

La pyramide du Grand Louvre

Autor(en): **Knoll, Franz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE proceedings = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen**

Band (Jahr): **13 (1989)**

Heft P-131: **The pyramid to the Grand Louvre**

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-41966>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

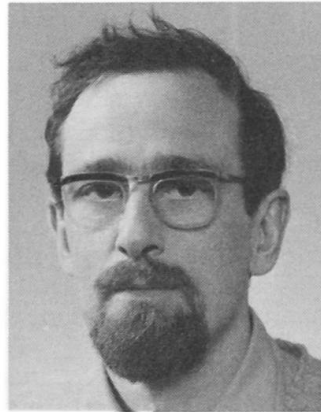
La Pyramide du Grand Louvre

Die Pyramide des Grand Louvre

The Pyramid to the Grand Louvre

Franz KNOLL

Dr. sc. techn.
Nicolet, Chartrand, Knoll
Montréal, PQ, Canada



Né en 1937, à Saint-Gall, Suisse. Diplôme d'ingénieur civil, EPF Zurich, 1960. Recherche sur les principes de la sécurité des structures, 1963 – 65. Doctorat 1966, EPF Zurich. Ingénieur et associé, Nicolet, Chartrand, Knoll, Montréal.

RÉSUMÉ

L'article présente le développement du concept structural pour la pyramide vitrée du Grand Louvre, ainsi que les différentes approches qui furent abandonnées en faveur de la structure exécutée. Une brève discussion retrace les limites pratiques de la technologie actuelle dans le domaine de la construction métallique.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung des Konstruktionsprinzips für die Pyramide des Grand Louvre wird erörtert, unter Einbezug einiger aufgegebenen Varianten. Die Grenzen der heutzutage verfügbaren praktischen Möglichkeiten der Konstruktionstechnik werden kurz diskutiert.

SUMMARY

The development of the structural design of the pyramid to the Grand Louvre is presented, along with some of the alternative designs which were abandoned in favour of the concept which was executed. A brief discussion recapitulates the practical limits to construction technology as they were found to exist today in the course of the project.



INTRODUCTION

Dans un contexte socio-économique qui encadre créativité et rigueur scientifique par des impératifs budgétaires et une recherche de fonctionnalisme, il est rare pour un concepteur de se voir confier un mandat aussi précis et succinct que celui de la structure de la pyramide du Grand Louvre. Transparence et légèreté, telle était la commande de M. I.M. Pei, l'architecte du projet.

Les méthodes d'analyse qui ont été retenues et les considérations principales qui ont influencé la démarche en vue d'atteindre ces objectifs font l'objet du présent exposé. Le degré de succès qui a été atteint et dont le lecteur demeure le meilleur juge, permet une réflexion sur le degré de développement des techniques et, de façon plus générale, de l'industrie de la construction métallique.

La décomposition des charges entre les divers éléments qui constituent la structure, le transfert des efforts de membre à membre, l'étanchéité et le contrôle de l'humidité, la planéité continue du vitrage et l'absorption des effets de température sont parmi les principales exigences à considérer lors de l'élaboration d'un parti. Le type de solutions avancées pour répondre aux différents aspects de la problématique ont des incidences sur la transparence de l'ouvrage. Le parti structural donne d'autre part une bonne indication sur l'avancement des méthodes techniques actuellement disponibles.

Les matériaux traités pour offrir une haute résistance à la rupture ainsi que les méthodes modernes de calcul permettent de réduire les membrures à des dimensions très minces respectant l'objectif de transparence. Aux points d'attache cette caractéristique des matériaux ne s'accommode toutefois guère des opérations de filetage, de soudure et de manipulation de l'outillage nécessaire à l'assemblage au chantier. Après de longues discussions et des études approfondies sur les capacités de l'industrie métallurgique, il s'est avéré nécessaire d'utiliser des matériaux moins raffinés pour les appareils d'attache, ce qui se refléta directement sur leur encombrement. Résultat quelque peu décevant, qui malheureusement se répéta pour les problèmes d'étanchéité et de contrôle d'humidité qui dicteront des dimensions de cadres du vitrage dépassant de beaucoup la taille même des membrures de compression. Il s'agit sans doute là de problèmes qui offrent un champ de recherche prometteur.

Les normes régissant la construction métallique et les ouvrages précontraints, de par leur nature même, ont été rédigées pour des structures courantes, conventionnelles. Lorsqu'on tente de les appliquer à un ouvrage exceptionnel, il faut constater qu'elles ont été conçues à partir d'hypothèses fondamentalement différentes qui, dans le contexte d'une interprétation prudente, c'est-à-dire le respect strict de toutes les règles à la fois, a tendance à augmenter la taille des éléments de la structure au-delà de ce que permettrait la qualité des matériaux et la sécurité des constructions.

En outre, il faut rappeler que les principaux obstacles qui se posent lors de l'exécution d'une construction "puriste" trouvent leur origine dans des problèmes pratiques de fabrication ainsi que de montage: nécessité d'un assemblage efficace, respect de l'échéancier, divergences d'opinion entre les parties impliquées dans la réalisation, contraintes de disponibilités des matériaux, méthodes qui existent en théorie ou qui ont été expérimentées en laboratoire, mais qui n'ont pas encore été consacrées par la pratique.

