

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 18 (1958)

Artikel: Etude aérodynamique du Pavillon de la France à l'exposition universelle internationale de Bruxelles 1958
Autor: Vallée, Pierre / Pris, Raymond / Bonvalet, Charles
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-16516>

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: 17.05.2025

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

Etude aérodynamique du Pavillon de la France à l'Exposition universelle internationale de Bruxelles 1958

Aerodynamische Untersuchung des französischen Pavillons an der Brüsseler Weltausstellung 1958

Aerodynamic Study of the French Pavilion at the Brussels International Exhibition, 1958

PIERRE VALLÉE, Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées, Directeur Général des Anciens Etablissements Eiffel

Les Ingénieurs-Conseils des Anciens Etablissements Eiffel:

RAYMOND PRIS, Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris, Ingénieur-Docteur

CHARLES BONVALET, Ingénieur
Paris

But et Principes d'établissement de la Recherche

Les Règles définissant l'action du vent sur les constructions, dites Règles N. V. 1946, imposées en France par la presque totalité des Cahiers des Charges et appliquées par tous les Bureaux d'Etudes, ont généralisé la notion d'effort aérodynamique. Il a été vérifié que les efforts de soulèvement sur toiture pouvaient atteindre localement 50 kg au mètre carré pour un vent de 20 m/sec. et 200 kg pour un vent de 40 m/sec.; aussi, actuellement, pour des raisons de sécurité et d'économie, a-t-on de plus en plus recours à l'étude aérodynamique sur maquette avant mise en œuvre, tout au moins pour les constructions présentant un intérêt spécial par suite de leur destination, de leur forme ou de leurs dimensions.

Les essais portent, pour les bâtiments principalement, sur la mesure des pressions extérieures et intérieures, sur la mesure des efforts appliqués aux principaux éléments ainsi que sur les points d'appui, plus particulièrement au niveau des fondations; les contraintes sont également déterminées sur maquette pour certains éléments lorsque l'action du vent y est prépondérante et lorsque la similitude mécanique peut être réalisée.

La visualisation par émission de fumées des courants induits à proximité de la maquette est toujours d'un grand intérêt; elle montre d'une façon très

spectaculaire les raisons de certaines anomalies ou accidents qui ne peuvent être prévus par d'autres moyens. De plus, la photographie permet de garder trace de ces écoulements pour leur examen ultérieur.

L'étude sur maquette permet également de déterminer avec une grande facilité les effets dus à un changement des formes extérieures pour les bâtiments.

L'originalité de la conception du *Pavillon de la France* et la nouveauté des formes qui en répondent nécessitaient des essais en soufflerie sur modèle réduit pour contrôler, dans le projet définitif, les résultats d'un calcul conduit par ailleurs, conformément aux Règles N. V. 1946. En effet, ce bâtiment ne répond pas aux définitions traditionnelles habituelles; de part et d'autre d'un plan de symétrie de la construction, la couverture épouse la forme de deux paraboloides hyperboliques et elle est portée par des « câbles » tendus dessinant deux systèmes de paraboles égales et parallèles à courbures opposées. Ces « câbles » sont attachés sur des poutres sablières placées suivant les côtés de deux quadrilatères gauches définissant également les deux paraboloides hyperboliques. Les câbles « porteurs » ont leur concavité tournée vers le haut, les câbles « tenseurs » ont leur concavité tournée vers le bas et la nappe des câbles tenseurs est placée au-dessus de celle des câbles porteurs; chaque câble porteur est constitué par une batterie de 8 fils d'acier à haute limite élastique de 7 mm de diamètre et chaque tenseur comporte 6 de ces fils; sous l'effet des pressions verticales, les câbles porteurs sont tendus et les câbles tenseurs sont détendus; au contraire, sous l'effet des dépressions, les câbles porteurs sont détendus et les câbles tenseurs sont tendus; de manière à maintenir, dans tous les cas, une tension résultante dans les câbles, il leur est appliqué une pré-tension de 10 tonnes qui assure ainsi la raideur du réseau. Des tôles minces se recouvrant en écailles sont fixées aux câbles et constituent la couverture proprement dite.

Les sommets hauts des paraboloides hyperboliques sont à 35 mètres de hauteur et les sommets bas sont à 17 mètres; l'ensemble couvre une surface de 12 000 mètres carrés et les efforts résultant des charges permanentes et des forces extérieures: neige, vent, dilatations, sont reportés au sol par les fondations des 3 points bas des poutres sablières ainsi que par des poteaux placés sous les sablières. L'aspect architectural est agrémenté par une flèche de 65 mètres de hauteur en porte à faux.

Il a été procédé à deux séries d'essais à la Soufflerie Eiffel sur une maquette au $1/125$. La première série d'essais avait pour but de contrôler les réactions d'appui et les pressions sur la couverture; la seconde série d'essais portait sur la mesure des contraintes dans les câbles portant la couverture.

Des critiques ont été émises à l'encontre de ces essais:

- la maquette représente le bâtiment à l'échelle de $1/100$ et même parfois $1/200$, ce qui apporte un doute quant à l'application sans correction des résultats à la vraie grandeur; c'est la question de la similitude;

- les formes extérieures ne peuvent être reproduites intégralement; certains détails, les moulures par exemple, deviennent invisibles sur une maquette;
- le vent est pulsatoire alors que le courant de la soufflerie est régulier.

L'expérience acquise dans les Laboratoires au cours des trente dernières années permet de répondre à ces critiques.

Similitude. Elle est réalisée lorsque la valeur des pressions mesurées en un point d'un bâtiment et au point correspondant sur la maquette ont même valeur. Aucune correction n'est à apporter aux coefficients données par le Laboratoire. Les forces dues à l'action du vent sur les surfaces composant ce bâtiment (façades, toiture) sont alors proportionnelles au carré des dimensions relatives de la maquette et de la vraie grandeur.

La similitude est obtenue:

1. Lorsque, du fait de la nature de la construction, les coefficients de pression ont une valeur constante, indépendante des dimensions et de la vitesse du courant. Il en est ainsi avec les corps à arêtes vives dont le sillage se forme toujours suivant des lignes bien définies de la surface, plaques planes (fig. 2) ou bâtiments limités par des surfaces se coupant suivant des arêtes vives (fig. 18 et 19).
2. Lorsque les coefficients de pression évoluent avec les dimensions et avec les vitesses, mais que, pour la maquette et la vraie grandeur, on réalise un même nombre de Reynolds ou, pour un même fluide, une même valeur du produit Vitesse $\times$ Dimension caractéristique de la construction (diamètre

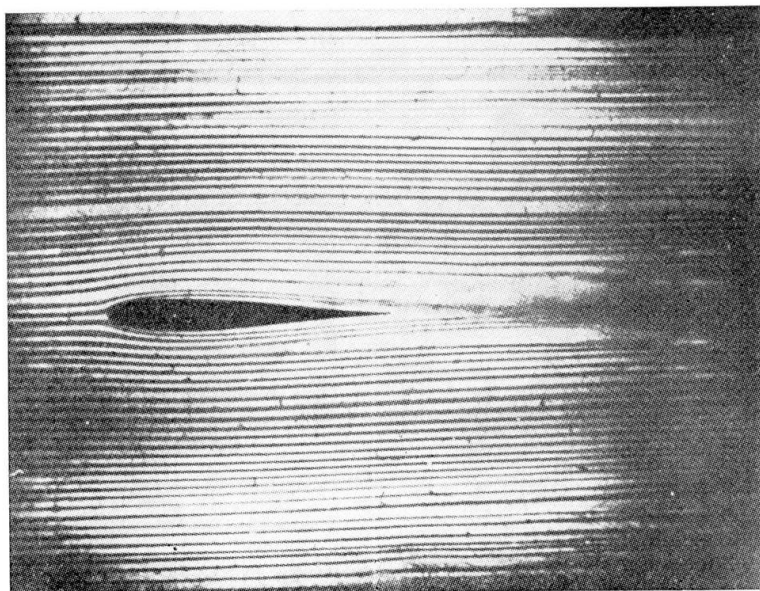


Fig. 1. Ecoulement d'un fluide le long d'un corps délimité par une ligne continue. L'importance du sillage dépend du régime d'écoulement. Les pressions maquette et vraie grandeur ne sont comparables que sous certaines conditions définies par les lois de similitude.

pour les cylindres, les cheminées, longueur pour un corps profilé). On doit avoir $V \times D$ ou $V \times L = C^{te}$. Le sillage formé par exemple en arrière d'un mât profilé (fig. 1), bien que moins intense que celui représenté fig. 2, évolue en fonction du nombre de Reynolds car il se forme sur le contour à partir de lignes différentes.

Suivant l'expression consacrée en Laboratoire, les corps profilés ou arrondis sont sensibles aux effets de la similitude; avec les corps parallélépipédiques, les bâtiments, la similitude est toujours réalisée, ce qui justifie l'adoption d'échelles très réduites pour les maquettes.

