Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 125 (1999)
Heft: 21

Artikel: Le potentiel structurel du verre
Autor: Guscetti, Gabriele
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79658

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

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

Le potentiel structurel du verre

Gabriele Guscetti, ingénieur civil EPFL, Guscetti & Tournier ingénieurs civils EPF, Plat. de Frontenex 5A 1208 Genève

Matériau transparent ou translucide suivant les cas, le verre est versatile, ambigu, à la fois présent et absent, résistant et fragile. Cette dernière caractéristique en particulier ne le destine à priori guère au rôle de structure porteuse. Pourtant, l'engouement qu'il suscite actuellement auprès des architectes – et, par extension, chez les ingénieurs et donc dans l'industrie – qui, dans l'architecture moderne ont toujours cherché à tirer parti de sa transparence, lui a ouvert de nouveaux développements et usages. Divers perfectionnements technologiques sont d'ailleurs à l'origine des qualités de verre que nous connaissons aujourd'hui. Parmi les développements essentiels, on peut citer le procédé du flottage (float) qui permet d'obtenir des surfaces de verre parfaitement planes de très grandes dimensions, les techniques du feuilletage et de la trempe qui améliorent la sécurité, les joints scellés et l'utilisation du silicone en général qui sont à l'origine des panneaux composites isolants thermiques et ont permis de libérer le verre de son cadre, enfin, les traitements de surface qui aboutissent à des écrans solaires et thermiques tout en conservant la transparence du verre. Cette évolution se poursuit et les industriels développent aujourd'hui des produits de plus en plus performants, aussi bien du point de vue énergétique et en matière de contrôle de la lumière, qu'en ce qui concerne la structure de surface et la couleur. Exploitées dans de nombreux projets contemporains, ces dernières propriétés sont d'ailleurs celles qui confèrent aux grandes façades de verre actuelles l'aspect dynamique et vif, qui les distingue de la production des vingt à trente dernières années.

Contrairement au développement des structures métalliques qui fut largement soutenu par les ingénieurs au début du XIXe siècle, l'utilisation du verre comme système structural a d'abord été proposée par des architectes. La retenue des ingénieurs par rapport à ce matériau tient en effet à ses caractéristiques intrinsèques de fragilité pouvant conduire à une rupture brutale sans signes prémonitoires apparents ce qui, comme nous le verrons, a une signification bien particulière en termes de sécurité et de fiabilité des éléments porteurs.

De manière générale, il est d'ailleurs intéressant de remarquer que l'évolution des choix en matière de structures porteuses a toujours tendu vers des matériaux ductiles, au détriment des matériaux fragiles. Ainsi, les plus célèbres constructions en pierre naturelle, telles les cathédrales gothiques, ont été nombreuses à s'effondrer lors de leur construction, alors qu'elles ont aujourd'hui une image de solidité et de stabilité. Il a suffi pour cela d'un simple écart du polygone des forces par rapport à la géométrie de la construction pour que, d'un état recherché de compression, la structure passe à un état non voulu de traction suffisamment important pour qu'une rupture fragile se déclenche, entraînant la ruine. La construction métallique a également évolué de l'utilisation de la fonte (matériau facile à mettre en forme, mais qui présente des caractéristiques de fragilité), vers l'utilisation de l'acier doux (résistant, facile à couper, plier, usiner, et également soudable). Quant au béton, c'est un peu la même chose, dans la mesure où l'adjonction de barres d'acier a su en faire un matériau composite, le béton armé, capable de reprendre des efforts importants de tractions et présentant également de remarquables caractéristiques de ductilité.

Tous ces matériaux à caractère plutôt ductile, auxquels on peut également associer le bois (matériau fibreux présentant une certaine ductilité) ont donc permis aux constructions d'évoluer de structures comprimées lourdes vers des structures comprimées légères, telles les coques, des structures tendues élégantes, comme les ponts suspendus, ou, encore, des structures triangulées ou flexionnelles élancées. Ces systèmes ont contribué à l'optimisation de la matière et des performances des constructions modernes.