1. Les matériaux

La recherche des méthodes techniques les plus avancées comprenait le choix très délicat d'un matériau offrant des qualités exceptionnelles d'apparence, de résistance, de durabilité et d'économie, cette dernière considération n'étant cependant pas prépondérante vu les quantités relativement modestes qui étaient requises. Le verre aurait évidemment été un matériau de premier choix, si ce n'était sa fragilité qui limite son utilisation dans une fonction structurale. Les fibres de carbone en matrice organique sont malheureusement

inflammables. Les alliages au titane ne présentent qu'un avantage de poids négligeable par rapport aux difficultés non résolues de montage et de soudage ainsi qu'à leur coût exorbitant. Le choix s'arrêta donc sur la famille des aciers chrome/nickel, inoxydables à un degré acceptable et dont le traitement à chaud et à froid ainsi que le soudage et les méthodes de fonte et de préparation mécanique des pièces sont connues et éprouvées. Ces aciers connaissent un très large champ d'application, de la tuyauterie chimique au haubanage des grands voiliers de courses. Ils peuvent être très avantageusement utilisés dans un projet qui exige des surfaces d'apparence métallique nette et durable ainsi que des éléments tirants de haute résistance.

L'acier AFNOR Z6CND17-11 (AISI 316) de composition:

max 0,07%C
17%Cr
11%Ni
min 2% Mo

répond à ces exigences. Selon des traitements de raffinement mécaniques et thermiques, il peut être amené à une limite d'élasticité ($R_{0,002}$) au delà de 1200 N/mm^2 et possède de bonnes valeurs de résistance au froid:

$$K_{cu} = 15 \text{ daJ/cm}^2 \text{ (à } -196^\circ\text{C)}$$

et au chaud:

$$\text{limite d'élasticité } (R_{0,002}) = 150 \text{ N/mm}^2 \text{ (à } +600^\circ\text{C)}$$

à l'état non traité (environ 50% de la résistance de base à $+20^\circ\text{C}$).

Malgré l'absence de coupe-feu, dispositif qui n'était pas exigé par les normes ni les autorités dans le cas présent, ces caractéristiques permettront à la structure de résister à un incendie d'une ampleur considérable.

2. Le concept structural

Il va sans dire que dans une recherche d'un maximum de transparence, la conception proprement dite de la charpente devenait l'élément devant faire l'objet des études les plus approfondies. C'est donc d'une multitude de variantes de typologies diverses que jaillit le concept final. Nous nous permettons d'en présenter ici quelques-unes (Fig. 1,2,3).

L'idée initiale d'utiliser du verre pour les membrures structurales de premier ordre (compression, effort tranchant) était évidemment séduisante (Fig. 1). Il fallut cependant se rendre à l'évidence que le développement technologique ne permet pas encore l'utilisation de ce matériau d'une grande fragilité. En cas d'accidents, d'actes de sabotages ou de vandalisme malheureusement devenus trop fréquents, le maintien de l'intégrité structurale d'un toit devant recouvrir un espace ouvert au grand public était une priorité absolue. Malgré le parallélisme important d'un système hautement hyperstatique que constitue un grillage de poutres, la fragilité de chacune des membrures n'aurait guère permis, en cas de perte d'une partie de la structure, une redistribution des efforts pouvant garantir la survie de l'ensemble. Il est possible que l'utilisation de verre tempéré ou renforcé et la mise au point de méthodes d'analyse exacte de l'intégrité structurale permettent, dans un avenir plus ou moins rapproché, la réalisation de structures aussi audacieuses. (C'est là un autre champ sur lequel la recherche pourrait se pencher). On se rappelle d'ailleurs que des portions considérables de murs-rideaux verticaux ont été exécutés en verre, et ce sans grillage métallique continu. La conception d'un ouvrage qui pourrait être susceptible de servir d'exutoire à l'enthousiasme de certains manifestants, exigeait cependant plus de prudence.

Le domaine des fermes tridimensionnelles fut exploré en profondeur lors de la phase de développement du projet (Fig. 2); il fut cependant abandonné comme concept de base parce que la totalité des membres sont contrôlés par des efforts de compression, c'est-à-dire les limitations d'élançement, ce qui résultait en des sections d'une épaisseur telle que l'ensemble n'aurait plus répondu à l'exigence fondamentale de transparence. Ce type de structure a par ailleurs connu un usage très généralisé ces dernières années et, en particulier, un grand nombre de toits vitrés ont suivi ce principe. La famille

