

Mesure de contraintes par libération dans le pont Adolphe à Luxembourg : une grande voûte de P. Séjourné



RÉSUMÉ

Cet article rapporte les résultats de l'application de la technique de mesure de contraintes *in situ* par libération partielle à un grand pont en maçonnerie de pierre, le pont Adolphe à Luxembourg dû à P. Séjourné. Pour disposer les vérins plats, on pratiqua douze entailles de 60 cm de large dans des sections situées près des naissances de l'arc. La méthode de mesure de contrainte par libération partielle et restauration au moyen de vérins plats s'est avérée utilisable. Elle a fourni dans la maçonnerie des valeurs de contraintes cohérentes et réalistes, bien inférieures à la résistance intrinsèque.

MOTS CLÉS : 24-61 - Pont - Maçonnerie - Mesure - Contrainte - Voûte - *In situ* - Vérin - Décompression - Luxembourg.

Bernard ESPION
Docteur Ingénieur
Chargé de cours

Jean-Pierre ELINCK
Docteur en Sciences
Chargé de cours

Pierre HALLEUX
Docteur Ingénieur
Professeur ordinaire
Directeur du service Génie Civil

Université de Bruxelles

Roland FOX
Ingénieur Civil
Division des Ouvrages d'art

Gilles DIDIER
Ingénieur Civil
Division des Ouvrages d'art

Christiane STOLL
Ingénieur Géomètre
Division des Ouvrages d'art

Administration des Ponts et Chaussées
du Grand Duché de Luxembourg

Introduction

Le pont Adolphe à Luxembourg (fig.1) est un grand pont en maçonnerie qui établit une liaison majeure à l'intérieur de la cité en reliant les deux parties de la ville séparées par la vallée de la Pétrusse. Le pont est constitué de deux arcs parallèles en maçonnerie de pierre supportant un tablier en béton armé de 16 m de largeur. L'ouverture des arcs à leur naissance est de 72 m ; la distance entre les parements des culées au niveau des fondations est de 84,65 m (fig.2).

Le pont Adolphe, ainsi nommé d'après le nom du Grand Duc qui en posa la première pierre le 14 juillet 1900, a été conçu par le célèbre ingénieur français P. Séjourné (1851-1939). Il en supervisa également la construction, qui dura jusqu'en 1904. Ingénieur des Ponts et Chaussées, Directeur des constructions de la Compagnie de chemins de fer PLM, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, il est généralement considéré comme le maître qui porta à son apogée la construction des grandes voûtes en maçonnerie avant que celles-ci ne céderent le pas aux ponts en béton. Son expérience est rapportée dans ce monument d'érudition que constituent les

six volumes de ses « Grandes Voûtes » (P. Séjourné, 1913-1916). Le pont Adolphe, quoiqu'il ne fut pas son dernier pont en maçonnerie - P. Séjourné construisit peu après le pont des Catalans à Toulouse et le viaduc de Fontpédrouse - est souvent considéré comme son chef-d'œuvre ; il est décrit en détail dans le second volume des « Grandes Voûtes » (P. Séjourné, 1913). À l'époque de sa construction, le pont Adolphe détint le record de portée pour des ponts en maçonnerie (84,65 m) ; cette portée ne fut dépassée en 1905 que par le pont de Plauen (en Saxe) (d'apparence nettement moins réussie), avec 90 m d'ouverture.

En 1933, le pont Adolphe fut l'objet d'essais de mise en charge avec une abondante instrumentation sous la direction de M. Ros, à l'époque le directeur bien connu du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux (EMPA) de Zürich. Les résultats de ces essais furent publiés en 1935 (M. Ros, 1935). D'après lui, ils témoignent de la saine conception du pont et de son excellent état. Il est intéressant de noter qu'il procéda à des essais de compression sur le grès constitutif des voussoirs du pont, ainsi que sur un prisme de maçonnerie réalisé avec le grès des voussoirs et un mortier comparable à celui mis en œuvre en 1900 dans les voûtes du pont. La résistance à la compression de cette maçonnerie, rapportée par M. Ros, est de 63 MPa.

Un examen géodésique récent du pont a fait apparaître que les arcs présentaient des écarts de géométrie verticaux non négligeables par rapport au profil théorique que P. Séjourné est censé avoir donné aux voûtes. La distribution de ces écarts est dissymétrique par rapport à la clé des arcs, dont la position actuelle correspond assez bien à la position théorique.

