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

Band: 9 (1972)

Rubrik: Theme IIIc: Thin-walled metal shells

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: 02.10.2025

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

IIIc

Coques métalliques

Stahlschalen

Metal Shells

P.A. LORIN
Paris

Dans le domaine des charpentes un des problèmes majeurs qui se pose à l'Ingénieur est celui de la couverture. Cette couverture est une grande surface à réaliser de telle sorte qu'elle constitue une protection totale contre le vent, la pluie, la neige. Elle doit donc résister à des systèmes de charges extérieures résultant de l'action du vent et de la neige, elle doit être en équilibre sous son poids propre et ces charges extérieures climatiques auxquelles peuvent s'ajouter des surcharges de service agissant en certains points en prenant appui sur des éléments supports laissant la plus grande liberté pour l'exploitation.

Des problèmes de même nature se posent dans d'autres domaines où il s'agit de réaliser des surfaces résistant à la pression de fluides (liquides ou gaz) notamment dans la construction navale ou dans la construction de réservoirs à liquides ou à gaz sous pression.

Aussi n'est-il pas étonnant que l'on trouve souvent quelque analogie dans ces réalisations d'applications diverses. La couverture en bois des vieilles cathédrales ne rappelle-t-elle pas d'ailleurs la construction d'une coque de navire, on les appelle des "nefs". Je citerai notamment en France la vieille église d'Honfleur, près de l'embouchure de la Seine, qui comporte deux nefs accolées, dont la couverture en bois, réalisée d'ailleurs par des marins, est tout à fait semblable à deux coques de navire.

Cependant, s'il faut insister sur cette analogie et bien signaler l'intérêt que nous avons à examiner comment les constructeurs de navires ou de réservoirs cherchent à résoudre leur problème, il est nécessaire également de

bien faire remarquer que le caractère particulier des couvertures tient en général à leurs grandes dimensions (avec points d'appui espacés) et à la valeur relativement faible des pressions supportées.

Ces données constituent l'originalité du problème à résoudre.

Il est intéressant en abordant ce problème, afin de déceler l'orientation des réalisations utilisant le métal, de reprendre très rapidement l'évolution suivie au cours des temps avec l'emploi de divers matériaux.

Un peu d'histoire.

Voyons comment les Architectes ont résolu le problème de la couverture à l'époque où l'on ne disposait guère, pour construire, que de la pierre et du bois.

La pierre ne résiste qu'à la compression et ne peut donc être soumise à une flexion, le bois au contraire travaille bien (dans le sens des fibres) et en traction et en compression, il peut donc aussi travailler en flexion.

Les solutions étaient-elles donc très différentes.

Avec le bois on a réalisé des structures porteuses, arcs ou fermes réticulés, sur lesquelles étaient posés les éléments de couverture. Ces derniers ne concouraient guère à la stabilité générale, ils transmettaient les pressions locales sur les éléments résistants. Ces constructions ont été les modèles d'où sont nés les types classiques de structures à ossature métallique.

Avec la pierre,au contraire, on a cherché un équilibre de membrane pure en compression, de même que pour les ponts on a réalisé un équilibre funiculaire en compression (les arcs).

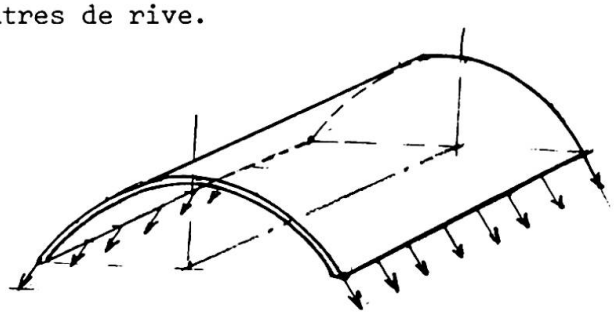
Il y a d'ailleurs une grande analogie entre l'équilibre funiculaire à une dimension et l'équilibre membranaire à deux dimensions.

Avec la pierre on a eu alors des chefs d'oeuvre d'équilibre membranaire en compression : les dômes sphériques (les merveilles de Sainte-Sophie à Istambul ou des palais et mosquées d'Ispahan en Iran), les voûtes (en particulier les voûtes gothiques).

