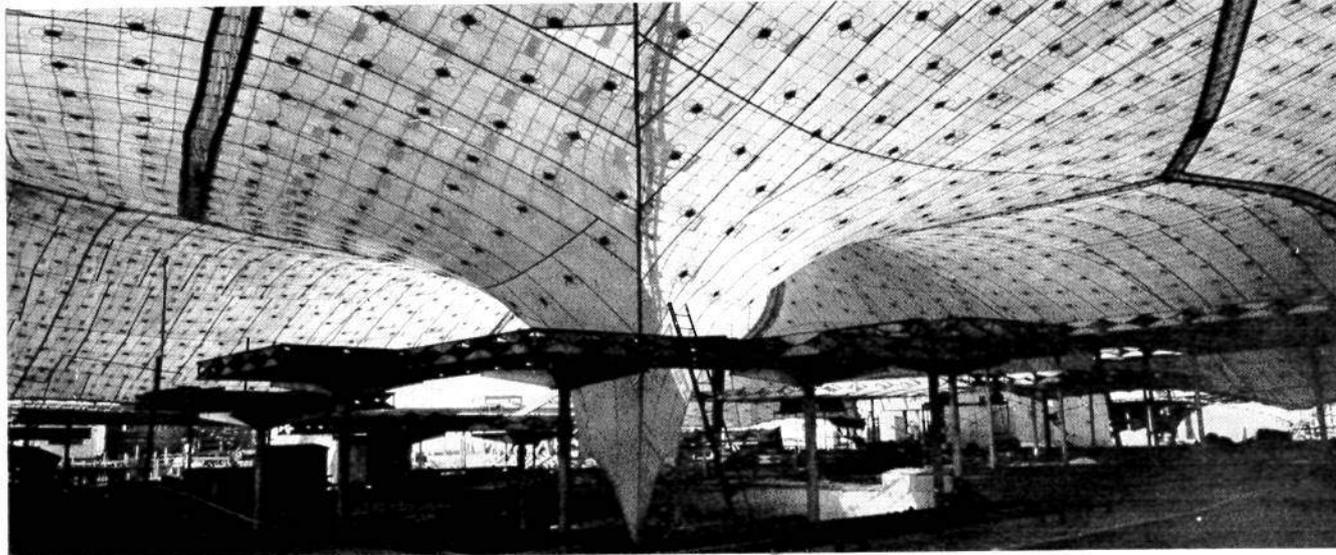
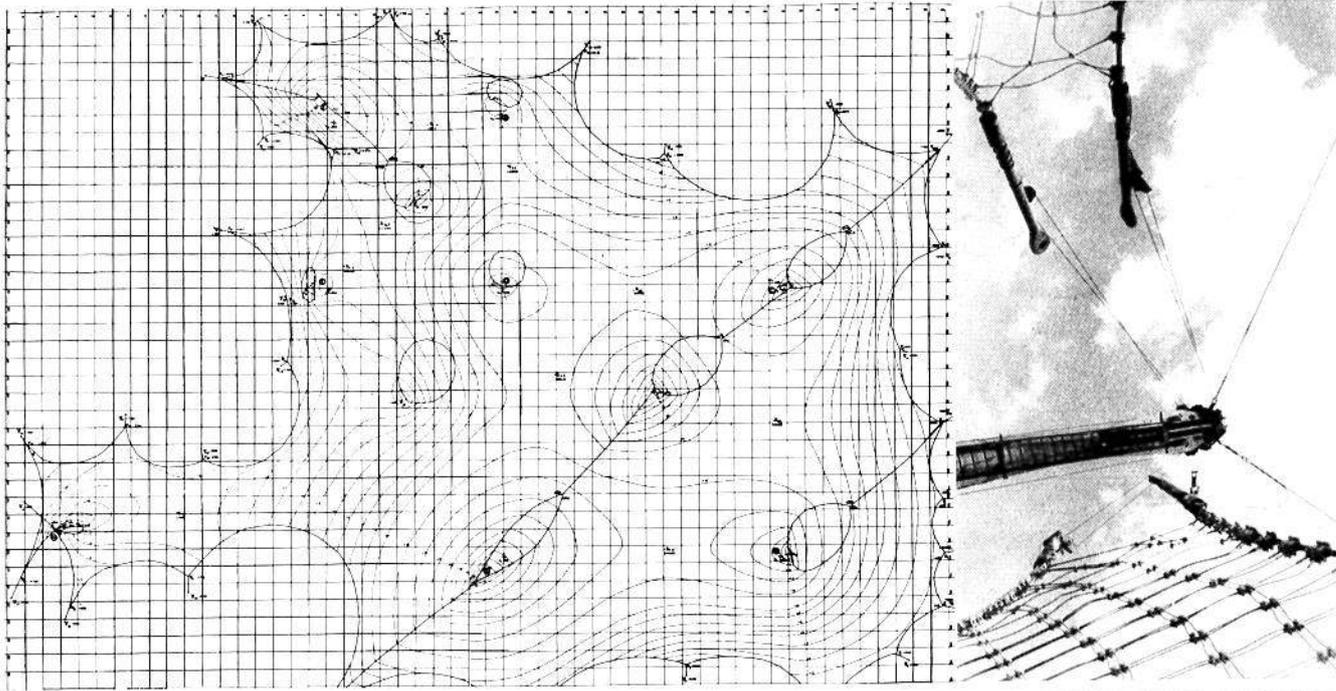
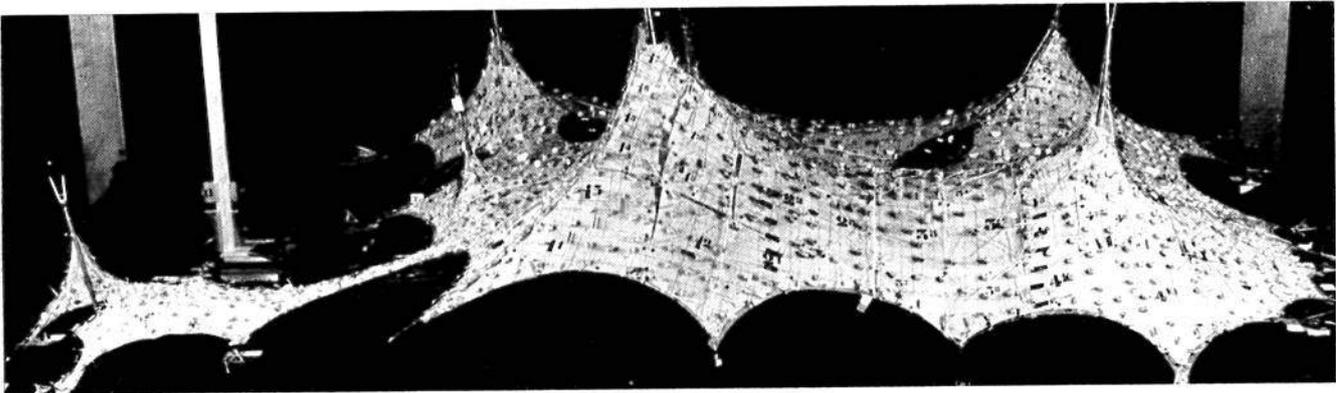


