Zeitschrift: Monuments vaudois. Hors-série

Herausgeber: Association Edimento - pour le patrimoine

Band: 1 (2013)

Artikel: La molasse de l'ingénieur : caractéristiques mécaniques et comportement structurel

Autor: Kälin, Jean-François / Marmier, Jean-Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1053488

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: 12.07.2025

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

La molasse de l'ingénieur

Caractéristiques mécaniques et comportement structurel

Jean-François Kälin & Jean-Pierre Marmier

Dans ce qui suit, nous abordons le problème des caractéristiques de la molasse (grès de Lausanne) sous l'aspect de la construction pratique, compte tenu de l'originalité de ce matériau. Ces caractéristiques ont fait l'objet d'une abondante recherche au Laboratoire des matériaux pierreux de l'EPFL sous la conduite successive des professeurs J.-P. Daxelhofer, J.-P. Delisle, V. Furlan et C. Félix ainsi que, plus récemment, par Mme B. Rousset. Les valeurs moyennes sont données dans un premier tableau.

Lors de l'étalonnage du système de capteurs de mouvement élaborés par René Treyvaud, capteurs capable de détecter des mouvements de l'ordre du centième de micron, une caractéristique tout à fait particulière de la Molasse de Lausanne a été mise en évidence : le module d'élasticité varie selon la contrainte appliquée **(fig. 2)**, ceci surtout dans la plage des contraintes relativement faibles subies effectivement dans l'ouvrage. Le principe de Navier à la base du calcul dit « élastique », lequel exprime la proportionnalité entre la contrainte et la déformation, n'est donc plus applicable et il s'ensuit logiquement que les méthodes de calcul des structures supposant un comportement élastique ne sont plus fiables.

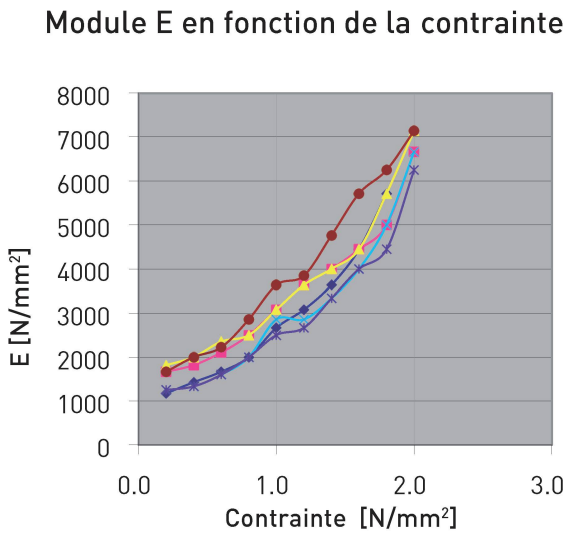
L'évaluation de la stabilité de l'ouvrage a été donc faite en recourant largement aux travaux de Jacques Heyman. Pour simplifier, la résultante des efforts (ligne des pressions) dans un ouvrage en pierre doit rester à l'intérieur de la structure porteuse avec une certaine marge. Dès que cette ligne sort de la matière, un ajustement automatique (rotule plastique) s'ensuit avec comme corollaire des déformations, des fissures et une réduction sensible de la stabilité. Cela a été le cas pour la cathédrale de Lausanne – comme par ailleurs dans la plupart des structures romanes ou gothiques – du fait de la position des arcs-boutants trop haute pour absorber d'une manière optimale les poussées des voûtes de la nef. Ces déformations des piliers de la nef sont visibles à l'œil nu et atteignent plus de 10 cm par endroit. Lorsque plus de trois rotules se forment dans le cadre d'un arc, il y a écroulement de l'ouvrage.

Une autre caractéristique ressort du premier tableau **(fig. 1)** : le coefficient de dilatation hydraulique. Il atteint environ 1,5 mm par mètre. Cela signifie que chaque fois que la pierre est saturée d'eau, la molasse se dilate en surface puis se rétracte en séchant. Tous les facteurs liés à l'absorption d'eau de ce grès tendre sont néfastes pour sa durabilité. Le matériau, entre la zone affectée par l'eau et le cœur de la structure, va donc être soumis à d'incessantes contraintes de cisaillement. La destruction se fait sous forme de plaques de 4 à 6 cm d'épaisseur qui se séparent petit à petit du matériau de base **(fig. 3)**. Vu de l'extérieur, à distance, rien ne laisse voir cette destruction jusqu'au moment où ces plaques commencent à se détacher. La perte de matière qui en résulte est de l'ordre de 22 à 25 % dans le cas particulier. La perte de résistance, dans un premier stade, joue peu de rôle du fait que les contraintes dans l'arc-boutant restent encore très éloignées des contraintes de rupture. Par contre, la stabilité de la structure est nettement plus affectée et ce, d'autant plus si la destruction est asymétrique : il se produit un effet de voûte latéral qui engendre des poussées au vide hors du plan de l'arc-boutant. Un traitement avec un mortier dit de « consolidation » n'a, dans le meilleur des cas, qu'un effet nul. Le flux de contrainte reste