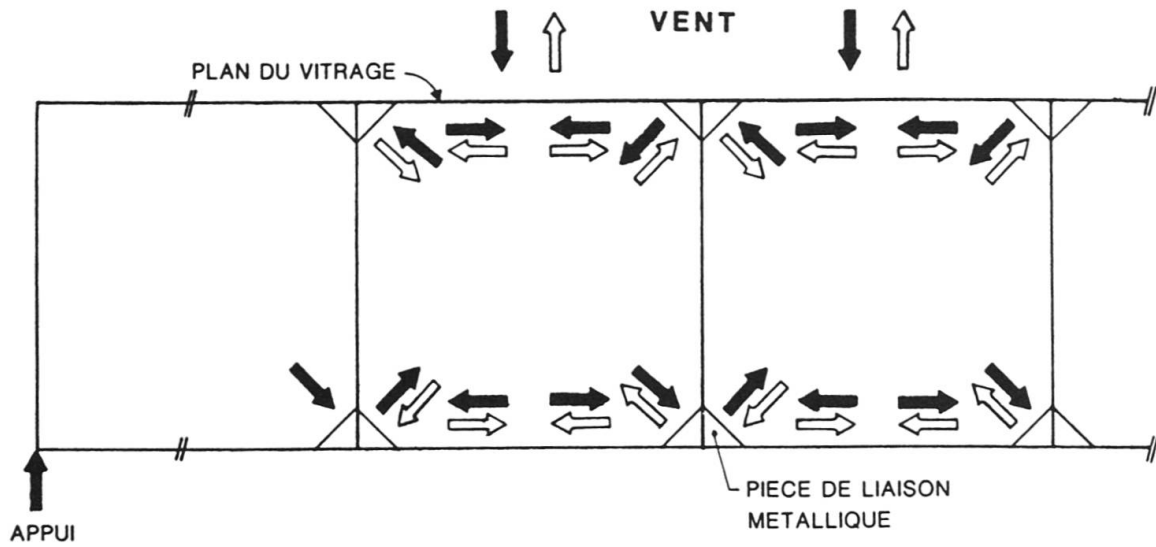


Fig. 1a. TRACTION ET COMPRESSION DANS LE VERRE

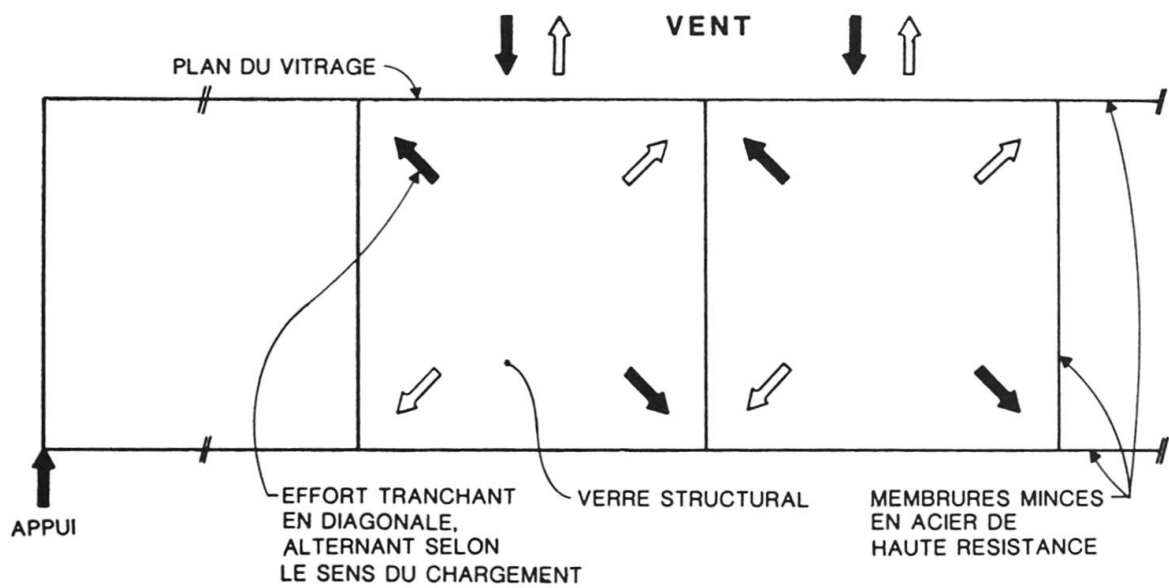


Fig. 1b. TRACTION DANS LE METAL & COMPRESSION DANS LE VERRE

Fig. 1. SCHEMA DE STRUCTURES VITREES

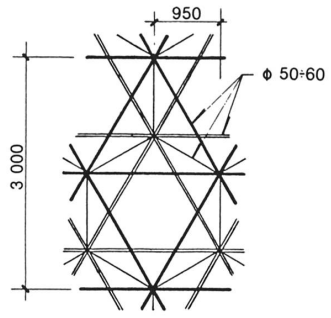


Fig. 2a. ARRANGEMENT TETRAEDRIQUE

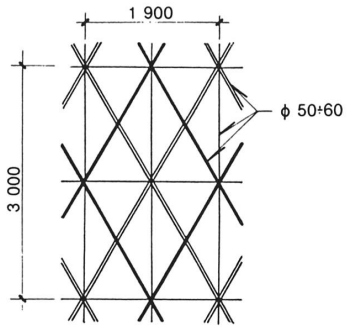


Fig. 2b. ARRANGEMENT HEXAEDRIQUE

Fig. 2. FERMES TRIDIMENSIONELLES

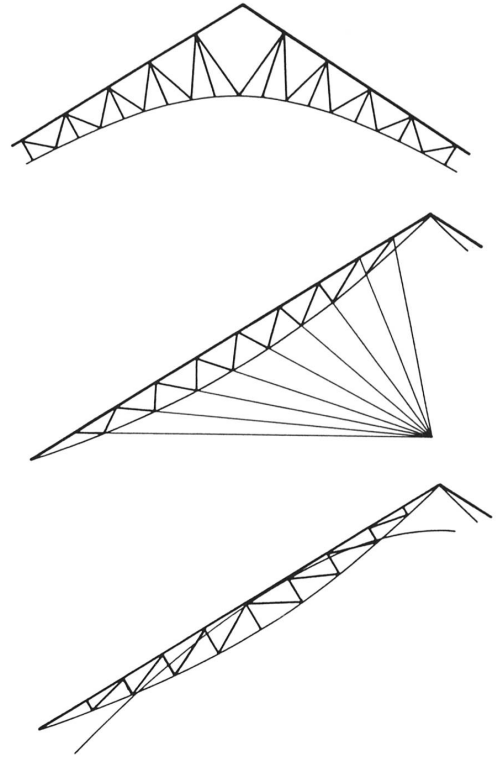


Fig. 3. STRUCTURES TENDUES DE FORME ARQUEE



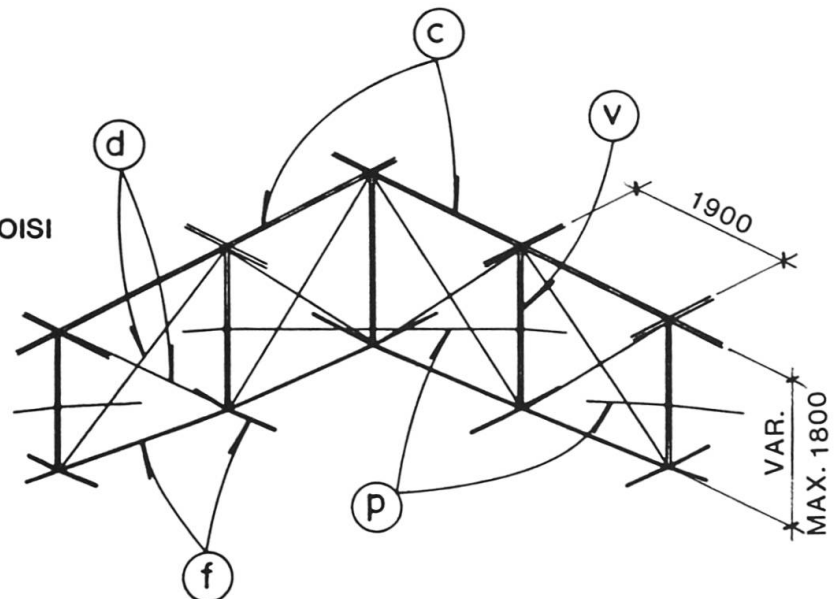
des structures à semelle arquée fut également étudiée par les concepteurs (Fig. 3). Les ponts suspendus ou en arc et les toits du type "ventre de poisson" en sont des exemples bien connus.

L'étude des structures suspendues souligne deux considérations fondamentales qui sont communes à toutes les solutions de cette famille. La membrure en courbe qui suit le cheminement des efforts globaux (poids, pression générale du vent, etc) ne possède que peu de rigidité en flexion (cables, arcs minces). Les fluctuations locales des efforts (poids ponctuels, effets dynamiques des rafales, efforts dus au montage, etc) causent des variations de géométrie qui s'ajusteront aux configurations instantanées du chargement; si cela n'est pas admissible, comme dans le cas d'une structure qui supporte un vitrage, il s'agit alors d'introduire un élément de rigidité de flexion, fonction que remplit par exemple la poutre qui supporte la chaussée dans le cas d'un pont suspendu.

