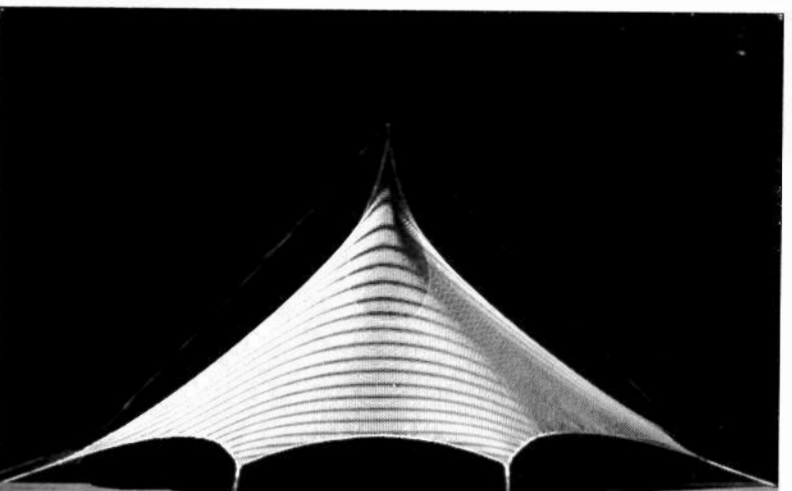
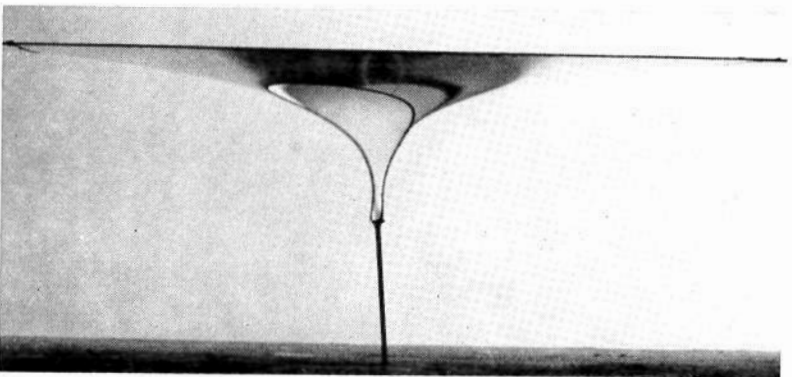
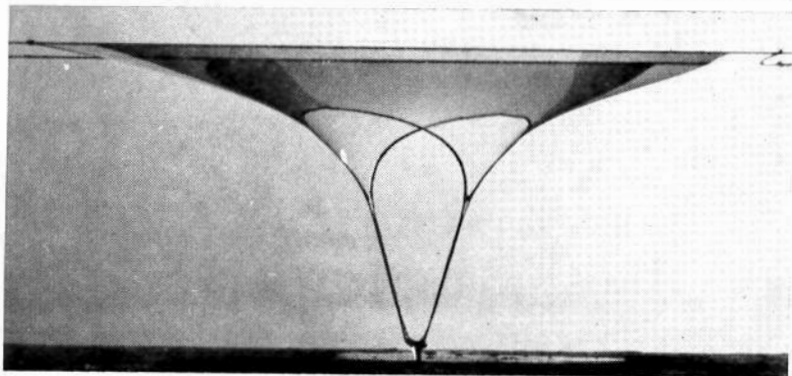
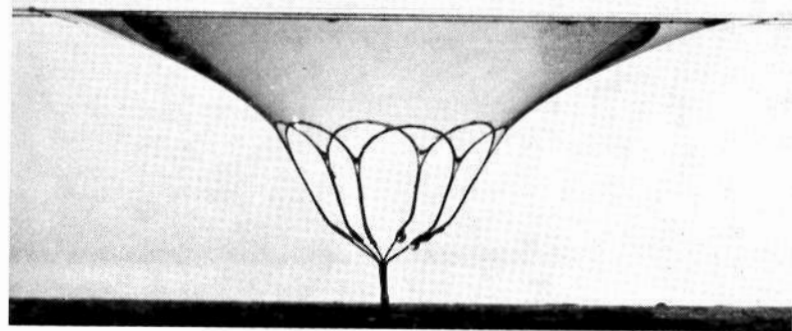


MONTREAL 67

GERNOT MINKE

Problèmes posés par la réalisation de structures sollicitées en traction. Le pavillon allemand à l'Exposition universelle de Montréal.