GRÈS ET MOLASSES

CARACTÉRISTIQUES	UNITÉS	DÉNOMINATIONS
		Mercerie
Masse vol. app.	kg/m³	2375
Masse vol. réelle	kg/m³	2697
Porosité totale	% volume	12.2
Porosité au mercure	% volume	
Absorb. eau atmosph.	% volume	8,2
Coef. d'imbibition	%	68
Coef. de capilarité	mg/cm²/min²	14,5-17,0
Anisotropie capillaire	%	8,5
Coef. de dilat. hydr.	mm/m	1,51-1,47
Anisotr. hydraulique	%	9,7
Résist. compres. sec	N/mm²	72,3-59,1
Résist. compres. sat.	N/mm²	28,5-23,4
Coef. de ramol. hydr.	%	40-41
Anisotr. état sec	%	8,2
Anisotr. état saturé	%	8,2
Vitesse du son, sec	m/sec.	2634-2840
Anisot. état sec (son)	%	9,3
Vitesse du son, sat.	m/sec.	3072-3133
Anisot. état sat. (son)	%	9,8

1 *Caractéristiques de la molasse de la Mercerie.*



2 *Molasse de la Mercerie. Module E en fonction de la contrainte.*

dans la partie encore saine de la structure. Dans le pire des cas, l'application d'une couche épaisse de mortier, avec les effets de retrait que cela suppose, ne pourrait qu'augmenter les tensions internes de la structure. D'autre part, si les caractéristiques du mortier de ragréage sont supérieures à celles de la molasse de base, lors du séchage de ce mortier, il se produira inévitablement un cisaillement entre les matériaux et on reviendra à la situation initiale. Dans une structure porteuse (arc-boutant) si fortement exposée à la pluie, le seul remède efficace est un remplacement par une pierre peu ou pas affectée par des changements d'humidité. À l'intérieur ou dans des zones protégées, la molasse peut parfaitement jouer son rôle de structure porteuse.

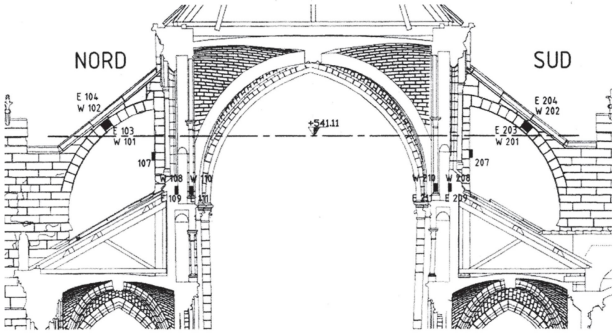
Du fait de son faible module d'élasticité (env. 7000 N/mm²) elle est très déformable – d'où son nom. Une structure en molasse sera peu sensible aux tassements différentiels, c'est le cas des piliers de la croisée de transept où, en diagonale, on a pu observer des différences de niveau de l'ordre de 13 cm sans que la stabilité n'en soit affectée.

Dans le cas des arcs-boutants, leur remplacement ne peut se faire que sur l'ensemble de la structure, toute modification du système porteur doit se faire symétriquement. Avec le remplacement d'une pierre, on introduit un matériau de qualité supérieure, donc avec un module d'élasticité différent de celui de la molasse en place. Si l'on ne remplaçait que l'arc-boutant sud – généralement plus affecté qu'au nord – il se produirait, au moment de la mise en charge, un déplacement horizontal de la nef en direction de la zone la plus tendre, au nord dans le cas particulier. Un changement de caractéristique de la pierre d'un côté implique donc une opération symétrique pour ne pas causer des dégâts dans le reste de la structure **(fig. 4)**. Ce phénomène, grâce aux capteurs de mouvement très sensibles utilisés, a pu être observé lors des opérations de mise en tension des tirants provisoires appelés à remplacer l'effet des arcs-boutants pendant leur restauration **(fig. 5)**.