La planéité permanente du vitrage excluant toute fluctuation géométrique, il fallait donc rechercher un élément de rigidité suffisante qui n'aurait que peu d'incidence sur la transparence de l'ensemble. Le poids modeste de l'ensemble (environ 100 kg/m^2) qui est un corollaire de cette transparence, augmente l'importance relative des effets de rafales (pressions et sous-pressions instantanées) et nécessite en contrepartie un accroissement de l'élément de rigidité. Quelle que soit sa forme, une poutre métallique conventionnelle utilisée comme élément raidisseur, devrait, pour satisfaire aux exigences particulières, avoir une profondeur minimum de 20 à 30 cm et bloquerait entre le quart et la moitié du dégagement visuel, selon l'orientation du regard. Il fallut donc revenir au concept des poutres décomposées, c'est-à-dire des treillis diagonaux.

Divers types de cette solution furent étudiés. Le choix final permet de maximiser le nombre de membrures ne recevant que des efforts de traction qui pourront être exécutées en acier de haute résistance de petits diamètres. La structure se compose des types d'éléments suivants (Voir Fig. 4):

**Fig. 4. SCHEMA
DU SYSTEME STRUCTURAL CHOISI**



- 1) Le cadrage (c) dans le plan du vitrage qui, avec les verticales (v) forment les seuls éléments comprimés de l'assemblage (diamètre de 58 et 75 mm).
- 2) Les tiges polygonales minces (f) qui forment les cordes inférieures des fermes (diamètre de 15 et 25 mm).
- 3) Les cables quasi annulaires disposés horizontalement (p) qui permettent la précontrainte de l'ensemble, lui confèrent une résistance au soulèvement global dû au vent et protègent également les membrures minces des efforts de compression.
- 4) Les tiges diagonales en croix (d) qui supportent les efforts tranchants provenant de fluctuations de charges locales, ou les différentiels que crée la divergence entre la géométrie choisie et la forme idéale correspondant au cheminement des efforts.