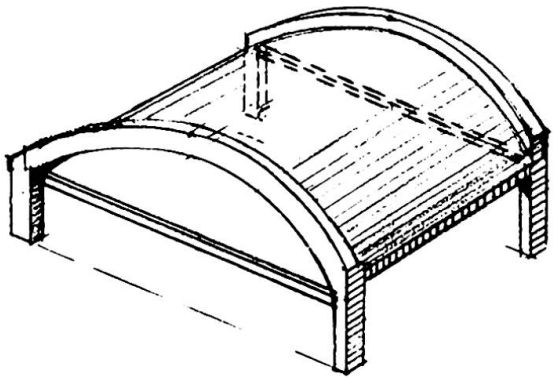
Ce qui est extrêmement intéressant c'est qu'avec une forte charge répartie donnant un équilibre membranaire en compression dans la forme initiale (dôme ou voûte en arc), l'équilibre reste réalisé avec de très faibles déformations lorsque viennent agir des surcharges non réparties uniformément mais d'intensité relativement faible par rapport au poids propre (c'est le cas du poids des véhicules sur un arc massif en maçonnerie, ou du vent sur un dôme ou une voûte en pierre).

Ceci nous amène à remarquer que la variation de forme est encore plus faible s'il s'agit d'un funiculaire en traction ou d'une membrane tendue. On sait - en effet, que les flèches d'une poutre sous des charges transversales sont fortement diminuées par l'effet d'un effort de traction dans la poutre. Si F est cette force de traction dans une poutre de portée ℓ, d'inertie I en un matériau de module E, les coefficients minorateurs de flèches s'expriment en fonction des cosinus et sinus hyperboliques de la quantité $\ell \sqrt{\frac{F}{E\,I}}$ (termes généralement appelés du second ordre, ou phénomène d'élasticité non linéaire). Il en est de même dans les membranes tendues, et il y a beaucoup à tirer partie de cette propriété pour les coques métalliques avec fortes tractions membranaires.

Les constructeurs en béton ont commencé par réaliser aussi des voûtes paraboliques constituant des membranes comprimées, les poussées de la voûte étant prises par des poutres de rive.



Mais finalement ces poutres de rive ont peu à peu été supprimées, les poussées de la membrane entre deux nervures au droit des poteaux ont été absorbées dans la voûte même. La membrane devient alors une coque.



Ainsi sont nés les voiles minces en béton dont l'avantage est que le matériau de couverture forme une toiture auto-portante.

En béton, il est facile de réaliser une surface quelconque à condition qu'elle soit réglée (coffrage), on a vu se développer de nombreux types de coques de cette nature.

Tout naturellement, les constructeurs métalliques ont cherché à trouver la solution de toitures auto-portantes. On doit alors réaliser une coque où le métal qui sera l'élément de couverture assurant la protection contre la neige et la pluie équilibrera directement, sans autres éléments structuraux, les actions du poids propre de la neige et du vent avec un nombre limité d'appuis donnant la plus grande liberté d'utilisation.

Mais il n'est pas question d'utiliser des coques épaisses pour avoir une solution économique. Avec les coques minces, des problèmes de stabilité se posent si l'on a des contraintes membranaires de compression. Par ailleurs, alors qu'il est aisé de réaliser des surfaces réglées quelconques en béton, pour le métal le problème devient très difficile à résoudre si la surface n'est pas développable.

Il est aisé de réaliser des coques de petites dimensions, et ceci explique le succès considérable des carrosseries d'automobiles en tôles minces embouties.

Les dimensions des couvertures de bâtiments ne permettent pas de telles solutions.

Les solutions possibles en métal - les problèmes posés.

Tout naturellement, les premières couvertures à ossature métallique utilisant un équilibre de membrane ont imité les réalisations en pierre : c'est-à-dire des dômes sphériques en compression.

Ainsi a été réalisée la première couverture utilisant le métal en France : il s'agit de la couverture de la halle aux blés, construite à Paris en 1811, aujourd'hui disparue.

Les éléments porteurs étaient des voussoirs en fonte.

On peut réaliser de telles couvertures en matérialisant des éléments structuraux suivant les cercles méridiens et parallèles de la sphère. Mais la peau, élément de couverture, est un élément porté, ce n'est pas une solution coque; pas plus que de nombreuses toitures coniques avec fermes rayonnantes suivant les génératrices.

On a hésité à aborder le problème pour des raisons théoriques : difficulté de résoudre le système complexe d'équations aux dérivées partielles avec les fonctions de rive à déterminer (analyse délicate de la rigidité des bords), difficulté concernant les problèmes d'instabilité pour les coques minces comprimées, difficulté de réalisation - surtout s'il s'agit de surfaces non développables.

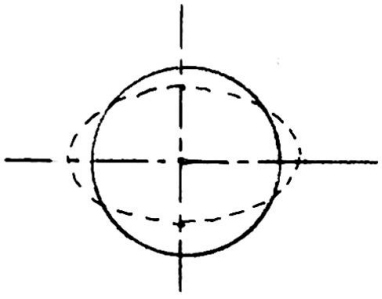
En ce qui concerne les difficultés théoriques de calcul des progrès très intéressants ont pu être faits d'une part par des recherches expérimentales dont la conséquence est de pouvoir introduire des hypothèses simplificatrices valables, d'autre part, grâce aux possibilités offertes par les ordinateurs dans le domaine de l'analyse numérique.