En revanche, aux deux quarts de la portée, les écarts des positions des voûtes sont approximativement antisymétriques par rapport au profil théorique et peuvent atteindre 15 cm dans chaque sens.

L'origine de ces écarts est inconnue ; jusqu'à l'établissement du relevé récent du profil de l'intrados au moyen d'un profilomètre à rayon laser, ceux-ci étaient passés inaperçus. Cette observation amena l'administration locale des Ponts et Chaussées à souhaiter avoir une idée assez précise de l'état de contrainte existant à l'intérieur des voûtes du pont. Elle s'orienta vers l'utilisation de la technique - considérée comme non destructive - de mesure des contraintes *in situ* par libération et restauration au moyen de vérins plats, et sollicita le conseil du Service de Génie Civil de l'université Libre de Bruxelles, où l'expertise de cette méthode était disponible.

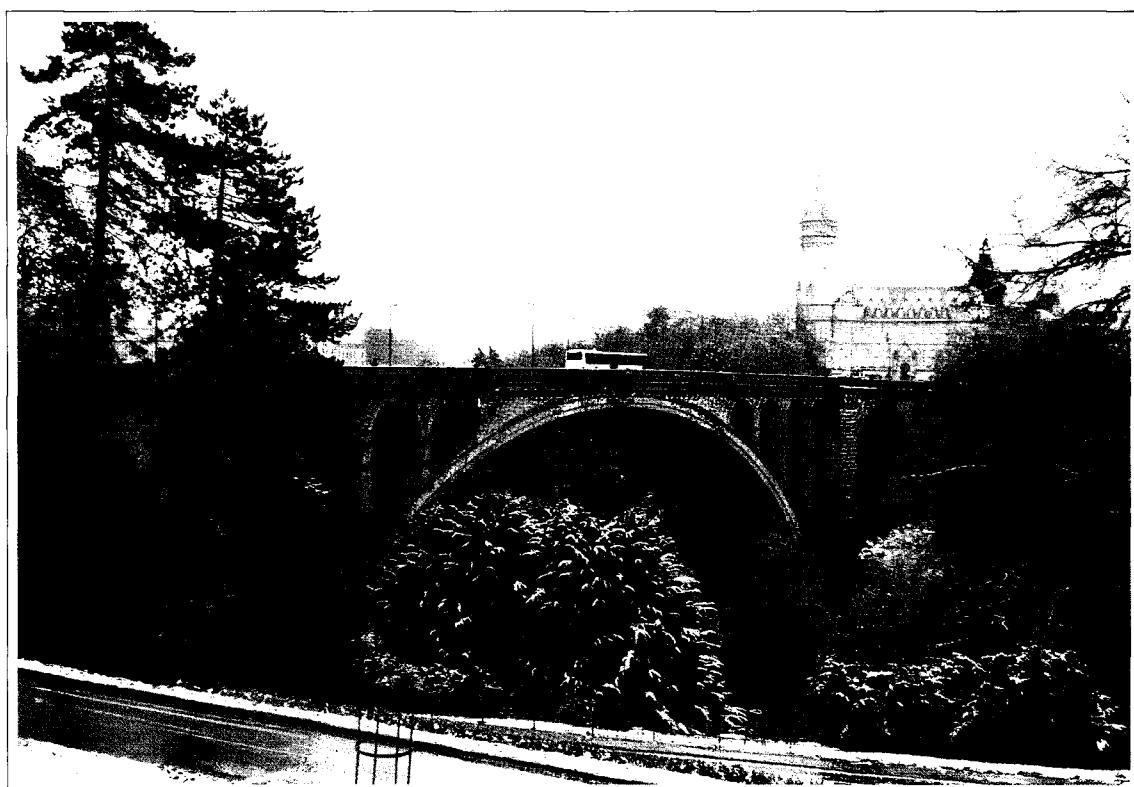


Fig. 1 - Le pont Adolphe à Luxembourg.