Le dernier point mérite une clarification. La décomposition des quatre faces de la pyramide en séries de losanges demande un système d'éléments structuraux qui respecte le même damier, donc un grillage de poutres - fermes. Les fermes se croisant, il était avantageux de disposer les courbes inférieures (= intérieures) des fermes dans une surface unique, soit une forme de "coussin". Au prix d'une certaine augmentation des efforts dans les tiges diagonales, cet arrangement permet une organisation visuelle plus claire tout en satisfaisant des considérations pratiques (minimisation de la flexion introduite dans les membrures communes aux deux familles de fermes, soit les poteaux "v", etc.). Une autre exigence, provenant du développement des détails d'attache, s'ajoute à la précédente; la pénétration de la surface intérieure de la structure par les câbles de précontrainte ne doit se faire qu'à des points suffisamment éloignés des noeuds des fermes (l'écart minimum est établi à 10 cm environ pour éviter des interférences qui résulteraient en des détails excessivement complexes).

Les membrures en arc (f) d'une part et la famille des contrecables annulaires (p) d'autre part, définissent deux surfaces qui, sans pour autant sacrifier leur courbure propre et la continuité visuelle, se définissent fonctionnellement par leurs intersections. Leur conception nécessita un exercice complexe d'itération graphique et numérique (Fig. 5); À l'aide de la polynomisation locale (différences numériques et différences des différences, prises dans toutes les directions alors qu'une suite de points d'intersection suggérera une courbe etc.), il fut possible de vérifier avec grande précision le poli de la forme, la présentation graphique rendant visible le même aspect de l'ensemble. Cette méthode fournissait une solution de compromis qui, puisqu'elle n'est pas le fruit d'une déduction purement logique, se prête plus facilement à des outils élémentaires de calcul qu'aux systèmes électroniques de traitement des données actuellement disponibles: là où les données manquent ou se contredisent ... l'ordinateur ne sait pas tricher.

Les appuis de la structure sont formés par les poutres de rive, essentiellement en béton précontraint, de la grande ouverture du niveau de la cour. Cette structure se compose de poutres de longue portée (38 m) et d'une profondeur réduite (1.80 m hors tout environ) ce qui nécessitait à la fois une forte précontrainte, un renforcement avec des poutres d'acier de charpente et des méthodes raffinées de contrôle des déformations. Même si ces variations de flèches (+ 2 cm) sont très modestes par rapport à la portée des poutres de rive, elles représentent un degré d'incertitude important quant au comportement et à la planéité visible de la pyramide. Il s'est donc avéré nécessaire de prévoir un système d'ajustement pour les "pieds" de la pyramide lequel doit être accessible même après l'achèvement de l'ouvrage. Ce système, basé sur le principe de la vis de réglage, prend toute son importance lors de la réalisation de l'ouvrage, étant donné le décalage imprévisible entre les étapes de chargement et de déformation de la structure de rive, dans le cadre d'un échancier soumis aux aléas des difficultés techniques et des différends de nature contractuelle ou sociale.

3. L'analyse structurale

Il est évident qu'une structure complexe d'une telle visibilité exigeait une analyse intensive et poussée de tous ses éléments, et ce d'autant plus qu'elle affichait un certain degré d'innovation. Cette analyse fut exécutée indépendamment et par le concepteur et par l'entreprise responsable de la réalisation. Le Bureau de contrôle, agent de vérification obligatoire pour les ouvrages exécutés en France, suivait ces travaux à titre d'observateur. Dans tous les cas où les hypothèses divergentes ne pouvaient être réconciliées, l'importance de l'ouvrage dictait que l'alternative la plus prudente et la plus conservatrice soit adoptée. Il s'ensuivit une certaine tendance vers la solidité des éléments au détriment d'une plus grande élégance et de la légèreté structurale qui aurait pu être atteinte en d'autres circonstances. Tout ingénieur qui participe à la conception d'un ouvrage a tendance à apaiser ses inquiétudes par une augmentation de la dimension de certains éléments. Lorsque plusieurs parties sont impliquées, ce réflexe naturel conduit à une augmentation sensible de la masse de l'ensemble. Dans le cas de la pyramide par exemple, cette prudence entraîna



une augmentation des diamètres des membrures de 5 à 15 pourcent, allant même jusqu'à 50% à certains endroits, suivant différentes interprétations des règles de modélisation et d'analyse. Ceci démontre à nouveau que l'application des marges de sécurité dans les structures ne découle pas de la logique pure, mais plutôt d'une évaluation personnelle et d'une standardisation qui prétend au fond refléter, par des règles numériques, le respect d'une certaine échelle de préoccupations sociales.

Le nombre impressionnant des membrures qui constituent la structure a signifié que les limites pratiques de la capacité des ordinateurs les plus modernes fut atteinte. Cette réalité a eu pour autre conséquence qu'une quantité énorme de résultats numériques a été produite, rendant impossible une vérification approfondie de l'analyse. Il fallut donc recourir à une vérification indépendante, partant d'une nouvelle modélisation et d'une série d'hypothèses nouvellement formulées. Les résultats des deux analyses ne concordèrent évidemment pas avec précision, entraînant des désaccords au plan technique, mais fournissant par ailleurs l'assurance que des erreurs significatives n'avaient pu se glisser dans la définition des dimensions des éléments de l'ossature.

Au-delà de l'analyse classique suivant la théorie élastique, trois éléments de problématique qui méritent une brève récapitulation devaient être résolus:

- Les effets de la pression variable et locale du vent.
- Le phénomène non linéaire des diagonales minces en croix qui, de leur nature même, interviennent alternativement sous charge.
- Le maintien de l'intégrité structurale de l'ensemble en cas d'accident, c'est-à-dire de perte de la résistance de certains éléments.