Représentation des formes. L'échelle d'une maquette est limitée par les

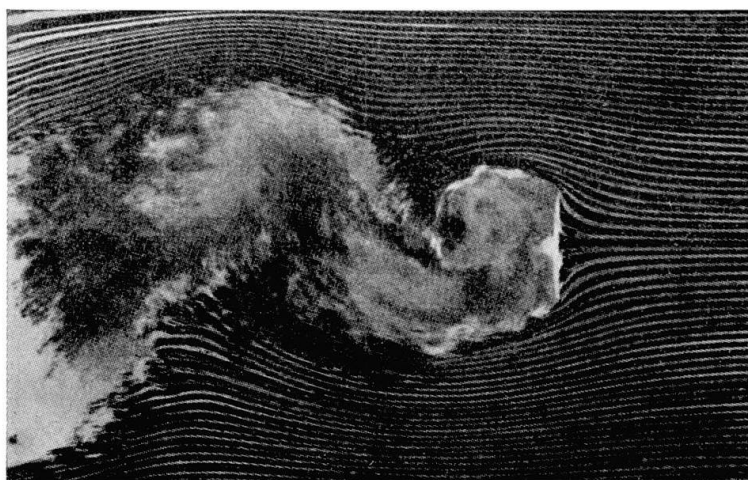


Fig. 2. Ecoulement d'un fluide autour d'une plaque plane normale au courant. Le sillage prend toujours naissance sur les mêmes lignes, au bord de la plaque. La similitude est toujours assurée.

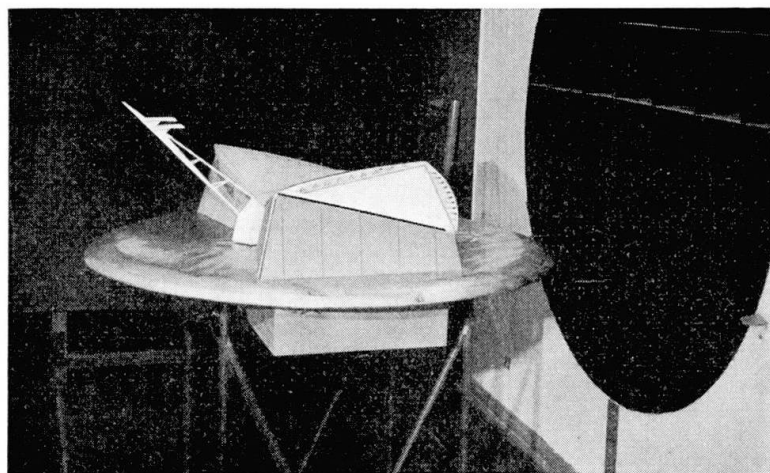


Fig. 3. Montage en soufflerie. Le vent est normal à la façade sud. Une maquette a été montée sous le plateau-sol; elle a pour effet de maintenir le courant parallèle au sol en réalisant la symétrie des résistances aérodynamiques.

dimensions de la soufflerie. Un diamètre de deux mètres est fréquemment réalisé pour la veine d'air (fig. 3). Il est parfois impossible, et même contraire à la précision des résultats, de représenter certains détails figurant sur les façades; si besoin est, leur action aérodynamique, d'ailleurs minime, peut être déterminée sur un élément de maquette à grande échelle. L'échelle adoptée pour la maquette du Pavillon était de $1/125^{\text{ème}}$.

Turbulence du vent. Ses effets sont importants lorsque les constructions sont susceptibles de vibrer ou d'osciller, même par vent régulier, telles les cheminées; des efforts anormaux peuvent alors être enregistrés dans les matériaux. Sur les bâtiments de forme plus ou moins parallélépipédiques, les efforts sont proportionnels au carré de la vitesse moyenne ou de la vitesse de pointe des rafales dont la valeur est liée à celle de la vitesse moyenne. Les règles N. V. 1946 en tiennent compte en majorant celle-ci dans le rapport $115/100$ pour tenir compte de l'effet des rafales.

Ces mesures peuvent donc être effectuées dans un courant à vitesse constante.

Les coefficients obtenus au Laboratoire représentant les efforts ou les pressions peuvent donc être utilisés sans correction pour l'étude des constructions en vraie grandeur.

Préparation des essais. Construction de la maquette. Programme d'essais. Dispositifs de mesure

Construction de la maquette

1. La maquette doit satisfaire aux conditions suivantes:

- représenter avec exactitude les formes générales du bâtiment;
- permettre l'exécution du programme prévu;
- être adaptée au Laboratoire en ce qui regarde les dimensions et les liaisons avec les appareils de mesure.

Les essais ont été exécutés au Laboratoire Eiffel à Paris.

2. La maquette comprend les éléments suivants:

- Un châssis métallique rigide remplaçant les fondations (fig. 4). Il est établi à l'intérieur d'un plateau circulaire de 1,80 m de diamètre et de 6 cm d'épaisseur dont la surface supérieure constitue le sol. Ce châssis n'est donc pas soumis à l'action du vent.
- Le châssis soutient la toiture du Pavillon par six colonnes (fig. 5). La préparation de cette toiture constituée par deux surfaces hyperboloidiques a nécessité la construction d'un gabarit sur lequel ont été appliquées dix couches de contreplaqué de 0,7 mm d'épaisseur. Avant collage, des tubes de 1,5 mm devant servir à la mesure des pressions superficielles étaient insérés à mi-épaisseur.

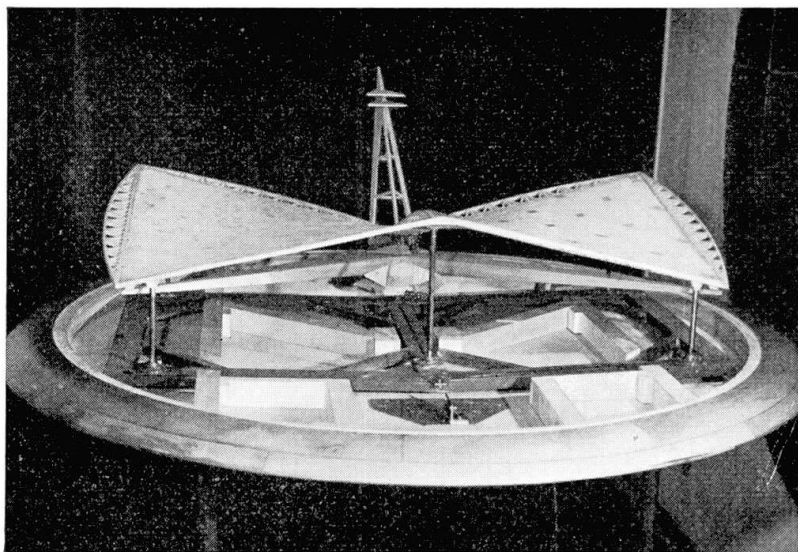


Fig. 4. Bâti-support. Le plateau ouvert montre le bâti formant fondations et soutenant la toiture.

Mesure des efforts résultants horizontaux sur les fondations. Le bâti repose sur trois billes autorisant un déplacement horizontal. Des dynamomètres électrostatiques mesurent les moments dus aux forces autour de trois axes verticaux. On en déduit la position et la valeur de la résultante.

Mesure des efforts verticaux appliqués aux fondations. Mêmes principes pour la mesure. Le bâti possède trois axes de rotation horizontaux successifs. Les billes sont enlevées.

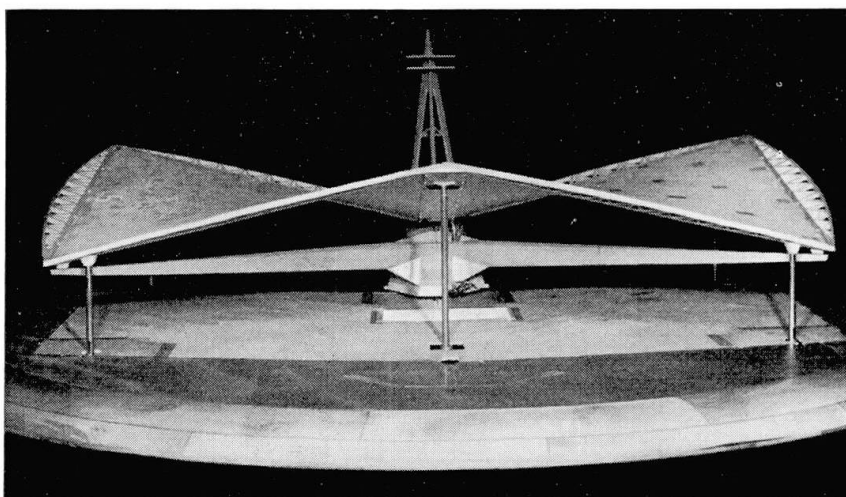


Fig. 5. Maquette sans façades. Vue côté face sud. La surface supérieure du plateau représente le sol à la cote $Z = 0$. Le pied du signal contient une salle de réunion. Les deux poutres diagonales relient l'auditorium aux angles sud-est et sud-ouest de la toiture. Les tiges rondes verticales établissent sur la maquette une liaison rigide entre la toiture et le bâti-support visible sur la fig. 4. La toiture (épaisseur 6 mm) est constituée par dix couches de contre-plaqué mises en forme et collées avec interposition à mi-épaisseur de tubes de prise de pression de 1 mm. Les prises de pression sont placées au centre des rectangles marqués en gris sur le versant est de la toiture. Les pressions ont été enregistrées successivement sur chacune des faces de la toiture.

- Les façades sont constituées par des feuilles en contreplaqué prenant appui sur le plateau à leur partie inférieure et sur la toiture à leur partie supérieure, par l'intermédiaire de fils d'acier disposés de façon à ne pas nuire à la précision des mesures (fig. 6 et 7). La façade Nord (côté signal) était percée de petites ouvertures équivalentes, en ce qui regarde l'écoulement de l'air, aux fentes prévues entre les glaces constituant cette façade en vraie grandeur.
- L'auditorium et le signal sont liés au bâti-fondation. Ils sont représentés fig. 6.

