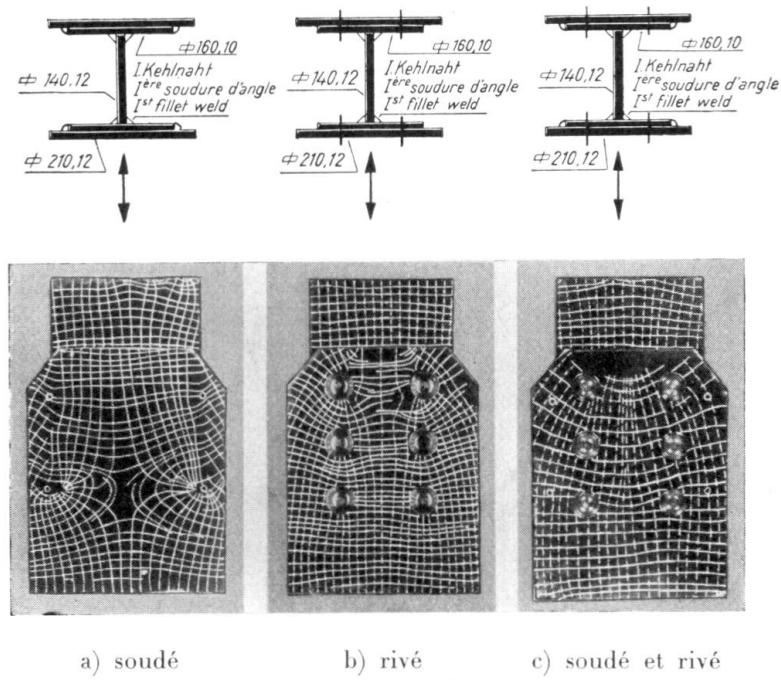
$$P_B = 46.80 \text{ t} \quad P_B = 66.78 \text{ t} \quad P_B = 67.53 \text{ t}$$

Fig. 3.

Types de joints. Rupture sous l'action d'une charge statique.

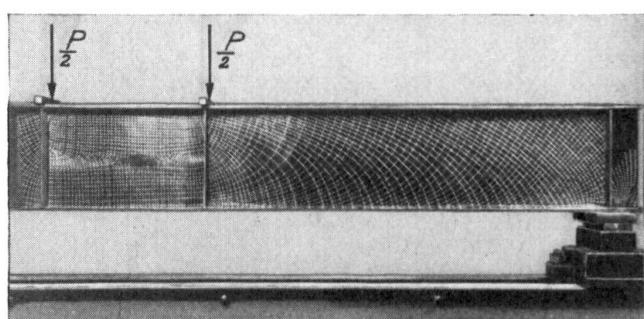
On peut représenter aussi l'allure des trajectoires sur une poutre ($h:l=1:10$) soumise à la flexion; on obtient ainsi la représentation connue. La fig. 5 montre le résultat de cet essai. La poutre était soumise, en son milieu, à deux charges concentrées, distantes de 500 mm; la portée de la poutre était de 3000 mm. Dans le panneau central, le moment est constant, sans effort tranchant, tandis que dans les deux panneaux d'extrémité les deux se combinent. La forme des lignes

représente avec exactitude ces relations statiques. Tandis que suivant le calcul l'effort de cisaillement est nul à mi-hauteur de l'âme dans le panneau central, il atteint un maximum dans le panneau extrême. Cela signifie que les lignes coupent l'axe de la poutre sous un angle de 45^0 dans les panneaux extrêmes. Entre les deux panneaux existe une zone de transition. Cette zone se présentera

Fig. 4.
Essai de compression II.

Trajectoires des contraintes dans des pièces soudées et combinées. Vue de devant.

vraisemblablement dans tous les cas où, statiquement, on a un passage brusque d'un mode de sollicitation à l'autre. Sous de fortes surcharges, des écaillages se sont formés dans la couche de laque du panneau central, ce qui montre un écoulement du matériau. Quoiqu'un moment constant agisse sur toute la longueur du panneau et que toutes les sections devraient être également sollicitées, certaines zones atteignent la limite d'écoulement plus tôt que d'autres (cf. fig. 6). Il est intéressant de constater que, dans la zone comprimée, l'écoulement s'effectue perpendiculairement à la compression tandis que dans la zone tendue il forme un angle de 45^0 avec la direction de la traction. On peut observer, en principe, le même fait dans les ailes comprimées et tendues du panneau central. Il semble donc que, dans ce cas, l'écoulement est

Fig. 5.
Trajectoires de contraintes observées sur une poutre soumise à la flexion, $h:l = 1:10$.

entamé dans la zone tendue par dépassement de la résistance au cisaillement tandis qu'il est armoré dans la zone comprimée d'une autre façon, probablement par dépassement de la résistance à la compression. La limite d'écoulement par cisaillement est donc déterminante pour la traction et la limite d'écoulement par compression pour la compression. Nous tenons à faire remarquer cependant que ces observations n'ont été faites jusqu'à présent que sur quelques éprouvettes et que le résultat acquis doit encore être contrôlé par de plus amples essais.