préfabrication de la résille et de la peau. La résille en fil d'acier inoxydable de 0,15 mm a été montée sur un cadre rigide en torsion de  $1,60 \times 2,00$  m, à l'échelle de 1/75 et à partir du flan du dernier modèle en tissu. La préfabrication de la résille a d'abord entraîné de grandes difficultés, les nœuds devant pouvoir pivoter mais non se translater. La résine initialement plane et rectangulaire subit en effet une déviation angulaire pouvant atteindre  $30^\circ$  lors de la courbure spatiale. (Il était donc impossible de souder directement les fils les uns sur les autres, et il a fallu les articuler au moyen de minces fils de cuivre, soudés à  $45^\circ$ .) Un câble sur quatre était représenté par un fil sur le modèle; la longueur des mailles était par suite de 2,67 cm. La longueur des extrémités de câble devait être variable, afin de permettre d'effectuer des corrections. Ce résultat a d'abord été obtenu au moyen de fils de perlon tirés à travers les maillons d'une chaîne fine, parallèle aux câbles périphériques. Des fils de cuivre ont été soudés par la suite, le soudage et le dessoudage de ces fils permettant de réaliser plus rapidement des corrections fines.

Les câbles périphériques et à œil étaient fixés à des tendeurs, permettant de faire varier leur longueur.