Exposé présenté au cours d'un séminaire auquel l'auteur a été invité par le Département d'Architecture de l'École supérieure technique de Hanovre.



La diversité des formes permises par les structures sollicitées en traction est très grande et croît au fur et à mesure de l'approfondissement de ce domaine. Un phénomène est néanmoins toujours sensible. Les possibilités de choix d'une forme sont relativement limitées dès qu'un système constructif donné est adopté. Un système de structures permet certes de nombreuses variantes formelles, mais la forme est toujours soumise aux lois constructives et aux sollicitations résultantes. Le processus de projet de structures sollicitées en traction doit tenir compte de ces lois et ne peut être poursuivi sans un contrôle permanent de la distribution interne des efforts. Il en résulte des méthodes inhabituelles jusqu'à présent de recherche et détermination de la forme. Les problèmes de réalisation du concept de structures sollicitées en traction sont décrits ci-dessous, en insistant particulièrement sur les méthodes de recherche et détermination de la forme, à l'aide du projet de pavillon allemand pour l'Exposition universelle de Montréal.

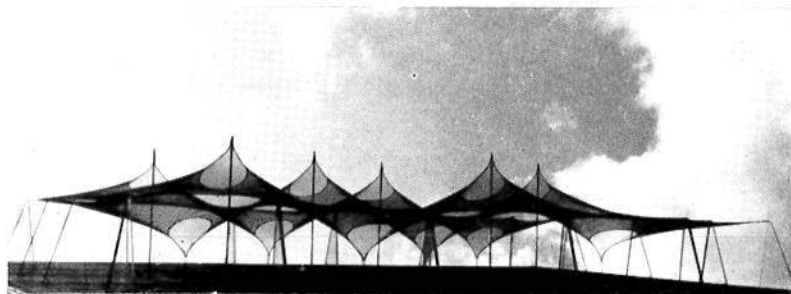
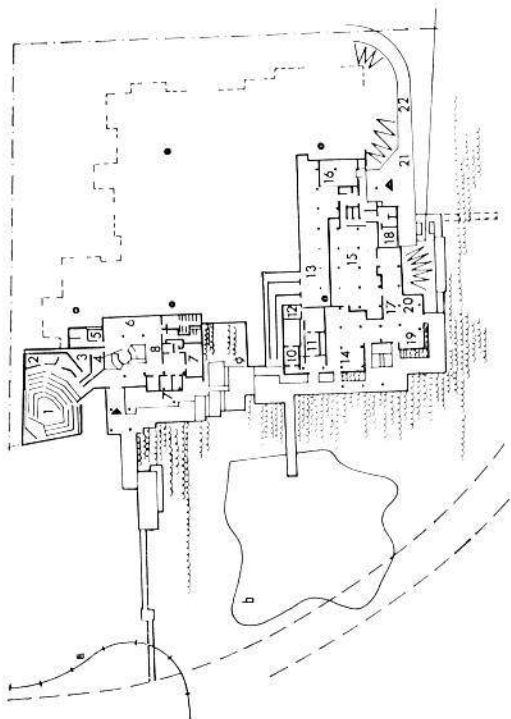
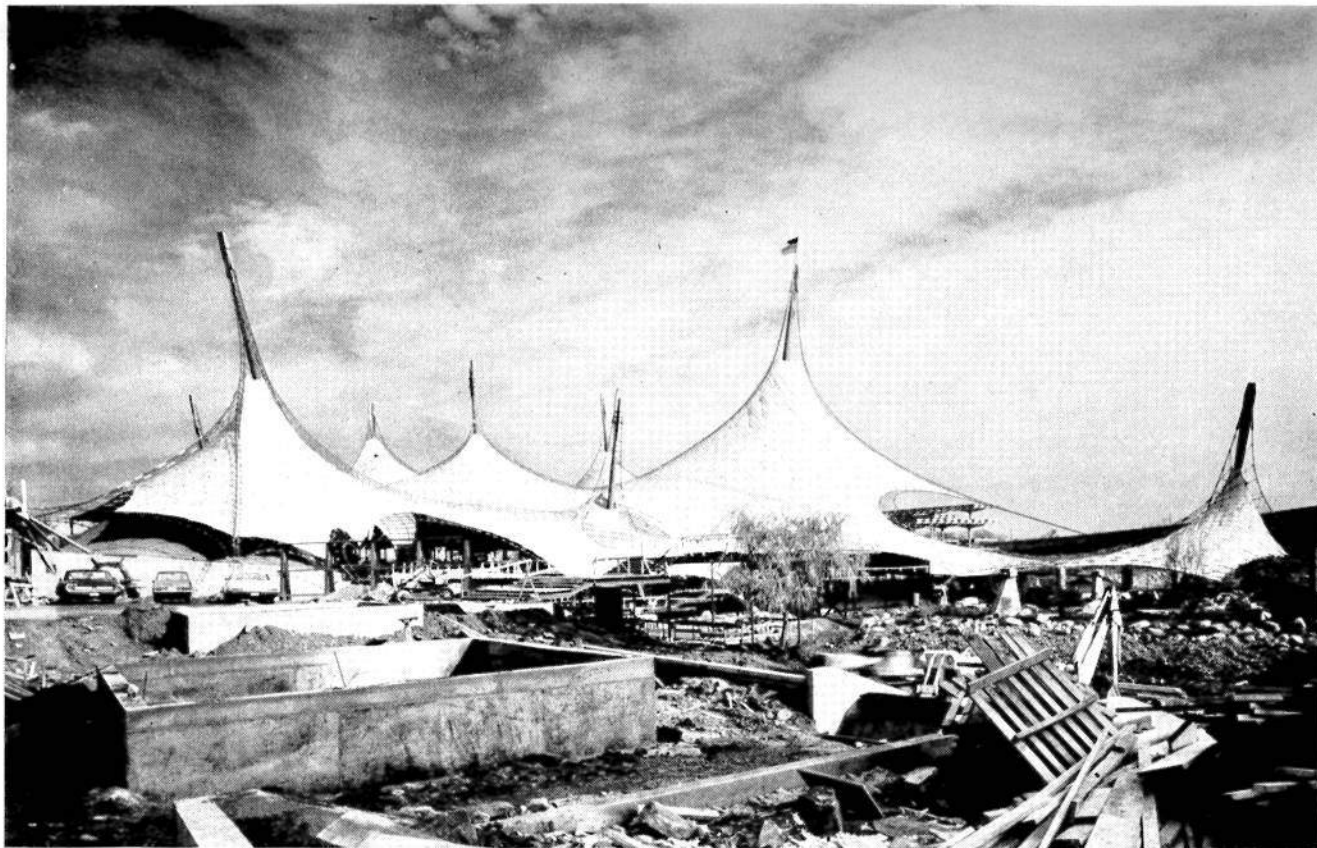
Le pavillon occupe une position de choix, au bord du plan d'eau formé par le Saint-Laurent et sur lequel ont lieu les régates; deux côtés sont délimités par l'eau. La petite île, qui fait partie du terrain de l'exposition, est incluse à la forme d'ensemble.