Or si l'on compare les principales caractéristiques des matériaux de construction à celles du verre, on remarque que le module d'élasticité de ce dernier, donc sa capacité de déformation, est de l'ordre de

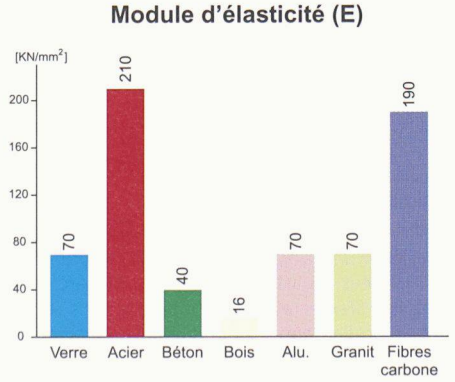

Fig. 1. - Elasticité comparée de divers matériaux

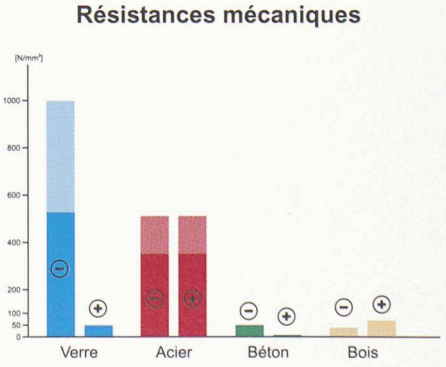

Fig. 2. - Résistances comparées de divers matériaux

70 kN/mm², ce qui le situe tout à fait dans la moyenne des autres matériaux (fig. 1). D'autre part, sa masse volumique est logiquement similaire à celle des pierres naturelles ou artificielles (24,7 kN/m³). En matière de résistance mécanique, certains matériaux, dont le verre, présentent des résistances à la compression et à la traction nettement différentes (compression ≃15 x traction), comme c'est également le cas du béton et des pierres naturelles. De fait, le verre possède une très bonne résistance à la compression et une résistance à la traction qui, bien que nettement inférieure, reste supérieure à celle du béton (fig. 2). Cette différence de comportement compression-traction ainsi que la comparaison de la ténacité mettent clairement en lumière la défaillance caractéristique du verre et de l'ensemble de la famille des céramiques, un défaut de ténacité qui porte un nom bien connu: la fragilité.

Le matériau verre

Sollicité par des efforts, le verre est donc un matériau très résistant, mais sa rupture est de type fragile. En traçant un graphique contrainte – déformation, on cons-tate que le verre est également parfaitement élastique. On peut même le qualifier de matériau « idéal », dans la mesure où il est encore parfaitement isotrope, soit doté des mêmes propriétés physiques dans toutes les directions. Par sa facilité de modélisation, un tel matériau constituerait un rêve d'ingénieur, n'était-ce la rupture qui survient dès qu'il a atteint une certaine con-trainte et sans qu'aucune déformation plastique ne se produise. (fig. 3).

De plus, ce point de rupture n'est malheureusement pas une constante, la résistance à la traction - plus que celle à la compression - étant au contraire une valeur caractérisée par une importante dispersion, typique des matériaux fragiles, que seule une approche statistique et probabiliste assez complexe permet d'aborder d'une façon satisfaisante du point de vue de la sécurité (méthode de Weibull).

La présence d'un défaut - lié à la fabrication du verre, à une rayure ou à un choc - dans la matière induit une forte concentration de contraintes autour du point défectueux dès que l'élément est sollicité par un effort. Une fois la contrainte limite dépassée, cette concentration crée une fissure instable qui croît à la vitesse du son, entraînant la rupture extrêmement rapide de l'élément. C'est en quelque sorte le principe du maillon le plus faible d'une chaîne, où le défaut le plus critique provoque la ruine totale de l'élément.

À ces aspects de fragilité et de probabilité de rupture s'ajoute un autre phénomène qui conditionne la résistance mécanique du verre: sa variation au cours du temps (fig. 4). La résistance du verre diminue fortement dans le temps s'il est soumis à des charges de longue durée. L'origine de ce phénomène réside dans la croissance lente de microfissures superficielles, due à une réaction chimique entre le verre et la vapeur d'eau présente dans l'environnement.

Si la capacité de résistance du verre est donc difficile à cerner, l'industrie y a répondu par des techniques développées pour pallier ses faiblesses: en élevant le seuil de résistance à partir duquel une fissure se développe et en diminuant le risque de rupture totale d'un élément de verre, elles en accroissent largement la fiabilité et la sécurité.