Afin de pouvoir comparer les contraintes dans les câbles, on a mis au point des extensomètres mécaniques correspondant exactement à la largeur d'une maille. Par leur appui en trois points, ils produisent une légère déviation du câble, qui diminue quand la contrainte augmente. La déformation est transmise par une tringlerie sur une échelle de lecture de la contrainte. Ces extensomètres se sont révélés être particulièrement pratiques, car ils sont d'un emploi rapide et permettent une mesure absolue de la contrainte. Les nœuds de la résille ayant été placés sur des courbes harmoniques suivant les deux directions des câbles et les contraintes étant pratiquement compensées dans la résille, il est apparu qu'une forme voisine de la surface minimale n'était pas la forme constructive correcte en tous les points. La surface minimale a la propriété de se raccorder tangentiellement aux bords et d'être aussi plane que possible sur les domaines intermédiaires. La résille du modèle de mesure s'est placée très près du sommet des mâts, presque verticalement, tandis que la région centrale de la selle était pratiquement plane. Il a fallu adapter la forme trouvée aux contraintes produites par la neige et le vent, c'est-à-dire augmenter la courbure des domaines soumis à des contraintes particulièrement importantes, afin de maintenir la déformation de la résille entre des limites admissibles, au moyen de forces extérieures. Pour obtenir la variation de forme désirée, des égalités de contraintes ont été prévues et quelques câbles doublés (permettant ainsi d'obtenir une double courbure plus importante des régions susceptibles de se déformer). Des essais de chargement ont été effectués par la suite pour contrôler la déformation produite par la neige (l'essai en soufflerie a montré que la déformation due au vent était négligeable). Une charge de  $100 \text{ kg/m}^2$  due à la neige se traduit pour le modèle de mesure par une charge d'environ 71 g par nœud de la résille. L'interprétation de l'essai de chargement a été effectuée photographiquement, au moyen de photos à double exposition. Chaque nœud chargé a été muni d'une section de mesure à deux points blancs, correspondant à une distance de 1 m. La photo à double exposition, qui représente simultanément la résille non chargée et chargée, permet de déterminer à quelques centimètres près, à l'échelle de 1/1, la déformation de la résille à partir de la relation



entre le déplacement vertical ponctuel et la section de mesure. Tous les travaux précédents visaient à trouver la forme constructive correcte pour ce système de structure. Le problème s'est ensuite posé de rendre cette forme communicable, c'est-à-dire de la déterminer de façon à pouvoir établir des dessins précis des fondations et des projections horizontales, ainsi que des dessins de préfabrication des mâts, câbles périphériques et câbles de la résille. Les coordonnées spatiales de quelques points de la résille étaient en outre nécessaires au calcul des efforts.

La première étape de la détermination de la forme consistait à tracer les lignes de niveau et la projection horizontale de la résille. Un palpeur de ligne de niveau a été construit dans ce but.

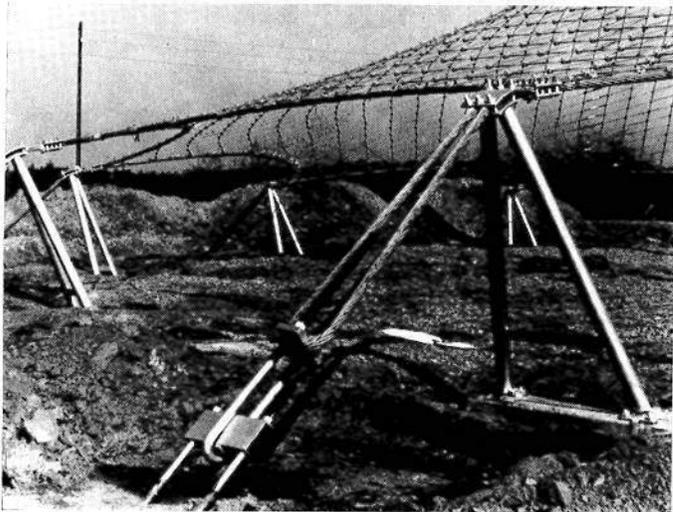
Un plan de dessin a été disposé au-dessus du modèle, sur son bâti. Il s'agit d'une plaque de marbre rectifiée avec soin et ajustable avec précision parallèlement au plan du modèle. L'appareil de pointage, comportant un fil à plomb sous le stylet, était mobile sur cette plaque et permettait de palper les divers points du modèle. (Pour la détermination des courbes de niveau, le fil à plomb a d'abord été réglé à un niveau donné pour contourner le modèle.) Lors du contact du fil à plomb avec un point de la résille, l'appareil déclenché pneumatiquement trace un point. (On peut ainsi obtenir une précision de 0,2 mm.)