L'effet des pressions variables revêt une importance capitale pour les membrures responsables de conférer à l'ensemble une résistance aux charges locales, c'est à dire les diagonales et les poteaux, tandis que compte tenu de la forme arquée des fermes, les autres membrures et câbles répondent principalement aux efforts globaux. Le problème de la répartition des pressions (ou sous-pressions) est de même nature que celui que posent les ponts suspendus ou d'arc mince sous le chargement transitoire des véhicules. Il est d'un caractère probabiliste, compte tenu de la nature aléatoire des paramètres qui définissent l'action du vent.

La résolution du problème fut trouvée en collaboration avec A.G. Davenport (University of Western Ontario, London, CDN) en combinant une variante de la méthode classique des lignes d'influence avec des valeurs de pressions mesurées sur modèle par G. Barnaud, P. Gross et J. Gandemer (CSTB, Nantes), et des corrélations estimées quant à la cohésion des champs de pression dans l'espace. La procédure fut facilitée par l'intégration automatique des "champs" d'influence par l'ordinateur, opération effectuée par un programme traditionnel d'analyse linéaire. Soit:

$$i = \text{valeur (champ) d'influence pour l'effort dans la membrure } i, \text{ selon la règle de Maxwell (Fig. 6)}$$

Avec une corrélation parfaite entre les effets de pression d'une part et ceux de la souspression d'autre part, on obtient, dans le sens d'une limite inférieure:

$$F = \int \bar{p}_i dA \pm g \int p'_i dA$$

où \bar{p}_i = pression moyenne
 p'_i = écart type de pression fluctuante
 g = facteur de pointe (à choisir selon le critère désiré
 $2 < g < 4$)

et sans aucune corrélation, on obtient le résultat le plus conservateur:

$$F = \int \bar{p}_i dA \pm g \left(\left(\int_{i>0} p'_i dA \right)^2 + \left(\int_{i<0} p'_i dA \right)^2 \right)^{1/2}$$

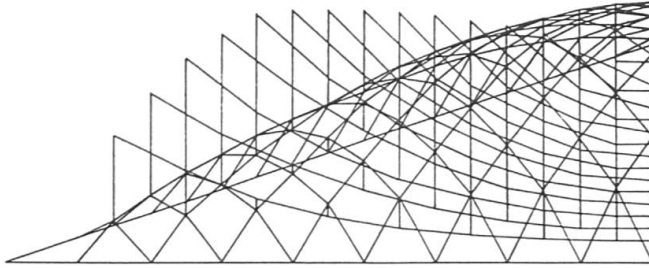


Fig. 5. AXONOMETRIE EXAGEREE D'UNE PARTIE DE LA STRUCTURE

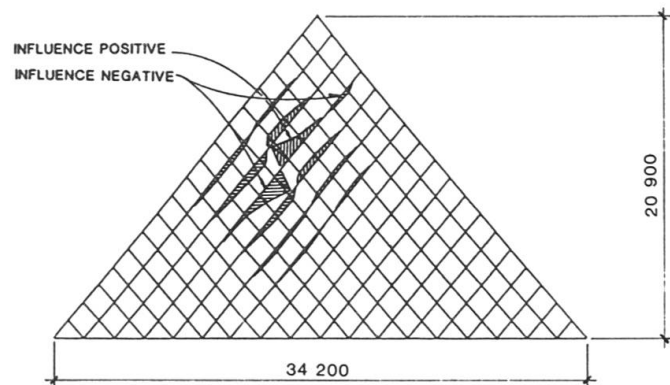


Fig. 6. SURFACE D'INFLUENCE POUR EFFORT TRANCHANT (DIAGONALES)

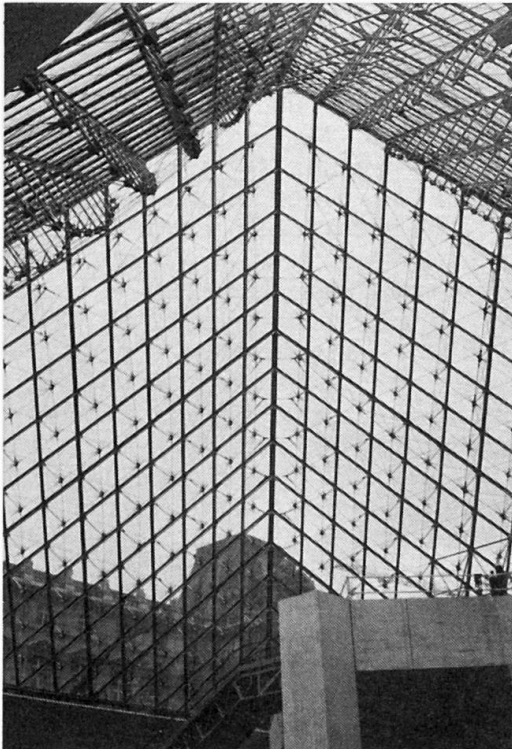
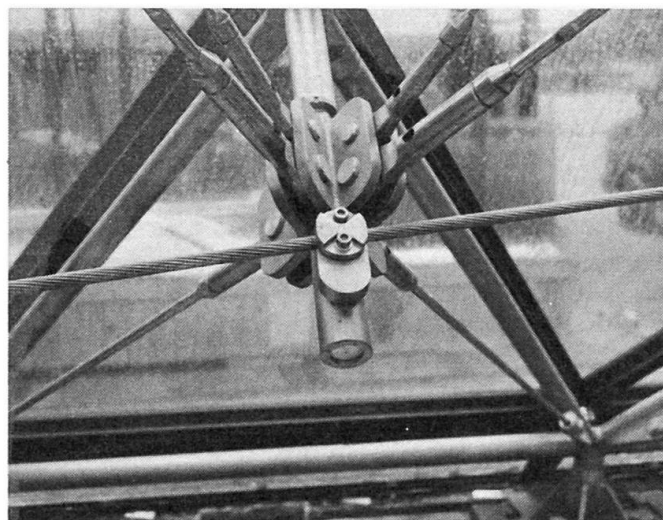


