

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 130 (2004)  
**Heft:** 17: Façades intelligentes

**Artikel:** Structures en verre, recherches en cours à la I'ICOM-EPFL  
**Autor:** Crisinel, Michel  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99336>

### **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:** 02.02.2025

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

# Structures en verre, recherches en cours à l'ICOM-EPFL

Depuis quelques années, le Laboratoire de la construction métallique (ICOM) de l'EPFL s'est lancé dans la recherche sur le verre en tant qu'élément structurel [1] et [4]<sup>1</sup>. En effet, l'architecture contemporaine fait de plus en plus appel à des éléments de construction transparents pour la réalisation de façades et de toitures, plus particulièrement à des éléments constitués de verre et de métal (fig. 1). Nous présentons ici quelques travaux de recherche dont le but est de fournir des moyens permettant de dimensionner les éléments d'enveloppe en verre des bâtiments modernes.

## Stabilité des éléments porteurs

Le verre, matériau longtemps réservé au remplissage des fenêtres, a beaucoup plus à offrir du fait de sa très haute résistance à la compression et de sa transparence. C'est pourquoi on cherche à étendre l'utilisation des feuilles de verre pour en faire des éléments porteurs tels que poteaux, poutres ou parois. Ces éléments étant très élancés, ils ont tendance

à se ruiner par instabilité lorsqu'ils sont soumis à la compression (ruine par flambage, déversement ou voilement). Actuellement, il existe très peu de connaissances dans le domaine de la capacité portante des éléments structurels en verre, et les méthodes de dimensionnement développées pour d'autres matériaux (par exemple l'acier) sont difficiles à appliquer au dimensionnement des structures en verre<sup>2</sup>. Ce constat a permis de définir les objectifs de la recherche d'Andreas Luible [5], à savoir :

- étudier le comportement sous charge des éléments structurels en verre, susceptibles de se rompre par défaut de stabilité, au moyen d'essais en laboratoire et de modèles analytiques et numériques;
- étudier les paramètres ayant la plus grande influence sur ce comportement;
- discuter les méthodes de calcul envisageables pour les éléments structuraux en verre, susceptibles de se rompre selon l'un des trois modes classiques d'instabilité (flambage des poteaux, déversement des poutres et voilement des plaques);
- proposer des aides de dimensionnement telles que des courbes de flambage.

Les principaux paramètres ayant une influence sur le comportement structural d'éléments en verre (écarts d'épaisseur des feuilles de verre, déformations initiales) ont été mesurés et évalués selon des méthodes statistiques. Le chercheur a également défini et explicité la contrainte de rupture, les autocontraintes thermiques dues à la trempe et la résistance intrinsèque à la traction. Enfin, il a analysé les modèles servant à définir la résistance à la traction du verre.

Le comportement au flambage des verres simples et feuilletés a été étudié au moyen d'essais (fig. 2) dont les résultats ont été comparés à ceux provenant de modèles analytiques et numériques. Ces derniers ont ensuite été utilisés pour

<sup>2</sup> Il ne possède pas de capacité de déformation plastique et présente un comportement fragile, ce qui implique que les concentrations de contraintes locales ne sont pas dissipées et que par principe aucune redistribution des efforts ne peut se produire, quel que soit l'état de la structure. De plus, la résistance du verre n'est pas constante et dépend des sollicitations et des conditions environnementales.



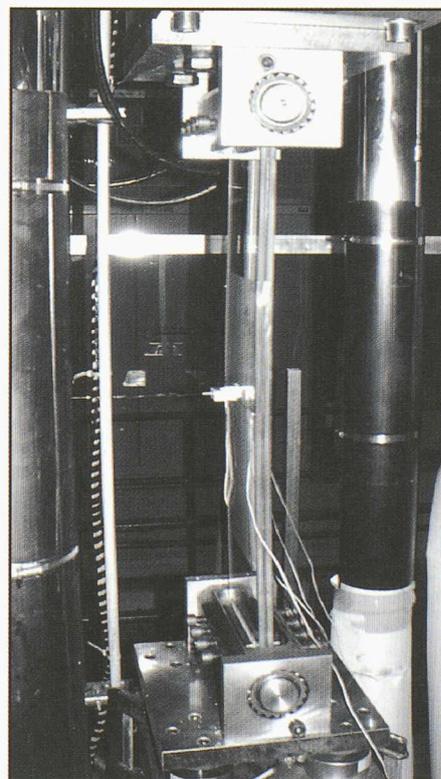
Fig. 1 : Verrière de toiture du bâtiment des Communications de l'EPFL à Ecublens, arch. Luscher Architectes SA, ing. S+N Schopfer & Niggli SA (Photo Luscher Architectes)