Un point très important à signaler pour les coques minces de couverture est celui du problème de l'instabilité sous des contraintes membranaires de compression ou de cisaillement.

Il faut souligner que ce problème d'instabilité comporte deux aspects : l'instabilité générale et l'instabilité locale.

Par analogie, nous prendrons pour illustrer ce point le cas d'une coque cylindrique vide plongée dans un liquide sous pression.

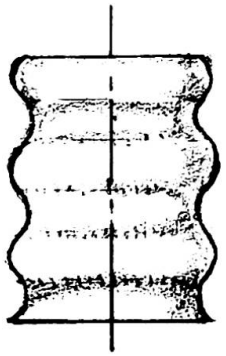
Un tel tube cylindrique peut présenter un flambement général par compression :

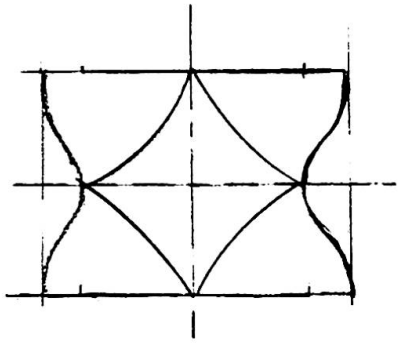


La contrainte critique pour un cylindre d'épaisseur e, de rayon r, est proportionnelle à $(\frac{e}{r})^2$.

On empêchera ce flambement général en disposant de distance en distance des raidisseurs ou des diaphragmes.

Mais on peut aussi avoir une instabilité locale de la paroi ou cloquage. Ce cloquage peut donner soit une déformation périodique (suivant l'abscisse sur l'axe du cylindre) de révolution, soit une déformation en facettes (loi périodique suivant l'abscisse sur l'axe du cylindre et suivant l'angle du centre) mais la contrainte critique est alors proportionnelle à $\frac{e}{r}$.





Comme $\frac{e}{r}$ est toujours beaucoup plus petit que l'unité, la contrainte de flambement local est, dans ce cas, toujours beaucoup plus grande que la contrainte de flambement général (proportionnelle à $(\frac{e}{r})^2$).

Encore faut-il remarquer que la coque peut souvent supporter des contraintes supérieures à la contrainte critique de flambement local.

D'ailleurs les fortes tensions membranaires sont toujours favorables : rappelons, à ce sujet, l'étude faite par Monsieur Massonnet sur le comportement post-critique des plaques planes (28ème volume des Mémoires A.I.P.C.).

Dans les coques minces métalliques on aura souvent avantage à chercher à développer des contraintes membranaires de traction.

On pourra utiliser des surfaces développables, telles que des cônes, soumises à de fortes précontraintes de traction : nous citerons plus loin le cas de couvertures circulaires avec toiture conique suspendue réalisée en Autriche.

On pourra utiliser des surfaces non développables (mais là se présentent de sérieuses difficultés de réalisation), en général des surfaces réglées hyperboloïdes de révolution ou paraboloïdes hyperboliques, telles que l'on ait, en tous points, des parties de la surface situées de part et d'autre du plan tangent.

La solution en hyperboloïde de révolution à une nappe avait séduit le regretté Ingénieur Lafaille (voir Congrès A.I.P.C. Berlin 1936).

Sur cette idée des grands hangars d'aviation avaient été construits en France, notamment à Toulouse, en 1935.

La couverture était constituée par une série de nappes d'hyperboloïde à axe horizontal, un tronçon d'hyperboloïde était limité par deux cercles situés symétriquement par rapport au cercle de gorge, l'ensemble était supporté par des fermes circulaires situées aux raccordements de deux nappes successives.

L'ensemble constituait une solution originale et de faible poids, la tôle de couverture étant une coque auto-portante. Mais la réalisation de ces grandes surfaces non développables a posé des problèmes considérables et s'est avérée très onéreuse.

On pouvait penser également aux paraboloïdes hyperboliques.

Si l'on prend un paraboloïde hyperbolique limité par un quadrilatère gauche (les rives sont quatre génératrices rectilignes) au voisinage du sommet, où le plan tangent est horizontal, on sait que cette surface comporte deux systèmes de paraboles égales de convexités contraires (en coupant la surface par des plans parallèles aux deux plans verticaux passant par les sommets opposés du quadrilatère gauche).