Le verre trempé

La trempe est un traitement thermique ou chimique, qui a pour effet de créer un état d'autocontrainte (en équilibre sans aucune force extérieure) où les couches externes du matériau sont en compression et la partie interne en traction. La plaque de verre est chauffée à environ 700°C, puis refroidie superficiellement et rapidement ce qui provoque une rétractation plus rapide des surfaces que des couches internes. Le retrait retardé de la partie intérieure permet de comprimer les couches externes déjà figées mettant en traction le cœur de l'élément. La résistance du verre étant fortement tributaire de ses défauts, en particulier de surface, ce procédé s'avère donc particulièrement intéressant. L'état d'autocontrainte créé par le trempage augmente la résistance à la traction de l'élément car, si une charge provoque un état de traction de la sur-

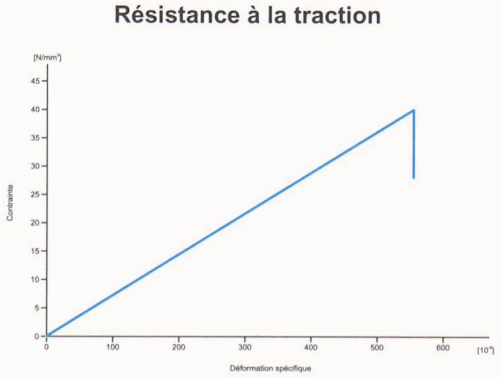

Fig. 3. - Graphique contrainte-déformation pour le verre

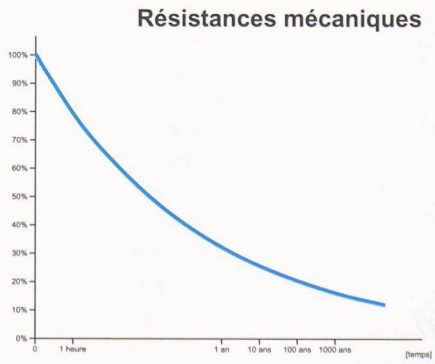

Fig. 4. - Diminution de la résistance du verre en fonction du temps

face, celui-ci devra d'abord vaincre la compression induite par la trempe avant qu'une fracture puisse s'amorcer.

Le verre feuilleté ou laminé

Une autre technique permettant d'augmenter la sécurité vis-à-vis de la rupture du verre consiste à appliquer un intercalaire plastique, généralement du PVB (polyvinyle de butyval), entre deux ou plusieurs feuilles de verre. Ce procédé améliore la sécurité de plusieurs points de vue et notamment en termes de probabilité. L'éventuelle rupture d'une des plaques feuilletée ménage en effet à l'élément composé une probabilité de survie appréciable - en tout cas à court terme - ce qui permet d'intervenir et de remplacer l'élément cassé. D'autre part, en cas de rupture d'une des lames, le verre feuilleté évite la chute des morceaux. Enfin la couche intercalaire, seul élément souple, permet de dissiper l'énergie provenant d'un choc, diminuant ainsi le risque de rupture.

Les deux techniques du trempage et du feuilletage peuvent d'ailleurs se combiner, un verre pouvant être à la fois trempé et feuilleté.

La conception des structures porteuses

Comment construire en verre, et si possible sans commettre trop d'erreurs? Comme il n'existe à ce jour ni formation ni post-formation universitaire spécialement dévolue au calcul des structures en verre et que les normes et règlements existants ne sont pas adaptés aux développements technologiques récents, il s'agit tout d'abord d'acquérir les connaissances de base essentielles à l'élaboration d'un projet. Face au nombre et à la constante évolution des techniques aujourd'hui disponibles, il est en outre souhaitable de faire appel aux industriels du verre pratiquement dès la phase initiale du projet. Cette collaboration avec l'industrie permet une vision rapide et générale des différentes possibilités techniques existantes et offre un échange d'expériences et d'informations extrêmement profitable à la mise au point du projet.

En ce qui concerne la conception des structures porteuses, la nature du matériau exige un concept logique permettant une compréhension claire du comportement d'ensemble de la structure jusqu'au détail le plus infime. Chaque élément de la structure, chaque pièce, doit être étudié en fonction de la prévision exacte de son comportement sous charge. Tout écart entre le modèle admis par l'ingénieur et le comportement réel de l'ouvrage est en effet susceptible d'excéder le seuil de résistance et d'amener une rupture brusque.

Comme on l'a vu, la matière du verre ne présentant aucune fiabilité intrinsèque, il revient donc à l'ingénieur de créer les conditions d'un comportement prévisible, garantissant la sécurité nécessaire à l'ouvrage.

À ces notions de conception, de modélisation et de calcul, il faut ajouter une dernière considération également très importante: celle du scénario en cas de défaillance d'un élément de verre. Quelles sont les conséquences de la rupture d'une pièce en verre? Un niveau de sécurité suffisant demeure-t-il garanti à court terme? Quels sont les risques d'effondrement d'une structure par la défaillance d'un seul élément? Bien que loin d'être aisées, les réponses à ces questions doivent absolument faire partie de la réflexion de l'ingénieur.