Fig. 2a et 2b : Essai de flambage d'un élément en verre feuilleté semi-trempe (Photos A. Luible, ICOM-EPFL)

étudier l'influence des paramètres principaux, en particulier l'effet de la liaison des verres feuilletés, due à la couche intermédiaire en butyral de polyvinyle (PVB), sur le comportement structural et la résistance au flambage des éléments comprimés en verre. Sur la base de cette étude, Andreas Luible propose et discute différentes méthodes de dimensionnement. Il en ressort qu'une analyse structurale au second ordre est la méthode la plus appropriée pour ce type d'élément. Comme simplification supplémentaire, il a été montré qu'une section de verre feuilleté composée de plusieurs couches de verre pouvait être remplacée, dans le modèle de calcul, par une section monocouche grâce à l'introduction d'une épaisseur équivalente de verre.

Il a également été possible de valider, par comparaison avec des résultats d'essais, les modèles analytiques et numériques développés pour étudier la résistance au déversement des poutres en verre. Une étude paramétrique a permis de définir et de discuter différentes méthodes de calcul de la résistance au déversement. Il en est ressorti que des courbes de déversement pouvaient être développées en fonction d'un coefficient d'élanement basé sur la résistance effective à la traction du verre. Des simulations numériques ont permis de donner des recommandations sur la façon d'établir des courbes de déversement de poutres en verre fléchies.

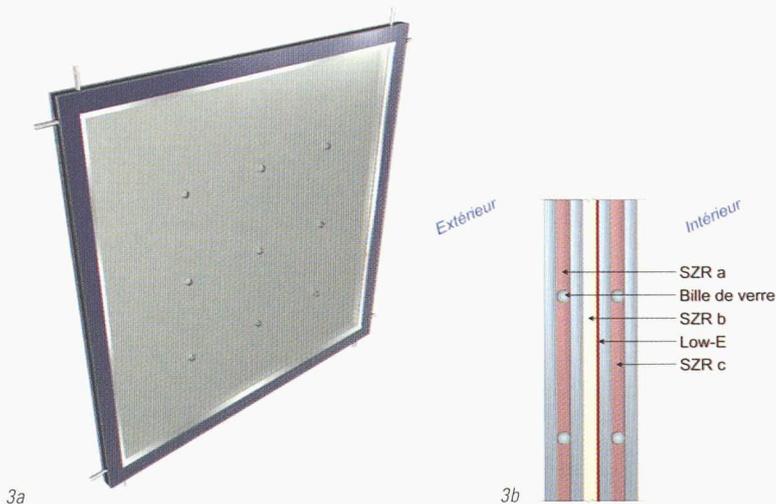
Le voilement de panneaux de verre simples et feuilletés comprimés a également été étudié à l'aide d'essais de voilement et de modèles analytiques et numériques. Il en est ressorti que les panneaux de verre comprimés possédaient une grande réserve de capacité portante post-critique, mais que la façon dont les forces sont introduites dans le panneau, ainsi que l'aspect de la déformée de voilement, pouvaient avoir une grande influence sur la résistance au voilement. Une méthode de dimensionnement à l'aide de courbes de voilement pourrait être établie en utilisant un coefficient d'élanement au voilement basé sur la résistance effective à la traction du verre. Les simulations numériques ont permis de donner des recommandations sur la façon d'établir des courbes de voilement pour des panneaux en verre comprimés.



2a



2b



- Certains concepts sont largement utilisés mais ne présentent qu'un domaine d'application restreint et souffrent de limitations et d'inconvénients considérables. Ils sont soit très simplistes, et donc impropres à l'utilisation pour des structures sophistiquées et novatrices, soit complexes, difficiles à utiliser, induisant à l'erreur, peu transparents et manquant de flexibilité malgré leur complexité.
- Il manque un concept de sécurité qui tienne compte d'une manière satisfaisante de la fragilité particulière du matériau.

