

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 130 (2004)
Heft: 10: Cathédrale de Lausanne

Artikel: Les ingénieurs civils face à un monument du XIIIe siècle
Autor: Marmier, Jean-Pierre / Kälin, Jean-François / Treyvaud, René
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99306>

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: 30.03.2025

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

Les ingénieurs civils face à un monument du XIII^e siècle

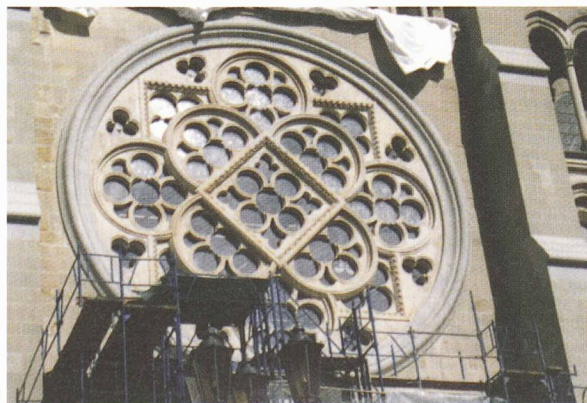
RESTAURATION

Dans le cadre des importants travaux de restauration entrepris durant les quinze dernières années sur la cathédrale de Lausanne, plusieurs interventions majeures touchant la structure ont été effectuées. Le présent article concerne deux d'entre elles : les travaux de consolidation de la rosace et le remplacement des arcs-boutants.

La rosace

Trois éléments essentiels ont rendu nécessaires les interventions sur la façade sud du transept : des tassements résiduels de l'angle ouest de cette façade, l'altération des vitraux, dont une grande partie date du XIII^e siècle, ainsi que la dégradation de la couronne de la rosace (fig. 1). Bien que cette dernière ait bénéficié d'une restauration complète au début du XX^e siècle, il est apparu que le grès calcaire très dur utilisé en 1908 n'avait pas résisté aux effets combinés du gel et de l'eau.

Les tassements différentiels ont été mis en évidence grâce à un système général de surveillance de la structure au moyen de cibles, observées optiquement depuis le sol, et avec des nivellements de précision de plusieurs points sur la façade sud. De plus, des investigations géotechniques effectuées parallèlement aux mesures de mouvement ont confirmé une faiblesse du sol, puisqu'une importante couche de sables limoneux n'était en effet pas encore complètement consolidée.



Pour remédier à ces défauts, il a été procédé à une densification de la zone de sables limoneux à l'aide de micro-pieux verticaux et obliques, à la dépose des vitraux de la rosace afin de les restaurer, ainsi qu'au remplacement symétrique et pierre à pierre de la couronne de la rose. Comme pour les restaurations précédentes, c'est le grès de Schmerikon (St-Gall) qui a été retenu. Afin d'assurer la précontrainte de l'ensemble de la rosace, deux tubes circulaires en acier inoxydable, solidaires d'une plaque d'appui cintrée assurant la diffusion des efforts dans la couronne (fig. 2), ont été mis en place au fur et à mesure du remplacement des pierres de la couronne.

Cette dernière opération s'est déroulée sous contrôle permanent des déformations des éléments de la rose. Compte tenu des efforts introduits et de modules d'élasticité différents entre les pierres de la couronne et celles du remplage, on pouvait s'attendre à des déformations de l'ordre du micron, voire moins si l'on fait intervenir les perturbations dues aux joints en mortier de plâtre. Aucun micromètre courant ne permettant une telle performance, le contrôle a été assuré par le capteur ultra sensible développé par l'un des auteurs de la présente contribution. Apte à détecter des variations de l'ordre du centième de micron, ce dispositif avait déjà été utilisé avec succès pour effectuer des mesures de contraintes *in situ* dans l'un des piliers de la cathédrale. Sur l'ensemble de la rose, 24 capteurs ont été posés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, soit 12 sur la couronne et 12 dans les angles du carré intérieur du remplage.

La mesure des déformations est faite sur une base de 90 mm (fig. 3) et les capteurs sont reliés au moyen d'une boîte de connexion à un PC. L'enregistrement s'effectue d'une manière continue et automatique à raison d'une lecture toutes les secondes pour chacun des 24 capteurs. Les mesures doivent être effectuées tôt le matin, afin de réduire au minimum les dérives dues à l'ensoleillement et aux variations de la température intérieure et extérieure qui en résultent. La figure 4 montre un enregistrement typique de capteurs fixés sur la couronne et le carré central de la rose.