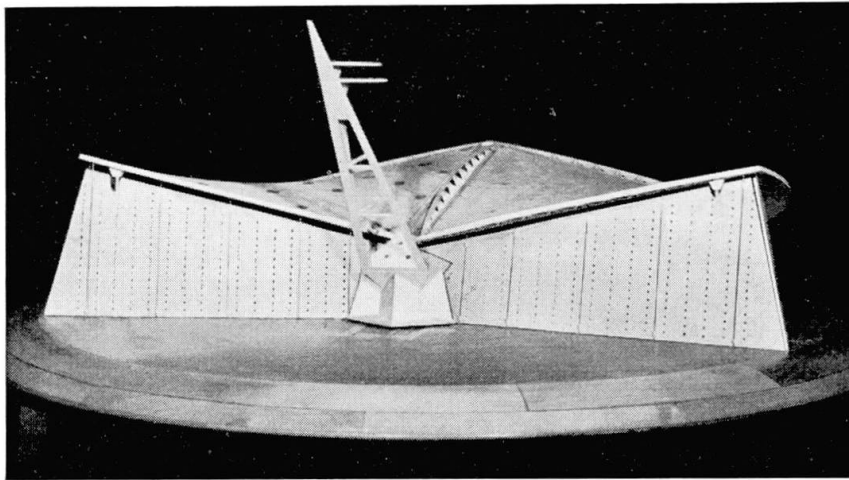


Fig. 6. Maquette avec façades. Vue côté face nord. La face nord est constituée par une verrière comportant des fentes régulièrement réparties entre les éléments vitrés. Pour satisfaire aux conditions de similitude aérodynamique, ces fentes ont été remplacées par les trous visibles sur la photo.

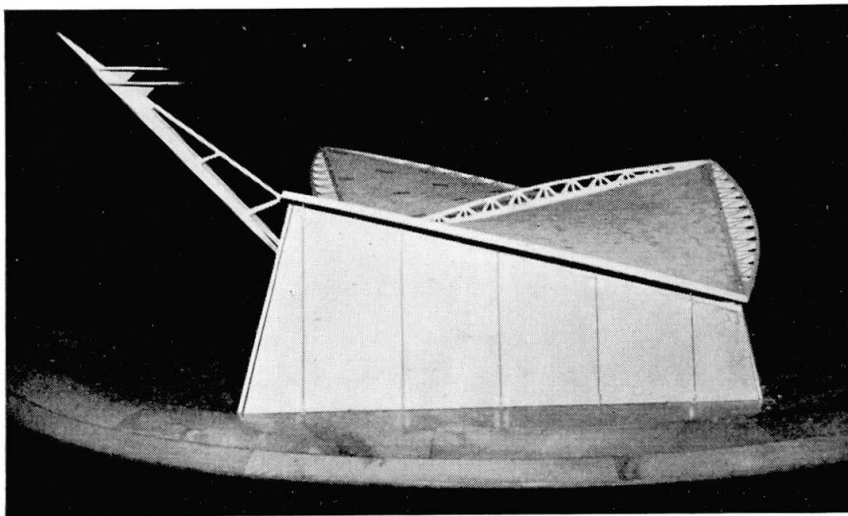


Fig. 7. Maquette avec façades. Vue côté face ouest. En dehors des portes d'accès, les façades ouest, est et sud sont étanches.

Programme d'essais

Les mesures suivantes devaient être obtenues:

1. Mesure des efforts résultants sur les trois points d'appuis principaux $S_1 - S_3 - S_5$ (fig. 8 et 9) et (fig. 10 à 13).
2. Mesure des pressions (fig. 5 à 7 et 14 et 15):
 - sur la toiture seule (fig. 5);
 - sur la toiture en présence de trois façades, la quatrième faisant face au vent étant enlevée, ce qui est la représentation du Pavillon partiellement construit;
 - sur la toiture en présence des quatre façades (fig. 6 et 7).
3. Mesure des contraintes créées dans les câbles formant toiture sous l'action du vent. Le montage et l'exécution de ces dernières mesures ont été effectuées par les Services du Laboratoire des Bâtiments et des Travaux Publics à Paris utilisant la maquette précédente après remplacement de la demi-toiture établie pour la mesure des pressions par une demi-toiture métallique.
4. Visualisation des courants à proximité de la maquette (fig. 18 et 19).

Mesure des efforts résultants sur les points d'appui

Une balance spéciale à six composantes, munie de dynamomètres électrostatiques est en étude au Laboratoire Eiffel; la préparation des essais sera facilitée et leur durée notablement diminuée.

Pour les essais actuels, un montage mécanique simple a été utilisé en faisant appel au principe de cinématique exprimant que tout système de forces peut être déterminé en valeur, direction et position si l'on connaît ses moments par rapport à trois axes.

Trois axes horizontaux $S_1 S_3 - S_1 S_5 - S_3 S_5$ ont été établis (fig. 8); le palier S_5 de l'un d'eux est représenté fig. 10. Le dynamomètre électro-statique visible fig. 11 monté au sommet S_4 (fig. 8) permettait, à l'aide des boîtes de mesure représentées fig. 12, d'effectuer la mesure des trois couples correspondant aux efforts horizontaux.

Le bâti reposant sur trois billes et trois axes verticaux étant établis aux sommets $S_1 - S_3 - S_5$ (fig. 9), le même dynamomètre monté en $D_1 - D_3 - D_5$ permettait d'effectuer successivement la mesure des moments autour de ces axes.

Le système de forces étant ainsi réduit dans le plan Z_1 du châssis, son transport dans le plan Z_2 des fondations ne présente pas de difficultés (fig. 13). Les points d'application des résultantes sont modifiés, sans que soient changées leurs valeurs. Les forces F_{H1} et F_{H2} se correspondent, ainsi que F_{V1} et F_{V2} .

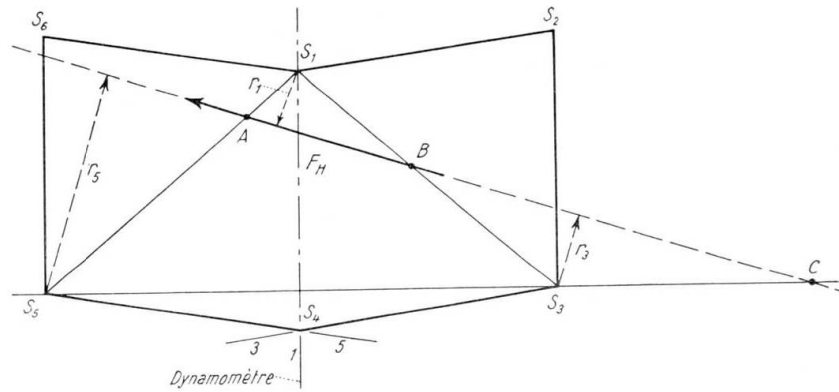


Fig. 8. Force résultante horizontale (F_H). Intensité et position dans le plan Z . Axes de mesure des moments $S_1 S_3 S_5$.

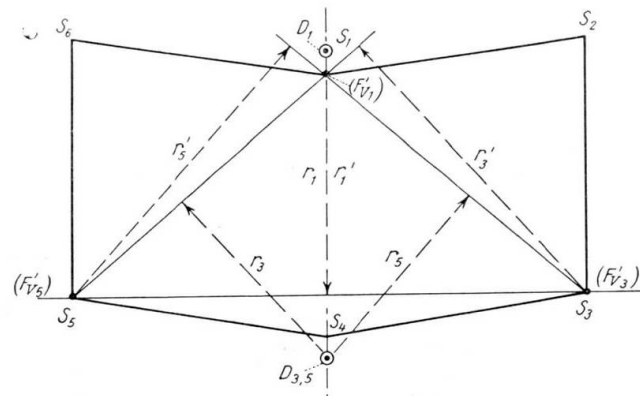


Fig. 9. Forces composantes verticales en $S_1 S_3$ et S_5 . Axes de mesure des moments: $S_1 S_3 - S_3 S_5 - S_1 S_5$. Emplacement des dynamomètres: D_1 et $D_{3,5}$.

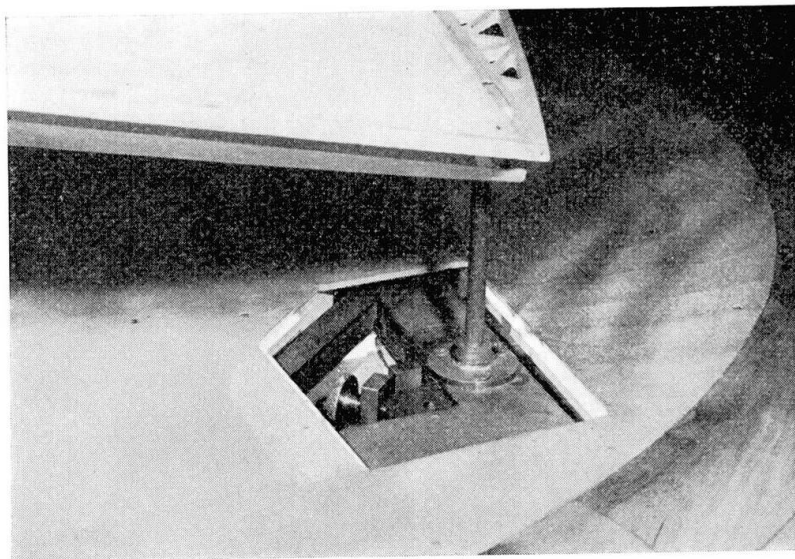


Fig. 10. Axes de rotation. Le couvercle $Z=0$ est enlevé. On voit une vis avec bouton molleté constituant l'un des paliers de l'un des axes horizontaux servant à la mesure. L'extrémité supérieure de l'un des axes verticaux est visible sur le bloc palier.