Or ces paraboles sont funiculaires des charges de densité constante en projection horizontale et voisines des funiculaires pour des surpressions intérieures ou extérieures. On peut ainsi réaliser une surface où les contraintes principales sous l'action du poids propre et du vent, sont dirigées suivant les paraboles.

Si les rives sont très rigides, cette membrane peut être en équilibre sans absorber d'efforts de cisaillement.

On peut alors réaliser une telle membrane par un filet de câbles paraboliques orthogonaux. Mieux encore, en donnant à ces câbles paraboliques de fortes précontraintes de traction, on peut faire en sorte que (vu la forte densité de charge uniforme correspondant à ces précontraintes de traction) pour des charges dissymétriques (vent ou neige donnant des charges non uniformes de

densité relativement faible) l'équilibre membranaire subsiste avec de très faibles déformations d'ensemble de la surface. Par ailleurs, aucun phénomène d'instabilité locale n'est à craindre. Mais une telle résille de câbles, constituant une membrane tendue sur son cadre, exige des rives ayant une très grande rigidité.

Une telle solution, employée par exemple pour la couverture du Pavillon de la France à l'exposition de Bruxelles 1958, résout parfaitement le difficile problème de la réalisation en construction métallique d'une surface non développable, mais elle exige une grosse dépense de matière dans les rives, ce n'est plus une coque.

Pour réaliser vraiment une coque suivant un paraboloïde hyperbolique, il faut utiliser des éléments de couverture en tôle, dont il faut étudier le formage et les assemblages. Pour ces assemblages, on bénéficie du fait que la surface comporte des génératrices rectilignes.

Il n'est pas douteux que l'on peut trouver des solutions élégantes pour réaliser des surfaces gauches en partant d'éléments plans formés à froid et assemblés entre eux par des moyens traditionnels suivant des surfaces de contact planes.

Je signalerai pour illustrer ce point, la remarquable réalisation d'une coque métallique sphérique que constitue le dôme géodésique Fuller. Il y a, aux Etats Unis d'Amérique, de très nombreuses réalisations de ces dômes en alliage léger (dômes Kaiser). En 1961, deux de ces dômes ont été réalisés en Europe, ils étaient les plus grands à l'époque, avec un diamètre de 60 m : l'un a été construit à Moscou, à l'occasion de l'exposition 1961 (il constituait alors le Pavillon américain), l'autre à la Porte de Versailles, à Paris, où il abrite le Palais des Sports. Une remarquable étude de la géométrie de la sphère a permis de réaliser toute cette surface en petits éléments bordés par des génératrices rectilignes constituant des losanges gauches. L'idée de base a été de considérer qu'il n'y a aucun point singulier sur une sphère, chaque point est un pôle. Ainsi les petits losanges gauches sont réunis par leurs pointes et par groupes de six sur divers pôles.

Il est impossible de constituer la surface sphérique avec des petits losanges gauches tous égaux, mais par une fine étude géométrique on montre qu'il est possible de constituer toute la surface avec un petit nombre

d'éléments, chacun reproduit en série. Qui plus est, il n'est pas nécessaire de former ces éléments gauches par emboutissage, il est possible de les obtenir par une série de plis rectilignes à la presse à plier classique des ateliers des constructeurs métalliques.

Enfin, l'assemblage de ces divers éléments dont les bords sont rectilignes se réalise par le procédé classique de rivets spéciaux posés à froid. Ainsi cette solution allie la facilité de fabrication sans nécessiter de gros investissements en machines spéciales, et la facilité de montage des structures traditionnelles en acier.

Ces résultats très intéressants montrent que malgré les difficultés présentées et sur le plan théorique et sur le plan pratique par la réalisation de grandes couvertures en coques métalliques, les Ingénieurs ont dans tous ces domaines fait de gros progrès qui incitent à poursuivre dans la voie de ces élégantes solutions.

Rapide tour d'horizon des résultats acquis dans le domaine théorique et le domaine pratique.

Il est très difficile de faire complètement le point de l'état actuel de la question, certes des lacunes considérables marqueront le rapide tour d'horizon que je vais faire, et je m'excuse auprès des chercheurs et des réalisateurs des oublis malheureux que je vais commettre, j'espère alors que ces oublis seront réparés par les contributions qu'ils voudront bien apporter au congrès de 1972.

Je ne prendrai d'ailleurs très rapidement que les recherches théoriques ou expérimentales ainsi que les réalisations les plus récentes. Pour avoir une vue plus complète de la question il est recommandé de lire les bulletins de l' "International associations for shell structures". On y trouvera, en particulier, de nombreuses études sur le calcul des coques à l'aide de programmes permettant l'emploi d'ordinateurs.