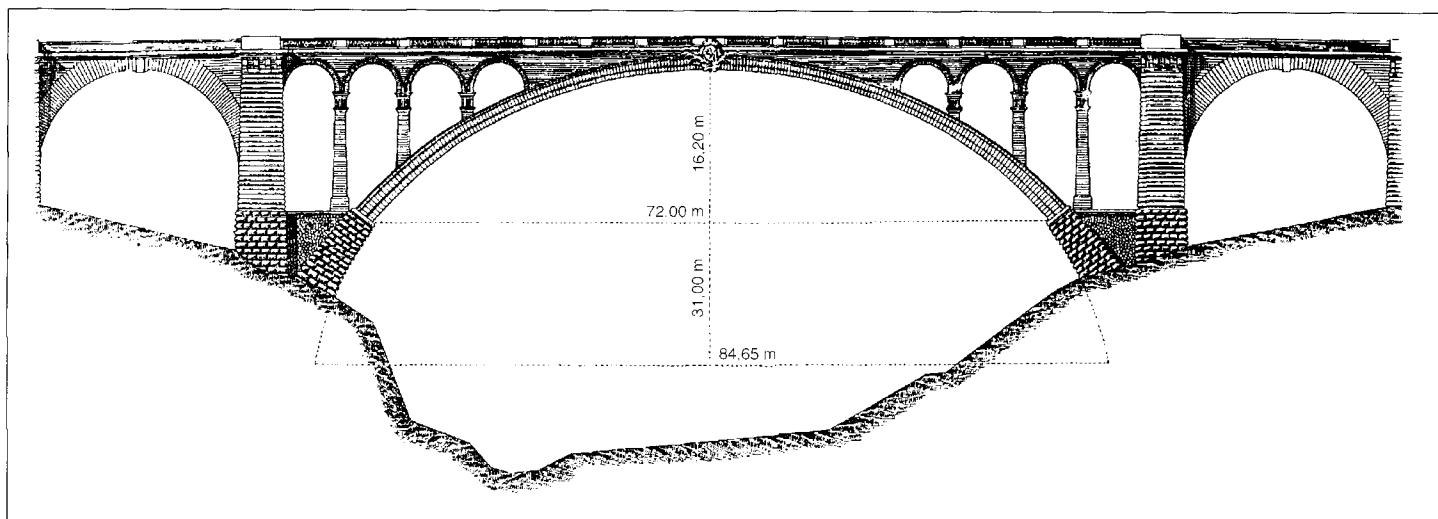
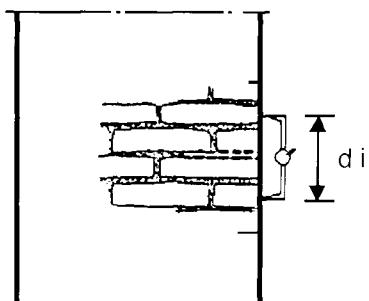
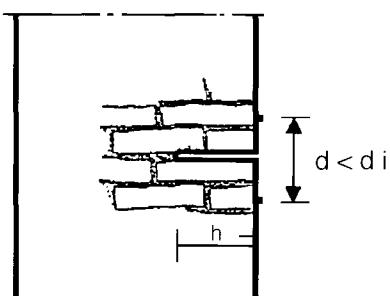


Fig. 2 - Élevation et dimensions générales du pont Adolphe (d'après Séjourné, 1913).

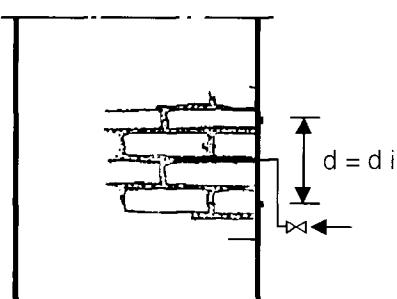
Fig. 3 - Principe de la technique de mesure des contraintes *in situ* par libération (d'après Rossi, 1985)



a. Mesure de l'état cinématique de référence



b. Entaillage



c. Rétablissement de l'état cinématique de référence au moyen d'un vérin plat

La mesure de l'état de contrainte *in situ* par libération partielle

La technique de mesure de contrainte *in situ* par libération partielle et restauration au moyen de vérins plats est utilisée depuis longtemps dans le domaine de la Mécanique des Roches où elle permet d'estimer les contraintes géologiques. Le principe de la méthode est fondé sur la libération partielle des contraintes causée par une entaille plane normale à la direction de la composante normale du tenseur des contraintes à évaluer, et du rétablissement de l'état cinématique de référence au moyen de vérins plats.