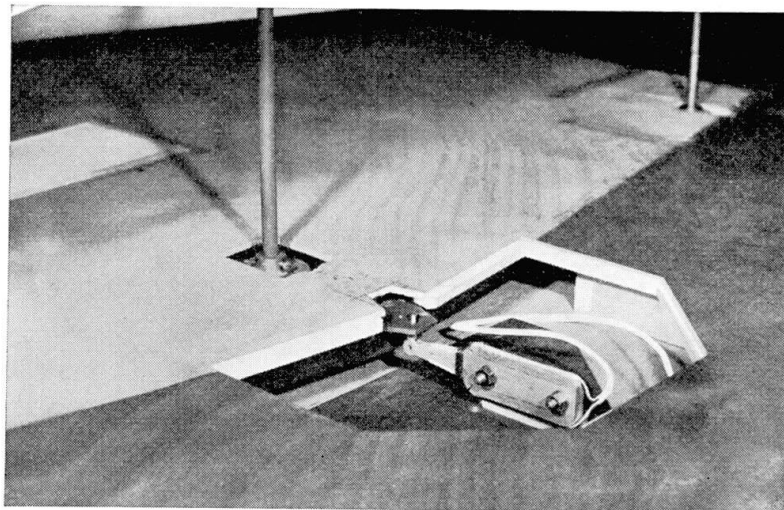


Fig. 11. Jauge électrostatique. Le couvercle étant enlevé, on voit le montage du dynamomètre mesurant l'une des composantes de l'effort vertical sur les fondations. Le bâti repose sur la tête de la jauge.

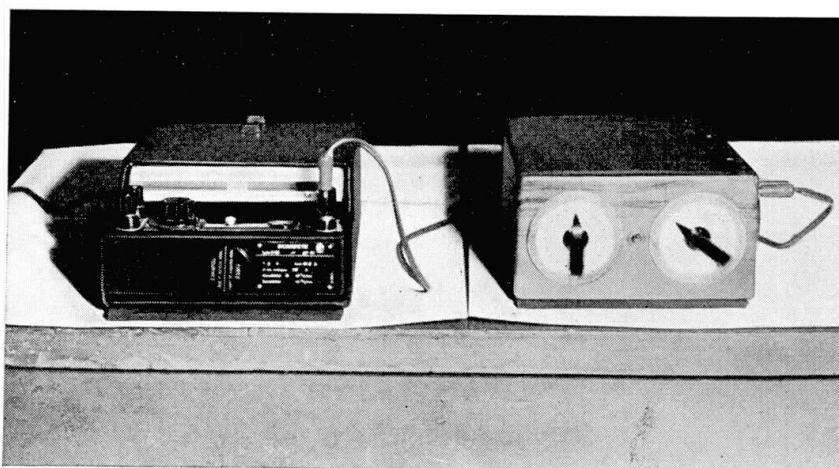


Fig. 12. Enregistrement des mesures. L'effort exercé sur la jauge produit une déviation du spot lumineux visible sur la boîte de mesure à gauche de la photo. Il est ramené au zéro par le jeu des manettes visibles à droite. On lit l'écart angulaire.

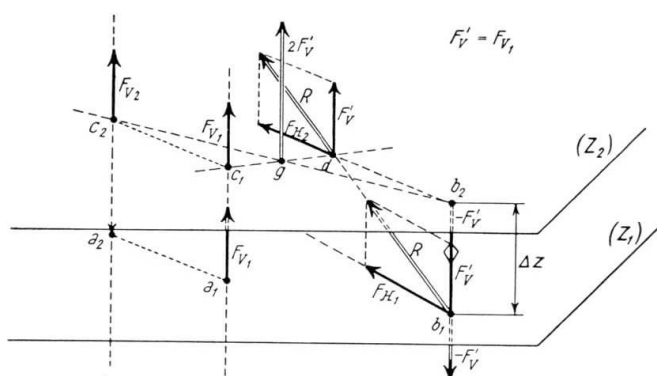


Fig. 13. Transport des forces résultantes. $F_{H1} F_{V1} (Z_1)$ dans le plan $(Z_2) F_{H2} F_{V2}$.
Déplacement des lignes d'action: $a_1 a_2 \quad b_1 b_2 = \Delta Z \quad F_{V2} = F_{V1} \quad F_{H2} = F_{H1}$.

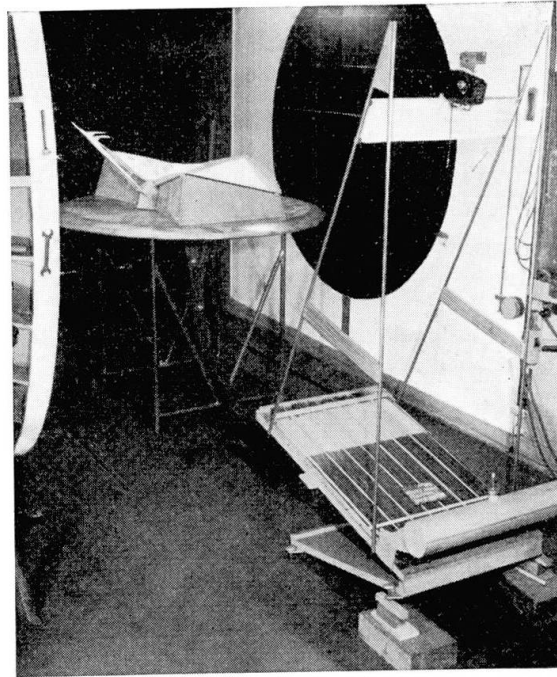


Fig. 14. Multimanomètre. Chacune des 62 prises de pression (toiture et façades) est reliée à l'un des tubes du multimanomètre. L'ensemble est photographié par un appareil monté à la partie supérieure du bâti.

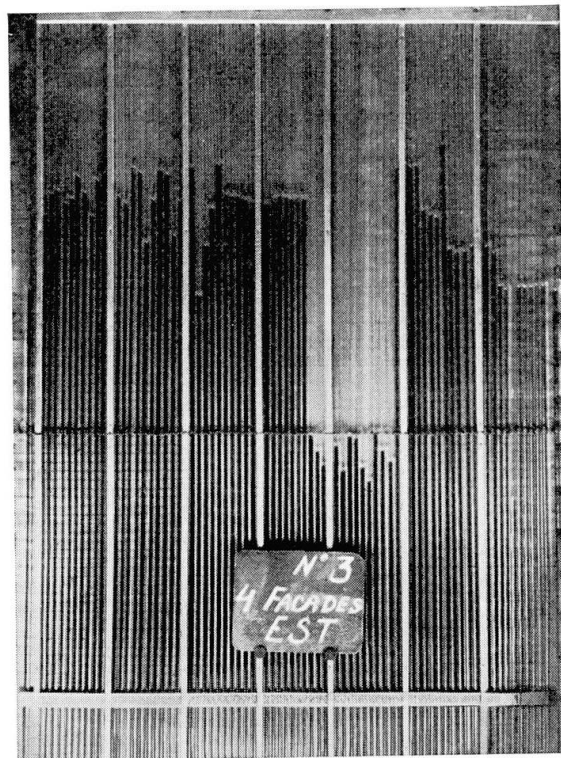


Fig. 15. Enregistrement manométrique (maquette avec 4 façades, vent est). Les tubes 1 à 25 donnent les pressions de la demie toiture, côtés est de la maquette, surface supérieure. Les tubes 26 à 61 les donnent sur les façades côté est. Le tube 65 donne la pression dynamique (q).

Mesure des pressions

1. *Toiture.* Les tubes encastrés dans l'épaisseur de la toiture, dont il a été question ci-dessus, se terminent dans des cavités pouvant être mises successivement en communication avec l'une et l'autre des faces de la toiture; les points de prise de pression sont visibles sur la partie droite de la maquette fig. 4 et 5. Ils sont reliés aux tubes d'un multimanomètre permettant l'enregistrement photographique simultané de 60 prises de pression (fig. 14). La fig. 15 représente l'un de ces enregistrements; les surpressions et les dépressions s'évaluent par rapport au niveau zéro figuré par les deux derniers tubes, droite et gauche. Le tube n° 65 permet de déterminer la valeur de la vitesse du courant.

2. *Façades.* Les tubes de pression encastrés dans les contreplaqués sont montés vers l'intérieur de la maquette. Les enregistrements s'effectuent comme il est dit ci-dessus.