La préfabrication de la résille exigeait la détermination de la longueur de chaque câble et de son angle de raccordement au câble périphérique. Il est apparu que la réduction photographique était la méthode la mieux adaptée. La résille a été photographiée par secteurs d'une longueur d'environ 8 cm, qui ont été projetés avec agrandissement sur un plan de dessin, puis tracés à l'échelle de 1/10.

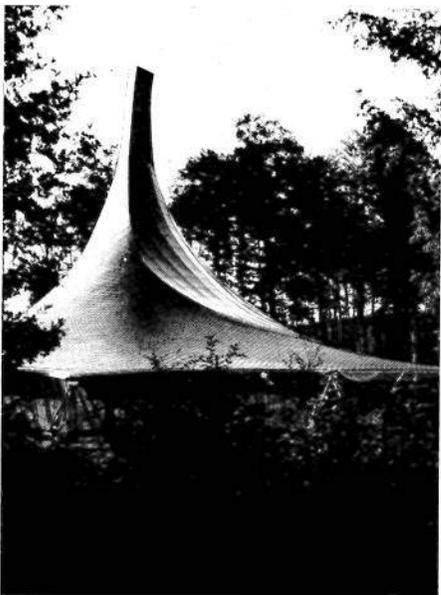
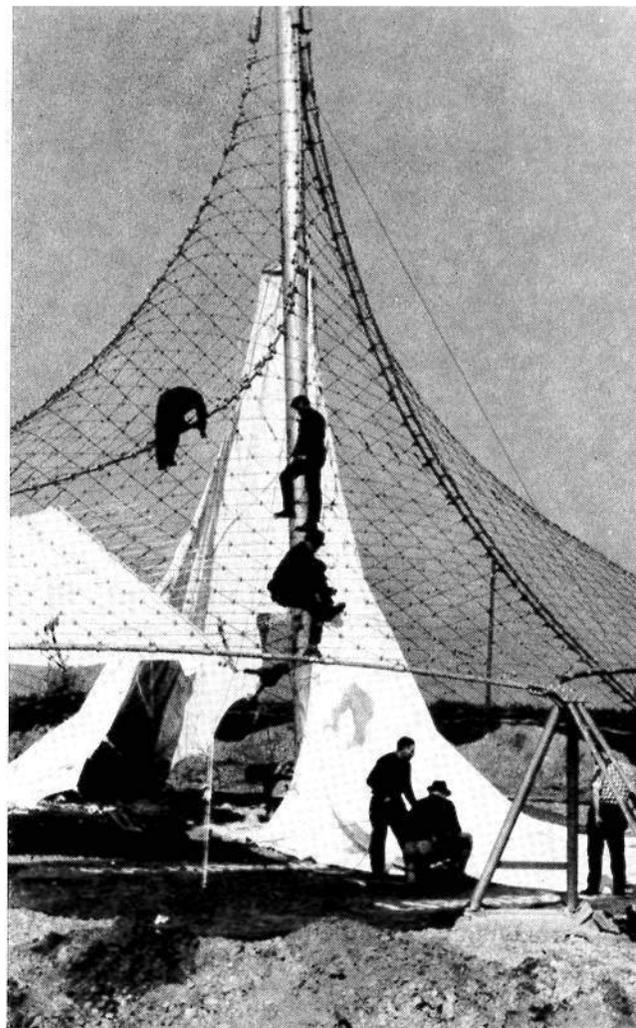
Une seconde méthode d'arpentage a en outre été essayée. La résille a été photographiée en stéréoscopie et les photos dépouillées dans un coordinateur tridimensionnel. Les coordonnées spatiales de chaque nœud de la résille ont été enregistrées sur une bande perforée. Il est envisagé de faire tracer à Montréal, à l'aide de cette bande perforée, des coupes quelconques de la résille par une machine à dessiner automatique.

La détermination du flan de la peau a été techniquement beaucoup plus difficile que celle du flan de la résille. La membrane plastique, située à environ 50 cm au-dessous de la résille, représente un parabolôïde hyperbolique et n'est donc pas développable sur un plan. Il a fallu la réaliser par assemblage de bandes ou de panneaux aussi petits que possible, à découpe concave, afin d'obtenir une courbure à deux directions continue dans une certaine mesure. Afin de déterminer les joints concaves ondulés, l'ensemble de la peau a été réalisé sous la résille du modèle, à l'aide de petits morceaux de toile à calquer. Ces morceaux portaient chacun un quadrillage de coordonnées permettant des mesures relatives.