Au début des années 1980, P.P. Rossi à l'ISMES (Bergamo, Italie) proposa d'appliquer cette technique à la détermination de l'état de contrainte dans des éléments de structure en maçonnerie de briques, tels que murs et piliers, dans le contexte de la sauvegarde de constructions relevant du patrimoine culturel ou architectural (P.P. Rossi, 1985).

Le principe de la technique proposée par P.P. Rossi est représenté schématiquement sur la figure 3a, b et c.

Supposons que nous souhaitions déterminer la composante verticale de la contrainte près de la face latérale de la colonne en maçonnerie de briques représentée sur la figure 3a. On matérialise une base de mesure de longueur d_i suivant la direction de la composante de contrainte à évaluer, et une lecture de référence de la longueur de cette base est prise. Ensuite, une entaille normale à la face latérale de la colonne est pratiquée, généralement dans un joint de mortier. Cette entaille induit un champ de déformations dans la maçonnerie autour de l'entaille et, en

particulier, un raccourcissement de la base de mesure si la contrainte libérée est une compression. On insère alors dans l'entaille un fin vérin plat, de forme rectangulaire ou semi-circulaire (figure 3b). On gonfle ensuite le vérin jusqu'à rétablir la longueur initiale de la base de mesure (figure 3c). Cette pression de rétablissement de l'état de référence est une indication de la contrainte normale qui existait dans la maçonnerie avant sa libération par l'entaille. Cette pression est légèrement plus grande que la contrainte libérée car elle doit être multipliée par le rapport de la surface du vérin à la surface de l'entaille, ainsi que par un coefficient caractérisant la rigidité du pourtour soudé du vérin.

La méthode proposée par P.P. Rossi a été testée en laboratoire et a reçu une certaine forme de justification théorique par simulation numérique (Sacchi Landriani et Taliercio, 1986). Elle a été utilisée pour évaluer des niveaux de contraintes dans des murs ou piliers de plusieurs édifices historiques, non seulement en briques mais également en pierre (P.P. Rossi, 1987). Le niveau de contrainte qu'il a mesuré sur des édifices du patrimoine n'a pas dépassé 3 MPa.

En France, une méthode de libération partielle similaire a été développée indépendamment par C. Abdunur au LCPC (C. Abdunur, 1985). Celle-ci a fait l'objet d'une justification fondamentale approfondie. Elle a été utilisée pour déterminer des valeurs de contraintes dans des constructions en béton précontraint (jusqu'à 10 MPa) où le rôle des contraintes induites par le retrait de dessication a particulièrement été mis en évidence (C. Abdunur et B. Godart, 1998). Il l'a également utilisée pour mesurer des contraintes dans des modèles de ponts en maçonnerie de briques (C. Abdunur, 1995). En ce qui concerne les maçonneries de briques, il recommande de pratiquer les entailles dans la brique plutôt que dans le mortier.

Notons encore que la technique d'utilisation des vérins plats fait depuis 1992 l'objet d'une procédure normalisée ASTM (C 1196 - 92), et qu'une étude critique exhaustive se fondant sur l'application de la méthode à divers chantiers vient d'être publiée (L. Binda et Cl. Tiraboschi, 1999).

Application de la méthode au pont Adolphe

La section transversale des deux arcs du pont Adolphe est rectangulaire pleine, mais de dimensions variables. L'épaisseur des arcs varie de 1,44 m à la clé à 2,16 m à leur naissance, 16,2 m plus bas. La largeur des arcs varie de 5,33 m à la clé, à 6,12 m aux naissances. Les arcs ont été construits en trois rouleaux successifs.

