

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 115 (1989)
Heft: 3

Artikel: La coupole de l'antiquité à nos jours: en marge d'un symposium international
Autor: Parvu, Aurèle
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76884>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

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

La coupole de l'Antiquité à nos jours

En marge d'un symposium international



Fig. 1. – «Süleymaniye», la mosquée de Soliman le Magnifique.

Il y a 400 ans, Mimar Sinan, l'illustre bâtisseur du temps de gloire de l'Empire ottoman, s'éteignait à Istanbul, finissant une vie presque centenaire et nous laissant une œuvre impérissable,

PAR AURÈLE PARVU, GENÈVE

témoignage à la fois de son génie créateur et de la splendeur atteinte par l'Empire au sommet de sa puissance.

Résumé

Pour célébrer le 400^e anniversaire de la mort du fameux architecte de l'Empire ottoman, Mimar Sinan (1490?-1588), IASS – International Association for Shell and Spatial Structure – et MSU – Mimar Sinan Üniversitesi –, l'Université d'Istanbul, ont organisé un symposium international «Domes from Antiquity to the Present», à Istanbul, du 30 mai au 3 juin 1988.

Le symposium a réuni une centaine de spécialistes de 18 pays, qui ont apporté leurs contributions pour une meilleure compréhension du dôme en tant que structure de construction.

Les célèbres dômes historiques, en maçonnerie – Panthéon, Sainte-Sophie ou Selimiye –, ainsi que tous les aspects de conception, projet et exécution pour les différents types de dômes modernes – en coque, réticulaire, membrane pneumatique ou sur câbles – ont été traités.

L'auteur se propose par cet article d'informer les personnes intéressées sur cette prestigieuse rencontre; il essaie de déceler les tendances actuelles de la coupole comme forme de construction et s'interroge sur ses possibilités en Suisse.

Pour célébrer cet anniversaire, l'IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) et MSU-Mimar Sinan Üniversitesi, l'Université d'Istanbul, ont organisé le symposium «Domes from Antiquity to the Present» qui a eu lieu, précisément à Istanbul, du 30 mai au 3 juin 1988, sous les auspices de l'Unesco, qui l'a partiellement «sponsorisé».

Tant le sujet que le lieu du symposium ont été merveilleusement choisis. Le dôme est le type de construction pratiqué avec prédilection par Sinan: des quelque 360 œuvres en tout genre (mosquées, écoles, hôpitaux, etc.) dont il est l'auteur, plus de 200 sont prévues avec des coupoles. Certaines d'entre elles, telles la «Süleymaniye» à Istanbul (fig. 1) – la mosquée du sultan

Abstract

Related to the commemoration of the famous Turkish architect Mimar Sinan (1490?-1588) on the 400th anniversary of his death, IASS – International Association for Shell and Spatial Structures – with collaboration of Mimar Sinan Üniversitesi, have organised the International Symposium on Domes from Antiquity to the Present in Istanbul, between May 30th and June 3rd, 1988. About 100 experts from 18 different countries participated and contributed, by their lectures, to a better comprehension of the dome as a structural form.

The famous historic domes in masonry – Pantheon, St. Sophie or Selimiye – as well as the various aspects of design, analysis and construction of all kinds of modern domes, such as Reinforced Concrete Shells, Reticulated, Cable-Supported Domes and Air-Supported Membranes were presented and discussed.

The purpose of the paper is to inform the interested people about this important meeting, try to reveal the present trends of the dome as a structural solution and explore its possibilities in Switzerland.

Soliman le Magnifique – ou la «Selimiye» à Edirne (fig. 2), sont célèbres. Sinan a réalisé cette œuvre grandiose en sa qualité d'architecte en chef de l'Empire sous les règnes de trois sultans, parmi lesquels il faut rappeler Soliman le Magnifique, symbole de la prospérité et de la puissance ottomanes. Istanbul n'est pas seulement le lieu où Sinan a créé une partie de ces œuvres remarquables et où il est mort, mais c'est également l'ancienne capitale de l'Empire romain d'Orient, d'où rayonne sur le monde chrétien l'église Sainte-Sophie (fig. 3) – chef-d'œuvre



Fig. 2. – «Selimiye», chef-d'œuvre de Sinan.



Fig. 3. – Sainte-Sophie.

de l'architecture byzantine – avec son dôme, le premier de grandes dimensions. Les innombrables coupoles parsemées des deux côtés du Bosphore, datant de périodes si différentes, et le riche passé historique dont elles témoignent ont fait de la ville d'Istanbul le meilleur cadre pour un symposium consacré à une rétrospective du dôme.

Le symposium a d'ailleurs connu un réel succès. Il a réuni une centaine de spécialistes venus véritablement de tous les coins de la planète: Japon, Etats-Unis, Inde, Canada, Australie, Afrique du Sud, Chine, Israël, Thaïlande, nombreux pays d'Europe et, bien sûr, Turquie, le pays hôte. Mieux que cela, parmi les participants, à côté des ingénieurs des structures et des architectes, des historiens et des archéologues étaient également présents, faisant de ce symposium un lieu de rencontre non seulement international, mais aussi interdisciplinaire. Les aspects les plus divers, historico-architecturaux, de la conception, de l'analyse structurale, du calcul statique et de la stabilité, de construction et d'économie, ont été traités.

Pour l'actualité de la coupole, il n'est pas sans intérêt de remarquer que les pays les plus avancés techniquement, le Japon et les Etats-Unis, étaient aussi ceux représentés par le plus grand nombre de participants. Sur un total de 97 participants très exactement, représentant 18 pays, 26 venaient du Japon et 14 des Etats-Unis. Il faut dire qu'un nombre impressionnant de superbes coupoles réalisées pour abriter des activités diverses – stades, piscines, patinoires, palais d'exposition, pavillons commerciaux, auditoriums, musées, jardins de plantes exotiques, planétariums, etc. – ont été construites au cours des deux dernières décennies dans ces deux pays.

La Suisse n'a présenté ni communication au symposium, ni participant – à part l'auteur de cet article.

Les contributions présentées, au nombre de 73, ont été groupées sous

les titres génériques Rapports de synthèse [3]¹, Le dôme dans l'œuvre de Sinan [3], Le dôme antique, romain et byzantin [8], Le dôme islamique [7], Le dôme romain et Renaissance [6], Le dôme baroque et autres types [9], Le dôme avec structure en coque [13], Le dôme réticulaire [13], Le dôme membrane [11]. Les communications ont été publiées intégralement, à deux exceptions près, par les soins de Mimar Sinan Üniversitesi, dans un volume de presque 1000 pages [1].

Anciens dômes sous la loupe de la science et de la technique modernes

En se reportant aux sujets traités, on remarque d'emblée le grand nombre de contributions qui portent sur des dômes anciens.