En ce qui concerne les apports récents sur le chapitre du calcul des coques, je signalerai :

- une étude de S.P. Banerjee parue au bulletin de l'I.A.S.S. n° 24 de mars 1965 : "Analyse numérique des coques à double courbure" : la solution des équations simultanées d'un élément de coque est assez difficile, il est donc usuel d'avoir

recours à une méthode itérative pour obtenir indirectement les résultats. L'auteur propose une méthode variante donnant une solution directe,

- une étude de A. Aass parue dans le même bulletin de l'I.A.S.S. "Effets des bords sur des coques coniques symétriques de révolution". L'auteur présente une méthode d'analyse de l'effet perturbateur d'un bord. Les combinaisons des fonctions de Kelvin et leurs dérivées sont données par des tables. On étudie également les "coques longues" où les conditions de bordure d'un bord n'affectent pas la distribution des contraintes de l'autre bord,

- une étude de Ernani Diaz, parue au bulletin de l'I.A.S.S. n° 23 de septembre 1965 "Equations de membrane pour les surfaces du second degré",

- une étude de M. Gellert, bulletin de l'I.A.S.S. n° 30 de juin 1967 "Solution particulière de l'étude d'un conoïde plat", on facilite le calcul en cherchant la solution générale par combinaison d'une composante particulière dépendant de la charge et d'une composante homogène,

- une étude de O.A. Andres dans le bulletin de l'I.A.S.S. n° 34 de juin 1968, traitant des "coques membranes ayant la forme d'une surface du 2ème degré avec contraintes de cisaillement pur",

- une étude de Tsuboi, dans le bulletin de l'I.A.S.S. n° 36 de décembre 1968 "analyse des efforts dans une coque P.H. supportée aux quatre coins". Analyse suivant la théorie de Vlasov par emploi d'une double série de Fourier. Le P.H. est supporté aux quatre coins , les réactions étant des forces concentrées normales à la surface moyenne du P.H. supposé aplati,

- une étude de W. Zerna dans le même bulletin de l'I.A.S.S. traite "une nouvelle formulation de la théorie des coques élastiques",

- une étude de P. Ballesteros dans le bulletin de l'I.A.S.S. n° 37 de mars 1969 traitant des "Structures à surface funiculaire - Calcul par ordinateur". L'auteur se propose de trouver la forme d'équilibre de la surface moyenne de la coque quand chargements et distribution des efforts résultants sont connus. Les équations différentielles correspondantes sont résolues par la méthode des différences finies. Plusieurs exemples sont présentés.

Après ce très rapide coup d'oeil sur les recherches théoriques, nous abordons le domaine théorique appuyé par l'expérimentation.

Dans cet ordre, je signalerai les très intéressantes études de L. Kollar parues dans les bulletins de l'I.A.S.S. n° 30 de juin 1967 et n° 39 de septembre 1969.

Ces études abordent un problème particulièrement intéressant pour les coques minces métalliques. Il s'agit du problème de l'instabilité élastique. On y voit que les charges dites critiques lorsqu'on les détermine par la théorie élastique linéaire n'ont pas toujours une réalité physique. On est ainsi amené à considérer un état qualifié de post-critique, ce qui montre bien que ce qualificatif de critique n'a pas réellement un sens physique, ainsi d'ailleurs que le même phénomène a été constaté pour les plaques planes qui peuvent avoir un comportement post-critique, ces charges critiques étant déterminées par la théorie élastique de Timoshenko (voir notamment l'étude de Ch. Massonnet déjà signalée, dans le 28ème volume des Mémoires A.I.P.C.).

Dans son étude, L. Kollar montre que selon les cas, configurations, modes de chargement, la capacité de charge, lorsque celle-ci a atteint le niveau dit critique, peut augmenter, ou rester constante sous déformations croissantes, ou diminuer. On peut ainsi discuter du degré de sécurité vis-à-vis de l'instabilité élastique.

Un développement théorique est donné sur une forme généralisée du diagramme de Southwell basé sur des essais sur modèles.

Une application de cette méthode est faite à l'occasion du projet de construction d'un Hall des Sports, à Budapest.

La couverture du hall de Budapest sera une coupole reposant sur trois appuis, ceux-ci sont en plan les sommets d'un triangle isocèle dont deux côtés mesurent 97,50m et le troisième 112,80m, le sommet de cette coupole étant à 17,40m au-dessus du niveau des trois appuis.

Toujours dans le domaine théorique établi sur des bases expérimentales, je signale la très intéressante étude présentée par Michele Capurso et Alfredo Gandolfi, publiée dans le n° 6, année 1969, de la revue Costruzioni metalliche sous le titre : "Determinazione sperimentale del carico di collasso di contenitori cilindrici nervati soggetti a pressione".

Il s'agit donc de la recherche des contraintes et déformations d'un tube

cylindrique muni de raidisseurs longitudinaux soumis à pression intérieure.