Pour les maçonneries de briques, C. Abdunur justifie le placement des vérins dans les briques plutôt

que dans les joints par le fait que les joints de mortier y sont souvent de faible qualité mécanique. Au pont Adolphe, il s'agit d'une maçonnerie de pierres de grandes dimensions dont les joints sont faits d'un mortier très résistant qui, de plus, est compacté et damé. D'autre part, il est un fait que pratiquer une entaille dans les voussoirs pouvait présenter un risque de rupture fragile, sans compter que cela aurait laissé une cicatrice indélébile dans des pierres du plus bel appareil. Par contre, pratiquer les entailles dans les joints présentait moins de risque, et l'avantage d'une réparation post-opératoire plus aisée et invisible. C'est pour ces raisons qu'il a été décidé de placer les vérins dans les joints de mortier, et plus exactement dans le joint situé entre les 4e et 5e niveaux de voussoirs comptés à partir de la naissance de l'arc, des deux côtés de celui-ci (fig. 4). À la naissance des arcs, l'épaisseur des voussoirs est de 35 cm, et l'épaisseur des joints de 1,5 cm. Les sections instrumentées sont donc situées approximativement à 1,5 m du niveau des naissances compté suivant l'intrados. Dans cette région, les dimensions moyennes des voussoirs sont les suivantes : 35 cm d'épaisseur, 85 cm de largeur, profondeur variant de 84 cm à l'intrados (1er rouleau) à 66 cm à l'extrados (3e rouleau).

Seul l'arc aval, qui est le plus déformé des deux, a été étudié. Nous avons donc deux sections instrumentées, une aux environs de chacune des naissances de l'arc aval. Ces deux côtés sont dénommés « côté Gare » et « côté Ville » de l'arc (fig. 5). Dans ces sections, on a pratiqué les entailles et placé des vérins plats en six endroits (fig. 5) : trois à l'intrados et trois à l'extrados (sur chaque face, un vérin était situé côté aval, le deuxième côté amont, et le troisième sur l'axe longitudinal).

Les vérins plats utilisés sont de fabrication Glötzl. Ils présentent une forme en segment de cercle, mesurant 59 cm (diamètre) par 19,5 cm (flèche). Leur épaisseur est de 6 mm (fig. 7). On a réalisé des entailles de 60 cm de large et de 8 mm d'épaisseur au moyen d'une scie circulaire de rayon légèrement plus grand que celui des vérins (fig. 6 et 7). Le jeu entre les vérins et le fond de l'entaille était inférieur à 0,5 cm, ce qui donne un rapport de la surface du vérin à la surface de l'entaille de 0,95. De fines tôles d'acier de 0,5 à 1 mm d'épaisseur ont ensuite été insérées au-dessus et en-dessous des vérins, afin d'assurer le contact le plus uniforme possible entre chaque vérin et son entaille.

Avant de pratiquer l'entaille, chaque joint était instrumenté au moyen de six bases de mesures, trois de 300 mm de long et trois de 500 mm de long. Les mesures de variation de longueur de ces bases ont été effectuées au moyen d'un déformètre Huggenberger donnant une sensibilité de lecture à 0,001 mm près (fig. 8), avec une précision de 0,004 mm.

