

Section de Génie Civil  
Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages



# Pont sur le Torrent d'Allèves : examen et projet d'intervention

## Rapport de synthèse



Justin Sanglard

Sous la direction du Prof. Eugen Brühwiler et du Dr Numa Bertola

Projet de Master

Lausanne, le 23 juin 2023

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contexte historico-culturel</b>	<b>2</b>
2.1	Trafic transalpin en Suisse . . . . .	2
2.2	Route et tunnel du Grand-Saint-Bernard . . . . .	3
2.3	Perspectives et projets pour la route . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Examen de la structure existante</b>	<b>8</b>
3.1	Documentation et description de l'ouvrage . . . . .	8
3.2	Inspection visuelle . . . . .	9
3.3	Examen de la structure . . . . .	9
3.3.1	Modélisation . . . . .	9
3.3.2	Dalle de roulement . . . . .	10
3.3.3	Tablier . . . . .	11
3.3.4	Piles . . . . .	11
3.3.5	Séisme . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Projet d'intervention</b>	<b>14</b>
4.1	Dalle de roulement . . . . .	14
4.2	Efforts dans le tablier . . . . .	16
4.3	Culées . . . . .	16
4.4	Appuis Gerber . . . . .	17
4.5	Travaux d'intervention . . . . .	18
4.6	Coûts économiques et écologiques . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>

<b>Références</b>	<b>21</b>
<b>Annexes</b>	<b>23</b>
<b>A Présentation de l'ouvrage</b>	<b>23</b>
A.1 Photos générales de l'ouvrage . . . . .	23
A.2 Principaux dégâts constatés lors de l'inspection . . . . .	24
<b>B Calculs liés à l'examen</b>	<b>26</b>
B.1 Dalle de roulement . . . . .	26
B.2 Analyse de sensibilité sur la hauteur des piles . . . . .	27
B.3 Calculs parasismiques . . . . .	27
<b>C Calculs liés au projet d'intervention</b>	<b>28</b>
C.1 Redistribution des efforts lors des clavages . . . . .	28
C.2 Efforts dans les culées clavées . . . . .	29
<b>D Analyses économiques et écologiques</b>	<b>30</b>

## Table des figures

1	Transit de fret à travers les Alpes suisses [source : OFS] . . . . .	3
2	Route du Grand-Saint-Bernard [12] . . . . .	4
3	(Gauche) Projet de 1949 [6]. (Droite) Projet exécuté en 1962 [10] . . . . .	5
4	Plan du tunnel d'Etroubles[20] . . . . .	6
5	Degré de conformité de la dalle de roulement . . . . .	10
6	Flexion dans les poutres et vérification . . . . .	11
7	Analyse de sensibilité sur les principaux paramètres du séisme . . . . .	13
8	Plan des interventions sur l'ouvrage . . . . .	14
9	Renforcement de la dalle de roulement au moyen d'une couche de CFUP	15
10	Degré de conformité de la dalle de roulement renforcée . . . . .	15
11	Plan du clavage des culées . . . . .	17
12	Plan du clavage des appuis Gerber . . . . .	18
13	(Gauche) Répartition des coûts du projet. (Droite) Répartition des émissions de CO2 . . . . .	19

# 1 Introduction

En Suisse, le travail des ingénieurs civils constitue de plus en plus en l'analyse d'ouvrages existants. Ce travail d'analyse est très différent de celui lié à la construction de structure neuve. En effet, il s'agit de vérifier qu'un ouvrage remplit toujours bien sa fonction en utilisant des méthodes d'analyse souvent plus complexes. L'examen doit nécessairement être plus avancé et détaillé qu'une structure neuve car les coûts d'intervention sont très onéreux.

En outre, le planification de l'intervention doit être finement étudiée afin de limiter les nuisances sur les usagers de l'ouvrage. Le renforcement d'une structure existante s'avère souvent peu efficace avec les méthodes traditionnelles qui engendrent des coûts disproportionnés.

Au cours des dernières années, de nouveaux matériaux ont été développés et des méthodes innovantes ont été appliquées lors d'intervention avec grand succès. Le composé cimentaire fibré à ultra-haute performante (CFUP) fait partie de ces nouvelles technologies, car les exceptionnelles propriétés mécaniques et la durabilité de ce matériau conviennent parfaitement au renforcement d'un ouvrage.

Ce projet de Master à l'EPFL étudie le pont du Torrent d'Allèves situé sur la route d'importance nationale du Grand-Saint-Bernard en Valais. Construit en 1962 lors de l'aménagement des voies d'accès au tunnel, cet ouvrage multi-poutres mesure 114 mètres de long. Il dispose de nombreuses travées irrégulières et de deux joints Gerber en mauvais état. En 1986, d'importants travaux ont été menés pour éviter l'effondrement de la travée entre ces joints.

Encadré par le Prof. Brühwiler et le Dr Bertola, le projet consiste premièrement en l'examen de la structure existante. Puis, un projet d'intervention visant le renforcement et l'amélioration de la durabilité de l'ouvrage est élaboré. La dalle de roulement sera notamment renforcée au moyen d'une couche de CFUP, matériau extrêmement performant et novateur. Avant de développer ces deux sujets techniques, l'influence historique et culturelle de la route du Grand-Saint-Bernard est étudiée.

## 2 Contexte historico-culturel

### 2.1 Trafic transalpin en Suisse

L'histoire et la culture suisses se sont construites autour des montagnes et du franchissement des Alpes. Le col du St-Gothard au coeur des empires européens a notamment eu une grande influence sur la première fédération des cantons suisses à la fin du XIII<sup>e</sup> siècle.

De nos jours, quatre grands couloirs transalpins se dessinent sur la carte de la Suisse : Grand-Saint-Bernard, Simplon, St-Gothard et San Bernardino.

Situé le plus à l'ouest, le Grand-Saint-Bernard a toujours été un passage privilégié, emprunté notamment par Annibal, Charlemagne et Napoléon. Un tunnel, construit en 1964, a donné un nouvel élan à cet axe routier en évitant le col situé à 2469 mètres d'altitude. Le col du Simplon permet de relier les villes de Domodossola et Brig par la route et par le rail. Les véhicules empruntent la route menant au col à 2006 mètres d'altitude. Depuis 1906, les trains circulent dans le tunnel de base mesurant presque 20 kilomètres, qui en a fait le plus long tunnel du monde pendant presque 80 ans. Récemment, la mise en service du tunnel de base du Lötschberg a ouvert une nouvelle liaison entre Milan et Berne. Reliant le canton d'Uri au Tessin, la renommée mondiale du St-Gothard provient de la mise en service en 1882 de la ligne ferroviaire et du tunnel historique de 15 kilomètres sous le massif montagneux. L'autoroute ouverte en 1980 dispose également d'un tunnel bidirectionnel de 20 kilomètres. Mesurant 57 kilomètres sous une couverture maximale de 2500 mètres, le tunnel ferroviaire de base est un record mondial et permet de relier Zurich et Milan en 2h40 pour le trafic voyageurs.

Le col du San Bernardino relie les vallées du Rhin et du Tessin par un tunnel autoroutier construit en 1967. Aucune ligne ferroviaire n'est aménagée dans ce couloir, ce qui limite son importance internationale dans le transit de marchandises.