A première vue, cela peut s'expliquer par la participation active des historiens, des archéologues et même des architectes qui, de par la nature même de leur profession, ont analysé les constructions en dômes comme des éléments de civilisations et cultures antérieures. D'autre part, l'accent mis sur les œuvres de Sinan dans ce symposium était logique, ce qui fait que le dôme au XVI^e siècle au Proche-Orient a encore étoffé la partie consacrée aux coupoles anciennes.

Il nous est toutefois apparu que les investigations et les études effectuées par les ingénieurs et même par les architectes sur les coupoles anciennes avaient un aspect beaucoup plus technique qu'on n'aurait pu le croire de prime abord. Des méthodes et des moyens modernes de calcul ont été utilisés pour analyser tous les dômes antiques, romains, byzantins ou autres, ainsi que les dômes érigés par Sinan.

Ainsi deux chercheurs américains [2], le professeur R. Mark de Princeton University et l'ingénieur A. Westagard de Cambridge Acoustical Associates, ont communiqué les premiers résultats d'une étude en cours sur la

coupole de Sainte-Sophie, utilisant notamment la méthode des éléments finis pour modeler, non pas la coupole d'aujourd'hui, qui est le résultat de plusieurs reconstructions, mais sa forme originelle, ce qui leur a permis d'analyser l'élaboration de la coupole dans son évolution. Ils ont modelé également, toujours par éléments finis, la célèbre coupole du Panthéon de Rome, réalisée avant Sainte-Sophie, pour des études comparatives avec cette dernière. Les résultats de ces minutieuses recherches corrigent voire contredisent les interprétations faites jusqu'à présent.

Il semble que les connaissances exceptionnelles, scientifiques, techniques et d'ingénierie dont les bâtisseurs de Sainte-Sophie ont été souvent crédités ressortissent davantage à l'enthousiasme de ceux qui ont été impressionnés par le sublime intérieur de la bâtisse qu'à la réalité.

Cette réalité serait, pour les chercheurs d'aujourd'hui, que seules une géométrie recherchée et l'expérience acquise dans des constructions antérieures ont orienté le créateur de Sainte-Sophie. D'autres contributions [4] ont en outre mis en évidence les qualités de géomètres d'Anthémios et d'Isodorus, les concepteurs bien connus du fameux édifice. L'approche géométrique de l'espace a permis une forme élégante, surtout pour le premier dôme construit, mais les exigences concernant la résistance et l'équilibre de la structure ont mal été prises en compte. Le comportement des piliers de support a donc été imprévisible et la stabilité du dôme n'a pas pu être assurée. Des investigations du même genre ont été entreprises sur des coupoles construites dans un passé beaucoup plus proche. En effet, les coupoles de la Renaissance et leur conception ont été soumises à l'analyse en utilisant les mêmes moyens scientifiques modernes. Pour des raisons faciles à comprendre, puisque l'Italie est le pays où se trouvent les plus fameux dômes anciens et que, d'une manière générale, le dôme a joué un rôle important dans l'architecture italienne, les spécialistes italiens ont largement contribué à cette analyse. Cependant, les spécialistes américains [5] et japonais [6] ont été également intéressés par le patrimoine culturel de la Renaissance. Les chercheurs turcs utilisent également les éléments finis [3] pour mettre en évidence la conception technique dans les œuvres de Sinan. Ils remarquent, avec raison, que la coupole a été trop souvent interprétée comme un phénomène spirituel, en oubliant l'aspect physique. Il se trouve que cet aspect physique a imposé plus d'une

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

fois la forme des dômes, qui ensuite a été vue comme un espace qui s'approche de la coupole céleste, aspirant à Dieu. Il est vrai que l'analyse des dômes anciens sous l'aspect de leurs performances techniques, y compris l'influence de la forme sur le comportement statique, enlève quelque peu de leur cachet de spiritualité. En revanche, ce point de vue a permis de rapprocher les uns des autres des coupoles qui, apparemment, n'avaient rien en commun, et de révéler que les constructeurs d'une coupole ont pu bénéficier de l'expérience de leurs prédécesseurs.

Bien que Sinan ait créé ses dômes 1000 ans après Sainte-Sophie, on est aujourd'hui convaincu qu'il a su profiter de la leçon technique.

L'évolution de la coupole dans les temps modernes

Souvent, les historiens d'architecture ont tendance à évoquer le passé quand il s'agit de dômes, probablement en raison du fait que l'esprit humain est beaucoup plus sensible aux formes pleines de significations, réelles ou imaginaires, d'un édifice chargé d'histoire, qu'à ses paramètres technico-économiques, si performants soient-ils.

En fait, rien ne justifie dans la réalité le sentiment ou la croyance selon lesquels la coupole aurait atteint le sommet de sa gloire à la Renaissance. Une analyse plus attentive révèle qu'ils sont même totalement infondés. On constate en effet que c'est dans les temps modernes que le développement scientifique et technique met pleinement en valeur les qualités structurales et architecturales du dôme, faisant de lui le type de construction utilisé dans presque tous les édifices d'envergure. En effet, sans changer essentiellement de forme – le dôme reste toujours une surface décrite par une courbe plane en rotation autour d'un axe vertical –, mais en utilisant les nouveaux matériaux, en particulier l'acier et le verre, et en mettant à profit les nouvelles découvertes de la science, on a réalisé des édifices exceptionnels. Ceux-ci dépassent, en grandeur, tout ce qui a été fait jusque-là et sont souvent des réussites exemplaires d'architecture originale et hautement expressive. Le dôme du Royal Albert Hall, construit dans les années 1862-1871, toujours en place, atteint des dimensions impressionnantes : érigé sur un plan elliptique, il a 76 m sur un axe et 56 sur l'autre.

Les coupoles concrétisent à tel point les découvertes spectaculaires de la science et de la technique qu'elles sont sciemment utilisées pour la construction des pavillons nationaux des différentes expositions universelles et pour

des édifices publics destinés à la haute autorité administrative ou politique, pour exprimer la puissance économique et, implicitement, l'unité et la stabilité politiques d'un pays. On y retrouve en quelque sorte la valeur symbolique du dôme, mais l'esprit qu'il représente a, bien sûr, changé, il a suivi le monde en mutation.