Par conséquent, de nombreuses applications nécessitent encore des essais en laboratoire, coûteux en termes d'argent et de temps. Par ailleurs, les éléments structuraux en verre sont souvent surdimensionnés et n'atteignent donc pas un niveau satisfaisant du point de vue architectural et économique. Ou bien, ils présentent au contraire un potentiel de risque important suite à la formulation d'hypothèses inappropriées lors de leur dimensionnement.

Le projet de recherche de Matthias Haldimann a pour but d'apporter une contribution substantielle au développement de bases scientifiques en vue d'un dimensionnement économique et sécuritaire des structures en verre ainsi qu'à leur application pratique. Concrètement, il s'agit :

- d'établir l'état de connaissances sur le dimensionnement des éléments porteurs en verre [7] et d'identifier et analyser les inconvénients et limitations des concepts existants ainsi que leurs sources,
- d'établir un concept cohérent, basé sur la mécanique de la rupture, qui permette des simulations probabilistes du comportement structural des éléments en verre,
- de quantifier les paramètres utilisés dans ce concept,
- de calibrer et valider le concept de simulation,
- de développer un concept de sécurité et de dimensionnement pour le domaine du verre porteur.

#### Façades avec circulation de liquide

Un troisième projet de recherche (mené par Thomas Vollmar) a pour but de développer une façade en verre dans laquelle les pertes en énergie thermique et les gains en énergie solaire sont contrôlés de façon active. Le principe est basé sur la construction d'un vitrage à quatre feuilles de verre confinant deux espaces intermédiaires avec circulation de liquide et un espace contenant un gaz (voir aussi p. 9).

La figure 3 donne une représentation schématique de l'élément de façade avec circulation de liquide. Le liquide de la chambre extérieure (SZR a) absorbe le rayonnement solaire et réduit la transmission d'énergie à l'intérieur du bâtiment. L'espace intermédiaire moyen contenant du gaz (SZR b) ainsi

#### Dimensionnement et sécurité

Dans son utilisation traditionnelle (fenêtres, vitrages), le verre ne doit résister qu'à des actions dues au vent, perpendiculairement à son plan. Les dimensions de plus en plus grandes des panneaux ainsi que l'amélioration des technologies d'affinage - par exemple la trempe thermique pour la fabrication du verre trempé et du verre durci ou l'utilisation du butyral de polyvinyle (PVB) dans la fabrication du verre feuilleté - rendent maintenant possible l'utilisation du verre comme élément porteur. Surviennent alors des questions concernant la sécurité de telles structures ainsi que la nécessité d'une méthode qui rende leur dimensionnement simple, sûr et économique. Les méthodes de dimensionnement de la construction en acier, en béton ou en bois ne peuvent pas être appliquées par analogie, puisque le verre a des propriétés mécaniques différentes.

Ces dernières années, de nombreux projets de recherche ont été dédiés à l'utilisation du verre comme élément porteur. Néanmoins, les ingénieurs qui dimensionnent des structures en verre sont dans une situation peu confortable en ce qui concerne les concepts de dimensionnement :

- En Europe, il n'y a pas d'accord général sur un concept unique de dimensionnement, tous les projets de normalisation ayant fait l'objet de vives oppositions (à juste titre d'ailleurs).

## L'ACTION EUROPÉENNE COST C13 : VERRE ET ENVELOPPES INTERACTIVES DE BÂTIMENT

L'action européenne de coordination des recherches dans le domaine « Verre et enveloppes interactives de bâtiment » a démarré en 2000 et durera cinq ans [2]. Son objectif principal est d'augmenter les connaissances sur les propriétés et les potentialités du verre dans le domaine du bâtiment pour améliorer les performances des enveloppes des bâtiments, réduire la consommation d'énergie et minimiser les impacts sur l'environnement.

L'action COST C13 concerne la coordination des différents travaux de recherche en vue d'améliorer la qualité des nouvelles façades, y compris la réhabilitation de façades d'anciens bâtiments, en intégrant de nouveaux principes conceptuels (définition systémique d'une enveloppe) et relatifs à la construction (systèmes techniques, matériaux, ossature et liaisons). L'action est organisée en un comité de gestion et quatre groupes de travail : WG1, Approche architecturale ; WG2, Qualité de l'espace intérieur ; WG3, Aspects structuraux ; WG4, Synthèse.

Le Laboratoire de la construction métallique ICOM de l'EPFL contribue aux travaux de coordination des recherches du troisième groupe.