La verrière de la salle André J. Heiniger , construite pour la société *Montres Rolex SA*

Cette première application présente les particularités suivantes: toiture de type « plate » (faible pente), utilisation de verres doubles isolants, fixés par points, système porteur principal à câbles, donc plutôt souple, impliquant une interaction entre les deux structures acier et verre, joints étanches au silicone.

La nouvelle salle a été créée dans la seule zone non encore excavée, au milieu des immeubles existants dans un périmètre carré de 24 m x 24 m. Sa localisation enterrée bannissant les ouvertures latérales, l'apport de lumière naturelle, indispensable à une atmosphère agréable, a donc été imaginé en toiture, sous la forme d'une grande verrière circulaire de 8,60 m de diamètre laissant pénétrer dans la salle une quantité de lumière considérable.

Initialement prévue comme un système classique de poutres rayonnant sur lesquelles s'appuieraient des verres pris dans des cadres, cette structure ne correspondait pas aux vœux du maître de l'ouvrage, qui souhaitait une verrière de conception moderne, novatrice, technique, transparente et légère. La solution proposée a donc consisté en une structure en câbles et verre fixé par points. (fig. 7 et 8) Les câbles forment une membrane tendue, sur laquelle repose le plan vitré qui se matérialise par une peau très lisse. Le système de fixation ponctuel accentue la présence du verre et permet une lecture claire du système porteur.

Dès les phases initiales du projet, les fabricants consultés ont permis d'encadrer les possibilités et limites d'une application horizontale telle qu'elle était imaginée.

Les principaux choix constructifs et éléments géométriques d'ensemble, soit le découpage en seize secteurs, la dimension des verres, le positionnement des joints et pentes, ainsi que le choix du système de fixation ont ainsi pu être définis.

A l'issue de cette première approche technique, le système de Pilkington, caractérisé par des fixations petites, élégantes et bien proportionnées aux dimensions de l'objet, a été retenu. Quand au système porteur à câbles, en lui-même indéfini dans sa forme, il acquiert la configuration et la rigidité requises pour résister aux charges externes par la seule mise en tension des câbles constituant la structure.

Si les câbles à convexité vers le bas (ci-après appelés « câbles ») eussent

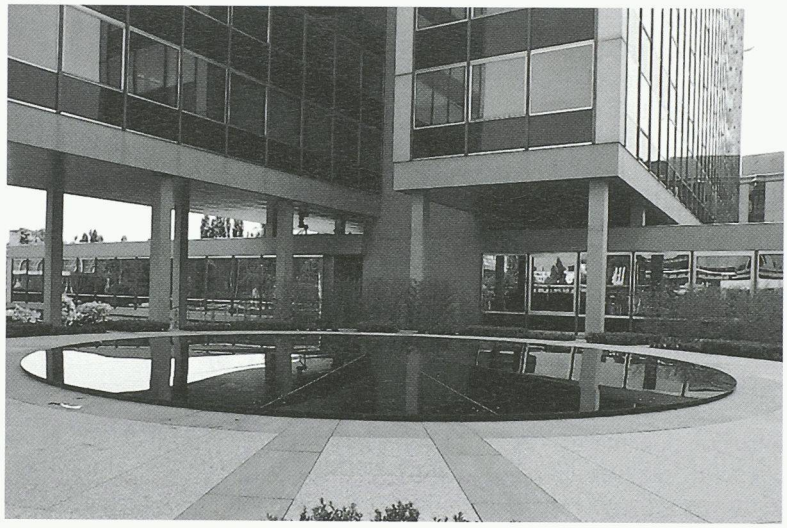

Fig.5. - La verrière de la salle André J. Heiniger (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