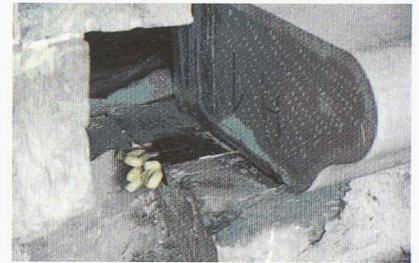
Fig. 1 : La rosace de la cathédrale de Lausanne

Fig. 2 : Détail du système de précontrainte de la rosace

Fig. 3 : Détail du capteur de déformation

Fig. 4 : Diagramme des déformations lors de la mise en tension des câbles autour de la rosace

Fig. 5 : Les arcs-boutants avant les travaux

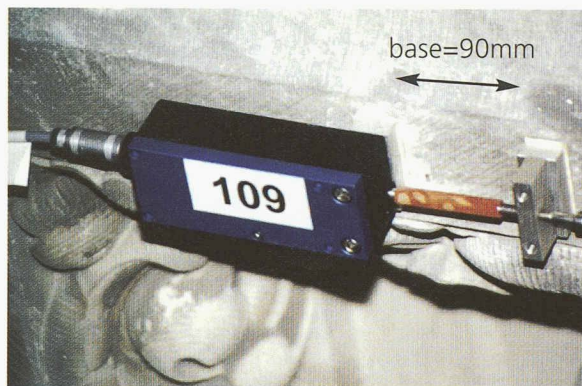


2

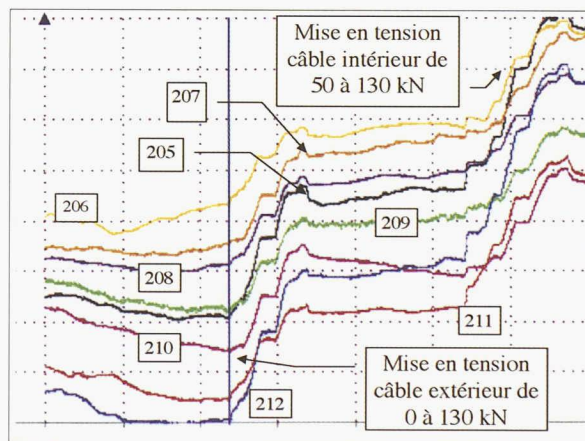
La sensibilité extrême de ce dispositif a permis de contrôler tout le processus de cerclage de la rose de la cathédrale de Lausanne sans aucune difficulté majeure, et de vérifier *in situ* la distribution des efforts entre la couronne et le remplage de la rosace. Il faut en outre noter le faible impact « destructif » de la méthode : seuls deux trous de \varnothing 6 mm par capteur sont percés dans la structure et, moyennant un trou supplémentaire de \varnothing 15 mm, les mêmes capteurs permettent de mesurer *in situ* les contraintes et le module d'élasticité de la pierre.

La concordance avec les calculs théoriques est bonne si l'on considère que les modules d'élasticité introduits dans les calculs, tant pour la couronne que pour le remplage, sont approximatifs et peuvent ne pas refléter la réalité de la maçonnerie en place. En effet, la présence de joints scellés au plâtre entre les pierres du remplage et de la couronne, de qualité inégale, peut influencer largement les résultats.

En l'occurrence, l'influence de la maçonnerie entourant la rosace ne semble pas avoir joué un rôle essentiel et la capacité des câbles à cercler la rose reste entière. La mise en place d'un système de lecture automatique des capteurs a permis d'effectuer les travaux de précontrainte du cerclage, avec un minimum de temps d'attente, en une matinée. La protection thermique des capteurs est en revanche nécessaire : en raison de l'influence du rayonnement solaire sur certaines parties de la rose, des essais tentés l'après-midi font en effet apparaître des dérives trop importantes pour permettre une interprétation correcte des phénomènes.



3



4



5

Les arcs-boutants

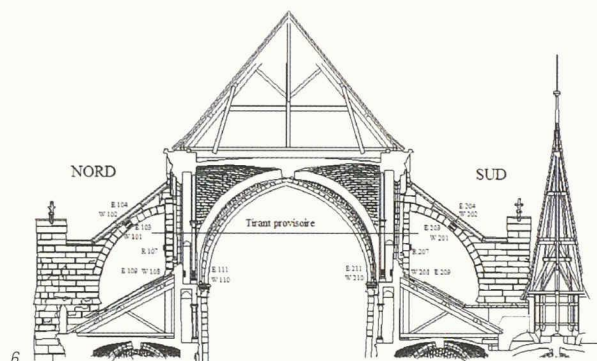
Le remplacement des arcs-boutants, en raison de leur forte dégradation (fig. 5), a été réalisé en 2002, pour la première paire, sous contrôle des mêmes capteurs que ceux utilisés pour la rosace. Menée en 2001, une première campagne de mesures de contraintes *in situ* (voir encadré, p. 14) avait vérifié les hypothèses de calcul des efforts dans les arcs-boutants les plus proches du transept, une étude qui a incidemment abouti au constat que la position des arcs-boutants par rapport aux arcs de la nef n'était pas idéale. L'excentricité des

Fig. 6 : Coupe nord - sud de la cathédrale

Fig. 7 : Représentation schématique d'un capteur « Treyvaud »

Fig. 8 : Vérin pour la mise en pression des capteurs

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)