Le pavillon est conçu sous forme d'une grande enveloppe s'étendant au-dessus d'un paysage d'exposition qui se développe librement et doit servir simultanément de paysage de détente. Le « paysage d'exposition » est articulé par des dépressions et des terrasses de hauteur différente. La grande enveloppe souligne cette articulation; elle est tirée vers le haut en huit points et ancrée vers le bas en trois points. Il en résulte une articulation spatiale qui est soulignée par l'éclairage : les points hauts et bas sont entourés par des zones claires, produites par les « yeux » translucides. L'itinéraire des visiteurs suit une spirale sur des terrasses de hauteur différente à travers ce « paysage d'exposition », qui s'écarte délibérément de l'idée du hall d'exposition classique.

La superficie du terrain est d'environ 10 000 m²; la surface couverte est d'environ 8 000 m². La longueur est d'environ 130 m suivant l'axe nord-sud et de 100 m suivant l'axe ouest-est. La hauteur du plus haut mât est de 38 m.

La grande enveloppe est constituée par une résille précontrainte, qui est tendue en forme de paraboloides hyperboliques sur huit mâts et trois points d'ancrage, et maintenues sur le pourtour par 30 câbles qui transmettent les efforts de la résille à des tirants précontraints, dans le rocher. La résille est constituée par des câbles d'acier de 12 mm et comporte des mailles rhombiques de 50 cm d'arête. Les câbles, qui comportent un œil aux points hauts et bas, transmettent les efforts de la surface aux points d'appui. Au-dessous de cette structure primaire est suspendue, à une distance moyenne de 50 cm, une structure secondaire constituée par une membrane précontrainte en tissu de polyester enduit de PVC, qui délimite l'espace. Elle est haubanée tous les 3 à 5 m² par rapport à la résille, à l'aide d'un ressort en forme de trèfle. Cet haubanage produit une stabilisation supplémentaire de la surface de la membrane et transmet à la résille les efforts produits dans la peau par le vent et la neige.

La forme extérieure du pavillon était fixée dans une certaine mesure par le terrain. L'articulation verticale résultait des éléments suivants : itinéraire à travers l'exposition, situation de l'auditorium à l'entrée, emplacement du restaurant et de la terrasse dans l'angle sud-est, désir de souligner la position marginale



du pavillon. Il était en outre établi que seule une résille précontrainte de câbles permettrait de couvrir une surface aussi grande. Le premier problème du processus de recherche de la forme consistait à réaliser une double courbure suffisante en tous les points de la résille et à abaisser les bords au maximum, afin d'obtenir une enveloppe pratiquement fermée. La forme précise correspondant au système constructif choisi ne pouvait être déterminée qu'empiriquement, à l'aide de modèles. Une recherche numérique de la forme était impossible, le calcul de cette structure exigeant une connaissance préalable de la forme. Le processus de recherche de la forme s'est poursuivi à divers stades, à l'aide de sept modèles complets. La première étape a consisté à trouver la forme correspondant aux conditions limites choisies, et la seconde à adapter la forme aux contraintes.