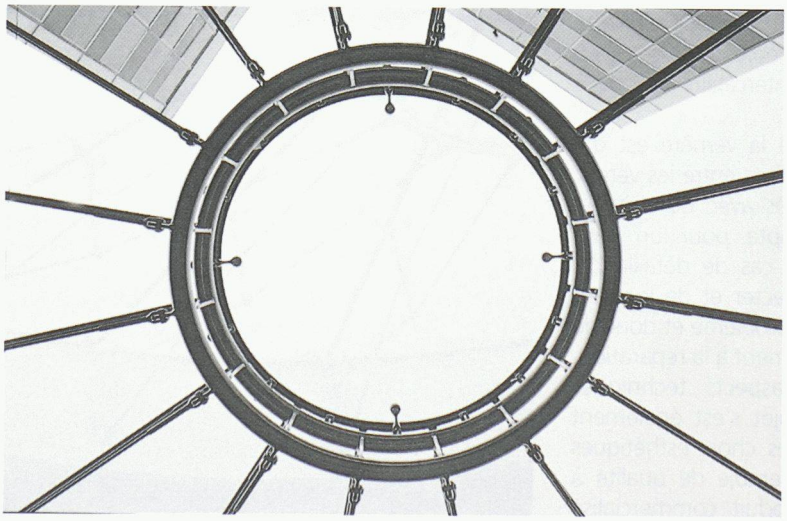

Fig.6. - Verrière de la salle André J. Heiniger: anneau central en acier (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

suffi à l'équilibre du système, des câbles à convexité vers le haut (ci-après «contre-câbles») ont toutefois été introduits pour en accroître la rigidité et en fixer la forme géométrique avant la pose des verres.
La mise en tension des câbles se répercute dans les contre-câbles et vice-versa; le système se trouve donc dans un état réglé d'autocontrainte avant la pose du vitrage. Le niveau de la précontrainte est choisi de façon à ce que les contre-câbles n'entrent jamais en compression, si bien que la structure présente toujours une rigidité donnée par les deux familles de câbles.
Les déviateurs intermédiaires, nécessaires au support des seize verres trapézoïdaux, sont des barres intrinsèquement instables hors du plan vertical défini par les couples de câbles. C'est grâce aux éléments de verre (rigidité dans leur plan horizontal) et aux forces de rappel des câbles que les déviateurs demeurent en position. Durant la phase de montage, ces éléments ont été stabilisés provisoirement avec des cordes.
Quant à l'anneau central en acier, il distribue par traction les forces des câbles tout en résolvant harmonieusement le détail, souvent délicat, de la convergence des câbles vers le centre du système.
La verrière s'appuie finalement sur la dalle en béton armé qui la circonscrit. Cette dernière représente un disque extrêmement rigide qui absorbe par effet d'arc, donc par compression, les forces de traction des câbles.
Le calcul statique du système à câbles a fait appel à un modèle d'analyse structurelle complexe traitant des problèmes de non-linéarité géométrique. Le souci d'une modélisation la plus proche possible du comportement réel de l'ouvrage se justifiait d'autant plus que les verres contribuent à la stabilité et à la résistance du système porteur d'ensemble. Nous avons utilisé le programme d'analyse numérique développé à l'EPFL par le professeur François Frey.

Cette analyse a permis d'apporter les réponses nécessaires aux points critiques du projet, c'est-à-dire à la définition de la géométrie initiale du système, au niveau de précontrainte dans les câbles, à l'estimation des déformations et des rotations angulaires sous charges, ainsi qu'au comportement en cas de rupture d'un panneau de verre. Il a donc permis de s'assurer de la parfaite comptabilité entre la structure, les éléments en verre et leur système de fixation.

La technique de fixation ponctuelle utilise obligatoirement du verre trempé (perçage du verre, concentration locale des contraintes autour des fixations), chaque module de verre ayant été soumis au « *heat soaked test* » afin de minimiser le risque de rupture spontanée dû aux inclusions éventuelles de sulfure et de nickel. Le verre est traité pendant huit heures à une température de 280 à 300°C. Le calcul statique des plaques de verre a été effectué par une analyse aux éléments finis, avec une contrainte maximale sous charges de dimensionnement limitée à 75 N/mm^2.

Thermiquement isolant (K=1,65 W/m^2 °K), le vitrage présente un facteur solaire très performant (g=0,20) et un faible coefficient de transmission lumineuse (TL=0,16). Le verre supérieur a une épaisseur de 12 mm, le vide d'air est de 16 mm, et le verre inférieur feuilletté présente une épaisseur de 6+6 mm, avec un intercalaire PVB de 2 fois 0,38 mm.

L'étanchéité de la verrière est garantie par les joints entre les verres, qui sont réalisés avec du silicone. Nous avons opté pour un joint simple qui, en cas de défaillance, permet de détecter et de localiser rapidement le problème et donc de procéder facilement à la réparation.