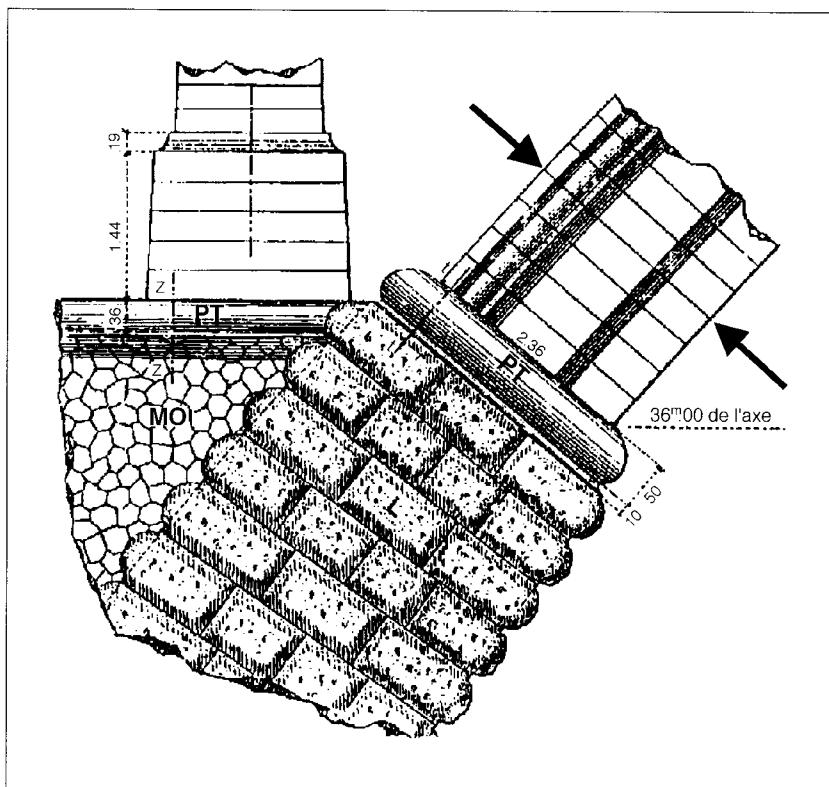


Fig. 4

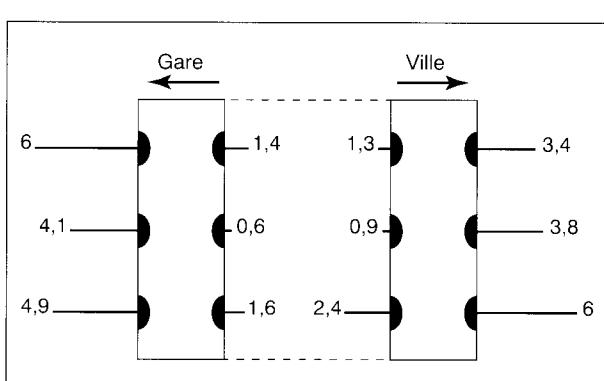


Fig. 5



Fig. 6

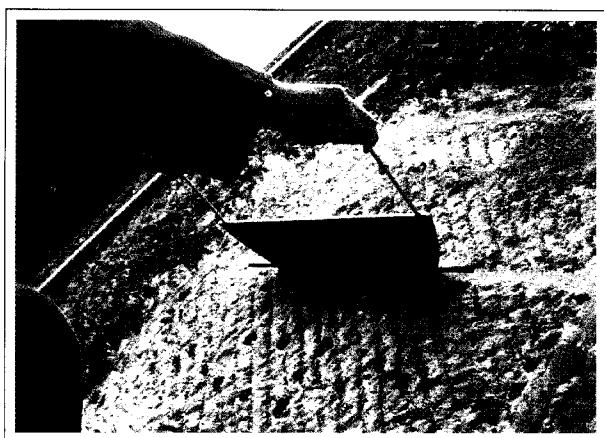


Fig. 7



Fig. 8

Toute la campagne de mesure et les opérations sur place ont été très soigneusement préparées par l'administration locale des Ponts et Chaussées. Les entailles situées près des faces amont et aval ont été pratiquées et les mesures effectuées le 14 septembre 1998 pour la naissance côté Ville. Ce jour-là, la température moyenne mesurée à différents endroits du pont a varié de 9,5 °C à 9 h jusqu'à 11 °C à 19 h. Le lendemain, on procéda de même pour les quatre entailles de la naissance côté Gare, la température moyenne étant comprise entre 11 et 13 °C. Ce n'est que le 29 septembre 1998 qu'on effectua les entailles et les mesures pour les quatre points de mesure situés sur l'axe longitudinal ; ce jour-là, la température moyenne mesurée sur la journée s'est établie entre 14 et 15 °C. Le pont est resté en service durant les opérations. La sensibilité de lecture du déformètre s'est avérée adéquate (variation de longueur des bases de mesure comprise entre 0,015 mm et plus de 0,100 mm).

Discussion des résultats

La figure 9 indique pour chacune des 12 entailles la valeur moyenne (pour les six bases de mesure par entaille) de la pression nécessaire pour restituer l'état de référence cinématique. On a en général observé une très bonne correspondance entre les lectures des six bases de mesure par entaille. Nous indiquons les pressions de rétablissement dans le vérin (en MPa) ; il y a lieu de se rappeler que les contraintes initiales « libérées » dans la maçonnerie sont probablement de 5 à 10 % plus faibles.

