ENAC / PROJET DE MASTER 2022-2023
SECTION DE GÉNIE CIVIL

Ponts en maçonnerie – élargissement du tablier

Auteure : Maude Bolliger

Encadrement : Prof. Eugen Brühwiler [1] / Dr. Numa Bertola [1]

[1] Laboratoire de maintenance, construction et sécurité des ouvrages (MSC) EPFL

Motivation et objectifs

Des ponts en maçonnerie sont construits depuis l'Antiquité et certains sont toujours utilisés. Les charges de trafic ont augmenté au fil des décennies. Elles sont devenues plus fréquentes et plus lourdes. Certains ponts ont dû être élargis pour répondre à la hausse de trafic et la plupart a également subi des travaux de maintenance afin de remédier à des problèmes d'étanchéité et de dégradation des matériaux.

Les ponts situés dans les gorges du Triège en Valais dans la région de Salvan vont être étudiés, plus précisément le pont ferroviaire, appartenant à la ligne du Mont-Blanc Express qui relie Martigny et Chamonix. Ce pont a été construit entre 1904 et 1906 et fait environ 48 mètres de long. Il comporte un arc principal et plusieurs petits arcs sont posés sur ce dernier.

Le but de ce projet est de vérifier la capacité portante de l'arc selon plusieurs méthodes et de comparer les différents résultats. Un élargissement du tablier va également être proposé afin de pouvoir poser une deuxième voie ferrée sur le pont.

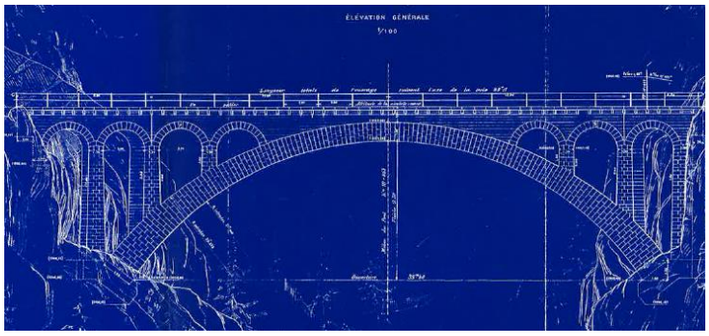

Figure 1: Pont ferroviaire des gorges du Triège

Vérification de la capacité portante de l'arc

Généralités
Longueur de l'arc: 35.4 mètres
Hauteur de l'arc: 9.7 mètres
Épaisseur de l'arc: varie entre 2.25 m à la naissance et 1.3 m à la clé
Matériau: granit (f_{xd} = 17.5 N/mm^2)
Courbe d'interaction entre l'effort normal et le moment de flexion:

$$M = \frac{1}{2}N\frac{-3d\beta^2 v + 3^{1/2}\beta^2 dv - 2\alpha N - 2\cdot 3^{1/2}\alpha N}{\beta^2 v(-3+3^{1/2})}$$

Charges permanentes agissant sur l'arc:
- Petits arcs et colonnes (granit)
- Matériau de remplissage (pierres cassées)
- Ballast
- Rails et traverses

Charges utiles agissant sur l'arc:
- Trafic à voie étroite

Méthode analytique
L'étude faite ici considère la rupture due à l'apparition de quatre rotules plastiques, créant un mécanisme. Cette vérification est basée sur les résultats de la thèse du Dr. Alix Grandjean. L'outil solveur de Excel est utilisé pour minimiser le multiplicateur de la charge utile en changeant la position des rotules.

Logiciel LimitState: RING
Ce logiciel permet de vérifier des ponts en arc en maçonnerie existants, d'une ou plusieurs travées. Les différentes géométries de l'arc ainsi que les propriétés des matériaux et les charges agissant dessus doivent être insérés. Le résultat donné est le multiplicateur de la charge utile et la déformée de l'arc.

Logiciel SCIA
Un arc en maçonnerie peut être modélisé avec ce logiciel. En utilisant la courbe d'interaction entre l'effort normal et le moment de flexion, il est possible de déterminer si l'effort normal et le moment de flexion induit par les charges verticales en tout point de l'arc est trop élevée pour être repris par l'arc.