### Programme scientifique

Le développement rapide des enveloppes de bâtiment en verre n'a pas permis aux architectes d'acquiescer et d'analyser toutes les potentialités et possibilités d'utilisation. En conséquence, il existe un besoin urgent d'établir une base de données d'exemples de bâtiments en verre - immeubles individuels, galeries et atriiums couvrant des espaces publics ou semi-publics, parois de verre contre le bruit ou le vent, etc. - afin d'évaluer et de discuter leurs qualités architecturales et leur impact visuel sur l'environnement.

Pour améliorer le confort des occupants des bâtiments en verre, il faut augmenter la qualité de l'espace intérieur, optimiser l'exploitation des ressources d'énergie naturelles et renouvelables et minimiser les impacts sur l'environnement en concevant des bâtiments avec des enveloppes « interactives », qui s'adaptent de manière dynamique et automatique à leur environnement extérieur et intérieur. Cette conception dépend de l'utilisation du bâtiment et résulte en une minimisation des ressources nécessaires à la construction, la maintenance et la démolition de l'ouvrage.

L'étude structurale des façades en verre doit comporter une détermination claire des actions, la définition de modèles de charge et une analyse des risques, le tout en conformité avec la philosophie moderne du dimensionnement structural des éléments de bâtiment relative aux états limites de service et ultime. La

recherche doit également concerner la liaison de l'enveloppe avec sa sous-structure et la charpente du bâtiment, incluant le développement de nouveaux systèmes et de nouveaux matériaux. Enfin, il faut également considérer la recherche dans le domaine du verre en tant qu'élément porteur à part entière afin de développer des méthodes de calcul fiables et économiques.

### Participation de la Suisse

Les projets suisses qui sont actuellement en cours et qui font partie de la coordination COST sont les suivants :

- EPF Lausanne (ICOM): « Glass as a load-carrying element in connection to the steel structure », Part A: « Stability of load-carrying elements of glass » (Thèse EPFL N° 3014 d'Andreas Luible), Part B: « Safety of steel-glass structural elements » (Thèse de Matthias Haldimann, en préparation).
- EPF Lausanne (ICOM) et ETH Zurich, Professur für Architektur und Entwurf, en collaboration avec le Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg (D) et Saint-Gobain Glas, Aachen (D): « Éléments de façade en verre avec circulation de liquide ».
- ETH Zurich, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK): Resttragfähigkeit von gebrochenen Verbundglas (Thèse d'Alexander Kott, en préparation).

Pour la Suisse, l'intérêt de l'action COST C13 concerne trois secteurs :

- Formation des étudiants, des ingénieurs et des architectes suisses dans un domaine novateur et en fort développement. Un des objectifs de l'action est la mise sur pied d'un cycle postgrade au niveau européen dans le domaine de la conception et de l'ingénierie des façades en verre.
- Collaboration entre les différents intervenants (recherche, développement, réalisation). Tester la collaboration pluridisciplinaire entre ingénieurs, architectes, physiciens du bâtiment, constructeurs, entrepreneurs, etc. afin de l'améliorer.
- Economie : obtenir le *know-how* nécessaire dans ce domaine afin que les sociétés et entreprises suisses soient compétitives en Europe et dans le monde (exportation). Le domaine de la rénovation des bâtiments, en particulier des enveloppes, est primordial en ce qui concerne l'amélioration de la qualité de la vie et la baisse de la consommation d'énergie.

Une conférence « Glass in Buildings », point culminant de l'action, aura lieu à l'Université de Bath (UK), les 7 et 8 avril 2005 (voir <[www.cwct.co.uk](http://www.cwct.co.uk)>). Le rapport final de l'action COST C13 sera publié par la Commission Européenne en mai 2005.

qu'un revêtement basse énergie (*Low-E*) minimise la transmission d'énergie jusqu'à la troisième chambre. Le refroidissement et le chauffage du bâtiment sont produits par la circulation du liquide dans la chambre intérieure (*SZR c*). Le réglage de la température intérieure sur l'ensemble de la surface de la façade en verre réduit les courants de convection et permet une augmentation sensible du confort intérieur. En cas de fort rayonnement solaire, le liquide transparent extérieur *SZR a* peut être remplacé par un liquide coloré. Ce procédé d'obscurcissement augmente le pouvoir d'absorption du liquide et l'efficacité du système.