Sur la figure 1 qui représente les courbes de transit de marchandises selon le col, nous pouvons constater que les marchandises transitent essentiellement par le St-Gothard (par la route et par le rail) et par le Simplon (par le rail) et que les autres corridors transalpins sont proportionnellement négligeables. Depuis le milieu des années 2000, le trafic

de marchandises par la route est constamment en baisse alors que la part du rail devrait poursuivre son augmentation, selon la volonté de l'initiative des Nouvelles Lignes Ferroviaires à travers les Alpes.

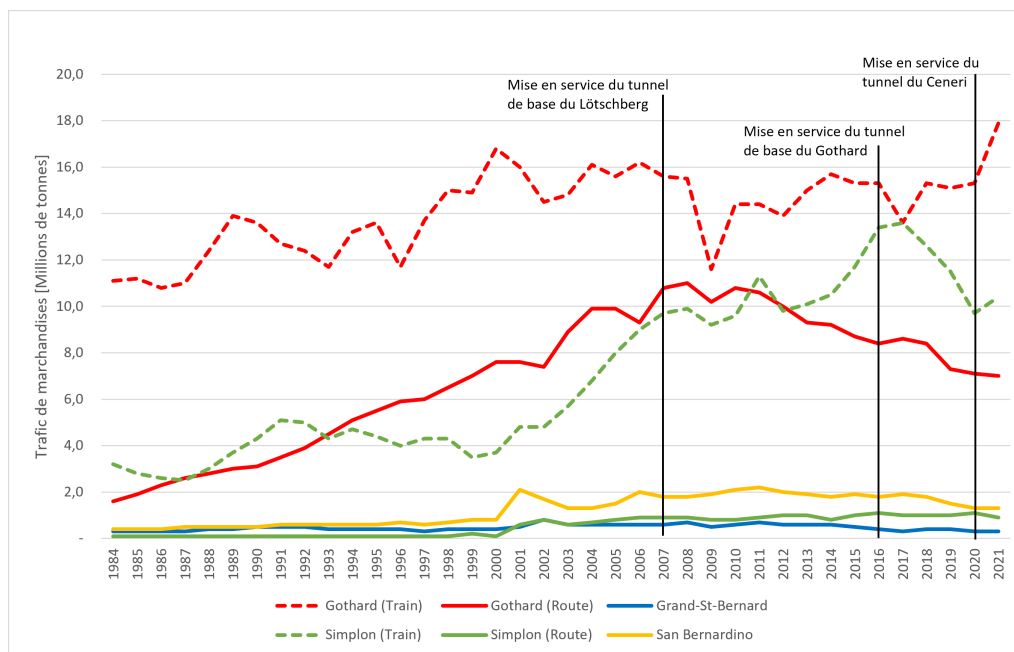


FIGURE 1 : Transit de fret à travers les Alpes suisses [source : OFS]

Quant à la route du Grand-Saint-Bernard, le transit de fret diminue fortement depuis le début des années 2000 pour arriver à des chiffres faibles. Le trafic journalier moyen qui est relativement important, s'explique par le fait que la route du Grand-Saint-Bernard est fréquentée majoritairement par des voitures de tourisme, surtout pendant les périodes estivales.

## 2.2 Route et tunnel du Grand-Saint-Bernard

Depuis la préhistoire, le col du Grand-Saint-Bernard a toujours été un passage privilégié à travers les Alpes. Les Romains ont aménagé la première route lors du I<sup>er</sup> siècle de notre ère. Durant le Moyen-Age, Bernard-de-Menthon, qui fut canonisé, a érigé l'hospice et a donné son nom au col situé à 2469 mètres d'altitude.

Une bonne partie de la route se trouvant à plus de 2000 mètres d'altitude, le col est

impraticable pendant une longue période de l'année en raison des conditions météorologiques. C'est pourquoi, le percement du tunnel routier a changé profondément la situation et les perspectives d'utilisation de ce corridor transalpin.

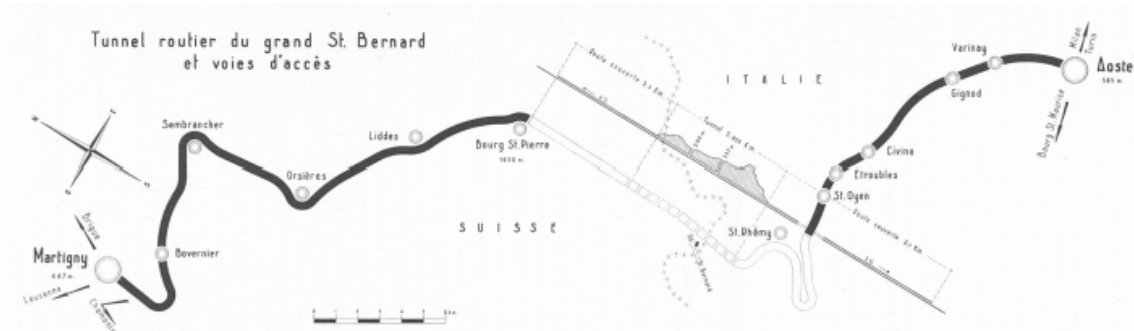


FIGURE 2 : Route du Grand-Saint-Bernard [12]

Depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les gouvernements sarde et suisse étudient la possibilité de créer une ligne ferroviaire ouverte toute l'année entre la vallée du Rhône et la plaine du Pô. La ligne ferroviaire au Grand-Saint-Bernard est finalement abandonnée pour se concentrer sur les projets de tunnel du Simplon et du St-Gothard.

Pourtant, le percement d'un tunnel de 2300 mètres sous le col de Menouve avait commencé en 1856. Le manque de financement et de volonté politique ont interrompu le projet après quelque dizaines de mètres creusés de chaque côté de la frontière. Après cet échec, les projets se sont succédés durant la fin du XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècle sans attirer l'attention du grand public et des politiques.

La démocratisation de l'automobile et des exigences de l'industrie auront raison du percement du tunnel routier au Grand-Saint-Bernard. La volonté et le financement initial proviennent d'initiatives privées ou locales (notamment FIAT du côté italien et le canton de Vaud du côté suisse). Les ingénieurs suisses R.-H. Lambert, H. Felber et italien G. Dardanelli ont mis sur pied le projet visant à traverser par la route sous le col du Grand-Saint-Bernard. Bien plus qu'un tunnel, le projet consiste en la construction des nouvelles routes d'accès adaptées au trafic moderne et à la construction de gares routières aux portails des tunnels. Niché à 1900 mètres d'altitude, le tunnel mesure 5800 mètres de long.

En raison de l'altitude du tunnel, les routes d'accès ont fait l'objet d'une attention par-



ticulière pour le passage des véhicules lourds mais également pour l'ouverture de la voie durant les mois d'hiver. En Italie, une nouvelle route couverte de 10 kilomètres est construite depuis St-Léonard, la protégeant ainsi contre les chutes de neige. Elle permet notamment d'éviter la traversée du dernier village de la vallée, St-Rhémy-en-Bosses, et les nombreux lacets jalonnant l'ancienne voie.