(Les études de recherche de la forme finale sur modèles et la détermination de la forme sur modèle de mesure, effectuées sous la direction de Frei Otto à l'Institut des structures portantes légères de Stuttgart, ont exigé environ 20 000 heures de travail.) Les calculs statiques ont été effectués en fonction des essais sur modèle. (Statique : Leonhardt et André, collaborateur Egger.) Plusieurs étant nécessaires pour la fabrication des câbles, mâts et serre-câbles, il a fallu déterminer les dimensions des éléments avant la détermination finale de la forme sur modèle. Cette détermination a été effectuée au moyen de calculs approximatifs,



Ci-dessus, montage de la structure expérimentale.  
Ci-dessous, état après transfert.



relativement simples car le dimensionnement de la résille dépend de la précontrainte. Une précontrainte de 1 000 kg par câble a été adoptée. On a choisi un diamètre de 12 mm pour les câbles de la résille et de 54 mm pour les câbles périphériques (on s'est limité à deux diamètres pour des raisons de production; la charge de rupture des câbles de la résille est d'environ 10 tonnes et celle des câbles périphériques d'environ 200 tonnes).

Il a fallu étudier un nouveau serre-câble en croix pour l'assemblage des câbles, aucun modèle utilisable n'existant sur le marché. Un serre-câbles en croix rotatif a été exclu par suite de son prix élevé. Le serre-câbles devait être léger, facile à monter et d'une fabrication économique. (40 000 pièces environ étaient nécessaires.) Il comporte trois parties matricées et peut se monter avec deux vis seulement.

Frei Otto envisageait le développement de mâts haubanés particulièrement légers pour les appuis. Le manque de temps a toutefois imposé l'abandon de ce développement. L'accord s'est fait sur de simples tubes d'acier avec des embouts coniques.

Une construction expérimentale, d'un diamètre d'environ 30 m et d'une hauteur de 17 m, a été réalisée à Stuttgart-Vaihingen pour permettre l'essai en vraie grandeur de tous les détails mis au point, l'étude de la précision des méthodes de détermination de la forme et la mise au point du cycle de montage. Cette construction expérimentale représentait une partie du pavillon. La résille de câbles a été totalement préfabriquée par la Société Stromeyer de Constance, puis livrée à Montréal en rouleaux d'une longueur de 8,5 m. Les mâts zingués, produits par la Société Steffens & Nolle de Berlin, ont été livrés terminés. Seul le mât A, d'une longueur de 38 m, a été livré en deux pièces et assemblé par soudage sur le chantier. Le montage à Montréal s'est effectué de façon très similaire à celle de la construction expérimentale. La résille a été levée sans auxiliaires particuliers, à l'aide des poulies de tête des mâts dressés en premier et haubanés provisoirement. Le déplacement sur la résille n'offrait aucune difficulté, la largeur de 50 cm des mailles n'imposant aucune mesure de sécurité.

- Érection des mâts et haubanage provisoire;
- Assemblage au sol des parties prémontées de la résille;
- Levage de la résille sur les barres à œil;
- Mise au point de la résille, contrôles de la tension;
- Montage des traverses pour la suspension de la peau;
- Assemblage des éléments de la peau en grands panneaux;
- Levage de la peau, fixation des ressorts en trèfle.
- Assemblage en l'air des grands panneaux;
- Mise sous tension de la peau.

Les travaux de recherche de la forme de la grande enveloppe ont été effectués par Frei Otto et Rolf Gutbrod, avec la collaboration notamment de Hermann Kendel et Larry Medlin. Les essais sur bulles de savon ont été effectués sous la direction de Frei Otto et Bernd Friedrich Romberg dans les ateliers de développement de la construction légère à Berlin. La détermination de la forme finale sur les modèles de mesure a été effectuée dans le cadre d'un contrat de recherche de la Direction fédérale de la construction de Berlin, à l'Institut des structures portantes légères, TH Stuttgart, par Frei Otto, avec la collaboration de Eberhard Haug, Larry Medlin, Berthold Burkhardt, Jochen Schilling et l'auteur.