Le niveau libre du liquide qui circule se situe en dessous de l'élément de façade. Ainsi le liquide situé dans les chambres *SZR* est en dépression, ce qui évite un gonflement des chambres mais provoque une déformation non souhaitée des feuilles de verre vers l'intérieur (effet de lentille). Pour réduire cet effet, des distanceurs en forme de billes de verre sont collées entre les feuilles.

Ce vitrage multiple à circulation de liquide intègre les composantes suivantes de l'enveloppe transparente d'un bâtiment :

- le système d'obscurcissement,
- les systèmes de chauffage et de refroidissement,
- le système de capteurs solaires.

La mission principale de l'ICOM dans ce projet est le développement d'un prototype. Des études particulières concernant l'étanchéité et le vieillissement des joints collés entre les feuilles ont été effectuées. La suite consistera à étudier le comportement et la résistance des feuilles soumises à la dépression intérieure et aux forces ponctuelles constituées par les billes de verre.

### Potentiel du verre

Il est évident que le verre n'a pas encore atteint tout son potentiel dans le domaine du bâtiment. À l'avenir, les panneaux de verre devraient être utilisés plus fréquemment comme éléments porteurs, en liaison avec les matériaux de construction usuels. L'expérience pratique déjà acquise dans ce domaine devrait permettre le développement de normes de dimensionnement et de règles de sécurité appropriées. De nouveaux types de vitrage, de nouveaux types de revêtements ainsi que des résultats de recherches théoriques et expérimentales devraient offrir bientôt de nouvelles perspectives dans l'ingénierie des enveloppes transparentes de bâtiments.

La technologie des façades est en train de se transformer en une discipline d'ingénieur. Ceci implique qu'une attention particulière doit être portée au matériau verre et à ses

applications structurales. Cette discipline devra intégrer les aspects d'ingénierie, d'architecture, combiner l'analyse, la normalisation, l'adaptation aux besoins économiques, le dimensionnement « sur mesure » et les détails de construction adaptés au client. C'est également dans cette vision interdisciplinaire que l'on a créé l'action de coordination européenne des travaux de recherche COST C13 « Verre et enveloppes interactives de bâtiment », qui est en train de rassembler les résultats les plus intéressants des recherches dans ce domaine (voir encadré p. 17).

Michel Crisinel, ing. dipl. EPFL, chef de section, chargé de cours  
Laboratoire de la construction métallique (ICOM)  
ENAC-EPFL, Ecublens, CH - 1015 Lausanne

### Bibliographie

- Publications principales de l'ICOM dans le domaine du verre structural
- [1] W. LAUFS, A. LUIBLE, R. MOHREN: « Etude préliminaire sur le verre comme élément de construction dans le bâtiment », Rapport ICOM 403, EPFL, Lausanne, 1999
  - [2] CRISINEL, M., COST ACTION C13: « Glass and interactive building envelopes ». In Informationstagung, *Stahl und Glas*, 19/20, März 2002, ETH Hönggerberg, Zürich, 2002, pp. 101-106
  - [3] A. LUIBLE, M. CRISINEL: « Auf Biegen und Brechen », *tec21*, N° 12/2002, pp. 29-36, SIA, Zürich, 2002
  - [4] W. LAUFS, A. LUIBLE, M. CRISINEL: « Introduction à l'utilisation du verre comme élément porteur dans les bâtiments », *Construction métallique*, N°2, pp. 15-32, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (C.T.I.C.M.), St-Rémy-lès-Chevreuse (F), 2003
  - [5] A. LUIBLE: « Stabilität von tragenden Elementen aus Glas », Thèse EPFL N° 3014, EPFL, Lausanne, 2004
  - [6] A. LUIBLE, M. CRISINEL: « Buckling Strength of Glass Elements in Compression », *Structural Engineering International*, Vol. 2/2004, pp. 120-125, IABSE, Zurich, 2004
  - [7] CH. HAAS, M. HALDIMANN: « Entwurf und Bemessung von Tragelementen aus Glas - Wissensstandbericht », Rapport ICOM 493, EPFL, Lausanne, 2004

### Remerciements

L'auteur remercie L'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES) ainsi que le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) pour leur support financier à la participation à l'action COST C13 et aux projets de recherche réalisés à l'ICOM. Il remercie aussi les jeunes chercheurs de l'ICOM en charge de ces projets, MM. Andreas Luible, dr ès sc. techn., Matthias Haldimann, ing. dipl. EPF et Thomas Vollmar, ing. dipl. EPF.