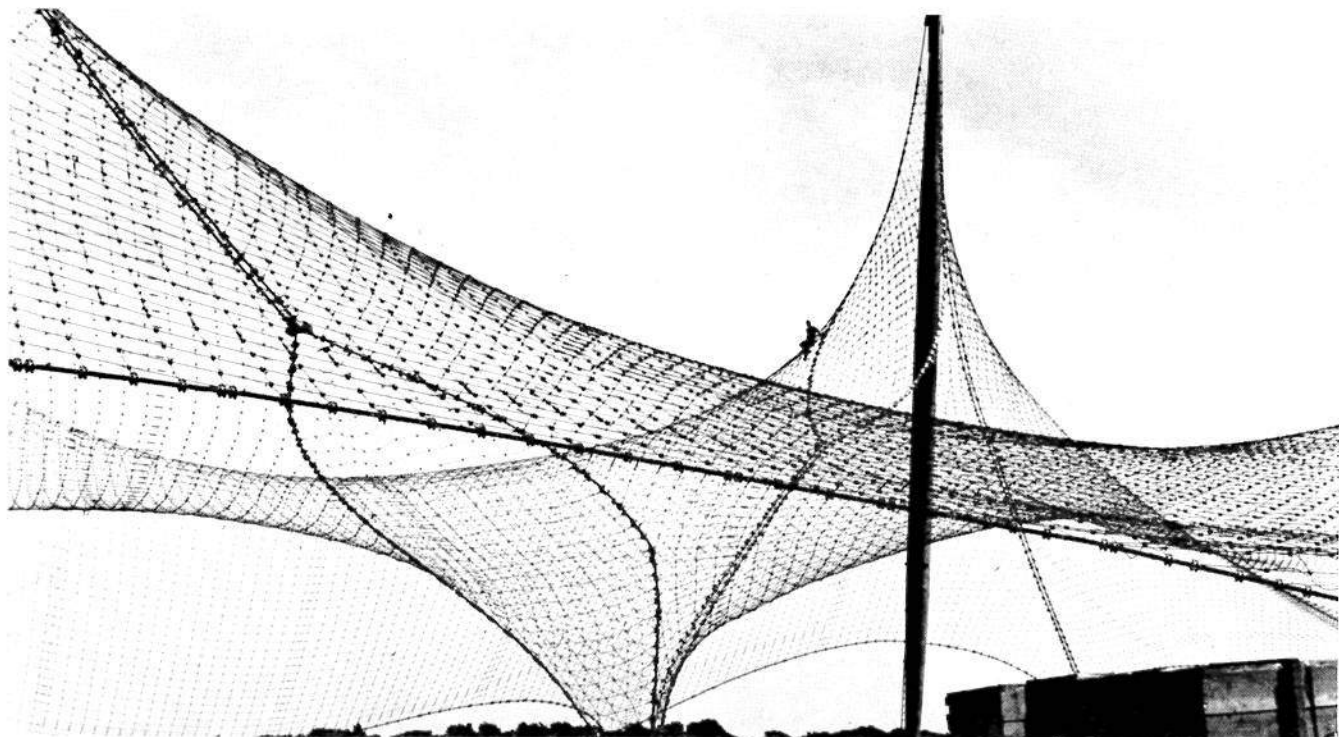
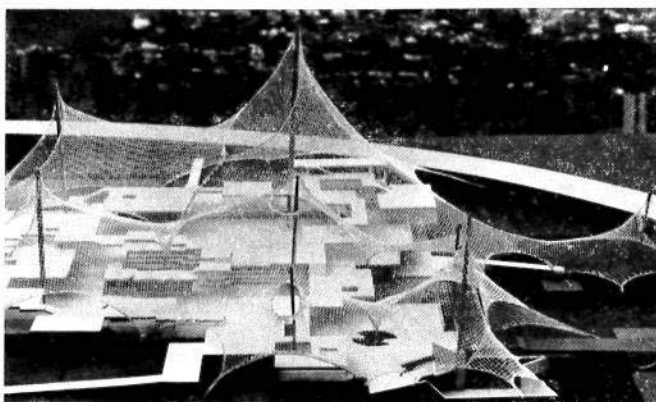
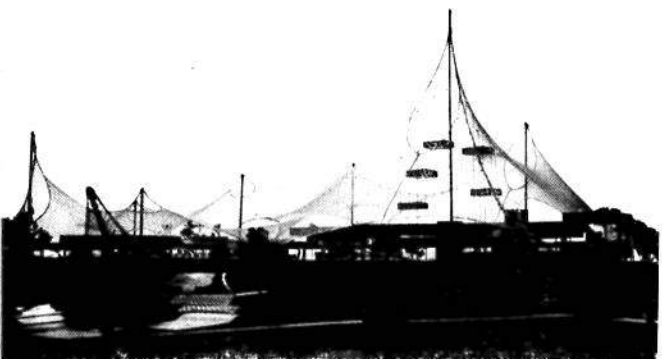
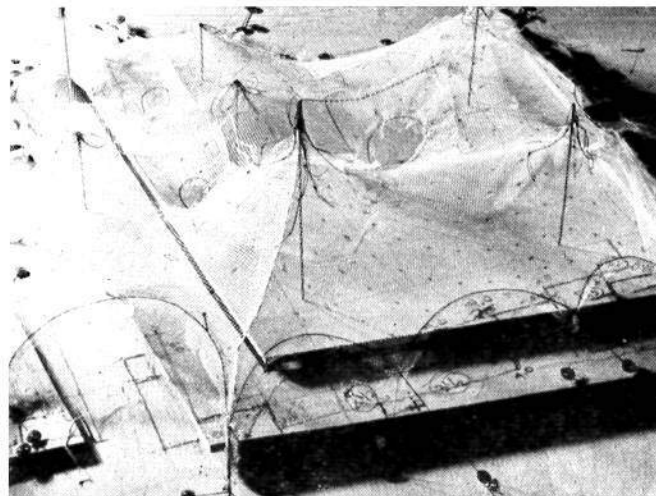
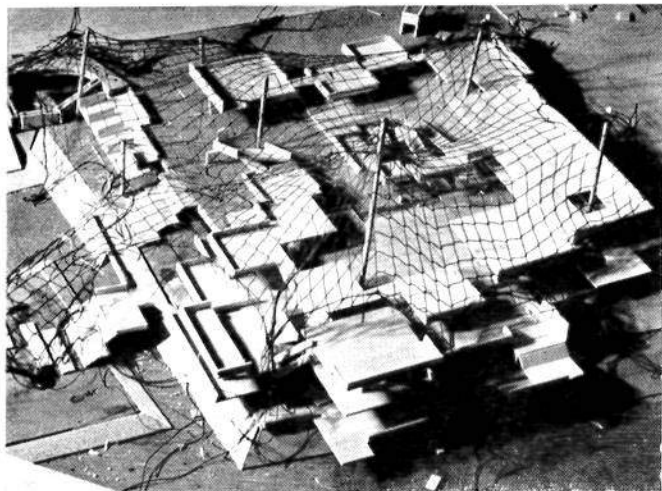
La recherche de la forme devait tenir compte des conditions constructives suivantes :