Dans un rapport sur l'évolution du dôme en acier au XIX^e siècle [7], présenté dans le cadre du symposium, le professeur R. Jodice, de l'Université La Sapienza de Rome, a souligné le rôle particulier joué par les conditions socio-politiques dans la valeur architecturale et représentative du dôme. Au début, l'acier est utilisé exclusivement pour ses qualités de résistance : on le dissimule sous des façades pompeuses et des faux plafonds en matériaux traditionnels, pierre et staff ; les coupoles sont construites d'après les modèles classiques anciens. C'est l'époque du néoclassicisme et de l'éclectisme où la valeur représentative de la coupole, conservée, n'est que celle, sans intérêt, de la bourgeoisie de l'époque. Il faut attendre la fin de la première moitié du XIX^e siècle, avec ses mouvements sociaux de liberté et d'indépendance dans de nombreux pays d'Europe, pour que la coupole retrouve brillamment sa vigueur et sa vraie valeur de représentation. Le professeur Jodice en veut pour exemple son pays, où le dôme en verre et en acier de la Galerie Victor-Emmanuel II à Milan (1865-1877) est devenu le symbole officiel de l'unité du pays, de son identité et de sa grandeur retrouvée. Mais des réalisations remarquables de ce genre existent un peu partout en Europe et pour des constructions aux affectations les plus diverses : jardins des plantes – Palmhaus à Munich, Victoria Regia House à Berlin, Kiggle Palace à Glasgow –, les bourses – New Corn Exchange à Leeds, Austro-Hungarian Bank à Vienne –, les églises – Saint-Augustin à Paris, Fünfhaus-Kirche à Vienne –, etc.

Le dôme en acier passe également outre-Atlantique, où il connaît un essor sans précédent. Il suffit de mentionner la New York World's Fair de 1853, où la coupole a un énorme succès, précisément de par sa valeur représentative, et le Capitole de Washington, qui se passe de commentaires quant à sa valeur de symbole.

Enfin il est intéressant de remarquer que dans les études et les recherches effectuées sur les coupoles anciennes, les spécialistes essaient de comprendre et de mettre en évidence des performances techniques, alors que pour les coupoles de l'époque moderne, on souligne la valeur symbolique.

En réalité la coupole, plus peut-être que tout autre élément qui parseme nos villes, entretient depuis toujours et

jusqu'à nos jours un rapport dialectique entre ses performances technico-économiques de structure et de résistance et sa valeur symbolique représentative.

Le dôme de nos jours

Il ne fait aucun doute que la partie la plus intéressante du symposium aura quand même été celle consacrée à la coupole de nos jours. C'est celle aussi pour laquelle les communications ont été les plus nombreuses.

Ces communications attestent d'emblée que la coupole conserve toujours son pouvoir de séduction. Les architectes et les ingénieurs lui accordent une place privilégiée et le public l'accueille avec enthousiasme. Elle continue à être le symbole de la civilisation qui l'a produite, présente dans toutes les villes olympiques, dans toutes les grandes villes, forme préférée pour la couverture des terrains de sports, des marchés, des amphithéâtres, bref de tous les endroits publics.

En effet, les principales qualités de la coupole – couverture des grands espaces avec une géométrie qui lui permet d'envelopper un maximum de volume pour un minimum de surface, forme sculpturale à l'extérieur, essor de l'espace à l'intérieur – trouvent dans l'époque contemporaine une remarquable valorisation. Pourquoi ?

Une des premières caractéristiques de l'époque contemporaine est le développement exceptionnel des agglomérations urbaines. Si on y ajoute la facilité avec laquelle les gens se déplacent aujourd'hui, on comprend qu'un événement sportif, culturel, même religieux, puisse réunir à la même heure en un même lieu une foule énorme, qui exige d'avoir son spectacle par tous les temps. Les plus grandes constructions du monde, capables d'abriter plus de 80 000 personnes, sont des constructions en dôme. C'est le cas de la coupole de Harris Country Sports Stadium à Houston au Texas, de 200 m de diamètre, et du superdôme de Sports Stadium de La Nouvelle-Orléans, avec une ouverture de 213 m ! Sur un plan différent, il est une autre caractéristique de notre société hautement industrialisée qui joue un rôle fondamental dans le développement du cadre bâti : la technologie très développée grâce à laquelle on dispose d'une vaste gamme de matériaux de construction, de méthodes ingénieuses pour les mettre en œuvre et d'équipements très performants. Il est clair que le tournant décisif pour les matériaux de construction a été l'apparition de l'acier au XIX^e siècle, le premier à remplacer le bois naturel et la maçonnerie, si limités dans leurs fonctions structurales ; aujourd'hui toutefois, on utilise également l'aluminium, le bois

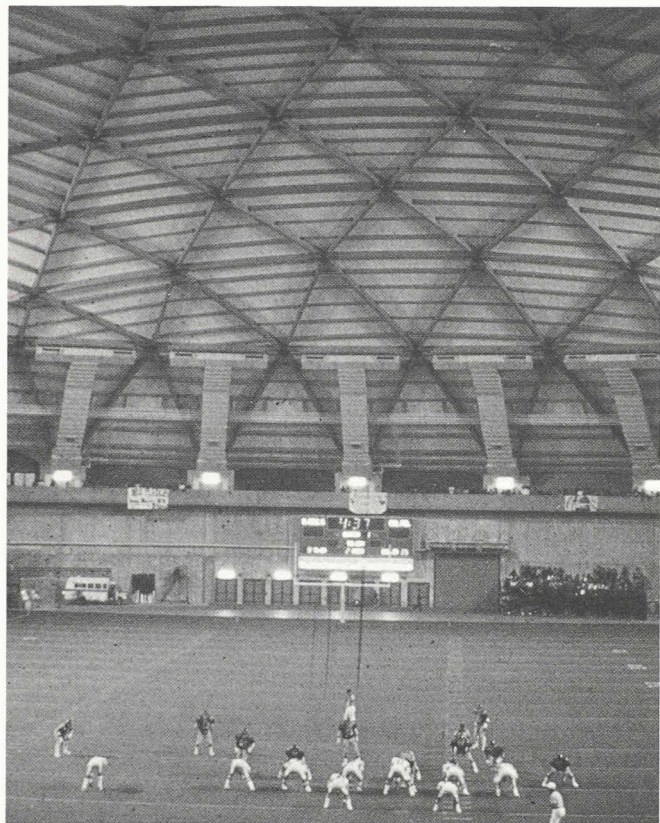


Fig. 4. – Ensphere – Salle d'athlétisme de Northern Arizona University, vue intérieure.

lamellé collé, le béton armé (en coque, prétendu), le ferro-ciment, les différents matériaux plastiques, les fibres de verre, ou encore diverses combinaisons des uns et des autres. Ceux-ci ont imposé de nouvelles formes de dôme : en coque, avec structure réticulaire, etc. Une communication [8], présentée par l'ingénieur américain K. J. Parson, illustre bien ces formes.

La figure 4 est une vue intérieure d'un imposant dôme sphérique de 153 m de diamètre, avec structure réticulaire, réalisé en bois lamellé collé, destiné à la salle d'athlétisme de l'University of Northern Arizona à Flagstaff. A une altitude relativement élevée, 2100 m, il est soumis à d'importantes sollicitations climatiques. Réelle performance pour une coupole avec structure en bois, il met bien en valeur les possibilités à la fois de la structure et du matériau.