Les résultats expérimentaux tirés d'essais sur cinq modèles ont permis de contrôler, avec une très bonne approximation, les bases théoriques.

Une étude parue dans le n° 34 du bulletin de l'I.A.S.S. présentée par A. Glassman donne une méthode originale pour traiter un problème complexe d'une coque sous certains modes de chargement, en déterminant les paramètres intervenant dans les équations générales d'équilibre par un nombre réduit d'essais sur modèle.

J'aborderai maintenant les exemples de réalisations faisant ressortir différents aspects de conception, d'application très intéressante de la précontrainte de traction appliquée à certains éléments, et d'utilisation des propriétés remarquables des surfaces gauches, donc non développables, posant cependant a priori de grosses difficultés pour des coques métalliques. J'ai signalé déjà, sur ce dernier point, les essais remarquables exécutés en utilisant les hyperboloïdes de révolution et les P.H.

Je reviendrai tout d'abord à la réalisation des couvertures en hyperboloïde de révolutions dont de nombreux modèles ont été exécutés de 1935 à 1940, ces recherches auraient certainement gagné à être poursuivies.

Les hangars à couverture en tôle mince autoportantes en forme d'hyperboloïde de révolutions ont fait l'objet d'un remarquable article de Y. Guyon et J. Mesnager publié en mai-juin 1936 dans les annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1ère année, n° 3.

Il est assez étonnant de voir que Y. Guyon beaucoup plus connu dans le domaine du béton précontraint ait eu, en 1935, l'idée de ces coques métalliques dont 34 exemplaires de 70 x 66 m ont été construits, l'hyperboloïde de révolution étant réalisée par une tôle de 1,4 mm d'épaisseur.

Dans ce type de couverture on trouve en chaque point un méridien qui est une hyperbole concave vers le haut et un cercle parallèle concave vers le bas. Ainsi, que les charges soient dirigées vers le bas ou vers le haut, on trouve toujours des éléments tendus, c'est la même propriété qui est utilisée dans les P.H. réalisés par deux nappes de câbles paraboliques de convexité contraire.

Mais, dans le cas de l'hyperboloïde en tôle, il ne s'agit pas d'une

membrane tendue sur un cadre rigide (P.H. à câbles) mais bien d'une coque. Ainsi sous l'action des supressions intérieures les cercles parallèles sont tendus, mais par le fait de la compatibilité des déformations, les éléments considérés suivant les hyperboles méridiennes sont comprimés. Dans les réalisations les tôles ont été raidies suivant le tracé de ces méridiennes par des pannelettes à treillis (ce sont des éléments de raidissage et non des éléments porteurs). Y. Guyon avait imaginé une mise en précontrainte de traction de la tôle pour éviter ces raidisseurs, à l'exécution on a préféré prendre la solution avec raidisseurs. Le montage était réalisé à l'aide de bandes de tôle plane qui après levage et repos sur les fermes circulaires (tracées suivant des cercles parallèles) prenaient naturellement un équilibre en chaînette très voisine de l'hyperbole méridienne.

Y. Guyon eut ensuite l'idée d'étendre ce principe de couverture à la construction de hangars métalliques démontables. Deux hangars de ce type, l'un de 28 m, l'autre de 38 m de portée furent réalisés en 1936. Y. Guyon n'a malheureusement rédigé aucun article sur ces réalisations, il en parlé récemment au congrès de Madrid de l'I.A.S.S.

L'idée de base a été de réaliser l'hyperboloïde de révolution par un système réticulé dont les éléments sont des tubes métalliques résistant à la compression et des câbles tendus.

La couverture comporte deux hyperboloïdes de révolution à axe horizontal, les méridiennes hyperboliques concaves vers le haut les cercles parallèles concaves vers le bas (comme dans le cas des hangars fixes). Ces deux hyperboloïdes se coupent suivant un cercle parallèle où ils s'appuient sur une ferme circulaire réalisée par un système réticulé de sections triangulaires avec un entrait en câble tendu.

En chaque noeud du système réticulé constituant un hyperboloïde on trouve: une méridienne hyperbolique, un cercle parallèle, deux génératrices rectilignes.