Au-delà des aspects techniques pointus, le projet s'est également orienté vers des choix esthétiques offrant un ensemble de qualité à l'image du produit commercialisé par le maître de l'ouvrage. Les aspects esthétiques sont d'autant plus

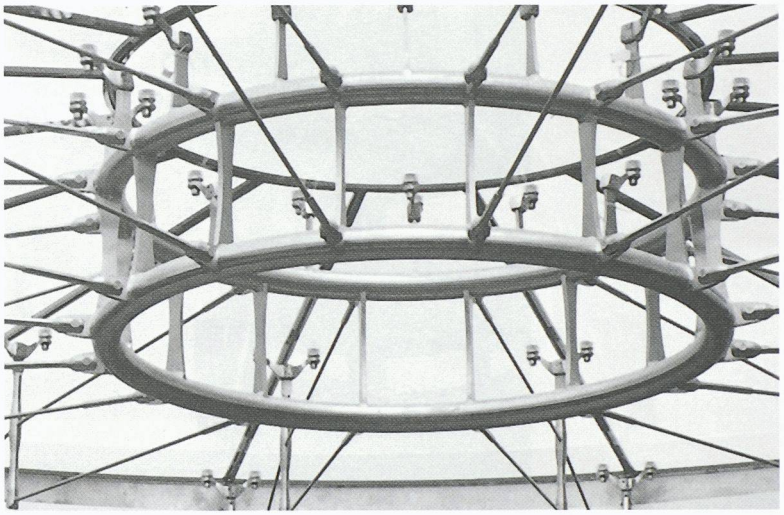

Fig.7. - Verrière de la salle André J. Heiniger: anneau central en acier avec système de câbles et contre-câbles (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

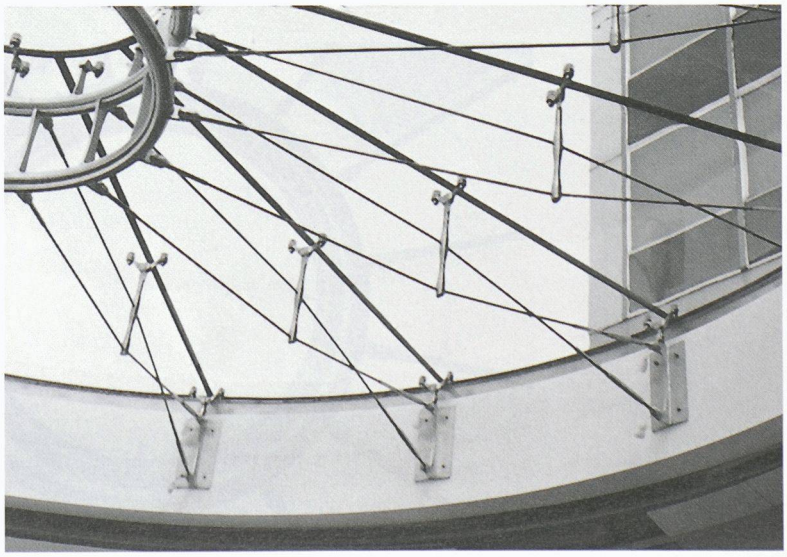

Fig.8. - Verrière de la salle André J. Heiniger: structure en câbles et verre fixé par points avec les déviateurs intermédiaires (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

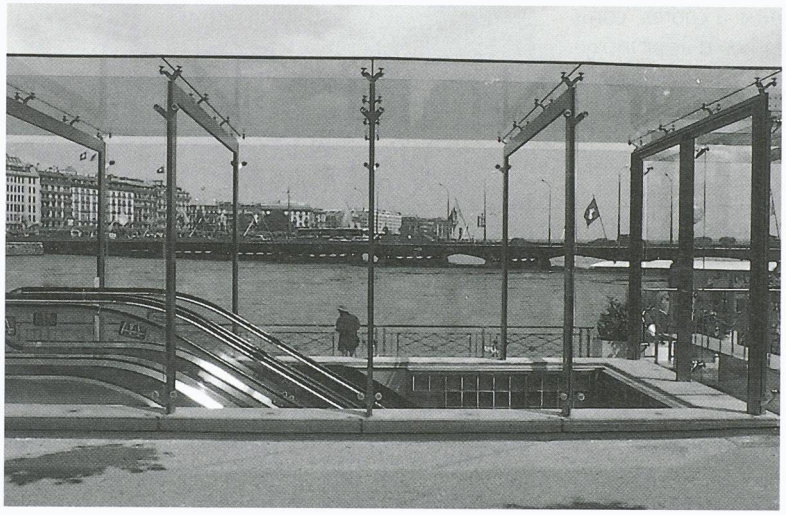

Fig.9. - La couverture des accès piétons du parking du Mont-Blanc (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