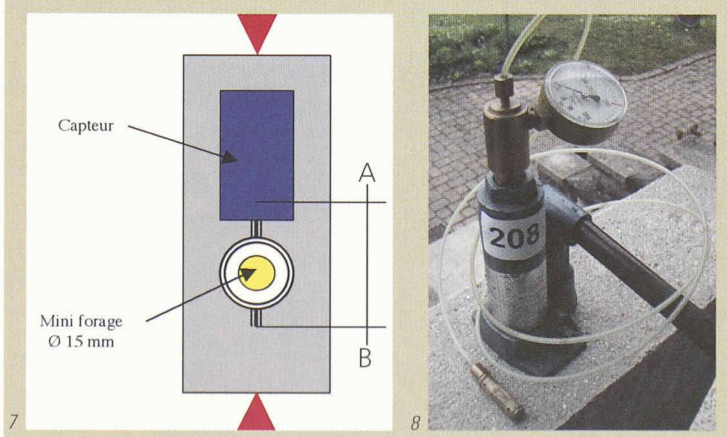
Capteurs « Treyvaud »

La mesure de la contrainte *in situ* se fait de la manière suivante : une base de mesure de (A-B), pontée par un anneau reliant le point fixe au détecteur de mouvement (sensibilité 1/100^e de micron), est implantée dans tous les endroits sensibles de la structure. Une série de mesures en continu est lancée pour déterminer l'importance de la dérive thermique.

Un trou Ø 15 mm, de 60 mm de profondeur est ensuite percé dans la pierre au centre de l'anneau, et l'on enregistre le raccourcissement ou l'allongement de la base A-B (fig. 7). Le percement doit se faire rapidement (en quelques dizaines de secondes) sans apport d'eau et si possible sans échauffement de la pierre. Une couronne diamantée spécialement conçue, refroidie par air, a été mise au point à cet effet.

Un petit vérin cylindrique (fig. 8) est ensuite introduit dans le forage, puis mis en pression par paliers successifs. Les modifications de la base A-B sont elles aussi enregistrées en continu.

La comparaison entre les deux diagrammes de déformation - lors du forage et lors de la mise en pression - permet de définir la contrainte initiale *in situ* dans l'élément de structure examiné. Il est aussi possible d'en déduire le module élastique instantané avec une bonne approximation. Afin de limiter les effets des variations de température pendant la durée des mesures, celles-ci sont réalisées à mi-saison, par temps couvert, pour éviter l'exposition du monument aux rayons du soleil. Un relevé systématique des températures tant à l'extérieur qu'à l'intérieur est indispensable.



poussées de la nef (fig. 6) provoque en effet des flexions dans la structure, flexions qui permettent d'expliquer les déformations importantes observées sur les piliers de la nef.

Dans le cadre de cette restauration, la pose du premier tirant provisoire destiné à remplacer la poussée des arcs-boutants a été effectuée en juillet 2002. La mise en tension des deux câbles a eu lieu sous contrôle des ingénieurs et du géomètre. Octobre 2002 a vu la démolition des anciens arcs-boutants, tandis que la mise en charge des nouveaux par suppression des tirants provisoires a été réalisée fin janvier 2003.

Au début, la mise en tension a été pilotée à l'aide de deux moyens de contrôle indépendants :

- une visée effectuée par le géomètre sur une cible à la clé de la voûte sexpartite pour déceler des mouvements verticaux de la voûte centrale de la nef ;
- une série de 18 capteurs disposés sur les arcs-boutants, sur le raidisseur, sur le mur et sur le bas de l'arc transversal de la voûte sexpartite.

La disposition des capteurs est donnée sur la coupe nord-sud de la figure 6. Par la suite, ce dispositif de contrôle a été complété par des cellules de mesure de tension sous les têtes d'ancrage des tirants provisoires.

La mise en tension du tirant constitué par deux câbles de précontrainte de type Freyssinet s'est effectuée par paliers jusqu'au moment où la voûte centrale de la nef a commencé à se soulever. À ce moment, l'effort dans les tirants en compensation de la poussée de la nef dépassait très légèrement la valeur calculée (11,4 t contre 10,7 t). La détente dans les arcs-boutants a été mise en évidence par les capteurs.

Trois des capteurs situés sur les arcs-boutants à remplacer n'ont pas ou peu réagi : ils se trouvaient dans des zones où aucun effort ne pouvait passer, soit en raison d'une ouverture partielle des joints entre les claveaux, soit par le positionnement d'un capteur sur une plaque de molasse décollée du reste de l'arc-boutant.

Les autres phases de travail - démontage des arcs-boutants, reconstruction et mise en charge par détente des tirants provisoires - ont été pilotées de la même manière.

Jean-Pierre Marmier, ingénieur civil EPUL
Ch. Ad. Burnat 13, CH - 1814 La Tour-de-Peilz

Jean-François Kälin, ingénieur civil EPFL
Fontenailles 21, CH - 1007 Lausanne

René Treyvaud, ingénieur électricien EPUL
GEOCONSULT - La Coudre, CH - 1148 Mont-La-Ville