Le dôme en béton armé de 48 m de diamètre que l'on voit en cours d'exécution sur la figure 5, réalisé pour l'auditoire de South Mountain High School à Phoenix, présente des particularités techniques d'exécution intéressantes. Il a été coulé à même le sol. Pour cela, un monticule en terre a été façonné de façon à servir de « moule » pour l'intrados du dôme. Ensuite le dôme, qui pesait quelque 1000 t, a été soulevé sur dix-sept colonnes en acier à une hauteur de 8,60 m.

D'autres exemples présentés, moins importants en dimensions mais d'une forme quasi sculpturale, ont précisé-

ment mis en valeur les multiples possibilités offertes par les matériaux et les techniques d'aujourd'hui. Les églises Sainte-Marie Goretti à Scottsdale (fig. 6) et Sainte-Odilla à Tucson (fig. 7), toutes deux en Arizona, illustrent bien les performances de la technique moderne en ce qui concerne la plasticité de la forme. Les architectes ont su mettre à profit cette technique nouvelle pour trouver un langage particulièrement expressif. La structure en coque de Sainte-Odilla est étayée par une ossature en bois lamellé collé

dont les éléments principaux sont trois arcs articulés (fig. 8), alors que la structure de résistance de l'église Sainte-Marie est constituée par l'enveloppe même, quatre voûtes hyperboliques intersectées. On touche ici à une caractéristique essentielle de la conception actuelle des constructions en général et des coupoles en particulier : l'enveloppe et la structure sont confondues, l'ingénieur n'est plus séparé de l'architecte – s'il l'a jamais été.

En effet, toutes les idées créatrices qui ont permis le développement de la coupole au cours des deux dernières décennies – développement prodigieux – s'inspirent de ce principe fondamental.

Le premier type de structure moderne, caractérisée en ce que la capacité portante réside dans l'enveloppe même, a été la structure en coque de béton armé. Les efforts dans la structure-enveloppe sont principalement de compression. Les inconvénients manifestes de ce type de structure, notamment les complications de coffrage, la lenteur d'exécution et le coût élevé, ont orienté les chercheurs vers des structures qui exploitent les mêmes principes géométriques simples, mais soient tendues.

En Suisse, on connaît les structures en coque très réussies du professeur H. Isler qui, dans un bref mais édifiant article [10], présente les qualités, surtout architecturales, des structures en coque et dégage les conditions à respecter pour que de telles structures soient un véritable apport à l'architecture moderne.

Est-ce que les réalisations du professeur Isler – en Suisse alémanique – ont inspiré les jeunes architectes et ingénieurs du pays ?

Les premières structures tendues, dans l'époque contemporaine, ont été appli-

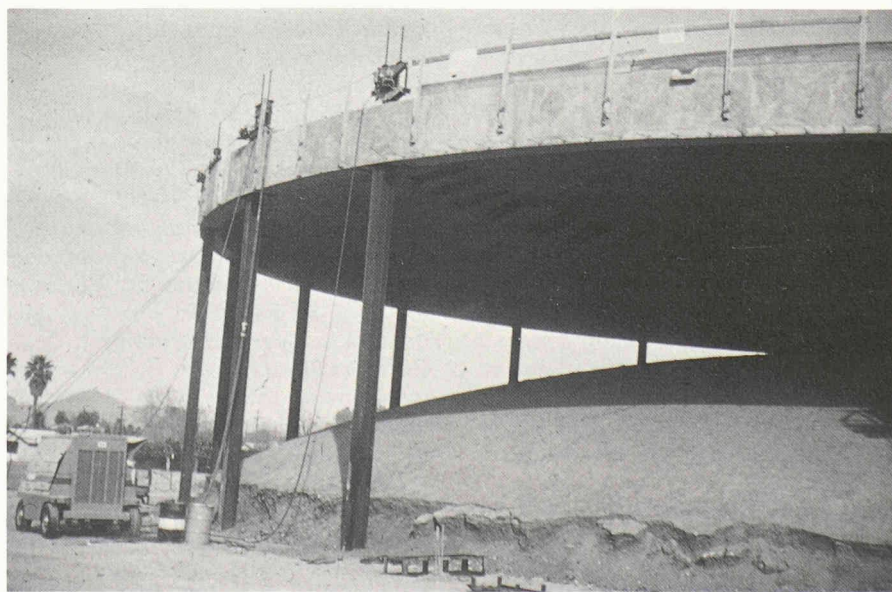


Fig. 5. – Le dôme de l'auditoire South Mountain High School, Phoenix, Arizona, pendant l'exécution.

quées à des constructions provisoires. Au début des années septante, la membrane, souvent utilisée dans les constructions temporaires, est introduite par Geiger et Berger dans des constructions à caractère permanent. Depuis, les coupoles constituées d'une surface ou d'éléments tendus connaissent un développement exceptionnel. Les perfectionnements techniques, technologiques ou de design des années quatre-vingt permettent désormais une utilisation encore plus large dans les applications les plus diverses. Dans le cadre du symposium, le professeur Mamoru Kawaguchi, de Hosei University à Tokio, a prononcé un exposé remarqué sur les dômes pneumatiques, qui fut une véritable leçon – leçon bienvenue, il faut le dire, tant les réalisations dans ce domaine sont, au Japon, multiples, variées et actuelles.

Les dômes pneumatiques diffèrent les uns des autres en fonction de conceptions structurales différentes. Il y a d'une part des dômes dont la pression d'air dans l'espace enfermé est supérieure à la pression atmosphérique et où la structure est soutenue par la pression de l'air – «air-supported structure» –; et d'autre part les dômes dont l'air sous pression, positive ou négative, est enfermé dans des éléments constitutifs de la structure – «air-inflated structure». Dans les deux cas, la membrane qui forme l'enveloppe du dôme se trouve sous tension et fait partie intégrante de la structure, elle est la structure même. Mais d'un type à l'autre, le comportement structural est bien différent.

Les dômes des figures 9 et 10, créés par le professeur Kawaguchi, sont des exemples de ces deux types de dômes pneumatiques. Le premier est un modèle à l'échelle naturelle, de 20 m de diamètre, réalisé à Hosei University, le second une application pratique.

Dans un autre cas (fig. 11), le professeur Kawaguchi a combiné les deux techniques, «air-inflated» et «air-supported», pour obtenir une structure intéressante avec une forme très originale. La section transversale de cette structure (fig. 12) illustre bien ces deux possibilités de réalisation. On remarque d'emblée que les structures pneumatiques sont particulièrement novatrices en ce qui concerne la forme.