1. Chaque point de la résille doit se situer sur un parabolioïde hyperbolique (c'est-à-dire se trouver simultanément sur une courbure positive et une courbure négative, afin d'être stabilisé dans l'espace suivant quatre directions).
2. L'orientation de la résille à deux directions doit être choisie de façon que les divers câbles présentent une courbure maximale.
3. La courbure de la résille doit être aussi constante que possible sur toute la surface. Des domaines plats doivent être évités, car ils subissent d'importantes déformations, notamment sous le poids de la neige.
4. L'orientation des câbles doit être telle que les mailles, carrées dans un plan, subissent une déformation rhombique aussi faible que possible par suite de la courbure en selle de la résille.
5. Les nœuds des câbles doivent se situer dans les deux directions sur des courbes harmoniques, afin d'obtenir une distribution continue des contraintes.
6. Les contraintes doivent être aussi égales que possible dans tous les domaines.

Cette dernière condition — contraintes égales sur la surface — impliquerait la recherche de la surface minimale pour une vraie membrane (= peau sollicitée en traction). Tendre vers la surface minimale a également été le point de départ de la recherche de la forme.

Une forme très grossière, réalisée avec un filet de pêcheur, a constitué le premier modèle de travail. Huit mâts étaient prévus dès l'origine. La hauteur et la position des mâts ont été adaptées à la forme de la résille et au paysage d'exposition recouvert. Les second et troisième modèles en tulle fin de Diolen, ont permis une détermination beaucoup plus précise de la forme. Certaines parties ont été découpées et remplacées par des éléments corrigés. La détermination des courbes d'accrochage des câbles périphériques et de la forme des « œils » aux points hauts et bas intérieurs a été particulièrement difficile. Des câbles de retenue intérieurs (« œils ») ont été utilisés pour la première fois à l'occasion de ce projet pour la stabilisation et la précontrainte d'une résille de câbles. L'application de ce nouveau système structural a exigé toute une série d'essais préliminaires.