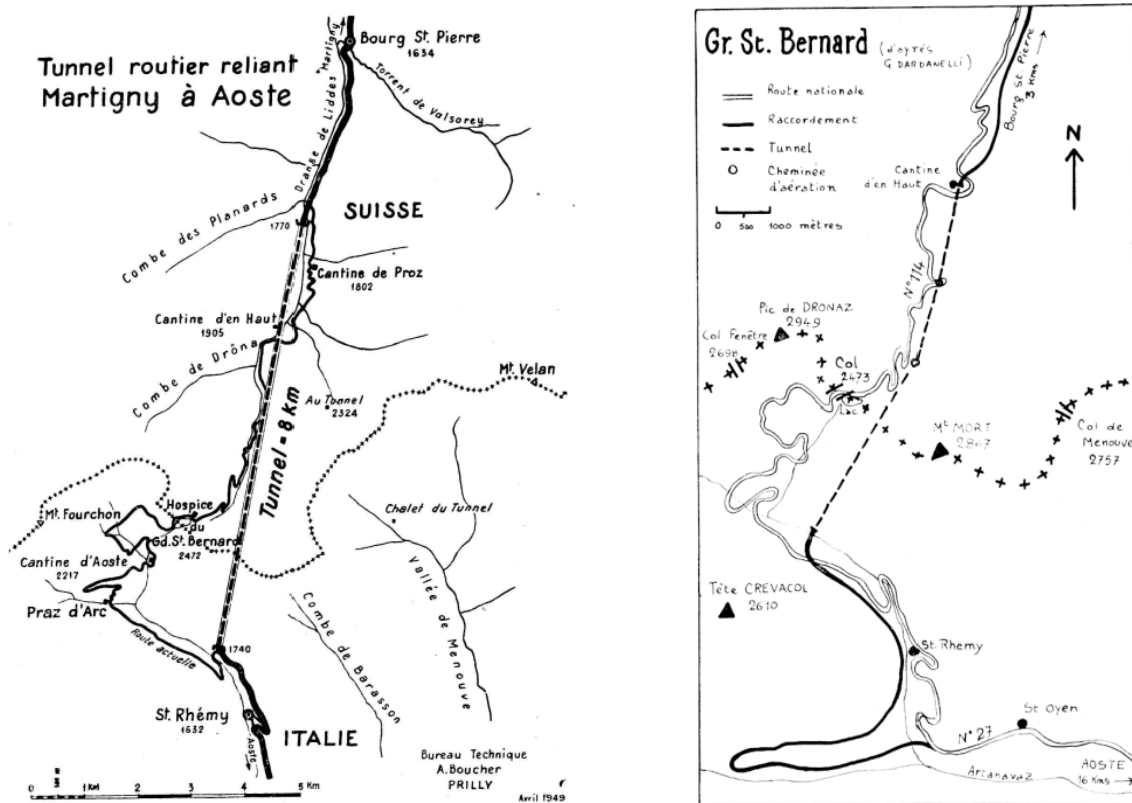


FIGURE 3 : (Gauche) Projet de 1949 [6]. (Droite) Projet exécuté en 1962 [10]

Du côté suisse, la route d'accès a été influencée par la construction du barrage des Toules et la mise en eau de sa retenue en 1964. La voie historique se retrouvant noyée dans le lac, la nouvelle route a été construite en surplomb du lac offrant un des plus beaux paysages de la région. Pour protéger la route contre les intempéries, avalanches et chutes de pierres, la route est couverte depuis la fin du village de Bourg-Saint-Pierre. C'est lors de l'aménagement des voies d'accès au tunnel du Grand-Saint-Bernard que le pont sur le Torrent d'Allèves a été construit en 1962.

## 2.3 Perspectives et projets pour la route

Depuis la construction du tunnel et de ses voies d'accès dans les années 60, de nombreux ouvrages d'art ont été construits.

Martigny est la ville d'où part la route du col du Grand-Saint-Bernard mais également celle menant au col de la Forclaz (en direction de Chamonix). Débuté en 1987, le tunnel du Mont-Chemin permet le contournement de la ville de Martigny limitant ainsi les nuisances liées au trafic traversant la ville. Directement connecté à l'autoroute A9, le tunnel mesure 1822 mètres.

Du côté italien, la route d'accès au tunnel du Grand-Saint-Bernard traverse actuellement les vieux villages d'Étroubles et de Saint-Oyen, ce qui perturbe la vie des habitants. Débutés en 2009, les travaux de la route de contournement, qui comprennent un tunnel de 4 kilomètres et de deux grands ponts, ont longtemps été arrêtés à la suite de la faillite de l'entreprise de construction. Actuellement, la construction du tronçon restant de 800 mètres a repris et la route devrait être mise en service en 2024.



FIGURE 4 : Plan du tunnel d'Étroubles[20]

Dans son rapport sur l'état des nouveaux tronçons intégrés au réseau des routes nationales de 2019 (rapport [15]), l'OFROU a détaillé les interventions prévues sur les ouvrages d'art. En effet, de nombreux ponts et galeries présentent des dégâts de corrosion et des défauts de portance. L'OFROU a également des projets pour la réalisation de nouveaux ouvrages tels que le contournement de Liddes, le nouveau tracé entre Pont-Sec jusqu'à

Fontaine-Dessous et le contournement de Sembrancher. Les projets se trouvent à différents stades de planification ou de réalisation.

Finalement, les perspectives futures sont freinées par les taxes de péages. En effet, le tunnel du Grand-Saint-Bernard est le seul tronçon de route suisse avec des taxes de passage. Les prix du péage sont relativement élevés puisqu'il faut compter 50 francs suisses pour un aller-retour d'une voiture de tourisme, soit 25% plus cher que la taxe autoroutière annuelle suisse. Ce péage pourrait ainsi décourager les utilisateurs à emprunter cet itinéraire.

### 3 Examen de la structure existante

Situé sur la route du Grand-Saint-Bernard entre les villages de Liddes et de Bourg-Saint-Pierre, l'ouvrage étudié concerne le pont du Torrent d'Allèves d'une longueur totale de 114 mètres. Des images générales du pont sont disponibles à l'Annexe A.1

Dans ce chapitre, l'état de l'ouvrage est examiné, c'est-à-dire qu'une inspection visuelle et un examen au moyen de calculs ont été effectués.

#### 3.1 Documentation et description de l'ouvrage

Deux documents sont disponibles à propos de cet ouvrage. Le laboratoire Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) de l'EPFL a rendu un rapport quant à la vérification du trafic 40 tonnes sur le pont du Torrent d'Allèves. Datés de février 2003, quelques plans et informations sur la résistance des sections sont disponibles [13].

Le deuxième document à disposition est un rapport d'inspection visuelle effectuée par le canton du Valais en date du 26 juin 2008 [19]. L'état de la structure porteuse y est jugé acceptable alors que les équipements sont en mauvais état. Des mesures rapides d'assainissement étaient prévues notamment pour remplacer un joint de chaussée.