Résultats obtenus. Valeurs des forces résultantes et des pressions sur le Pavillon

Forces au niveau Z_1

Les valeurs des rapports: $\frac{\text{Forces}}{q}$, q pression dynamique égale à $\frac{V^2}{16}$ (Règles N. V. 1946, p. 8), sont inscrites dans le tableau 1; elles s'appliquent au Pavillon en vraie grandeur. F_H désigne les forces résultantes horizontales en kg, F'_V les

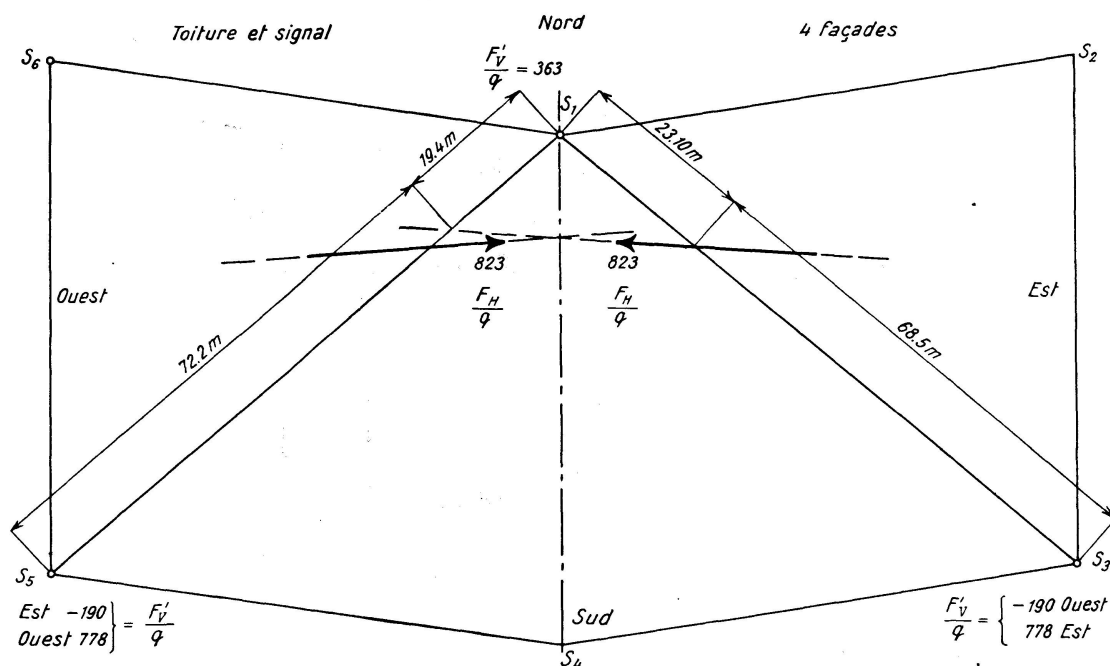


Fig. 16. Vent est et ouest.

composantes verticales sur les points d'appui et F_v les forces résultantes verticales.

Un exemple de mise en position de ces forces est donné fig. 16.

Pressions (fig. 17)

1. *Toiture.* Les pressions extérieures (p_e) et intérieures (p_i) sont données par l'expression des rapports $\left(\frac{p_e}{q}\right)$ et $\left(\frac{p_i}{q}\right)$ aux points marqués.

2. *Façades.* La pression intérieure a une valeur uniforme; dans la configuration présente, $\frac{p_i}{q} = -0,175$.

Valeurs numériques

1. *Forces horizontales.* La lecture du tableau 1 montre que la toiture sans façades, avec signal et auditorium, subit par vents Sud, Est et Ouest un effort de renversement supérieur à celui déterminé pour l'ensemble toiture-façades; cet effort est même doublé par vents Est et Ouest. Ce résultat, surprenant au premier abord, a les causes suivantes:

Tableau 1. Forces résultantes horizontales $\left(\frac{F_H}{q}\right)$ m/kg. Vraie grandeur.

Vent	Nord	Sud	Est (ou Ouest)
Sans façades	1815	1805	1720
4 façades	1930	1450	823
3 façades	1390	2045	1205

Forces composantes et résultantes verticales $\left(\frac{F'_v}{q}, \frac{F_v}{q}\right)$ m/kg. Vraie grandeur.

		$\frac{F'_v}{q}$	$\frac{F_v}{q}$	$\frac{F'_v}{q}$	$\frac{F_v}{q}$	$\frac{F'_v}{q}$	$\frac{F_v}{q}$
Sans façades	S_1	1033		151		366	
	S_3	- 625	- 217	1762	3675	1190	1292
	S_5	- 625		1762		- 264	
4 façades	S_1	2460		215		363	
	S_3	406	3272	588	1031	- 190	954
	S_5	406		588		- 190	
3 façades	S_1	7060		4650		4570	
	S_3	2390	11 840	3770	12 190	3180	9920
	S_5	2390		3770		2170	

Signe +, forces ascendantes. Signe -, forces descendantes.

- les façades, et en particulier la façade au vent, ne transmet à la toiture que la moitié environ de sa résistance propre, l'autre moitié étant prise par les liaisons au sol;
- comme le montrent les visualisations de courant pour un vent de direction Sud (fig. 18 et 19), le bâtiment dans son entier et pour toutes les directions, est plongé à l'intérieur du sillage créé par la façade au vent; l'augmentation de résistance provenant de cette façade est plus que compensé par la diminution de la résistance des autres éléments.

2. *Forces verticales.* Elles proviennent presque uniquement des effets du vent sur la toiture. Elles ont en général un effet de soulèvement.

Une vitesse de référence de 40 m/sec. est souvent adoptée dans les calculs, bien que cette valeur corresponde à une tempête tout à fait exceptionnelle (144 km/h). Dans ce cas, les efforts de renversement et de soulèvement auraient les valeurs suivantes en ce qui concerne le Pavillon avec les quatre façades, portes fermées (tableau 2).

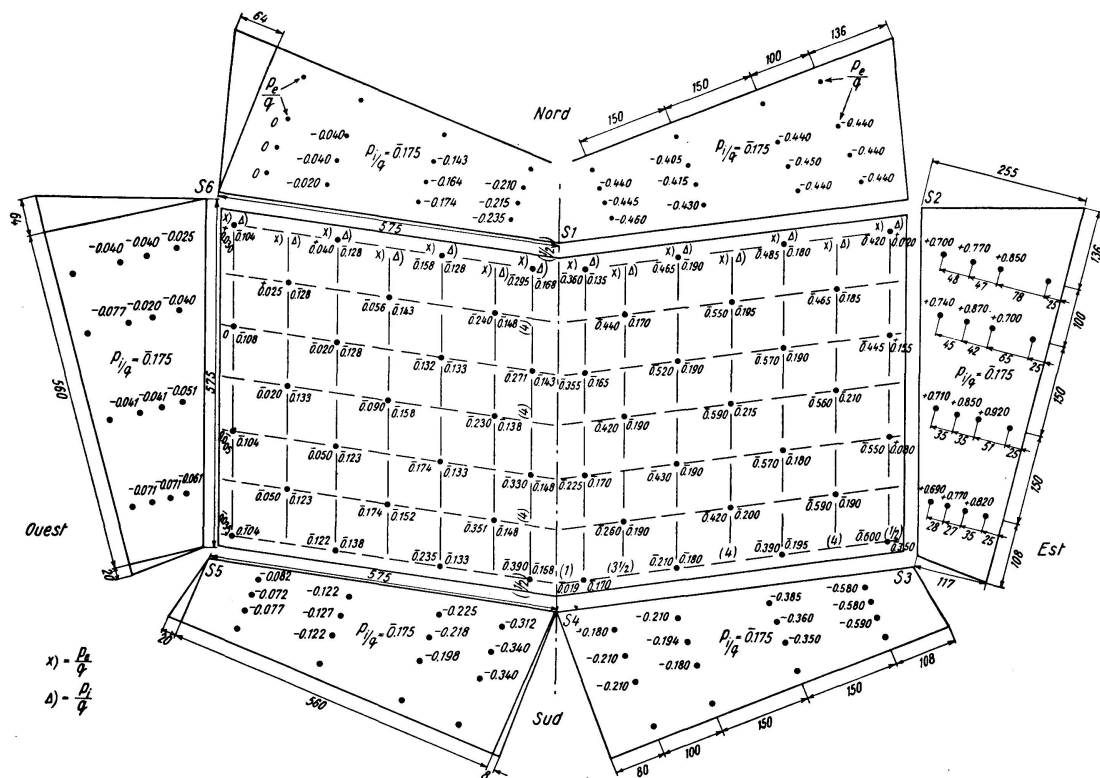


Fig. 17. Exposition de Bruxelles. Pavillon de la France. Les pressions sur la toiture et les façades. Configuration: Bâtiment avec toiture et signal. 4 façades. Direction du vent est.

Par vent ouest les pressions sont disposées symétriquement.

$$\frac{p_e}{q}, \text{ extérieur et sur toiture. } q = \frac{V^2}{16} \quad \frac{p_i}{q}, \text{ intérieur et sous toiture.}$$

+ surpression - dépression

Les chiffres () donnent l'écartement des prises de pression sur toiture évalué en longueur de diagonale du réseau des cables de la maquette. Les cotes sont relevées sur la maquette.

Tableau 2. Valeurs numériques des efforts. Vitesse du vent: 40 m/sec.