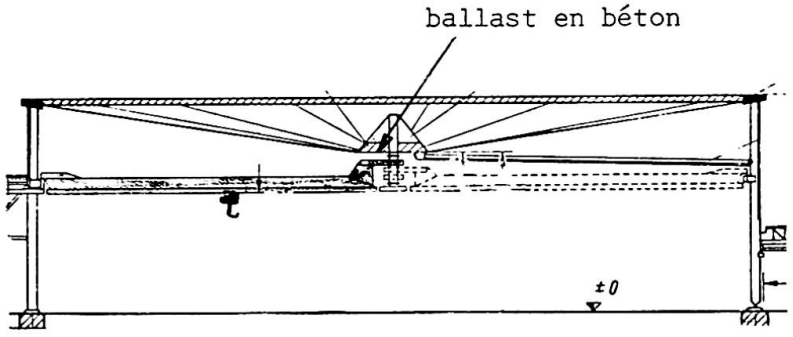
Dans le hangar de 28 m de portée, les génératrices rectilignes étaient matérialisées par des tubes, le méridien et le parallèle par des câbles. Dans le hangar de 38 m de portée on avait pris la solution inverse : méridien et parallèle en tubes, génératrices rectilignes en câbles.

Une force de direction quelconque appliquée à un noeud se décompose en trois composantes dont deux suivant les tubes et une composante de traction sur l'un des câbles, le deuxième câble détendu par la déformation n'intervenant pas. Mais il était possible de faire toujours intervenir les deux câbles en leur donnant une précontrainte de traction (à l'aide de tendeurs à lanterne).

Voici donc un exemple remarquable de coque précontrainte métallique.

Le hangar de 28 m pesait 11 tonnes en tout, soit 20 kg/m^2. Il était transporté sur deux camions et deux remorques et était monté en 6 heures par une équipe de 20 hommes. Le hangar de 38 m pesait 22 tonnes, transporté sur 3 camions et 3 remorques, il était monté en 9 heures avec une équipe de 30 hommes.

Parmi les réalisations très récentes, il faut signaler tout particulièrement la construction d'un nombre très important d'usines à plan circulaire dont la couverture est une coque conique en tôle mince prenant appui sur une poutre circulaire à la partie haute de la paroi externe circulaire, et dont le sommet est situé au centre à un niveau inférieur. Au sommet inférieur de cette toiture conique se trouve suspendu le pivot d'un portique de manutention dont l'autre extrémité roule sur une poutre circulaire.



Le plan de l'usine a été étudié pour la meilleure utilisation fonctionnelle avec desserte en tout point par manutention mécanique. Ce qui est remarquable dans

cette couverture en coque en tôle mince c'est la réalisation de la précontrainte de traction par la suspension du portique de manutention avec charge accrue par un ballastage en béton. Cette mise en précontrainte évite tout danger de flambement sous les effets du cisaillement dans la coque.

Sur ce système de couverture, on lira avec le plus grand intérêt l'étude du Professeur H. Beer publiée dans le n° 1 de janvier 1963 de la revue Der Stahlbau, sous le titre "Round hall with suspension cone-roof".

CONCLUSIONS EN VUE DU CONGRES DE 1972.

La réalisation de la couverture des grands bâtiments par une tôle autoportante formant coque constitue une évolution dans le sens de la meilleure utilisation de la matière.

L'idée est de renoncer au principe traditionnel d'une couverture passive portée par une structure classique, de même que dans la construction des ponts on tend à incorporer la dalle de chaussée dans l'ensemble du solide élastique qui transmet les charges aux appuis (dalle participante, ou dalle métallique orthotrope).

Le problème spécifique de la coque métallique tient au fait qu'avec des tôles minces très bien adaptées aux grosses contraintes de traction on peut craindre des phénomènes d'instabilité en compression et en cisaillement, et au fait que la réalisation de certaines surfaces, notamment les surfaces gauches, présente des difficultés d'ordre pratique.

Il est très souhaitable que des communications soient présentées en vue de la discussion qui sera faite au congrès de 1972, notamment sur les sujets suivants, sans que cette liste soit exhaustive :

- recherches théoriques générales ou particulières à certaines surfaces,

- problèmes d'instabilité,

- intérêt de la mise en précontrainte de traction,

- recherches expérimentales permettant soit de justifier des théories, soit de fournir la valeur de certains paramètres entrant dans les calculs, soit de

valider l'assimilation de la coque à un modèle plus simple facilement accessible à l'analyse numérique,

- principes et moyens de mise en oeuvre de certaines réalisations,

Des contributions ayant également trait à d'autres applications des coques, notamment dans le domaine des réservoirs à liquide ou gaz sous pression, seraient très intéressantes car elles pourraient dégager certains aspects favorables utilisables dans le domaine des couvertures.

On remarquera, en outre, que le thème IIIc n'est pas limité à l'acier mais inclut d'autres matériaux comme les métaux légers et le bois.

D'avance je remercie ceux qui voudront bien ainsi participer aux travaux du Congrès.