La fig. 7 montre, pour une poutre de faible portée ($h:l = 1:4$), la ruine de la résistance de l'âme par cisaillement. Les trajectoires de contraintes principales représentées à la fig. 7 ont été engendrées par la charge utile. On aperçoit déjà des zones d'écoulement pour la charge utile aux environs des charges et des appuis. Ces zones ont augmenté avec l'accroissement de la charge, sous forme de surfaces de glissement se propageant toujours plus loin dans le panneau extrême à partir des points de départ et formant un angle de 45° avec les directions des courbes de contraintes principales, ce qui montre clairement la détérioration de la poutre par cisaillement.

Nous avons étudié d'une façon très approfondie les tensions dans un portique. Dans les montants, les trajectoires des contraintes principales ont la forme attendue (fig. 8). Au cours de cet essai, nous avons attaché la plus grande importance à l'allure de ces lignes dans les angles. L'observation de l'angle révèle une dissymétrie des lignes par rapport à la diagonale. Dans un *angle de comparaison*, à section rectangulaire et chargé symétriquement, on obtient des courbes symétriques et régulières, comme le montre la fig. 9; ces courbes concordent avec celles obtenues optiquement par *Cardinal von Widdern*.⁵ Dans l'*angle du portique*, on constate un déplacement des courbes vers la traverse. La cause doit être cherchée dans les différents modes de charge des montants et de la traverse. Dans les premiers on a une force longitudinale et un moment, dans le second par contre un effort tranchant et un moment. Cette auscultation fut complétée par des mesures d'allongements effectuées dans une série de section et ces allongements furent transformés en efforts normaux et tranchants en admettant un état de tension suivant deux axes. L'interprétation des mesures, ainsi que l'exposé des connaissances acquises, se trouveront dans une publication qui paraîtra prochainement.

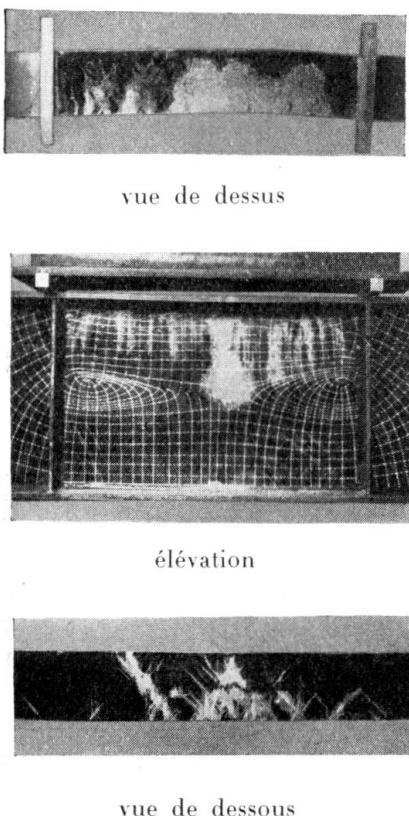


Fig. 6.

Zones d'écoulement au milieu d'une poutre soumise à la flexion.

un déplacement des courbes vers la traverse. La cause doit être cherchée dans les différents modes de charge des montants et de la traverse. Dans les premiers on a une force longitudinale et un moment, dans le second par contre un effort tranchant et un moment. Cette auscultation fut complétée par des mesures d'allongements effectuées dans une série de section et ces allongements furent transformés en efforts normaux et tranchants en admettant un état de tension suivant deux axes. L'interprétation des mesures, ainsi que l'exposé des connaissances acquises, se trouveront dans une publication qui paraîtra prochainement.

⁵ *Cardinal von Widdern*: Mitteilungen des Mech.-Techn. Laboratoriums der Technischen Hochschule München.

A titre de comparaison on a choisi deux types d'angles différents. Dans un cas on a appliqué dans l'angle une tôle plus forte que l'âme des montants tandis que dans l'autre cas on a appliqué des raidisseurs. La fig. 10 montre l'allure différente des courbes de contraintes principales. A l'extrémité des petits raidisseurs on observe une brisure des lignes, ce qui permet de supposer que les contraintes se répartissent sur toute la hauteur de l'âme et que l'angle intérieur est déchargé. Le développement des courbes sur l'aile d'intrados garantit un bon appui de la membrure intérieure de l'angle raidie, contrairement à ce que l'on a pour l'angle renforcé.

La fig. 11 représente les trajectoires des contraintes principales sur le côté intérieur de l'aile d'intrados, d'une part pour un angle renforcé et d'autre part pour un angle raidie.