Nous sommes quelquefois très loin de la forme classique du dôme. Les dômes des figures 13 et 14, réalisés par le professeur Kawaguchi, sont à cet égard exemplaires. De dimensions impressionnantes – le premier a 200 m de longueur et 75 m de largeur –, ils ont attiré les éloges de toute la presse spécialisée. Il faut remarquer les différentes directions des câbles de renforcement, méridiennes ou parallèles, et la



Fig. 6. – Eglise Sainte-Marie Goretti, Scottsdale, Arizona.



Fig. 7. – Eglise Sainte-Odilla, Tucson, Arizona.



Fig. 8. – Ossature en bois lamellé collé de l'église Sainte-Odilla.

forme des éléments composant la membrane.

D'ailleurs, la forme est l'un des problèmes clés des structures à membrane. Il s'agit aussi bien de la forme de la structure que de la forme (initiale) de la membrane.

Pour la structure, on distingue les dômes à bas profil, utilisés pour les dômes à caractère permanent, et les dômes à haut profil, utilisés surtout pour les constructions temporaires. Quel que soit le type du dôme pneumatique au moment de la construc-

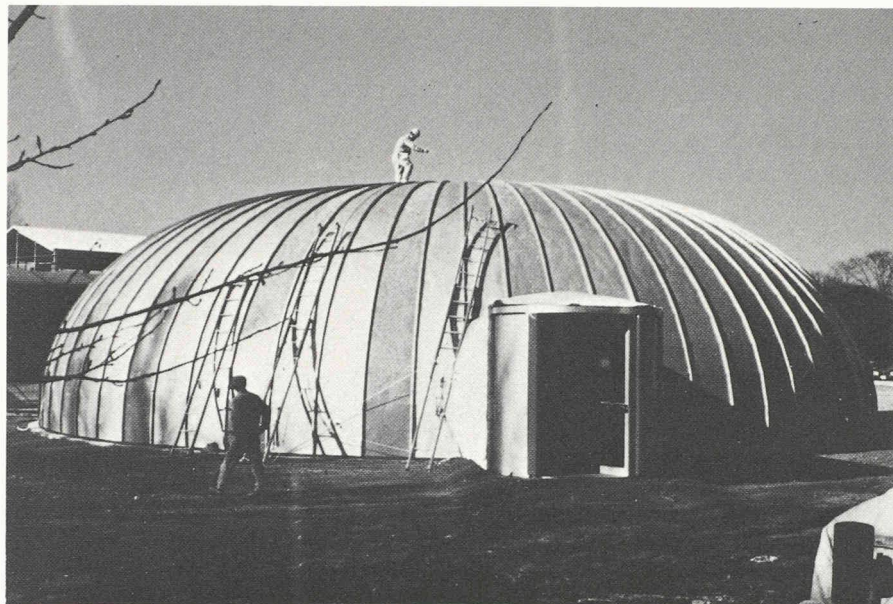


Fig. 9. – Dôme soutenu par la pression de l'air avec membrane en feuilles d'acier inoxydable.

tion, on se heurte premièrement à la difficulté de créer une forme avant la pressurisation.

D'autre part, la membrane qui forme l'enveloppe complète du dôme est constituée de pièces taillées, de forme bien déterminée, réunies entre elles par une ligne de couture ou de soudure de manière que la forme finale de la coupole sous pression soit celle voulue. En plus, l'enveloppe se trouve sous tension et les efforts se développent normalement dans deux directions, ce qui fait que les coutures doivent résister aux sollicitations aussi bien que la membrane elle-même. Les matériaux pour la membrane, de par leur nature, ne sont pas résistants aux changements de courbure ni aux efforts de compression, d'où les problèmes de plis. C'est le problème spécifique des structures pneumatiques qui, à côté des inconvénients présentés par la nature même du matériau à partir duquel la membrane est confectionnée – inflammable et sujet à détérioration –, préoccupe les spécialistes.

Un groupe de chercheurs japonais de la Technical Research Division de Fujita Corporation ont montré que le problème de la forme de la membrane pouvait être réduit à un problème de

surface minimale; un autre groupe du Tokyo Institute of Technology traite le problème des plis – concentration d'efforts dans la membrane – comme un problème de valeurs propres. Sur la figure 9, la membrane du dôme est constituée de feuilles d'acier de 0,3 mm d'épaisseur, taillées en bandes et réunies suivant les lignes des méridiens, avec des boulons ordinaires disposés à 30 cm d'intervalle. Pour cela, le professeur Kawaguchi a étudié la «forme pneumatique la plus plate possible» [11] et il démontre que cette surface est la plus plate des surfaces de rotation avec plans tangentiels verticaux autour de leur équateur, qui ne développent pas d'efforts de compression sous la pression de l'air interne. Les inconvénients spécifiques des dômes à membrane tendue, auxquels s'ajoute leur dépendance à l'égard du système mécanique pour la pression de l'air, ont incité les spécialistes à chercher des solutions qui conservent les avantages de ces types de structures et évitent leurs défauts.

Les structures légères présentées par l'architecte Horst Berger vont dans cette direction. Il s'agit, toujours, de

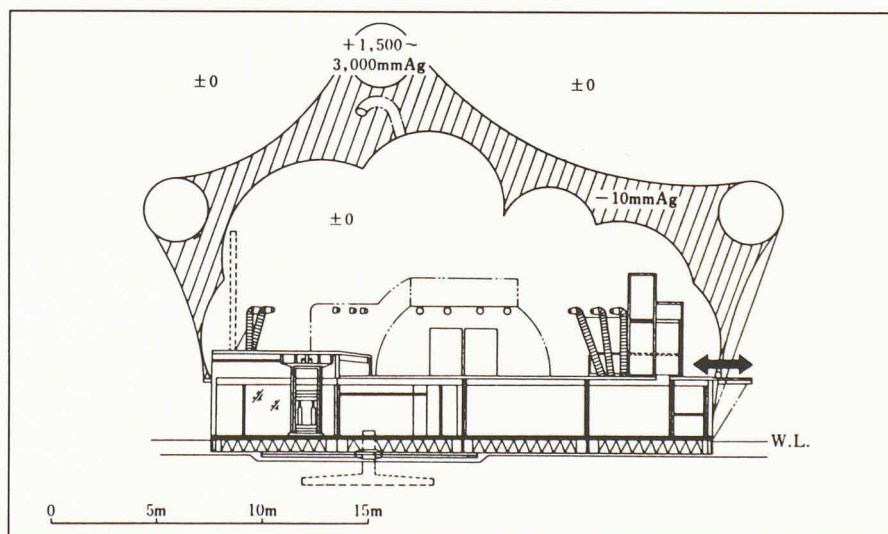


Fig. 12. – Section transversale de la structure pneumatique mixte.