Reliées par des entretoises disposées régulièrement, quatre poutres soutiennent la dalle de roulement de 16 cm d'épaisseur. Mesurant entre 8 mètres et 30 mètres, les travées sont irrégulières. Les piles sont doublées transversalement mais aucune information quant à leur géométrie et leur armature n'est disponible.

Deux appuis Gerber situés entre les piles P5 et P6 coupent le pont en une partie continue (de la culée Orsières à la pile P5) puis en deux poutres simples. Le pont étant fixe aux deux culées, les effets du fluage et du retrait ont ouvert ces joints, menaçant le tablier entre P5 et P6 de s'effondrer. En 1986, des poutres métalliques ont été installées en urgence pour soutenir cette partie du tablier et sont toujours présentes.

Quatre câbles de 32 fils de 6 mm de diamètre sont soigneusement disposés dans chaque poutre de la culée Orsière jusqu'à la pile P5 puis de la pile P6 jusqu'à la culée Bourg. Le béton est admis de classe C40/50 alors que la précontrainte est de type Y1590. Des étriers de diamètre 12 mm sont disposés tous les 150 mm dans chaque poutre.

## 3.2 Inspection visuelle

L'inspection visuelle a eu lieu le 25 février 2023 par beau temps. La méthode (risque) pour l'évaluation de l'état a été utilisée selon Bertola et Brühwiler [2].

Les bordures du côté montagne sont systématiquement dégradées. Le béton d'enrobage a éclaté laissant apparaître plusieurs armatures. Le revêtement est bon mais des fissures transversales ont été constatées près des culées. Le joint de chaussée sur un joint Gerber est déjà dégradé alors qu'il est en place depuis seulement 10 ans.

L'inspection a révélé quelques nids de gravier dans les poutres et de nombreuses traces de corrosion sous la dalle de roulement. Cependant, ces défauts sont localisés et ne devraient pas menacer la sécurité structurelle.

La situation la plus préoccupante provient de l'état des appuis Gerber. Ceux-ci sont largement ouverts et non-étanches. Heureusement, les poutres métalliques évitent l'effondrement d'une partie du pont.

La note globale de 3 (en état défectueux) a été attribuée à l'ouvrage en raison des dommages aux joints Gerber et aux appuis de culée. Cependant, l'état du pont est relativement bon et seuls quelques éléments sont dégradés ou défectueux. Quelques images des principaux dégâts constatés sont disponibles à l'annexe A.2.

## 3.3 Examen de la structure

Les résultats les plus importants concernant l'examen de la structure existante sont résumés dans ce rapport. En raison de l'absence d'informations concernant les fondations, aucune vérification n'est effectuée pour ce genre d'élément.

### 3.3.1 Modélisation

Après avoir effectué des calculs simples à la main, trois modèles numériques ont été développés. Le premier sert à déterminer les efforts transversaux dans la dalle de roulement. Également conçu sur SCIA, un autre modèle permet de calculer les efforts dans les piles et poutres. Finalement, le comportement sismique est analysé avec un modèle barre sur Statik.

Le trafic conventionnel et exceptionnel de type II, la température et la neige ont été modélisés dans les deux premiers modèles. La neige et le trafic exceptionnel ne sont jamais déterminants. De très nombreux cas de charges concernant le trafic conventionnel ont été modélisés pour calculer l'ELU et la fatigue. Les charges ainsi que les facteurs de sécurité ont été considérés selon la SIA 269. Aucun ELS n'a été vérifié.

Les vérifications en section sont effectuées avec le logiciel FAGUS de la suite CUBUS.

### 3.3.2 Dalle de roulement

Avec une épaisseur de 16 cm, il est attendu que la dalle de roulement soit l'élément critique du pont notamment pour la résistance au poinçonnement et à l'effort tranchant. Grâce à son plan d'armature disponible, la dalle de roulement a été contrôlée avec une bonne confiance sur son comportement. Le poinçonnement a été vérifié selon la méthode développée par A. Muttoni pour les dalles de roulement [16]. Voici les degrés de conformité concernant la dalle de roulement pour les phénomènes suivants :

Type de vérification	Flexion	Cisaillement	Poinçonnement
ELU2	1.39	0.84	0.77
Fatigue	1.28	(KO)	-

FIGURE 5 : Degré de conformité de la dalle de roulement

Ces résultats montrent que les résistances à l'effort tranchant ainsi qu'au poinçonnement ne sont pas suffisantes. L'annexe B.1 apporte des précisions.

Le choc des véhicules sur le dispositif de retenue n'est pas déterminant pour la dalle de roulement. Les efforts provenant de l'écoulement des profilés métalliques sont, en effet, inférieurs aux actions non-accidentelles.

### 3.3.3 Tablier

Seules les poutres extérieures sont vérifiées puisqu'elles sont les plus sollicitées. Sur la figure 6, les résultats sont présentés.

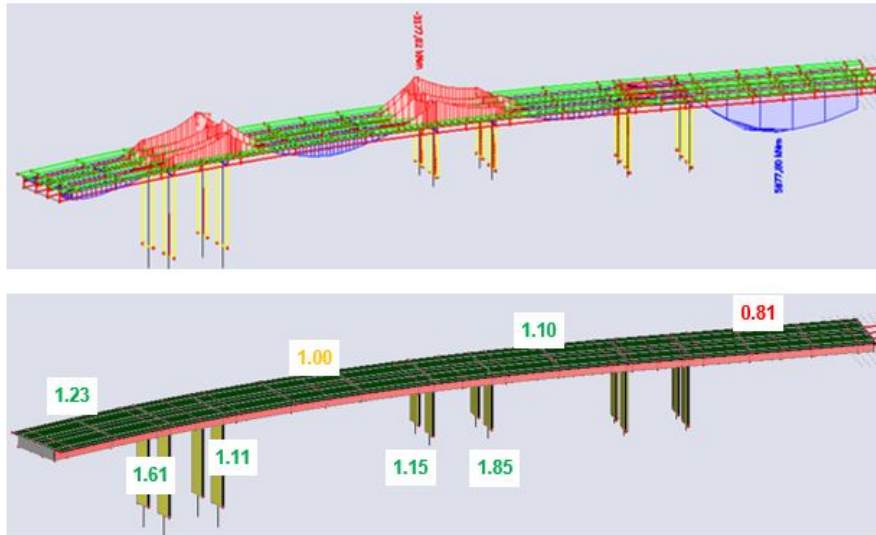


FIGURE 6 : Flexion dans les poutres et vérification

La résistance est insuffisante sur la première travée du côté de Bourg-Saint-Pierre qui fonctionne en poutre simple. De plus, la grande travée de 30 mètres atteint tout juste la sécurité nécessaire.

Selon la méthode élastique, un degré de conformité de 1.29 est calculé pour la résistance à l'effort tranchant.

En ce qui concerne les vérifications à la fatigue, les sections sont comprimées sur l'ensemble de la hauteur, car la précontrainte est totale. Les différences de contrainte dans les étriers sont plus critiques mais atteignent un degré de conformité de 1.08.

### 3.3.4 Piles

La différence de température est déterminante pour les piles. Comme l'effort normal peut être favorable (vérification en section) et défavorable (stabilité), deux situations d'examen sont étudiées : Une avec 0.8 PP + 0 Trafic et l'autre 1.2 PP + 0.75 Trafic. Définie

dans la norme SIA 262 :2013, la méthode employée pour la vérification au deuxième ordre est la méthode de la courbure.