Fig. 7. Vue intérieure



Appareil d'attache type avec cable de précontrainte



Dépendant du cas étudié, la corrélation peut varier entre ces deux extrêmes. Vu l'importance relativement faible de ces efforts, il a suffi, dans le cas présent, d'adopter la deuxième version, ignorant la corrélation. La valeur de g adoptée est de 3, reflétant le choix de la limite supérieure pour les calculs.

Diagonales

Le problème que pose le phénomène inélastique des diagonales qui n'affichent aucune stabilité en compression fut résolu de deux manières. Pour l'analyse des efforts sous la pression locale du vent, un élément résistant à l'effort tranchant fut introduit, représentant à la fois les deux éléments d'une paire de diagonales croisées. Lors du montage de la pyramide, les diagonales ont été munies d'une légère précontrainte pour éviter le relâchement sous les conditions normales de charge.

L'intégrité structurale de l'ensemble

La stabilité et la résistance de l'ensemble en cas de perte d'un de ses éléments à la suite d'un accident ou d'un acte de sabotage, a fait l'objet d'une étude en collaboration avec B. Thurlimann (EPF, Zurich, Suisse). Le résultat de cette étude démontra une tolérance importante de la structure envers ce type d'évènement. Grâce au caractère hautement hyperstatique et à la déformabilité considérable des matériaux et du système, la perte d'un ou plusieurs éléments, même sous des charges extrêmes, ne provoquera donc pas d'effondrement global, ni même partiel. Sous un chargement normal, des dommages même plus importants demeureront tolérables, permettant d'assurer le temps nécessaire pour l'exécution de réparations ou la reprise temporaire des parties affectées.

4. Les détails

Les appareils d'attaches des différentes membrures ont fait l'objet d'études élaborées, s'étendant aux considérations élasto-mécaniques du comportement sous charge, des méthodes de fabrication, de montage, ainsi que bien entendu de la disponibilité des pièces et des considérations économiques.

Le concept original prévoyait diverses possibilités pour les attaches qui, dans le processus de développement poursuivi en collaboration avec l'entreprise adjudicataire (CFEM, Suresnes, France), ont connu une ou plusieurs modifications. Même les membrures inférieures des fermes en arcs, qui initialement devait être constituées de monotorons de 19 fils dans le concept original ont dû être modifiées. Afin de faciliter les attaches et le montage, ces membrures ont été réalisées en monofils d'acier à haute résistance, du type utilisé pour les haubans des voiliers de grandes courses, et sont effectivement fabriquées par une entreprise spécialisée dans ce domaine (Navtec, Littleton, Mass., U.S.A.).

Malheureusement, la liaison de membrures exécutées en matériaux de haute résistance demeure un domaine qui requiert encore beaucoup de perfectionnement; les détails relativement encombrants qu'affiche la pyramide, qui sont pourtant le résultat d'études approfondies, en font foi. La haute résistance des aciers est, de toute évidence, une caractéristique fort délicate qui souffre mal les effets des méthodes classiques de liaison. Fonte, soudure, filetage, boulonnage, etc font perdre l'essentiel de cette haute résistance. En conséquence, les pièces de noeuds des cadres comprimés dans le plan du vitrage, qui sont sujettes à des contraintes relativement faibles et compatibles avec le matériau de base, ont les dimensions des membrures mêmes, tandis que pour les membrures tendues en monofils ou torons de haute résistance, les détails des joints nécessitent des dimensions qui sont un multiple de celles des membrures à connecter. Les pièces qui joignent des éléments minces deviennent alors plus importantes visuellement que celles du cadrage solide.

L'explication peut sans doute en être trouvée dans la complexité des procédures qui produisent la haute résistance, et dans le problème qui se pose lorsqu'on doit transférer des charges concentrées d'une unité à l'autre. La continuité du matériau étant impossible à reproduire - soudure et fonte étant exclues - il faut alors traduire des efforts longitudinaux en charges transmises par frottement ou par des filetages, changer un système de cables continus en chainons, transformer des barres minces en clés et goupilles qui sont fabriquées de matériau d'une résistance relativement faible et, puisqu'elles travaillent dans des circonstances défavorables (efforts tranchants, filetage, précontrainte ajoutée, etc) doivent être d'une conception sensiblement plus massive. L'introduction de la précontrainte qui contrôle la traction dans les membrures minces nécessite également des appareillages relativement grossiers pour la mise en tension. Finalement, le réglage et l'ajustement géométrique qui doivent compenser les imperfections de longueurs et de rectitude découlant de la fabrication et de l'assemblage, exige des augmentations de diamètre significatives pour accommoder les ridoirs.