Méthode des lignes de pression
C'est une ancienne méthode pour l'étude des arcs. S'il est possible de trouver une ligne de pression restant à l'intérieur de l'arc, alors la sécurité structurale de l'arc est vérifiée. L'épaisseur de la ligne dépend de l'effort normal agissant à cet endroit, de la résistance de la maçonnerie et de la largeur participante du pont.

Résultats

	Épaisseur de l'arc		
Méthode	Constante de 1'300 mm	Constante de 1'775 mm	Réelle
Excel	n = 1.46	n = 2.47	-
RING	n = 2.26	n = 4.12	n = 3.95
SCIA	-	-	n = 1.3
Ligne de pression	-	-	n = 1.7

Tableau 1 : Résultats principaux des différentes méthodes

Le logiciel RING donne des valeurs de n plus élevées que la méthode analytique. Mais selon RING, considérer un arc d'une épaisseur constante moyenne de 1'775 mm revient sensiblement au même que l'épaisseur réelle de l'arc, qui est variable. Les résultats trouvés à l'aide du logiciel SCIA et des lignes de pression sont trop conservateurs.

Élargissement du tablier

Il est considéré que la ligne ferroviaire doit être doublée. Le pont n'est pas assez large pour pouvoir accueillir une deuxième voie. Il est donc décidé de poser une auge en CFUP plus large que le pont. Cette dernière permet d'étancher le pont et de rigidifier le pont.
Selon les résultats de la méthode analytique et une épaisseur de l'arc constante de 1.3 mètre, l'arc ne supporte pas le doublement des charges utiles. L'inertie de l'auge permet de mieux répartie les charges ponctuelles et une inertie minimum de $8.68 \cdot 10^{10}$ mm^4 est nécessaire.

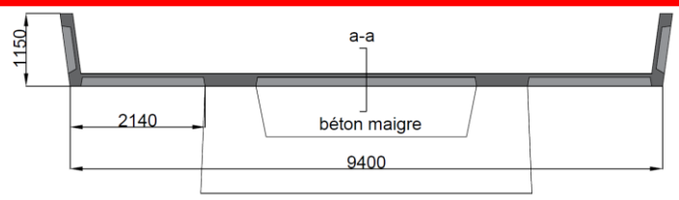

Figure 2: Dimensions principales de l'auge

Checks effectués:
- Vérification du basculement autour des appuis
- Vérification des contraintes aux angles des pierres
- Dimensionnement de la précontrainte: a été mise en place longitudinalement pour garder les auges colées entre elles
- Vérification du glissement entre la pierre et l'auge dû:
  - Aux forces de lacet
  - Aux forces centrifuges
  - Aux forces dues au démarrage et au freinage
- Dimensionnement transversal
- Vérification des dalles entre les nervures
- Fatigue des barres d'armature passives
- Fatigue du CFUP

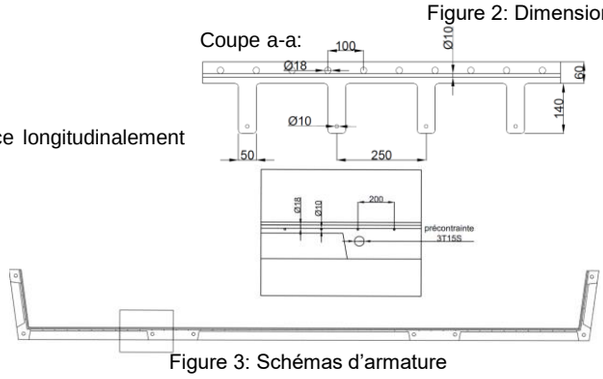

Figure 3: Schémas d'armature

Afin de réduire la quantité de CFUP utilisé, l'auge est évidée au-dessus du béton maigre, au niveau des porte-à-faux ainsi que sur les parties verticales de l'auge, selon la coupe a-a. Une passerelle de service est mise en place du côté amont du pont. Une légère pente et une évacuation des eaux côté aval du pont permettent d'évacuer les eaux de pluie.
La construction se réalise depuis le pont à l'aide d'une grue ferroviaire. Les anciennes rails sont enlevées au fur et à mesure de l'avancée. Des joints époxy sont coulés entre les auges.

Sources: Figure 1: Delphine DEBONS et Laurence RAUSIS. Les ponts du Triège. Service de la Mobilité, Etat du Valais. Décembre 2020