L'appui ponctuel d'une résille de câbles est difficile à réaliser car des contraintes très élevées apparaissent au point d'appui, d'où partent deux câbles dans le meilleur des cas, et doivent être absorbés essentiellement par ces deux câbles. On obtient des contraintes relativement régulières dans la surface en intro-



duisant un câble de retenue, qui recueille les efforts sur un vaste secteur de la résille et les transmet à la pointe. Ce câble de retenue, qui forme une boucle à son origine, est appelé câble à œil. L'idée de déformer ou de soutenir des peaux sollicitées en traction, c'est-à-dire des membranes, à l'aide de boucles est apparue en 1963 dans les ateliers de développement de la construction légère de Frei Otto à Berlin, au cours d'une série d'essais sur des bulles de savon. On a étudié diverses possibilités d'appui, en partant de plusieurs câbles de retenue disposés en rosace, puis en réduisant le nombre de ces câbles. L'« œil » est une courbe spatiale à courbure constante, qui n'a toutefois pas encore été déterminée mathématiquement. Cette courbe subit une déformation dans une résille de câbles, lorsque les mailles sont rhombiques et non carrées. (Les contraintes dans une résille de câbles à deux directions, rapportées à la surface, sont différentes, contrairement à ce qui se passe dans une membrane d'une bulle de savon.) Afin d'étudier la forme de résilles tendues par des œils, R. L. Medlin a entrepris en 1964 quelques études sur modèle dans les ateliers de développement de la construction légère à Berlin. Cette idée constructive a été appliquée pour la première fois en 1966 pour le projet de Montréal.

Le premier essai de découpage de l'ensemble de la résille dans un seul morceau plan a été abandonné, car les mailles présentaient des déformations rhombiques trop prononcées dans certains secteurs. Un joint de montage a été adopté, qui s'étend transversalement sur la résille et conduit ainsi à réaliser le flan de cette résille à deux directions à partir de deux résilles planes.

Ce projet ayant été classé premier au concours et choisi pour la réalisation, un nouveau perfectionnement de la forme fut entrepris. Le projet soumis au concours fut pratiquement adopté comme point de départ car il ne restait que 18 mois jusqu'à l'achèvement du pavillon. Un modèle précis fut réalisé à l'échelle de 1/100, des parties marginales et des œils devant sans cesse être perfectionnés (afin de satisfaire le mieux possible aux six conditions précitées). De nouveaux essais d'œils sur bulles de savon furent nécessaires, car il apparut que la dimension de l'œil dépend de la courbure et de la contrainte du câble. Les essais sur bulles de savon montrèrent que l'œil diminue quand l'effort croît et peut être sorti de la membrane. (Il est impossible d'accroître la courbure de la membrane au-delà d'une certaine valeur.) Certains œils subissant une déformation par des câbles d'arçier, par suite du joint de montage, des essais furent également entrepris sur des bulles de savon pour ce cas.

Afin de pouvoir apprécier la stabilité de la forme au vent, un modèle de soufflerie a été construit à l'échelle de 1/50, d'après le plan des lignes de niveau du modèle de projet. Des trous fins ont été percés en 130 points de ce modèle, pour mesurer la différence de pression par rapport à la pression statique de la soufflerie. Chaque trou était relié par un tube souple à un petit tube de verre à moitié rempli d'alcool. Les différences de pression produisaient une variation du niveau de l'alcool dans les tubes, photographiés en vue d'un dépouillement ultérieur. (Les essais ont été réalisés à deux vitesses, 20 et 40 m/s, et pour huit orientations différentes du vent.)

Afin de pouvoir déterminer avec précision la forme du plan sous précontrainte, il a fallu construire un modèle de mesure, présentant une similitude aussi précise que possible avec la construction originale et permettant de déterminer toutes les cotes pour la