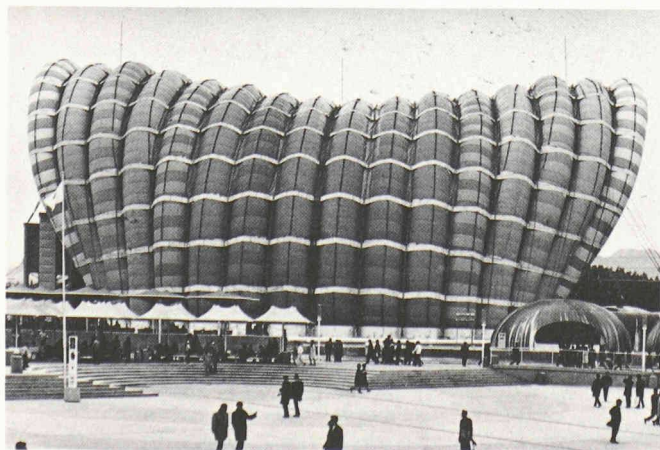


Fig. 10. – Dôme à éléments gonflables, pavillon du groupe Fuji pour Expo '70, Osaka.

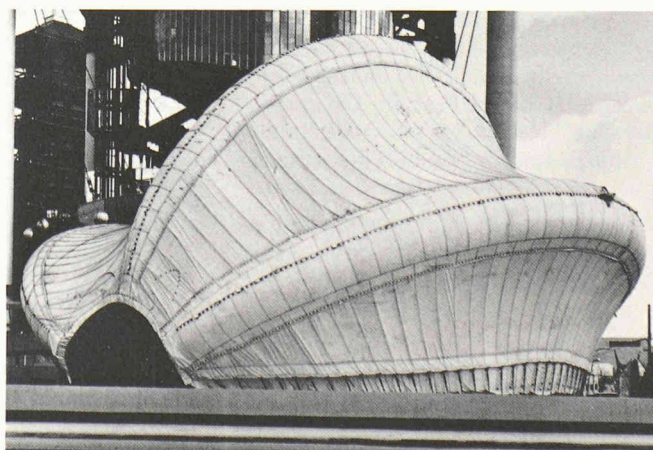


Fig. 11. – Structure mixte, «air-supported» et «air-inflated», pavillon Electrique pour Expo '70, Osaka.



Fig. 13. – Pavillon Therna, exposition d'Aomori.

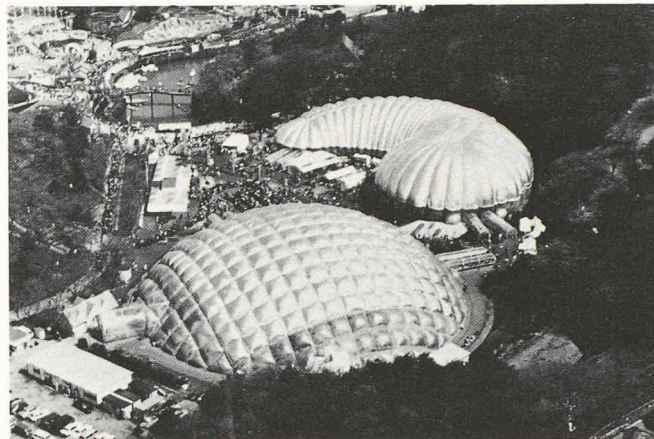


Fig. 14. – Dôme pour la Conférence mondiale à Orchid.

structures tendues réalisées avec une membrane souple attachée à un système de câbles. La capacité portante et la stabilité sont assurées, comme pour les structures à membrane tendue, par la forme – courbe – et par les efforts exclusivement de tension, mais seuls les câbles sont soumis à l'effort et se trouvent en équilibre sans la participation de la membrane.

Le développement de ce type de structures, utilisées dans un vaste champ d'applications, a été impressionnant au cours de cette dernière décennie, comme l'illustrent les figures 15, 16 et 17. On y remarquera la forme architecturale, hautement plastique, bien qu'elle soit liée étroitement à la capacité portante de la structure.

En ce qui concerne les dômes à structure réticulaire, on remarque d'abord la tendance vers les formes modelées rappelant plus les structures en coque que la forme classique du dôme de révolution. Les travaux présentés par les ingénieurs japonais dans ce domaine sont très représentatifs (fig. 18). Dans leur exposé [12], les réalisateurs ont souligné le problème qu'il y a à trouver une forme faisable et optimale. C'est toujours grâce à l'ordinateur que cette étude théorique et pratique – calcul des coordonnées de la surface ainsi que du comportement structural – a pu être réalisée.

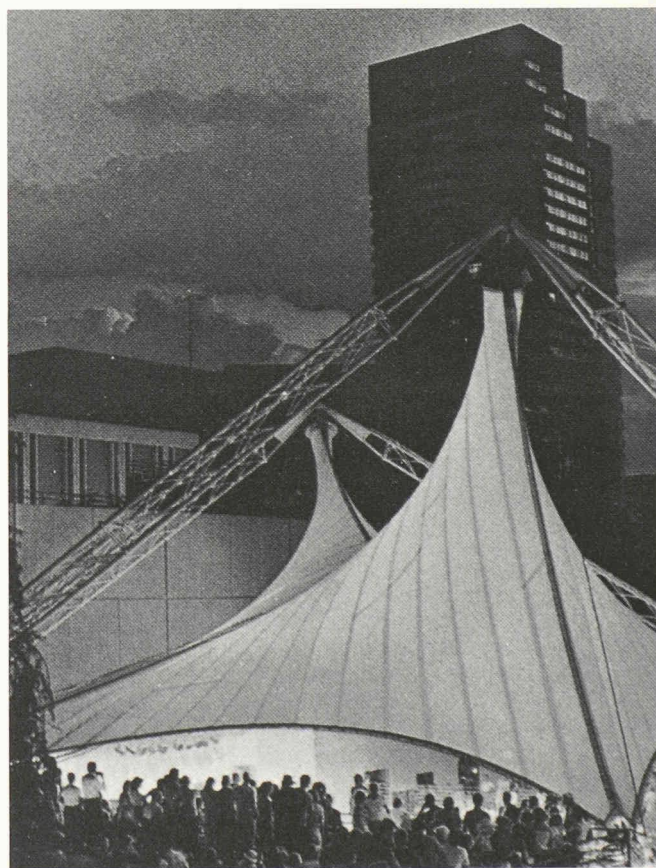


Fig. 15. – Shoreline Amphitheatre, Mountain View, Californie.