Direction du vent	Nord	Sud	Est et Ouest
Forces horizontales (tonnes)	193	145	82
Forces verticales résultantes ascendantes (tonnes)	327	103	95

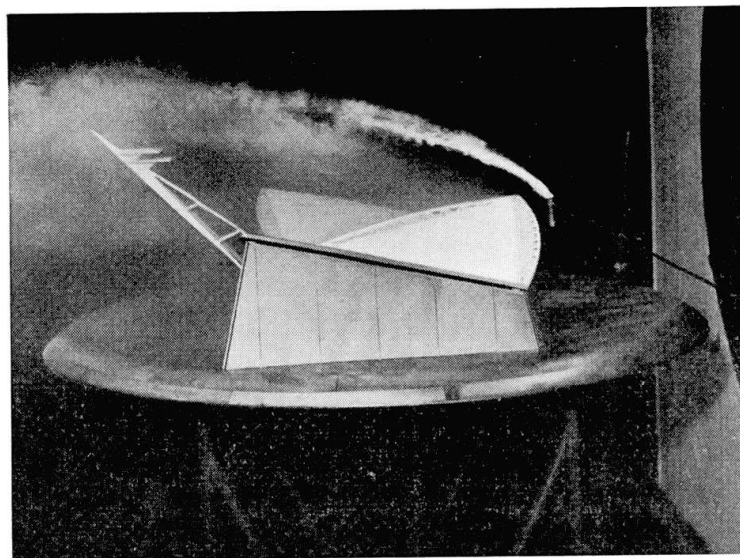


Fig. 18. Visualisation du courant. Maquette avec façades, vent sud. Prise de vue instantanée. La turbulence du courant est très forte. On distingue un courant inversé en arrière de la façade nord.

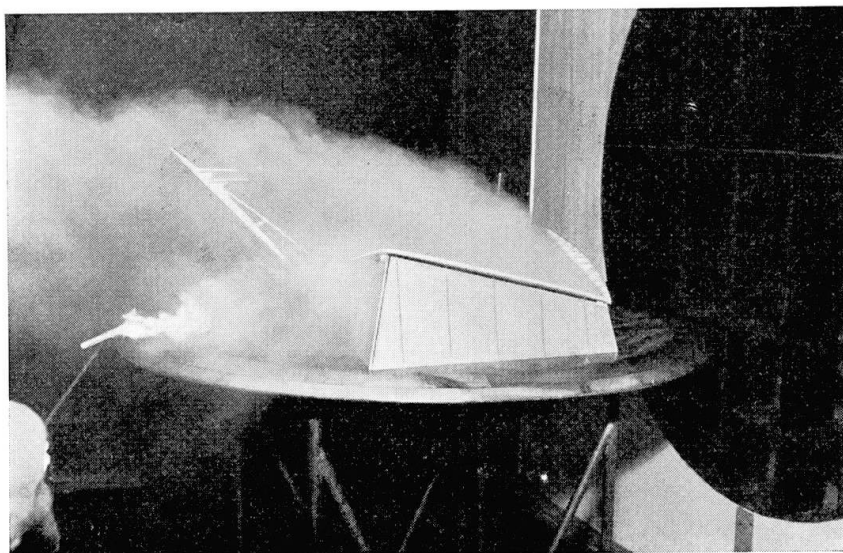


Fig. 19. Visualisation du courant. Emission nord. Le cliché est inversé du précédent. Le courant est visualisé à l'intérieur de la zone de sillage; il remonte le vent jusqu'à la poutre de rive de la façade sud.

Des valeurs plus importantes seraient à envisager en cas de destruction de la face Sud.

3. *Pression.* Les valeurs inscrites fig. 17 montrent parfois l'existence de variations importantes des pressions sur une faible distance, ce qui peut être à l'origine d'efforts locaux supplémentaires pour certains éléments de la construction. Pour un vent de 40 m/sec., les valeurs extrêmes correspondent à une surpression de 90 kg/m² sur façade au vent et à une dépression de 57 kg/m² en toiture.

Mesure des contraintes dans les câbles

A la suite de la mesure des résultantes des efforts aérodynamiques, et des pressions aérodynamiques sur le modèle qui a fait l'objet de l'étude que Monsieur PRIS a menée à bien, il a été procédé à la détermination sur une maquette représentant la moitié de la toiture du Pavillon de la France, des contraintes dans les câbles dus à la poussée du vent. Ces essais ont eu lieu également à la Soufflerie Eiffel.

Cette demi-maquette, de même échelle dimensionnelle, c'est-à-dire $1/125$, que celle qui a permis l'étude aérodynamique proprement dite, a été ajustée à côté de l'autre moitié symétrique de l'ouvrage constituée par la moitié de la maquette aérodynamique. Plus précisément, la moitié Ouest de la maquette aérodynamique a été conservée et la maquette qui a fait l'objet de la mesure des efforts dans les câbles représente la moitié Est de l'ouvrage.

Le modèle a été réalisé en laiton, aussi bien les poutres de rive que les câbles de la toiture (voir fig. 20). Le choix s'est porté sur ce matériau car il était nécessaire de pouvoir coller les extensomètres, donc de disposer d'une largeur suffisante d'une part, et d'obtenir des déformations mesurables, donc

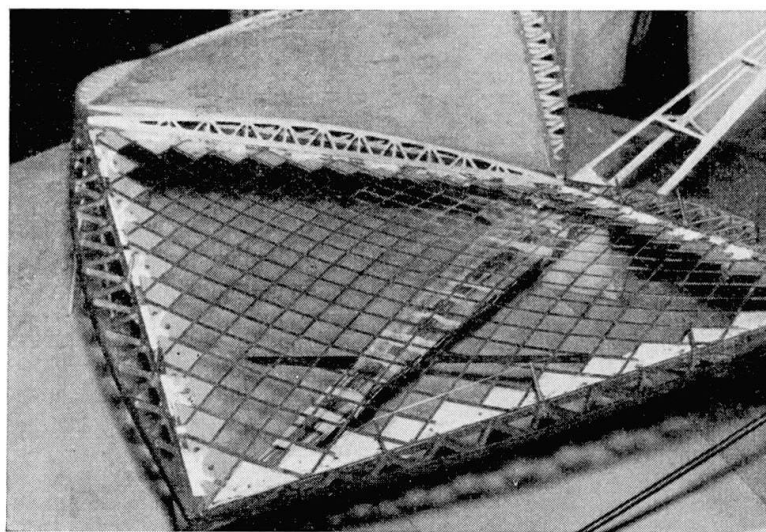


Fig. 20. Vue des câbles du modèle avant la pose de la toiture.

d'utiliser un matériau de module d'élasticité relativement faible, d'autre part.

Les câbles de toiture ont été figurés par du clinquant de laiton de $15/100$ mm d'épaisseur. L'échelle dimensionnelle du modèle étant égale à $1/125$, la largeur des bandes de clinquant a été choisie égale à 3 mm pour les câbles tenseurs et à 4 mm pour les câbles porteurs. Ces dimensions sont telles qu'elles respectent le rapport des sections des deux familles de câbles. Alors qu'il existe en réalité 39 attaches de câbles par poutre de rive, le modèle n'en a représenté que 13 pour des questions d'encombrement. Donc 1 câble du modèle réduit figurait 3 câbles du prototype. Cette disposition ne modifiait en rien la répartition des efforts dans l'ensemble des câbles.

Ces conditions de base de la conception du modèle-réduit ainsi définies, nous allons décrire succinctement la réalisation pratique de la toiture.

Chaque câble du modèle (câble triple en réalité) a été lié avec la famille de câbles orthogonaux le coupant, par l'intermédiaire d'un rivet en cuivre de $15/10$ mm de diamètre. La fig. 20 reproduit la photographie des deux réseaux de câbles, avant la pose de la toiture. Celle-ci a été obtenue en bouchant chaque carré élémentaire limité par deux couples de câbles orthogonaux, par deux carrés de contreplaqué de 1 mm d'épaisseur disposés l'un sur l'autre, et liés ensemble par un petit boulon de $15/10$ mm de diamètre les traversant en leur centre. Un des carrés s'appuie sur les deux câbles porteurs et l'autre sur les deux câbles tenseurs, de telle manière que l'imperméabilité de l'ensemble de la toiture à l'air soit quasiment parfait. La fig. 21 représente la photographie de la maquette avec sa toiture. Etant donnée la disposition des carrés de contreplaqué, un seul des deux réseaux de câbles est visible (les câbles tenseurs en l'occurrence). Seul l'autre réseau apparaîtrait si la photographie du dessous de la toiture avait été faite.

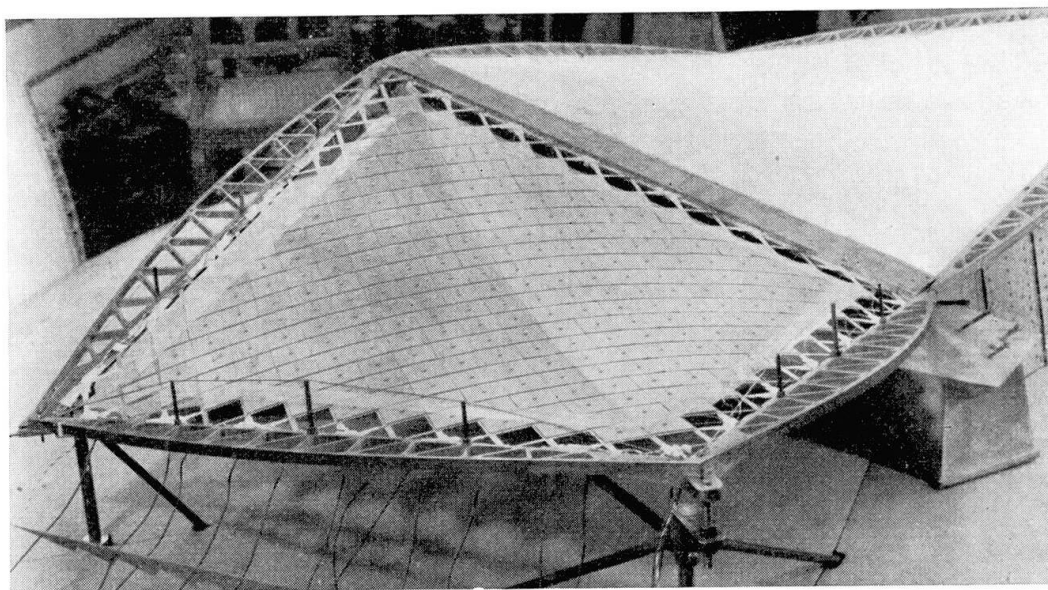


Fig. 21. Vue de la toiture et des extensomètres à fil résistant.