Aucune information sur la géométrie des piles et leur armature n'est disponible. La hauteur réelle des piles est inconnue et peut être théoriquement augmentée jusqu'à la banquette de fondation. Une analyse de sensibilité sur la hauteur a donc été effectuée en faisant également varier la quantité d'armature. Les détails de cette analyse sont disponibles dans l'annexe B.2.

D'après cette analyse, la résistance des piles est satisfaite avec une armature moyenne pour toutes les hauteurs des piles. Si la profondeur de la banquette est d'un mètre, une petite armature est même suffisante.

### 3.3.5 Séisme

En plus des inconnues présentes dans la géométrie des piles (cf. sous-chapitre 3.3.4), certains paramètres du séisme sont incertains. L'information concernant la classe de sol sismique n'est ainsi pas disponible selon les données de <https://map.geo.admin.ch>. En comparant avec les autres vallées à proximité, le pont devrait se situer en classe de sol A (plus probable) ou E.

Différentes analyses de sensibilité ont été effectuées. La plus intéressante concerne les résultats croisés entre les différentes classes de sol identifiées et la rigidité des piles. Sur la figure 7, les résultats de cette analyse sont présentés.

La classe de sol influence l'effort normal dans les piles alors que la rigidité agit sur le moment longitudinal. Au final, nous constatons que la rigidité des piles a bien plus d'importance que la classe de sol sur les degrés de conformité. Pour la vérification de la sécurité structurale, les rigidités des piles ont été adaptées en fonction du niveau de sollicitation (soit rigidité non-fissurée EI0 ou fissurée EI/3). Ainsi les degrés de conformité pour la sécurité structurale sont supérieurs à 1.0 même pour un sol de classe E (l'armature est admise à  $\Phi 20@150$ ).



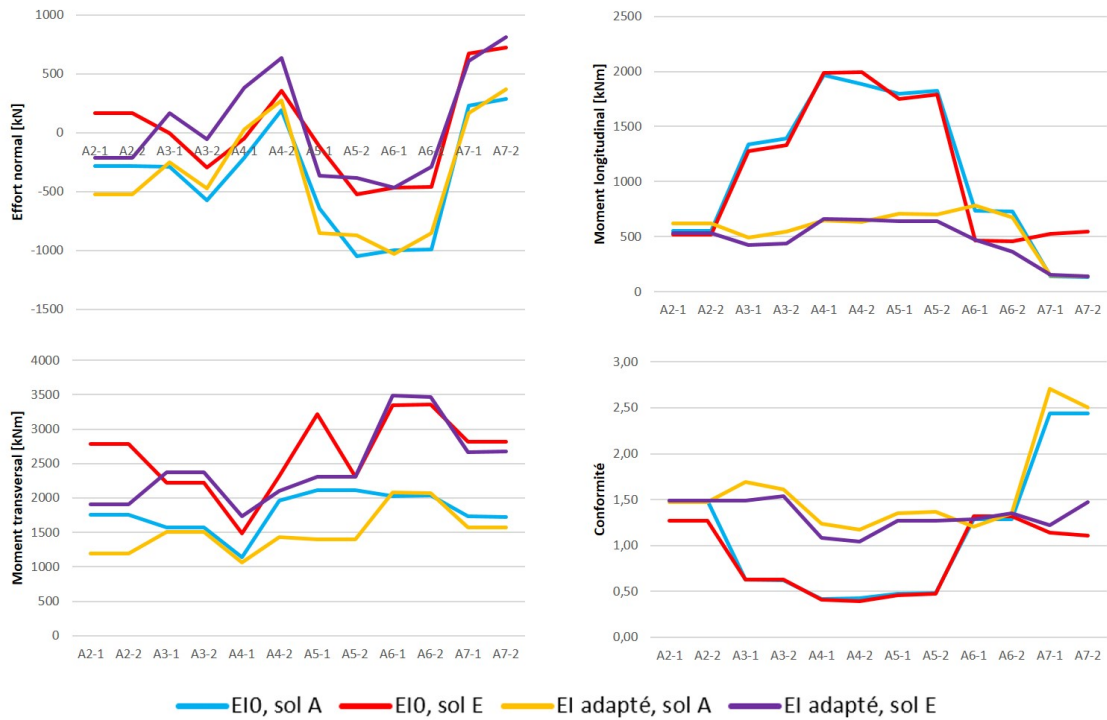


FIGURE 7 : Analyse de sensibilité sur les principaux paramètres du séisme

La vérification contre la chute des éléments au sens de la SIA 261 :2013 n'est pas satisfaisante puisque les appuis Gerber ne sont pas assez larges. De plus, comme le pont est admis d'importance COIII, les déplacements aux joints de chaussée ont été vérifiés et sont conformes aux exigences.

## 4 Projet d'intervention

Sur la base des constatations de l'examen de la structure, le projet d'intervention se concentre sur les points suivants :

1. La dalle de roulement est renforcée au moyen d'une couche de 6 mm d'épaisseur de CFUP. De plus, la couche est armée avec des barres de diamètre 12 mm tous les 150 mm tant longitudinalement que transversalement ;
2. Les bordures sont chemisées avec du CFUP pour les protéger. De plus, de vraies gouttes pendantes sont construites ;
3. Les deux appuis Gerber sont clavés avec du CFUP. Ainsi, les problèmes de durabilité disparaissent et les poutres métalliques de soutien peuvent être démontées ;
4. Les culées sont également clavées et des dalles de transition sont construites. Les appuis métalliques sont laissés en place et noyés.

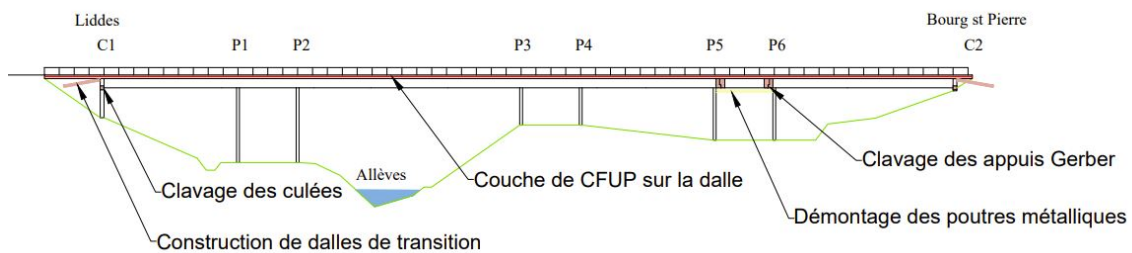


FIGURE 8 : Plan des interventions sur l'ouvrage

Dans ce chapitre, les interventions sont détaillées et les conséquences sur la sécurité structurale et la durabilité expliquées.