En résumé, on peut affirmer que la connaissance des champs de tensions et des zones d'écoulement fournit un bon aperçu sur le comportement des pièces étudiées et de leurs éléments. La mensuration des champs de tension donne une idée de la grandeur et de la répartition des contraintes et tout spécialement de l'état de tension suivant deux axes. Les résultats de ces essais permettront

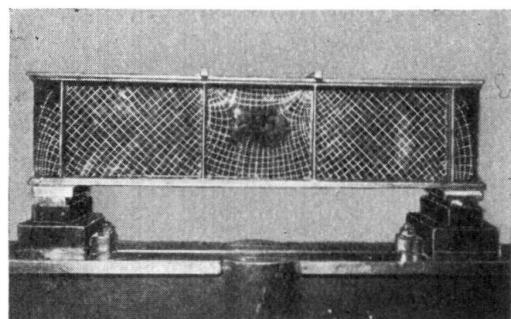


Fig. 7.

Trajectoires de contraintes observées sur une poutre soumise à la flexion, $h:l=1:4$.

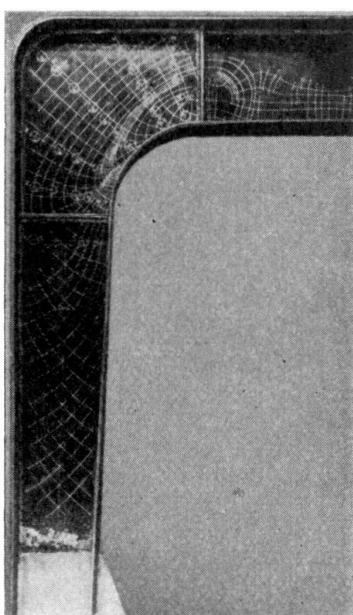


Fig. 8.

Trajectoires de contraintes observées sur un portique à section en I.

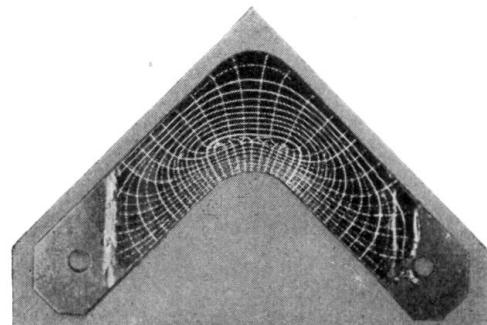
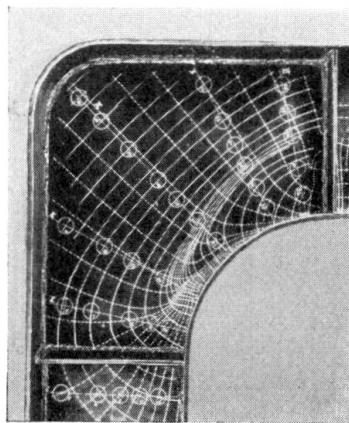


Fig. 9.

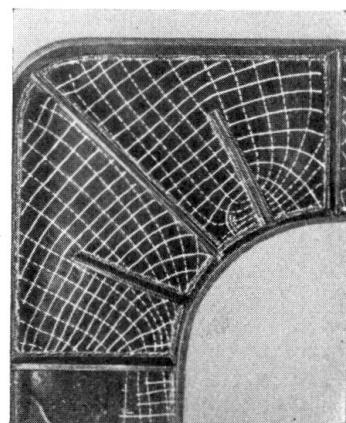
Trajectoires de contraintes observées sur un angle à section rectangulaire.

vraisemblablement l'adaptation à l'état de tension suivant deux axes de certaines méthodes de calcul existantes dont les résultats devront concorder avec les valeurs réelles. On pourra également contrôler l'exactitude des hypothèses fon-

damentales nécessaires à la détermination mathématique des différentes contraintes caractéristiques.



Angle a. Tôle d'angle renforcée.

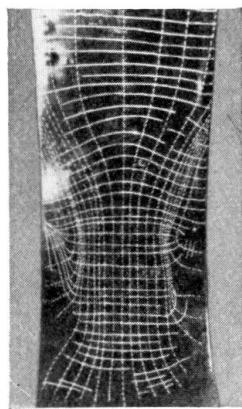


Angle b. Tôle d'angle non renforcée
mais avec raidisseurs.

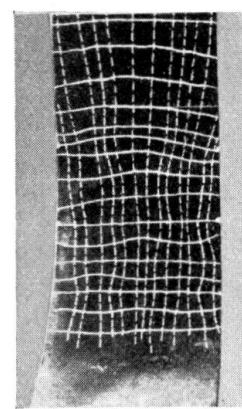
Fig. 10.

Allures des trajectoires dans les angles de deux cadres différents.

Le but de ces investigations doit toujours être la découverte de méthodes de calcul pratiques, c'est-à-dire simples et de validité générale, qui concordent bien



Angle a. Tôle d'angle renforcée.



Angle b. Tôle d'angle non renforcée
mais avec raidisseurs.

Fig. 11.

Allure des trajectoires observées sur l'aile intérieure d'un angle de portique.

avec les relations réelles et qui donnent au constructeur la possibilité de construire des ouvrages économiques mais offrant une sécurité suffisante.