D'autre part, pour brider tout déplacement des poutres de rive, perpendiculairement à leur plan, sous l'action de la composante verticale des efforts dans les câbles, la fixité a été acquise en assujettissant trois points intermédiaires de chaque poutre à un socle absolument rigide, à l'aide de tirants filetés de 3 mm de diamètre reliant chacun des points considérés au socle. L'extrémité de ces tirants est visible sur la photographie de la fig. 22 représentant la maquette prête à être essayée en soufflerie. La présence de ces tirants dans la veine de la soufflerie ne constituait pas une source d'erreur, d'autant plus que l'ouvrage réel possède une rangée de poteaux soutenant chaque poutre de rive. Enfin, les points bas Nord et Sud-Est ont été rendus fixes l'un par rapport à l'autre à l'aide d'une barre rigide dont les extrémités s'accrochaient respectivement sur les poteaux Nord et Sud-Est.

Le modèle ayant été ainsi fabriqué, des appareils de mesure extensométrique ont ausculté les extrémités d'un certain nombre de câbles porteurs et tenseurs, à raison de un sur deux. Ces appareils sont des extensomètres à fil résistant. Leur principe est le suivant: Supposons un fil métallique très fin de $\frac{2}{100}$ mm de diamètre environ, en alliage cupro-nickel par exemple, collé sur la surface d'un matériau dont les déformations doivent être mesurées. Ce fil est isolé électriquement du matériau par l'intermédiaire de deux feuilles de papier très mince entre lesquelles il est emprisonné et par rapport auxquelles il est lié solidairement par collage.

L'ensemble formé par le fil et ses feuilles protectrices est collé sur le matériau au droit du point dont on veut mesurer les déformations. Faisons passer par ce fil un courant de faible intensité (10 à 20 mA). Le fil offrira une certaine résistance au passage du courant. Mesurons la valeur de cette résistance avant déformation du matériau. Déformons le matériau et mesurons à nouveau la résistance de l'extensomètre. Celle-ci aura varié, c'est-à-dire qu'elle aura augmenté si le matériau s'est allongé, car le fil de l'extensomètre se sera également allongé alors que sa section aura diminué; inversement, elle aura diminué si le matériau s'est raccourci. Ainsi la mesure de la variation relative de résistance électrique de l'extensomètre, permettra, après étalonnage convenable, la mesure de la déformation du matériau sur lequel il aura été collé.

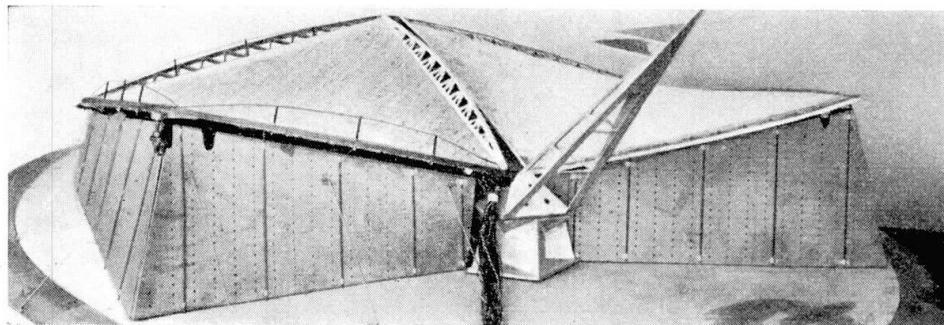


Fig. 22. Vue d'ensemble du modèle.

Si ce matériau ne subit que des déformations de caractère élastique, la connaissance de son module d'élasticité permettra de connaître les contraintes qui le sollicitent à partir de la mesure des déformations qu'il subit.

Les extensomètres à fil résistant équipant le modèle réduit sont de très petit modèle. Ils sont du type Baldwin A. 7. Leur partie active se présente sous la forme d'un rectangle de 3 mm de large sur 4 mm de long. L'ensemble des extensomètres collés est visible sur la photographie de la fig. 21.

L'étalonnage des câbles directement en effort a été effectué sur une bande de laiton de chaque type (3 mm et 4 mm de largeur) soumise à une traction simple et dont les déformations ont été mesurées avec des extensomètres du même type, collés dans les mêmes conditions que ceux disposés sur le modèle.

Un extensomètre collé sur une bande de laiton de chaque type appelé extensomètre compensateur, la bande de laiton n'étant pas soumise aux déformations provoquées par le chargement, et dont le rôle était d'annuler les déformations dues aux variations éventuelles de température, a été emprisonné sous la toiture, et subissait de ce fait le même régime thermique que les extensomètres de mesures proprement dits, appelés extensomètres actifs.

Les mesures ont consisté en la détermination de la variation relative de la résistance électrique de chaque jauge active, sous l'action du chargement dû au vent, à l'aide d'un appareil, basé sur le principe du pont de Wheatstone, dont une branche était occupée par une jauge active, une autre par une jauge de compensation, et les deux dernières par des résistances incorporées à l'appareil et dont la valeur, sur laquelle agit l'opérateur, permet de rétablir l'équilibre du pont pour chaque cas de chargement. La photographie de la fig. 23 représente une vue d'ensemble des dispositifs d'essai.

Les appareils de mesure disposés convenablement (il y en avait 50 au total),

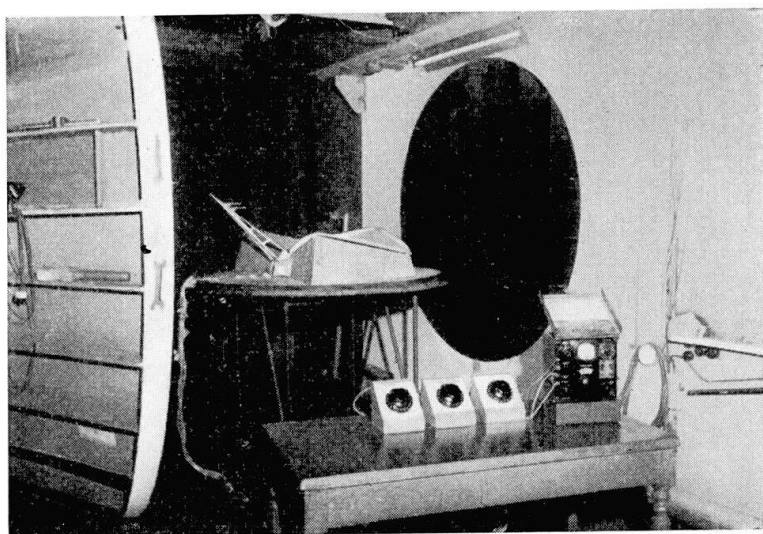


Fig. 23. Vue d'ensemble des dispositifs d'essai.

il est nécessaire pour passer des résultats de mesure sur modèle aux valeurs des efforts sur l'ouvrage réel, de définir les relations de similitude.

Lorsque la forme générale des corps essayés en soufflerie est parallélépipédique, les pressions exercées par le vent sur le modèle réduit et sur le bâtiment sont les mêmes en deux points homologues, à condition que le produit: vitesse du vent $\times$ longueur des côtés rectangulaires, atteigne au minimum 5 m²/sec.

Cette condition est vérifiée dans notre cas puisque ce produit vaut:

$$25 \text{ m/sec.} \times 0,55 \text{ m} = 13,7 \text{ m}^2/\text{sec.}$$

Ainsi, les pressions étant égales en deux points homologues du modèle et du prototype, l'échelle des pressions est égale à 1, soit:

$$\frac{1}{p} = \frac{P_m}{P_p} = 1.$$

L'indice m est relatif au modèle, l'indice p au prototype ou ouvrage réel.

De cette première relation de similitude, se déduit la relation qui seule nous intéresse directement, c'est-à-dire celle qui permet de passer des efforts mesurés sur le modèle aux efforts sollicitant réellement l'ouvrage:

$$\frac{1}{P} = \frac{F_m}{F_p} = \frac{P_m \times S_m}{P_p \times S_p} = 1 \times \left(\frac{1}{125}\right)^2 = \frac{1}{15625}.$$

Après avoir mis au point le modèle, les dispositifs de mesure et les relations de similitude, les mesures en soufflerie ont pu être effectuées, en suivant le programme d'essai suivant:

Mesure des efforts dans les câbles soutenant la toiture, sous l'action de la poussée d'un vent de 25 m/sec.

1. *Ouvrage avec ses 4 façades:*

direction du vent: Nord
Sud
Est
Ouest

2. *Ouvrage sans aucune façade:*

direction du vent: Nord
Sud
Est
Ouest

3. *Ouvrage avec ses façades Nord-Sud et Ouest:*

direction du vent: Est

4. *Ouvrage avec ses deux façades Nord et Sud limitées à 4 m du sol:*

direction du vent: Est

Ouest

5. *Ouvrage avec sa seule façade Sud, limitée à 4 m du sol:*

direction du vent: Nord.