### 4.1 Dalle de roulement

La dalle de roulement, initialement de 16 cm d'épaisseur, est renforcée au moyen d'une couche de CFUP de 6 cm. Admis d'épaisseur de 2 cm, l'enrobage de béton doit être hydro-démolisé. Deux nappes d'armature de diamètre 16 mm sont disposées dans la couche de CFUP. L'enrobage de 16 mm est amplement suffisant pour le CFUP pour protéger les armatures contre les attaques extérieures. De plus, l'épaisseur de revêtement bitumineux

est fixé à 80 mm. La figure suivante présente le plan de renforcement de la dalle de roulement.

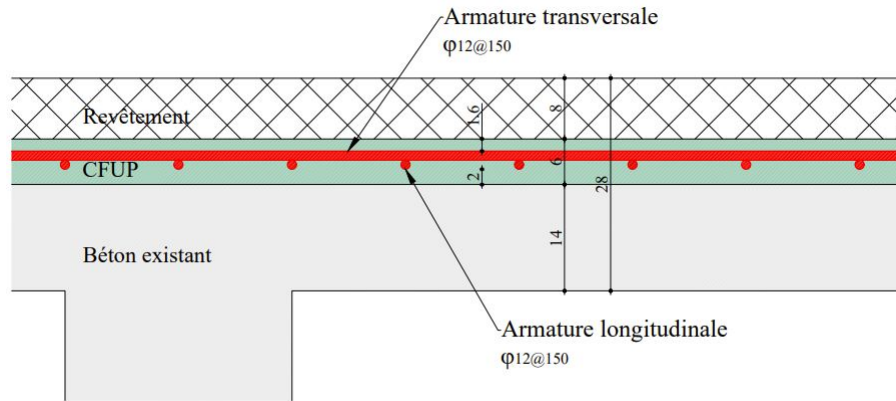


FIGURE 9 : Renforcement de la dalle de roulement au moyen d'une couche de CFUP

Les calculs ont été effectués selon les modèles proposés du cahier technique SIA 2052 :2013 pour le renforcement avec CFUP. Dans ce cahier, les modèles de flexion et de cisaillement sont bien décrits alors qu'aucune indication n'est disponible pour le poinçonnement. L'augmentation de la résistance en flexion et de la hauteur statique ont permis d'avoir une résistance suffisante en utilisant le modèle de poinçonnement de la SIA 262. La section a donc été conservativement simplifiée comme un béton homogène de classe B40/50. Voici les résultats obtenus avec le renforcement proposé :

Type de vérification	Flexion	Cisaillement	Poinçonnement
ELU2	2.44	1.80	2.10
Fatigue	2.06	(OK)	-

FIGURE 10 : Degré de conformité de la dalle de roulement renforcée

Le projet actuel a donc des réserves de portance et pourrait être optimisé. Cependant pour des raisons constructives, l'épaisseur de CFUP pourrait difficilement être réduite.

## 4.2 Efforts dans le tablier

Les clavages des culées et des appuis Gerber entraînent une modification du système statique pour les charges variables. Les efforts dans le tablier seront moins importants à mi-travée mais plus importants sur les appuis. Comme le pont est fixe aux deux culées, la température devient déterminante vers les culées. L'annexe C.1 montre la redistribution des charges variables dans le tablier.

Grâce à cette redistribution des charges et à la couche de CFUP, le problème de résistance du tablier est corrigé et nous obtenons un coefficient de conformité égal à 1.0 (0.81 avant l'intervention).

## 4.3 Culées

L'intervention porte également sur les culées. En effet, les appuis mécaniques sont en mauvais état alors que des fissures apparaissent sur la chaussée, ce qui laisse présager l'absence de dalles de transition.

Le clavage des culées doit notamment lier le banc de culée et le tablier. La figure 11 montre les détails du clavage. Premièrement, des barres de diamètres 20 mm assurent la continuité entre le banc de culée et l'entretoise du tablier. De même, de nouvelles barres de diamètre 16 mm forment l'angle de cadre extérieur et se poursuivent dans la couche de CFUP sur la dalle de roulement. Des étriers de diamètre 12 mm assurent la liaison entre la nouvelle dalle de roulement (nervurée en CFUP selon [5]), le mur de culée et le tablier. Finalement, le CFUP est coulé, y compris dans les interstices entre le mur de culée et le tablier, noyant ainsi les appuis mécaniques.

La construction de dalles de transition permet d'amortir les déplacements différentiels entre l'ouvrage et le terrain de fondation. Prévues en CFUP, les dalles peuvent être soit préfabriquées ou coulées en place.

D'après l'annexe C.2, l'angle de cadre ainsi créé attire de nombreux efforts qu'il s'agit de transmettre aux fondations. La température provoque des tractions à l'intérieur de l'angle alors que le trafic plutôt à l'extérieur. Le séisme provoque également des efforts aux culées qui ont été contrôlés.

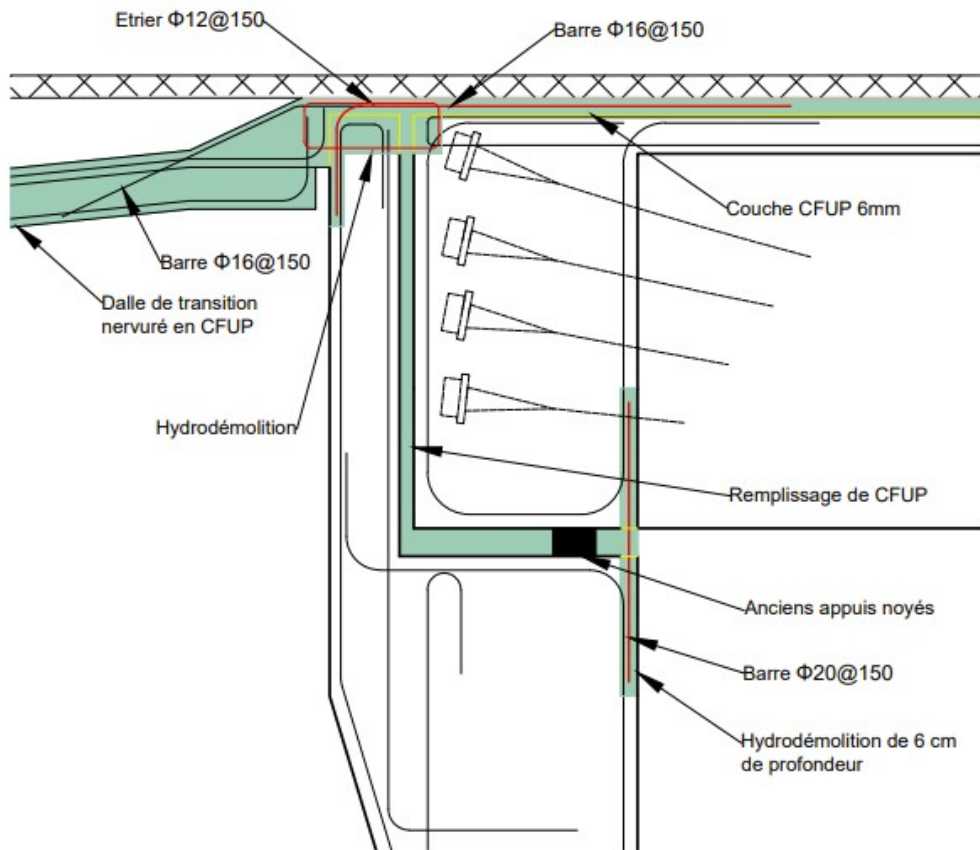


FIGURE 11 : Plan du clavage des culées

Cette intervention aux culées permet de supprimer les problématiques liées à la durabilité tout en limitant les perturbations dans l'entretoise où se trouvent les têtes d'ancrage de la précontrainte.