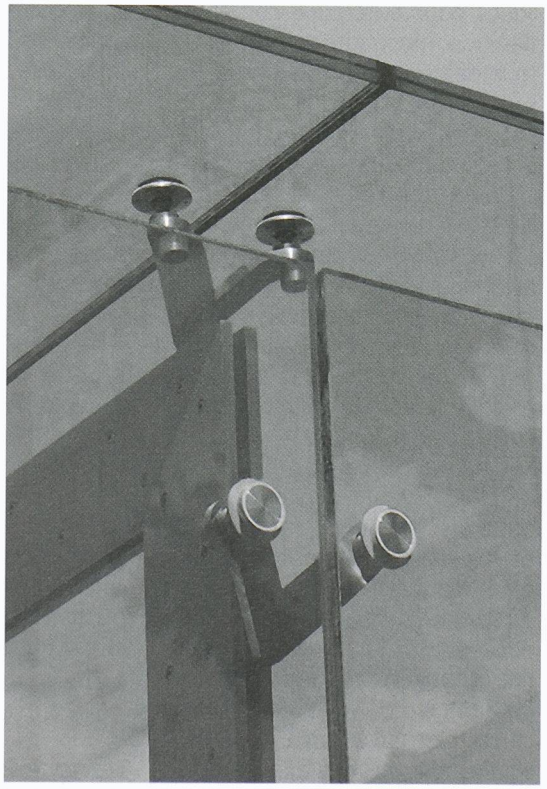

Fig.10. - Couverture des accès piétons du parking du Mont-Blanc: les lames métalliques assemblées par boulonnage prennent en sandwich les pièces de fixation du verre (Photo Fausto Pluchinotta, Genève)

importants, que la transparence et la luminosité mettent fortement en évidence la structure porteuse qui supporte le verre.
Les pièces en acier inoxydable de la structure ont donc été étudiées et dessinées dans le détail, à partir d'esquisses faites à la main et de moyens de création essentiellement développés pour l'industrie automobile et le design de produits. Ces moyens permettent très rapidement la visualisation de l'objet en cours d'étude par des images de synthèse.
L'avantage d'une telle démarche réside dans le fait qu'une fois le design approuvé, les documents et fichiers nécessaires sont directement disponibles pour la fabrication. Selon la méthode de production, il s'agissait soit de plans usuels, soit de fichiers informatiques pour des machines à commandes numériques. Les pièces d'appuis des éléments de verre ont, par exemple, été directement usinées par le maître de l'ouvrage sur les mêmes machines qui produisent les boîtiers de montres.

La couverture des accès piétons du parking du Mont-Blanc

Dans ce deuxième exemple, le verre a été utilisé sous forme de grandes plaques fixées par points permettant de stabiliser la structure.
L'avant-projet des architectes prévoyait une construction la plus transparente possible, mais les premiers contacts avec des entreprises spécialisées n'ont pas été très satisfaisants. Deux solutions furent envisagées: l'une avec des cadres formés par des tubes de 200 mm de diamètre, l'autre avec des cadres en verre constitués de poutres et de colonnes de 350 mm de hauteur, donc peu élancées. Les deux variantes prévoyaient des découpages multiples des panneaux de verre et la stabilité était assurée par des contreventements classiques.
La solution finalement adoptée permet une meilleure interprétation du projet des architectes (AVV, atelier d'architecture, Genève): elle con-

siste en un système à cadres, composés de deux lames d'acier inoxydable, qui portent les plus grandes plaques de verre autorisées par les possibilités constructives et techniques. La toiture est donc constituée d'un panneau unique sur huit appuis et deux panneaux latéraux sur les façades. D'une hauteur de 150 mm pour une épaisseur de 15 mm, les lames métalliques - assemblées par boulonnage pour éviter les déformations inévitables dues aux soudures sur de l'acier inoxydable - prennent en sandwich les pièces de fixation du verre. Le profil en lame étant caractérisé par une rigidité torsionnelle et une inertie hors du plan très faibles (avec les instabilités de flambage et de déversement qui en découlent), ce sont donc les éléments en verre qui assurent, par un effet de plaque, la stabilisation horizontale des cadres. Le verre remplit ainsi le rôle habituel des contreventements souvent matérialisés par des croix en acier ou en câble.

Dans ce cas également, la compatibilité du comportement d'ensemble a été vérifiée par une modélisation complexe faisant intervenir des calculs en non-linéarité géométrique (EPFL, Prof. F. Frey). Différents états limites d'instabilité ont été analysés pour la colonne et la traverse.