La somme de ces appareillages risque donc de devenir beaucoup plus volumineuse que ne le sont les membrures qu'ils relient. Cet état de choses se retrouve dans des domaines comparables, la précontrainte du béton par exemple, où les ancrages sont constitués de pièces considérablement plus encombrantes que les unités de tension, c'est-à-dire les câbles. Dans ce cas, elles sont toutefois habituellement dissimulées dans la masse de béton. La plupart des constructions de treillis tridimensionnelles qui sont composées ou de membrures relativement encombrantes ($L/d < 40$) dont la résistance est limitée par les appareillages d'attache, ou de pièces de joints plus massives, témoignent du même problème.

5. L'étanchéité et le contrôle de l'humidité

Pour une réalisation du prestige de la pyramide, qui doit recouvrir un espace public climatisé, il ne suffit plus aujourd'hui de concevoir une enveloppe imperméable aux eaux extérieures. La condensation provenant des conditions intérieures d'une part, et le taux d'humidité requis pour la conservation des oeuvres d'art et le confort du public d'autre part, amèneront une accumulation d'humidité qui, dans certaines conditions, pourrait provoquer de la buée sur les vitrages voire même des gouttelettes. Afin d'éliminer ces phénomènes indésirables, un système sophistiqué de canalisation des eaux intérieures devait être conçu. Il est constitué de chassis de vitrage en aluminium comportant des pièces d'étanchéité qui, combinées avec le système de réglage géométrique, deviennent malheureusement plus importantes visuellement que la structure elle-même.

Le module constitué par les vitres en forme de losange est indicatif des dimensions limites des pièces en verre, de la qualité de celui des ateliers St-Gobain.

Dans le cas de la pyramide, il en découle une fréquence de meneaux croisés qui s'ajoutent à la structure mince pour créer un taux d'obscureissement d'environ 13% en projection perpendiculaire au vitrage, ce qui se compare favorablement à d'autres toits vitrés. Même si l'on est encore loin de "l'invisibilité", l'on peut cependant prétendre que la pyramide représente ce qu'il est possible d'atteindre aujourd'hui en tenant compte des contraintes imposées par l'avancement des techniques, par les normes et autres considérations (sécurité, étanchéité, coûts, préoccupations artistiques) qui ont régi cette réalisation.

À titre de comparaison, le Tableau I quantifie deux autres exemples de toits vitrés. Tout en se rappelant que chaque réalisation présente des conditions spéciales particulières (chargement de neige, vent, portées de la structure, pentes, contraintes économiques, disponibilité des matériaux et des produits industriels etc), qui peuvent affecter une caractéristique telle que le taux d'obscureissement, les chiffres du tableau suivant peuvent être considérés comme mesure d'un ordre de grandeur de la transparence des toits vitrés qu'il est possible d'atteindre aujourd'hui.



TABLEAU 1
taux d'ombre (pourcentage)

	<u>Projection</u>	<u>Structure</u>	<u>Menuiserie</u>	<u>Ensemble</u>	<u>Année de réalisation</u>
Pyramide du Louvre	90°	8	13	14	1988
	45°	17	18	31	
Toit sur treillis en arc* "Le Windsor" Montréal, CDN	90°	11	13	15	1986
	45°	22	25	45	
Toit sur arcs tubulaires* "Place Montréal Trust" Montréal, CDN	90°	13	13	15	1988
	45°	38	40	70	

* Ces exemples ne comportent aucune mesure visant au contrôle de l'humidité intérieure, ce qui aurait entraîné un taux sensiblement plus élevé pour les menuiseries de ces ouvrages.

CONCLUSION

Les limites de la technologie sont toujours imprécises. Ce que l'on peut réaliser en théorie en laboratoire, en petits échantillons et quel qu'en soit le coût, dépasse de beaucoup ce qui s'avère possible en pratique pour un ouvrage de taille plus substantielle. Un grand champ s'offre donc à tous ceux qui prétendent pousser l'expérimentation.

La structure de la pyramide en constitue un exemple; prototype réussi - c'est à l'observateur qu'il appartient de juger. Si la transparence et l'élégance constituaient les objectifs primordiaux, il ne faut pas oublier les autres fonctions auxquelles il fallait également satisfaire: la sécurité, les critères architecturaux divers, les exigences de climatisation, d'étanchéité, d'illumination. La structure de la pyramide demeure donc essentiellement un compromis entre des exigences parfois contradictoires même si elle peut prétendre constituer un reflet d'une technologie poussée appliquée au concret.

Les principaux obstacles à l'atteinte d'une transparence "absolue", sont les attaches des membres de haute résistance tant entre elles qu'avec la menuiserie. Même la structure comprimée, régie par des rapports d'épaisseur qui découlent directement des lois fondamentales de la mécanique, est d'une importance visuelle subordonnée à l'encombrement visuel des menuiseries d'étanchéité. Il s'agit donc là de deux aspects de la technologie qu'il y aurait tout avantage à développer. L'usage du verre lui-même en fonction structurale a été considéré pour le projet de la pyramide mais dut être abandonné pour des raisons de risque. L'incertitude est en effet trop élevée, compte tenu des propriétés mécaniques de ce matériau (fragilité).