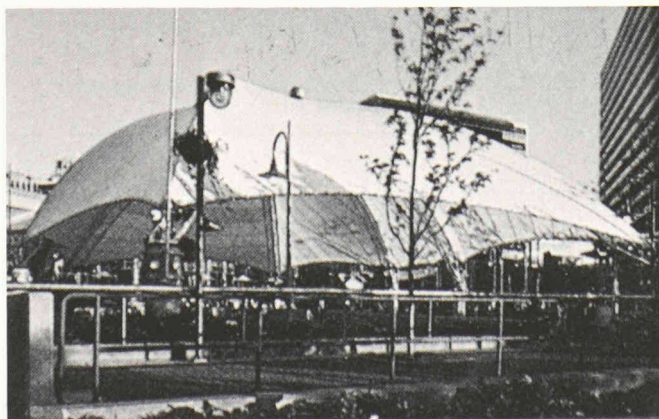


Fig. 16. – Water Street Pavilion, Flint, Michigan.



Fig. 17. – Pensacola Municipal Pool Pavilion, Floride.

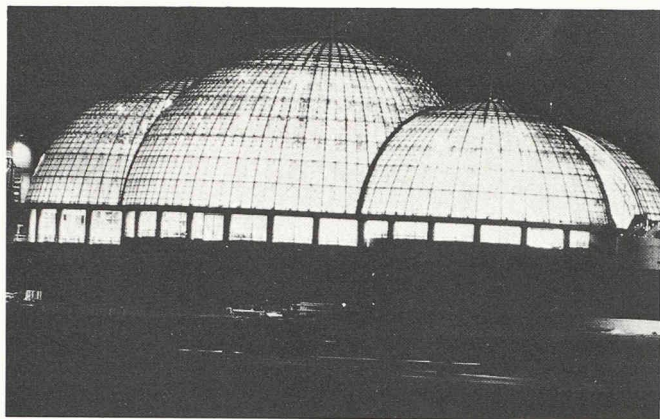


Fig. 19. - Jardin des plantes, Tokio - vue des dômes intersectés.

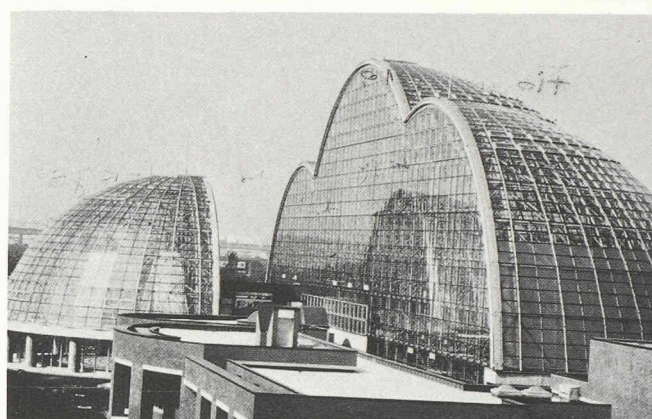


Fig. 20. - Jardin des plantes, Tokio - vue du plan vertical.

Toujours au Japon, un autre dôme destiné à un jardin des plantes, d'une forme tout à fait spéciale, est fait de plusieurs dômes intersectés et sectionnés par un plan vertical (fig. 19 et 20). Il combine ainsi la surface sphérique avec une surface plane, deux éléments structuraux fondamentalement différents. On sait bien que sur la surface sphérique les moments fléchissants sont pratiquement nuls, alors qu'une surface plane travaille surtout par ce type de sollicitations. Les réalisateurs ont réussi à minimiser la concentration des efforts née de cette association de structures différentes dans un seul bâtiment.

La caractéristique essentielle commune à toutes les structures légères modernes, avec poids réduit au minimum possible, conduit à des constructions avec une sensibilité accrue aux phénomènes de stabilité, surtout sous les charges accidentelles, la neige et le vent. Les nouvelles formes, les nouveaux matériaux obligent chaque fois à reconsidérer les problèmes de flambage, de stabilité et de comportement dans le domaine élasto-plastique, tout en prenant en compte la spécificité des nouvelles structures.

S'il est une tendance qui se dégage nettement pour le dôme actuel, c'est celle qui va vers de nouvelles formes de construction combinant avec éclectisme les différents types de structures réticulaires avec membrane suspendue, structures en câbles tendus avec membrane, structures en arc avec membrane, etc.

Cette tendance directrice en entraîne au moins deux autres :

- la mise au point de technologies pour des matériaux nouveaux, en général souples, résistant aux efforts de tension ; la fiabilité du matériau est le problème majeur de toutes les constructions faisant appel à une membrane ;
- la mise au point de méthodes de calcul et de programmes d'ordinateur permettant de surprendre le comportement réel des structures généralement complexes.

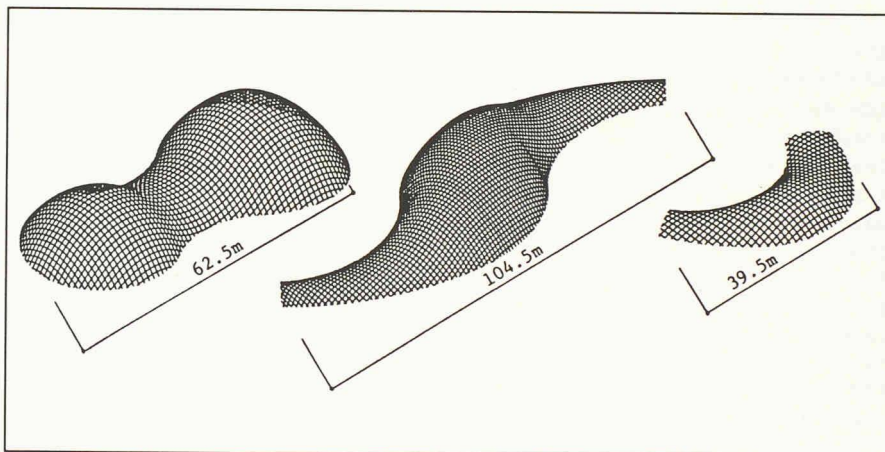


Fig. 18. - Les pavillons Nara, Theme et bureau d'information pour Silk Road Exposition, Nara, 1988.

Bibliographie

- [1] *Domes from Antiquity to the Present*, Proceedings of IASS-MSU Symposium, Istanbul, 1988. Published by Mimar Sinan University, Findikli, 80040 Istanbul, Turkey.
- [2] MARK, R.; WESTAGARD, A.: «The First Dome of the Hagia Sophia: Myth vs. Technology»*.
- [3] KARAESMEN, E.; ÜNAY, A. I.: «A Study of Structural Aspects of Domed Buildings with Emphasis on Sinan's Mosques»*.
- [4] MAYER-CHRITIAN, W.: «Hagia Sophia, The Engineers' Planning of Anthemios and Isidorus, Reconstruction»*.
- [5] ROBINSON, C. ELWIN: «St. Peter's Dome: The Michelangelo and Della Porta Designs»*.
- [6] KATO, S.; HIDAKA, K.; AOKI, T.: «Structural Role of the Wooden

Ring of the Dome of Santa Maria del Fiore in Florence»*.