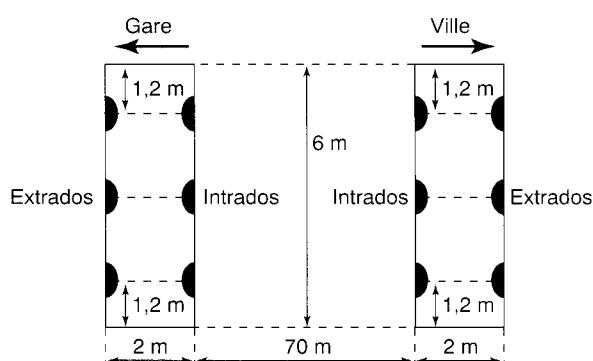


Fig. 9 -

Toutes les mesures dénotent des compressions. La figure 9 montre que les mesures prises des deux côtés du pont sont fort symétriques :

➤ la valeur moyenne des six localisations par section de mesure, qui fournit une indication sur la valeur de la poussée de l'arc près des naissances, est sensiblement la même côté Gare ou côté Ville : 3 MPa ;

➤ la valeur moyenne des trois mesures effectuées à l'extrados (5 MPa du côté Gare et 4,4 MPa du côté Ville) est plus élevée que la valeur moyenne des trois mesures effectuées à l'intrados (1,2 MPa du côté Gare et 1,5 MPa du côté Ville). Si l'on admet l'hypothèse de Navier d'une distribution plane des contraintes normales, ceci indiquerait que la ligne des pressions se trouve située dans ces sections environ 20 cm au-dessus de la fibre moyenne côté Gare, et 16 cm au-dessus de la fibre moyenne côté Ville.

En comparaison, on peut se rapporter à l'état de contrainte calculé donné par P. Séjourné (P. Séjourné, 1913). Il indique - sans beaucoup de détail quant à ses hypothèses de calcul - que le niveau de contrainte moyen aux naissances en l'absence de charge sur le pont est de 1,9 MPa, et que la contrainte la plus élevée se trouve à l'intrados où elle vaut 3,3 MPa ; ceci correspond à une ligne des pressions se trouvant environ 25 cm sous la fibre moyenne.

On peut dès lors conclure que le relevé expérimental de contrainte par libération donne une allure de la distribution de contrainte qui n'est pas en parfait accord avec celle - théorique - calculée par P. Séjourné : d'une part, la valeur moyenne des contraintes apparaît plus élevée *in situ* que suivant les calculs de P. Séjourné et, d'autre part, la ligne de poussée est située au-dessus de la fibre moyenne *in situ*, mais en-dessous de la fibre moyenne suivant les calculs de P. Séjourné.

Les différences entre les observations relatives aux contraintes faites *in situ* et les résultats du calcul de P. Séjourné peuvent être dus à la déformation des arcs. Mais il se peut tout autant que ces différences soient dues à des causes tout à fait ordinaires ou normales comme des différences de température ou le processus de construction des voûtes comme, par exemple, le matage des joints qui était systématiquement recommandé par P. Séjourné. L'influence de ces effets dans une structure hyperstatique comme un grand arc bi-encastré peut être significative. Il y a enfin lieu de noter que le tablier original du pont a été remplacé en 1961 par un tablier en béton armé plus large et plus lourd, ce qui peut aussi contribuer à expliquer certaines différences.

D'autre part, il est peu probable que les mesures de contraintes *in situ* permettent d'expliquer l'origine de la déformation actuelle des arcs. Il se peut d'ailleurs fort bien que ces écarts, qui ne sont pas visibles à l'œil nu, datent de l'époque de la construction du pont elle-même. On rappellera ici que la construction de ce grand pont ne fut pas exempte de problèmes : P. Séjourné lui-même, qui n'était

certainement pas présent en personne tous les jours sur le chantier, évoque un incident significatif survenu lors de la construction de la voûte amont (P. Séjourné, 1913), à savoir le basculement brutal sur le cintre, côté Gare, d'une partie insuffisamment soutenue de la voûte construite en porte-à-faux à partir de la culée. Une fissure de plusieurs centimètres s'ouvrit à l'extrados, ce qui exigea réparation. D'autre part, les photographies prises en cours de chantier montrent des cintres soutenus par des échafaudages dont la rigidité était peut-être insuffisante. On est donc légitimement en droit de se demander si la déformation des arcs n'est pas d'abord à imputer à des écarts de géométrie initiaux des cintres, qui seraient passés inaperçus à l'époque de la construction.