Pour chaque cas de chargement, les mesures ont été répétées quatre fois afin de s'assurer de la faiblesse de la dispersion et d'accroître la précision des essais. Dans la totalité des mesures, cette dispersion s'est révélée très faible, et l'erreur relative qu'elle a déterminée, dont l'importance était d'autant plus grande que les mesures étaient petites, n'a pas dépassé 2% pour les valeurs maxima des efforts.

La source d'erreur la plus sensible provient des limites de précision inhérentes à l'échelle et à la nature de la maquette. Le modèle réduit a été réalisé dans les meilleures conditions et il semble difficile de concevoir une fabrication plus précise à cette échelle.

Malgré tout, une certaine inégalité dans la participation des différents câbles à la résistance de l'ensemble de la toiture n'a pu être évitée et cette inégalité est surtout sensible pour les câbles de courte longueur.

Les plus faibles valeurs des efforts dans les câbles ont lieu, comme il fallait s'y attendre, pour le cas où la construction possède ses quatre façades. Les valeurs obtenues sont très peu dispersées et ont permis de tracer des courbes moyennes avec une erreur minime.

Les essais avec la construction sans façade ne donnent pas naissance également à des efforts considérables, sauf sur les câbles tenseurs des poutres Sud et Médiane sous les vents Sud et Ouest (voir fig. 24).

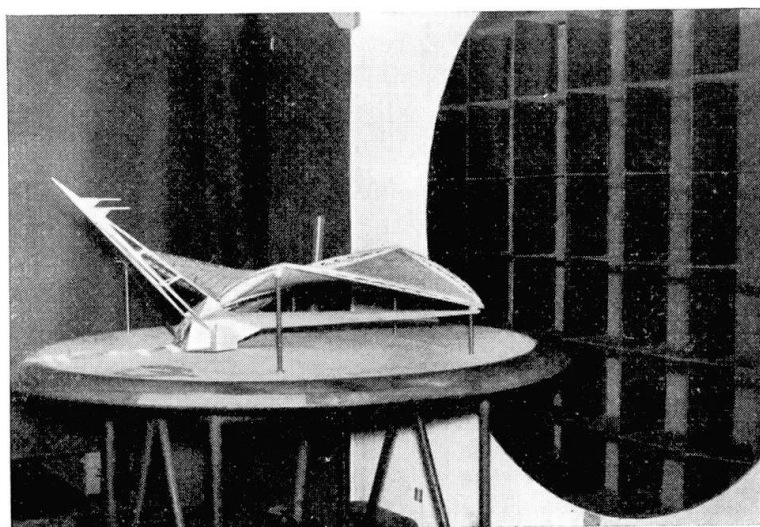


Fig. 24. Vue du modèle en soufflerie sans aucune façade.

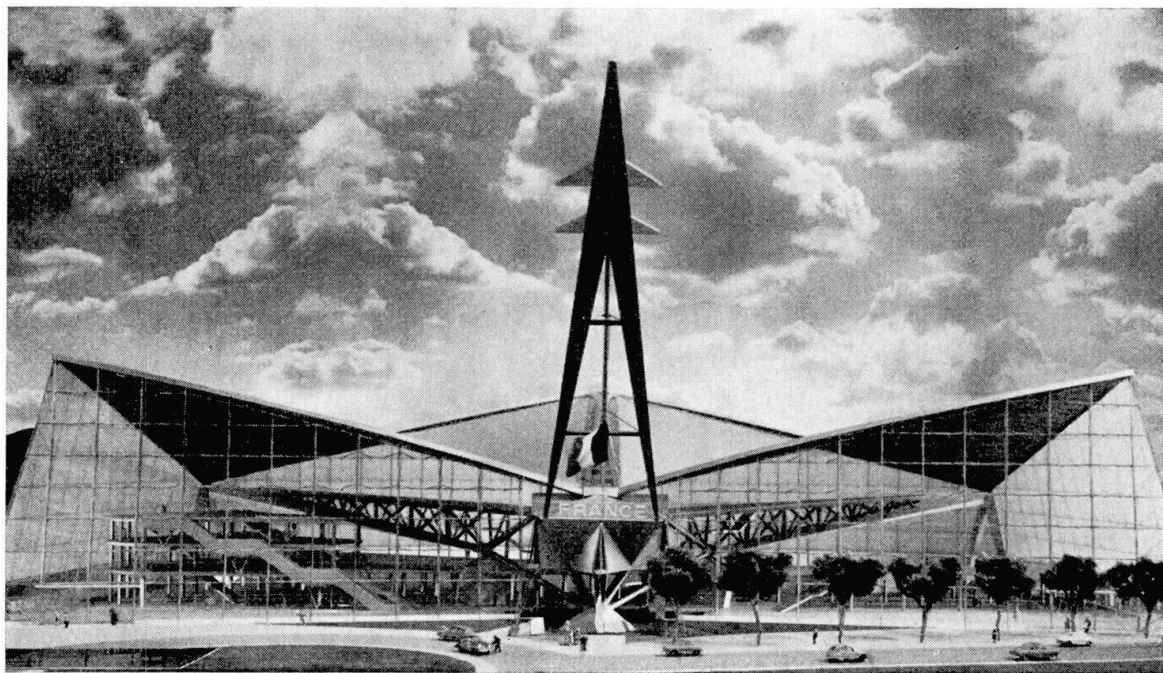


Fig. 25.

Les essais sous un vent Est soufflant sur la construction possédant ses façades Nord, Sud et Ouest mettent en évidence des efforts de traction importants sur les câbles tenseurs et des diminutions de traction sur les câbles porteurs, comme le laissaient prévoir les mesures de pression faites dans les mêmes conditions.

Quand la construction n'a que ses faces Nord et Sud limitées à 4 m du sol, les vents Est et Ouest soumettent les câbles de la toiture à des efforts moins conséquents que lors du cas précédent.

Enfin, quand l'ouvrage ne possède que sa face Sud limitée à 4 m du sol, le vent du Nord sollicite surtout les câbles tenseurs, mais d'une manière moins puissante que lorsque les trois façades sont construites et que le vent arrive de l'Est.

Les courants locaux

La visualisation des courants par émission de fumée permet d'expliquer parfaitement certaines évolutions ou certaines valeurs au premier abord anormales des forces et des pressions.

On voit sur la fig. 18 la formation du courant ascendant créé par la façade avant, délimitant une zone à vitesse réduite et même inversée, laquelle englobe l'ensemble du Pavillon (fig. 19). Dans cette dernière vue, la fumée est émise en arrière du bâtiment, au niveau du sol. Le courant remonte sur la toiture jusqu'à la rive amont pour reprendre ensuite une direction normale dans la partie supérieure du sillage.

Cet effet, commun à tous les bâtiments exposés à l'action du vent, joue un grand rôle, non seulement en ce qui regarde la résistance propre des éléments qui les composent, mais également pour la ventilation intérieure laquelle a pour origine les différences de pressions extérieures.

Conclusion

L'application des Règles N.V. 1946 à un bâtiment de formes complexes tel que le Pavillon de la France, permet l'établissement d'un avant-projet donnant une évaluation des forces agissant sur chacun des grands éléments qui le composent.

L'étude sur maquette que l'on vient d'exposer permet de déterminer avec précision aussi bien les efforts locaux que les efforts résultants. Ils permettent sous certaines conditions, de mesurer directement les contraintes dues à l'action du vent pour certains éléments particulièrement sensibles à son action. L'observation des écoulements induits donnent des indications dont l'intérêt ne saurait être sous estimé. Enfin, l'attention est appelée sur la facilité avec laquelle peut être déterminée l'influence de la modification des formes extérieures sur l'ensemble d'un bâtiment.

Résumé

Le Pavillon de la France à l'Exposition Universelle de Bruxelles 1958 couvre une surface de 12 000 m² sans appuis intermédiaires, grâce à la mise en œuvre d'une couverture en paraboloides hyperboliques portée par des câbles tendus sur une ossature métallique.

L'originalité sans précédents et les dimensions de ce bâtiment nécessitaient une vérification des calculs conformes aux Règles N.V. 1956 par des essais aérodynamiques qui ont porté sur les conditions de stabilité générale, sur les efforts locaux et sur les contraintes dans les câbles.

Zusammenfassung

Beim französischen Pavillon an der Brüsseler Weltausstellung 1958 wurde ohne Zwischenstützen eine Fläche von 12 000 m² überdeckt. Die Eindeckung besteht aus hyperbolischen Paraboloiden, getragen durch Kabel, die in einem Stahlskelett verankert sind.

Die absolute Neuheit und die Abmessungen dieses Gebäudes verlangten eine Nachprüfung der Rechnung entsprechend den Normen N.V. 1956 mit aerodynamischen Versuchen, die sich auf folgendes erstreckten: Bedingungen für die allgemeine Stabilität, örtliche Beanspruchungen und Spannungen in den Kabeln.

Summary

The French Pavilion at the Brussels Universal Exhibition 1958 covers an area of 12,000 m² without intermediate supports, owing to the construction of a roof in hyperbolic paraboloids carried by stretched cables on a steel framework.

The originality of the design, which was without precedent, and the size of the building made it necessary to check the calculations in accordance with the N.V. 1956 regulations by means of aerodynamic tests which comprised the conditions of general stability, local stresses and the strain in the cables.