BIBLIOGRAPHIE

A. Aass — Bulletin I.A.S.S. n° 21, de mars 1965, "Analyse numérique des coques à double courbure".

O.A. Andres — Bulletin I.A.S.S. n° 34 de juin 1968 "Coques membranes ayant la forme d'une surface du 2ème degré avec contraintes de cisaillement pur".

P. Ballesteros — Bulletin I.A.S.S. n° 37, de mars 1969, "Structures à surface funiculaire - calcul par ordinateur".

S.P. Banerjee — Bulletin I.A.S.S. n° 21 de mars 1965, "Analyse numérique des coques à double courbure".

H. Beer — Der Stahlbau, n° 1 de janvier 1963, "Round-hall with suspension cone-roof".

Michele Capurso — Costruzioni Metalliche, n° 6, année 1969 "Determinazione sperimentale del carico di collasso di contenitori cilindrici nervati soggetti a pressione".

Ernani Diaz — Bulletin I.A.S.S. n° 23, de septembre 1965 "Equations de membrane pour les surfaces du second degré".

Alfredo Gandolfi — Costruzioni metalliche n° 6, année 1969 "Determinazione sperimentale del carico di collasso di contenitori cilindrici nervati soggetti a pressione".

A.A. Gellest	Bulletin I.A.S.S. n° 30 de juin 1967 "Solution particulière à l'étude d'un conoïde plat".
A. Glassman	Bulletin I.A.S.S. n° 34 de juin 1968.
Y. Guyon	Annales de l'I.T.B.T.P. Paris, 1ère année, n° 3, mai-juin 1936 "Construction de hangars d'aviation métalliques à toiture autoportante de 70 m d'ouverture".
L. Kollar	Bulletin I.A.S.S. n° 30, juin 1967, "Comportement post-critique des coques en arc - essais sur modèle".
L. Kollar	Bulletin I.A.S.S. n° 39, septembre 1969, "Comportement des coques dans le domaine post-critique".
B. Lafaille	Congrès Berlin 1936.
Ch. Massonnet	28ème volume Memoires A.I.P.C. "Etude du comportement post-critique des plaques planes".
J. Mesnager	Annales de l'I.T.B.T.P. Paris, 1ère année, n° 3, mai-juin 1936 "Construction de hangars d'aviation métalliques à toiture autoportante de 70 m d'ouverture".
Tsuboi	Bulletin I.A.S.S. n° 36 de décembre 1968 "Analyse des efforts dans une coque P.H. supportée aux 4 coins".
W. Zerna	Bulletin I.A.S.S. n° 36 de décembre 1968 "Une nouvelle formulation de la théorie des coques élastiques".

Résumé

Le problème particulier relatif aux couvertures coques en métal consiste en la réalisation de surfaces de grandes dimensions en tôle mince avec points d'appui très espacés d'où:

-importance des problèmes d'instabilité globale et locale - nécessité de prendre en compte les termes du second ordre (élasticité non linéaire) - intérêt des mises en précontrainte de traction,

-difficultés de réalisations pratiques surtout s'il s'agit de surfaces non développables.

On souhaite des contributions dans les domaines théorique, expérimental et pratique. Le thème ne se limite pas à l'emploi de l'acier, on songe à d'autres matériaux comme les métaux légers et le bois.

On peut aussi sortir du domaine des couvertures. Des enseignements intéressants sont à tirer de problèmes de coques comme de ceux des réservoirs.

Zusammenfassung

Das Problem der Schalendächer aus Stahl betrifft die Herstellung grosser und sehr weitgespannter Flächentragwerke aus dünnem Blech. Daher:

-Wichtigkeit der örtlichen wowie der Gesamtstabilität. Notwendigkeit der Berücksichtigung der Grössen zweiter Ordnung (nichtlineare Elastizität). Vorteile der Zugvorspannung.

-Konstruktive Schwierigkeiten, insbesondere für nichtabwickelbare Flächen.

Beiträge aus den Gebiete der Theorie, der Versuche und der Praxis sind erwünscht. Das Thema ist nicht auf Stahl beschränkt, weitere Werkstoffe wie Leichtmetall oder Holz kommen ebenfalls in Betracht.

Auch ausserhalb des Gebietes der Schalendächer wie z.B. der Behälter können interessante Schlüsse gezogen werden.

Summary

Particular problems concerning metal shell roofs consist to carry out surfaces of large dimensions, made of thin sheet-metal, with supports widely spaced, therefore:

-Importance of total and local buckling. Necessity to take into consideration second order terms (non-linear elasticity). Interest of tension prestressed elements.

-Difficulties about practical applications mainly with non developable surfaces.

Contributions are solicited on theoretical, experimental and practical fields. The scope of investigations is not limited to the use of steel but may be extended to other materials as light metals and wood.

Interesting informations may also be drawn from other fields of shell structures, as tanks, for example.