En conséquence, la seule - mais très importante - conclusion qui peut être tirée en relation avec les essais de détermination de contrainte *in situ*, est que ceux-ci fournissent des ordres de grandeur pour les valeurs des contraintes qui sont réalistes et bien en-dessous de la résistance à la compression de la maçonnerie (de l'ordre du dixième).

Conclusion

Nous avons rapporté dans cet article les résultats d'un essai de détermination de contraintes *in situ* par la technique de libération appliquée au pont Adolphe à Luxembourg. À notre connaissance, il s'agissait d'une première pour l'application de cette technique de mesure à un grand pont en maçonnerie de pierre. La méthode s'est avérée utilisable et a fourni des résultats répétitifs et cohérents.

Les valeurs obtenues apparaissent plausibles tant par leur symétrie que par leur ordre de grandeur, bien inférieur à la résistance de la maçonnerie. Ceci était l'information recherchée par le maître de l'ouvrage qui initia la campagne d'essais.

Une comparaison fine des valeurs mesurées et calculées des contraintes dans une structure hyperstatique comme une grande voûte bien encastrée en maçonnerie apparaît un peu comme un exercice académique, car l'état de contrainte *in situ* est probablement assez fortement influencé par des effets dus à la température ou aux procédés de construction, effets dont l'ordre de grandeur peut être important mais difficile à évaluer finement.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier P.-M. Dubois qui, dans le cadre de ses activités d'ingénieur-conseil (Bureau d'études PMD), a suggéré à l'administration des Ponts et Chaussées du Grand-Duché de Luxembourg d'exploiter la technique des vérins plats disponible au Service Génie civil de l'université Libre de Bruxelles pour l'analyse du pont Adolphe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDUNUR C. (1985), Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de libération miniaturisée, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **138**, pp. 5-14.

ABDUNUR C. (1995), Direct assessment and monitoring of stresses and mechanical properties in masonry arch bridges, Proceedings of the *1st International Conference on Arch Bridges*, Bolton (UK), September 3-6, 1995, Thomas Telford, pp. 327-335.

ABDUNUR C., GODART B. (1998), Méthodes d'auscultation pour l'évaluation des ponts, *Ann. BTP*, décembre (6), pp. 35-49.

ASTM C 1196-92 (1992), Standard test method for *in situ* compressive stress within unit masonry estimated using flatjack measurements.

BINDA L., TIRABOSCHI CI. (1999), Flat-jack test as a slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures, *8th International Conference Structural Faults + Repair*, London, 1999, Proceedings (M.C. Forde, ed.), Engineering Technics Press, Edinburgh, ISBN 0-947644-41-5.

ROS M. (1935), Pont Adolphe sur la vallée de la Petrusse à Luxembourg. Résultats des essais de surcharge, *Annales des Ponts et Chaussées*, **105**ème année, Septembre, IX (23), pp. 469-506.

ROSSI P.P. (1985), Flat jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structure, *7th International Brick Masonry Conference*, Melbourne, 1985, *i quaderni dell'ismes*, **205**.

ROSSI P.P. (1987), Recent developments of the flat-jack test on masonry structures, *USA-Italy workshop on Evaluation and retrofit of masonry structures*, August 1987, i quaderni dell'ismes, **231**.

SACCHI LANDRIANI G., TALIERCIO A. (1986), Numerical analysis of the flat jack test on masonry

walls, *J. de Mécanique théorique et appliquée*, **5** (3), pp. 313-339.

SÉJOURNÉ P. (1913-1916), *Grandes Voûtes*, Imprimerie Vve Tardy-Pigelet, Bourges.

ABSTRACT

Stress measurements by release of tension in the Adolphe bridge, a large arch designed by P. Séjourné

B. ESPION, J-P. ELINCK, P. HALLEUX, R. FOX, G. DIDIER, Ch. STOLL

This paper reports the results of application of the technique of in situ stress measurement by partial release of tension in a large stone bridge, the Adolphe bridge, in Luxembourg which was designed by Paul Séjourné. To install the flat jacks, 12 notches, each 60 cm wide, were cut in the sections adjacent to the springing of the arch. The method of measurement by partial release and restoration using flat jacks proved to be usable. It provided consistent and realistic values for stress in the masonry which were considerably lower than the intrinsic strength of the structure.

Mesures de contraintes par libération dans le pont Adolphe à Luxembourg : une grande voûte de P. Séjourné