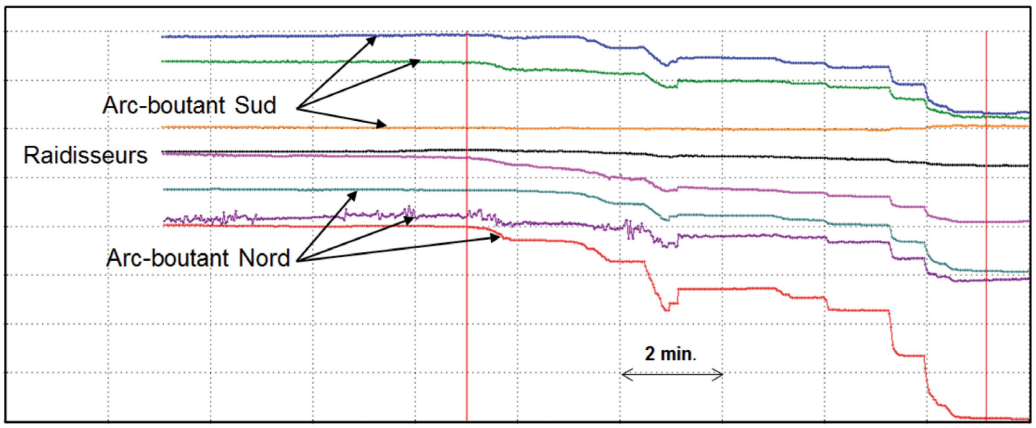
Pour des raisons similaires, le remplacement d'un ou deux voussoirs par arc-boutant conduirait à des altérations programmées. En plus des déformations asymétriques évoquées, la mise en place d'une pierre avec des caractéristiques mécaniques différentes peut engendrer des concentrations de contraintes sources de fissuration. Le choix du mortier de hourdage, comme celui de jointoiement, doit être compatible avec le type de pierre choisi, ceci aussi bien en ce qui concerne sa dureté que sa teneur en sels solubles. C'est une règle de base (cf. norme SIA 266-2), en particulier :

> 3.3.4.1. Le mortier de hourdage doit être plus déformable et plus tendre que les pierres. Le module d'élasticité du mortier doit donc être inférieur à celui des pierres.

3 *Mesures posés sur des arcs-boutants (Photo J.-P. Marmier).*



4 *Renouvellement des arcs-boutants : positionnement des tirants provisoires (J.-P. Marmier).*



5 *Évolution des contraintes dans les arcs-boutants de l'axe 8 mesurée par les capteurs « Treyvaud » lors de la mise en tension (de 0 à 50kN) des tirants provisoires. Les arcs de chaque côté sont soulagés, mais pas symétriquement ; les raidisseurs ne réagissent pratiquement pas.*

Confectionner un mortier de hourdage convenable avec un module d'élasticité plus faible que celui de la molasse n'est pas évident. Il est facile de faire un mortier de faible résistance mais dans la plupart des cas le mortier devient poreux et facilite ainsi la pénétration de l'eau de ruissellement à l'intérieur de la maçonnerie. On attire l'eau là où on ne voudrait pas qu'elle se manifeste. D'autre part, la résistance du mortier de jointoiement, lequel devrait rendre le joint plus ou moins étanche, ne doit pas être supérieure à celle du mortier de hourdage, ceci afin d'éviter les concentrations de contraintes sur les arêtes de la pierre. Dans ce contexte, l'expérience et le savoir-faire du maçon sont essentiels. La durabilité des structures porteuses en maçonnerie de pierre dans les zones soumises aux intempéries, ne peut donc pas être garantie à long terme avec un matériau tel que la molasse.

Pour conclure, la déontologie de l'ingénieur civil en matière de conservation de structures porteuses en maçonneries de pierre peut se résumer dans les critères de base suivants :

- La stabilité (donc la sécurité) de l'ouvrage dans les cas normaux de charges doit être assurée de manière impérative.
- La consolidation des structures en maçonnerie de grès tendre avec des mortiers rapportés est illusoire.
- En cas de dégradation asymétrique de la structure, il faut considérer les effets négatifs éventuels hors du plan de la structure.
- Dans la mesure du possible, il faut améliorer la stabilité de l'ouvrage pour les cas de sollicitation exceptionnels tels que les séismes ou d'autres phénomènes dynamiques (vibrations ou résonance propre) ; l'incorporation d'armatures passives ou actives peut être une solution.
- Les travaux doivent être réalisés à sec ou avec un minimum d'apport d'eau dans le cas de grès tendres (molasse) ou en présence de fresques.