#### 4.4 Appuis Gerber

Le clavage des appuis Gerber est nécessaire car l'état des appuis est mauvais. De l'eau s'écoule à travers le joint de chaussée et provoque de la corrosion sur les appuis et les poutres métalliques. Ces dernières, installées depuis 40 ans, doivent être démontées pour restaurer l'état initial du pont.

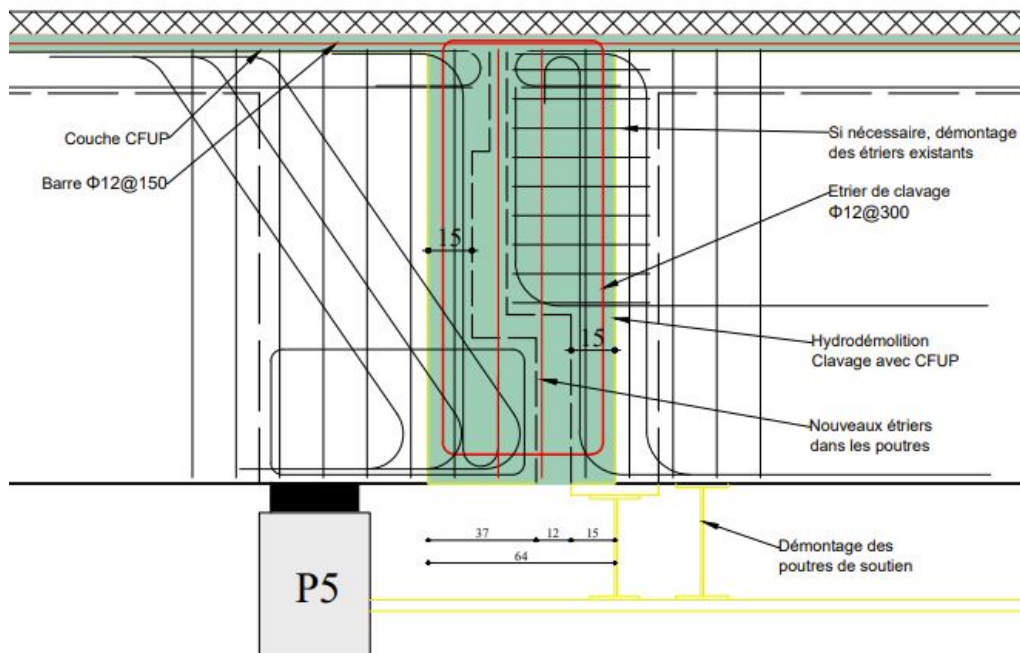


FIGURE 12 : Plan du clavage des appuis Gerber

Le concept de clavage repose sur quatre éléments importants. Sur une profondeur minimale de 15 cm, l'hydro-démolition dégage les armatures. Les étriers dans les poutres doivent être prolongés alors que des étriers de diamètre 12 mm claquent les joints. Enfin, du CFUP est coulé pour fermer les appuis Gerber. La couche de CFUP suffit pour reprendre les efforts de flexion à l'ELU et le CFUP est étanche pour les sollicitations à l'ELS.

#### 4.5 Travaux d'intervention

Dans ce sous-chapitre, quelques explications sont données en ce qui concerne les travaux d'intervention.

Le maître d'ouvrage autorise la fermeture d'une voie de circulation pour autant qu'elle soit suffisamment large (3.5 m). Comme le tablier est relativement large, l'espace réservé aux travaux est confortable.

Les poutres métalliques existantes sont utilisées pour soutenir la travée entre les appuis Gerber lors du clavage puis elles sont démontées à la fin du chantier.

## 4.6 Coûts économiques et écologiques

Dans ce dernier sous-chapitre, nous estimons les coûts économiques et émissions de CO<sub>2</sub> du projet d'intervention. Les bases de calcul sont disponibles à l'annexe D.

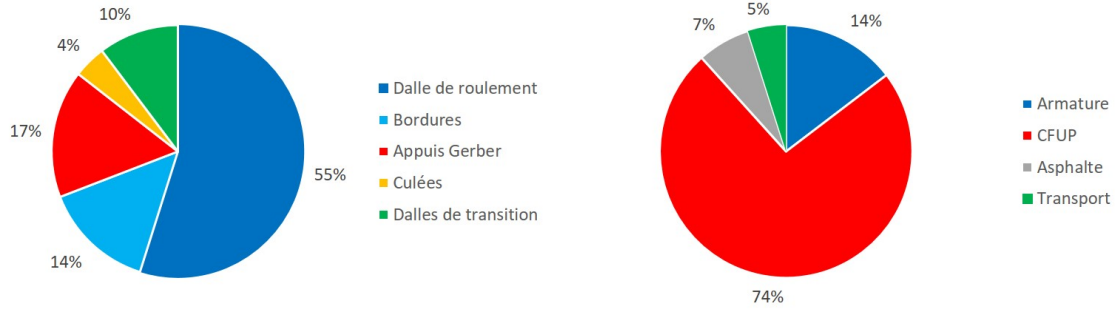


FIGURE 13 : (Gauche) Répartition des coûts du projet. (Droite) Répartition des émissions de CO<sub>2</sub>

Ainsi, le coût total du projet est estimé à 525'000 francs suisses, soit 510 CHF/m<sup>2</sup> et les émissions de CO<sub>2</sub> se montent à 225 tonnes, soit 220 kg/m<sup>2</sup>. En Suisse, il est admis qu'un ouvrage neuf coûte 3000 CHF/m<sup>2</sup>. De plus, selon [8], les émissions pour un nouveau pont se situent entre 1000 et 5000 kg/m<sup>2</sup>. Ainsi, ces comparaisons montrent qu'il est économiquement et écologiquement avantageux de renforcer l'ouvrage avec le projet proposé.

## 5 Conclusion

Dans ce projet de master, nous avons d'abord étudié l'importance historique et culturelle de la route du Grand-Saint-Bernard dans le trafic transalpin. Le tunnel, ouvert en 1964, ainsi que la construction des nouvelles voies d'accès ont nettement amélioré l'intérêt d'utilisation de la route. En outre, nous avons commenté les grands projets effectués après les années 60 et ceux planifiés à l'avenir.

Le pont sur le torrent d'Allèves est un ouvrage majeur de la voie d'accès au tunnel du Grand-Saint-Bernard. L'état visuel a été jugé acceptable alors que les calculs ont montré de sérieux problèmes au niveau de la sécurité structurelle. En particulier, la dalle de roulement, épaisse de 16 cm, n'est pas suffisante pour résister aux efforts du trafic actuel.