- [7] JODICE, R.: «The Iron Dome in the Nineteenth Century»*.
- [8] PARSON, K. JOHN: «Dome Design and Construction in the USA»*.
- [9] BERGER, HORST: «New Development in Lightweight Dome Structures»*.
- [10] ISLER, H.: «Concrete Shell and Architecture», *Bulletin of the IASS*, No. 91, vol. XXVII-2, August 1986.
- [11] KAWAGUCHI, M.: «The Swallowest Possible Pneumatic Forms», *Bulletin of the IASS*, No. 63, 1977.
- [12] MAENO, T.; WADA, M.; NAGASE, T.; HISTAOKU, T.: «Structural Design and Construction of Timber Lattice Shell»*.

* Les articles suivis d'un astérisque font partie de [1].

Pour conclure

Malgré le succès de participation à ce symposium, on ne peut s'empêcher de penser aux absents, qu'il s'agisse de personnes ou de pays. Et l'on pense d'abord à Donald Richter, le père de la coupole géodésique avec surface collaborante. Son absence a privé le symposium

de toute une catégorie de dômes. On pense aussi à l'architecte-ingénieur Stéphane du Château, qui a tant contribué au développement de la coupole réticulaire en France.

La France a d'ailleurs été l'un des pays absents - une absence fortement ressentie. L'URSS, également absente, a néanmoins fait parvenir quelques communications.

D'autres pays encore n'étaient pas représentés à Istanbul pour la simple et bonne raison que la coupole n'occupe pas une place importante dans leur espace construit.

Mais alors, quels sont les facteurs déterminants ou quelles sont les conditions à remplir pour que la coupole soit une forme de construction applicable?

Est-il besoin d'une tradition – importante aussi bien psychologiquement que techniquement – ou plutôt d'un esprit novateur? La coupole est-elle une forme concurrentielle dans un certain contexte industriel seulement?

S'intègre-t-elle dans le tissu urbain des grandes agglomérations seulement? Ses qualités sont-elles mises en valeur dans des régions à climat clément seulement?

Autant de questions auxquelles l'auteur de cet article ne saurait ni ne voudrait apporter de réponse; mais il est persuadé que de nombreux architectes et ingénieurs intéressés sauront répondre et apprécier l'opportunité et l'avenir du dôme en tant que forme de construction applicable à la Suisse.

Pour conclure, nous tenons à remercier ici le professeur I. Mungan de Mimar Sinan Üniversitesi, qui a été

l'initiateur et le principal organisateur du symposium. Sa stature scientifique a assuré à cette rencontre le plus haut niveau. Ses qualités humaines ont réservé à chacun des participants un accueil chaleureux dans sa pittoresque ville et au symposium.

Adresse de l'auteur:

Aurèle Parvu
Ingénieur civil SIA
34, rue du Nant
1207 Genève

Vraquier polyvalent

Caractéristiques principales du design

Comment, avec une formation non traditionnelle, un ingénieur suisse peut participer au développement de techniques qui ne nous sont pas familières, tel pourrait être l'intitulé de cet article dans lequel M. Elio Marcacci (voir encadré ci-contre) aborde un sujet peu courant dans nos colonnes: la construction navale. Pour un vraquier polyvalent, il présente en effet ici les conclusions d'une évaluation économique dont son bureau d'études a été chargé et qui portait sur le design de navires de tailles et de types différents.

Rédaction

M. Elio Marcacci est né en 1943 en Suisse. Architecte industriel diplômé de la Carnegie-Mellon University de Pittsburgh et ingénieur industriel diplômé du Massachusetts Institute of Technology, il a travaillé comme ingénieur chez Quickborner Team, Cybernetic of Planning and Organization à Hambourg, avant de diriger la Division industrielle Siteco-Fiat à Turin. Actuellement ingénieur-conseil indépendant, il a été volontaire du Corps suisse d'aide en cas de catastrophe de 1974 à début 1988 et est cadre de milice de l'Approvisionnement économique du pays, responsable de la coordination entre les offices de l'alimentation et de l'industrie.

Description du navire

Vraquier polyvalent à une hélice et propulsion par moteur diesel, d'une largeur maximale pour la traversée du canal de Panama et convenant au trafic maritime mondial.

PAR ELIO MARCACCI,
VÉSENAZ

Navire à un pont, avec les emménagements suivants sous le pont:

- citerne de coqueron avant
- 7 cales de cargaison
- salle des machines
- citerne de coqueron arrière.

L'équipage est logé à l'arrière, dans un rouf de six étages donnant une bonne visibilité de la passerelle sur les conteurs arrimés sur le pont.

Port en lourd et tirant d'eau

Le port en lourd est d'environ 69 140 t. Le tirant d'eau à pleine charge est de 13,6 m bas de la quille en eau salée de $PS^1 = 1,025$.

Objectifs et modifications

Pour un tel vraquier, les modifications aux caractéristiques de son design qui sont le plus favorables aux armateurs – d'où intérêt accru du design sur le

marché – sont, par ordre d'importance:

1. Augmentation du taux de fret de la cargaison.
2. Augmentation du temps pendant lequel le navire rapporte un revenu.
3. Augmentation de la capacité de chargement par voyage, d'où réduction des coûts de voyage par mille nautique.
4. Diminution de la consommation globale de combustible.
5. Diminution du prix du combustible.
6. Réduction des besoins totaux en énergie à bord.
7. Abaissement des coûts de production du navire.
8. Accélération des opérations de manutention, donc gain de temps de relâche dans les ports et rotation plus rapide.
9. Réduction du poids de l'acier total.
10. Augmentation de la vie du navire.
11. Réduction des délais de construction.

Les points 1 et 5 sont déterminés par la situation du marché et, par conséquent, ils n'ont pas été pris en considération.

Le point 3 peut être réalisé par une amélioration au niveau de la navigation et le respect de l'itinéraire, mais il peut également être influencé par

l'équipement à disposition, la forme de la coque et le dessin du gouvernail. Bien que le point 10 puisse être influencé par le dessin structurel, il dépend probablement plus de la manière dont le navire est manié, exploité, géré et entretenu.

Donc, dans notre projet, nous avons concentré nos efforts sur les autres objectifs énumérés ci-dessus. Voici un aperçu des moyens auxquels nous avons eu recours pour les réaliser.

Coûts de production, poids et délais

Points 7, 9 et 11

Dans le dessin structurel du navire, nous avons tout particulièrement veillé à ce que:

- le travail sur les différents éléments structurels soit réduit à un minimum;
- l'assemblage des divers éléments en blocs et unités de montage soit aisé;
- le montage des différents blocs et unités soit facile;

¹PS: poids spécifique.