En cas de défaillance du système de contreventement, le critère a été d'assurer que la structure pouvait encore porter les charges prévues avec une sécurité globale réduite à 1,0.

La verrière du quai des montres *Rolex* au Locle

Ce dernier exemple traite plus en détail les possibilités du verre feuilleté, en particulier sa capacité à créer une liaison suffisamment rigide pour que deux éléments de verre ne se comportent pas comme s'ils étaient indépendants, juste capables de reprendre leur part de charge, mais profitent de la section adjacente comme une seule grande section, constituant un ensemble deux fois plus résistant.

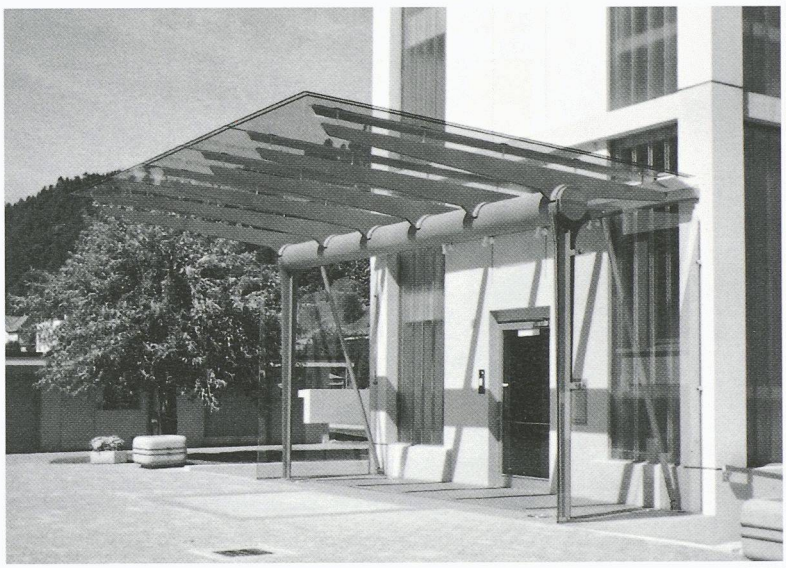

Fig. 11. - La verrière du quai des montres Rolex *au Locle (Photo Bureau Guscetti & Tournier)*

La construction métallique se compose de poutres à lames stabilisées au déversement par les plaques de verre. La charge de neige s'avérant importante (400 kg/m^2) au Locle, les éléments de verre s'appuient linéairement sur les poutres métalliques pour éviter une concentration trop importante des efforts autour des trous provoquée par un système fixé par points. Le dimensionnement du verre a par ailleurs pris en compte la diminution de la viscosité de l'intercalaire PVB à basse température: matériau visqueux, le PVB se comporte en effet comme une colle quasi rigide à des températures inférieures à 10°C, si bien que la section composée par les deux verres devient alors presque homogène et donc beaucoup plus résistante.

Sur la base de récentes études menées à l'Université de Stuttgart (*Institute for Lightweight Structures*, Dr M. Kutterer), l'épaisseur du verre a été réduite de 2x12mm à 2x10mm. Elle aurait même pu être abaissée à 2x8mm, mais une sécurité minimale à court terme en cas de rupture d'un verre n'aurait dans ce cas plus été assurée. Le dimensionnement du verre a été effectué selon une méthode semi-probabiliste prenant en compte le comportement du PVB pour le cas particulier de l'action de la neige (T<10°C, action de courte durée).

En conclusion, le verre a aujourd'hui démontré qu'il méritait sa place dans les matériaux de structure. Sa technique d'application s'est diversifiée, couvrant un domaine de plus en plus vaste qui va des verres fixés par points aux systèmes à poutres (montants de façades, poutres) en passant par les piliers et les dalles.

Celà étant, de telles applications restent malgré tout encore marginales et souvent peu satisfaisantes en termes de sécurité et de fiabilité, en particulier en ce qui concerne le comportement post-rupture.

A notre avis, la contribution du verre aux structures porteuses sera appelée à se renforcer et à se compléter, à partir du moment où son impressionnant potentiel de résistance à la compression sera exploité en complément à d'autres matériaux (tels des fibres, câbles et tirants) résistant à la traction, pour créer un ensemble composite permettant d'ouvrir la voie à la ductilité tant souhaitée par les ingénieurs. □

Les lecteurs intéressés trouveront des illustrations et matériaux complémentaires au présent article sur le site Internet <http://www.gti.ch