Le projet d'intervention propose le clavage des appuis Gerber ainsi que le renforcement de la dalle au moyen d'une couche de CFUP. Ce matériau innovant permet de résoudre les problèmes de résistance car ses propriétés mécaniques sont excellentes. En outre, le CFUP permet d'assurer une exceptionnelle durabilité. Malgré toutes les incertitudes et inconnues relatives au pont, le projet a démontré que l'utilisation du CFUP permet de renforcer efficacement un ouvrage tout en conservant son esthétique naturel.

Finalement, ce travail a permis d'identifier des solutions techniques et constructives aux problèmes fréquemment constatés de nos ouvrages existants. Dans un contexte de limitation d'émission de gaz à effet de serre, la destruction-reconstruction d'ouvrage est une solution de facilité alors que la technologie permet la restauration à des coûts raisonnables. La surveillance, la maintenance et le renforcement, si cela s'avère nécessaire, sont de meilleurs investissements pour l'avenir du point de vue économique et écologique.



## Références

- [1] *Barrage des Toules*. Comité suisse des barrages. [https://www.swissdams.ch/fr/les-barrages/liste-des-barrages-suisse/Les\\_Toules.pdf](https://www.swissdams.ch/fr/les-barrages/liste-des-barrages-suisse/Les_Toules.pdf) , dernière visite 17 avr. 2023.
- [2] Numa BERTOLA et Eugen BRÜHWILER. « Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection ». In : *Structure and Infrastructure Engineering* Volume 19 :4 (2023), p. 575-588. DOI : [10.1080/15732479.2021.1959621](https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1959621) (cf. p. 9).
- [3] Eugen BRÜHWILER. *Dalles de pont renforcées par le CFUP*. Conférence. Journée JERI, 9 nov. 2019.
- [4] Eugen BRÜHWILER. *Structures existantes I et II : Examen et interventions*. Cours. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2021.
- [5] Eugen BRÜHWILER. *CFUP pour la maintenance et la construction d'ouvrages d'art de l'infrastructure routière*. Documentation. Office fédéral des routes, 2022 (cf. p. 16).
- [6] Henri CHENAUD. « Le tunnel routier du Grand-St-Bernard : résumé de la causerie faite à l'Alpe de Bavon ». In : *Bulletin de la Murithienne* tome 66 (1949) (cf. p. 5).
- [7] *Col du Grand-Saint-Bernard*. Wikipedia. 2022. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Col\\_du\\_Grand-Saint-Bernard](https://fr.wikipedia.org/wiki/Col_du_Grand-Saint-Bernard) , dernière visite 4 mars 2023.
- [8] David COLLINGS. « The Carbon Footprint of Bridges ». In : *Structural Engineering International* Volume 32 :4 (2021), p. 501-506. DOI : [10.1080/10168664.2021.1917326](https://doi.org/10.1080/10168664.2021.1917326) (cf. p. 19).
- [9] *Détails de construction de ponts*. Directive. Office fédéral des routes, 2011.
- [10] Bernard JANIN. « Les tunnels routiers du Mont-Blanc et du Grand-Saint-Bernard, les perspectives de leur ouverture pour la vallée d'Aoste ». In : *Revue de géographie alpine* tome 50 (1962), p. 87-120 (cf. p. 5).
- [11] *L'importance du projet pour les cantons : Valais*. DETEC Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication. <https://www.uvek.admin.ch/uvek/fr/home/detec/votations/votation-vignette-autoroutiere/importance-pour-les-cantons/valais.html> , dernière visite 4 mars 2023.

- 
- [12] R.-H. LAMBERT. « Le tunnel routier du Grand-Saint-Bernard ». In : *Bulletin technique de la Suisse romande* Cahier 20 (1959), p. 289-293 (cf. p. 4).
- [13] H. LUDESCHER et E. BRÜHWILER. *Vérification du Pont sur le Durnand et du Pont sur le Torrent d'Allèves pour le trafic routier 40 to*. Laboratoire Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages, EPFL, fév. 2003 (cf. p. 8).
- [14] *Nouvelle galerie de sécurité au Grand-Saint-Bernard après plus de 10 ans de travaux*. RTS. 2022. <https://www.rts.ch/info/suisse/13232347-nouvelle-galerie-de-securite-au-grandsaintbernard-apres-plus-de-10-ans-de-travaux.html> , dernière visite 17 avr. 2023.
- [15] *Rapport 2019 d'état des nouveaux tronçons du réseau des routes nationales (NAR)*. OFROU Office fédéral des routes. 2020 (cf. p. 6).
- [16] Miguel Fernandez RUIZ, Rui Vaz RODRIGUES et Aurelio MUTTONI. *Dimensionnement et vérification des dalles de roulement des ponts routiers*. Office fédéral des routes, sept. 2009 (cf. p. 10).
- [17] *SS 27 Variante Etroubles e Saint-Oyen [It]*. anas. 2023. <https://www.stradeanas.it/it/ss-27-variante-etroubles-e-saint-oyen> , dernière visite 17 avr. 2023.
- [18] *Transport transalpin de marchandises*. OFS Office fédéral de la statistique. 2022. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/transport-marchandises/transalpin.html> , dernière visite 4 mars 2023.
- [19] Canton du VALAIS - SRCE. *Rapport d'inspection du pont sur le Torrent d'Allèves*. 26 juin 2008 (cf. p. 8).
- [20] Julien WICKY. *Sur la route des vacances gît un tunnel à l'abandon*. Le Matin Dimanche. 2020. <https://www.24heures.ch/sur-la-route-des-vacances-git-un-tunnel-a-labandon-575875287964> , dernière visite 8 juin 2023 (cf. p. 6).

---

# Appendices

## A Présentation de l'ouvrage

### A.1 Photos générales de l'ouvrage



## A.2 Principaux dégâts constatés lors de l'inspection

(Gauche) Bordure. (Droite) Joint de chaussée sur joint Gerber.



(Gauche) Appuis de culée. (Droite) Corrosion sous porte-à-faux de la dalle de roulement et nid de gravier dans les poutres.



(Gauche) Zoom sur l'appui Gerber vers P5. (Droite) appui Gerber vers P6

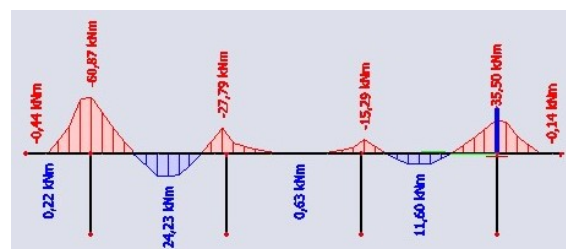


## B Calculs liés à l'examen

Voici quelques indications sur les calculs effectués durant l'examen.

### B.1 Dalle de roulement

Trois situations ont été analysées pour la sécurité structurale de la dalle de roulement. En voici une :



La dalle n'est pas armée pour le cisaillement. La vérification est donc effectuée selon le chiffre 4.3.3.2 de la SIA 262 :2013.

Cinq situations ont été étudiées pour le poinçonnement. Voici les résultats :

	Schéma section de contrôle	Schéma mécanisme de rupture en flexion	Conformité
Porte-à-faux 1 roue			1,35
Porte-à-faux 2 roues			0,77
Entre âmes 1 roue			1,60
Entre âmes 2 roues			1,50
Entre âmes 4 roues			0,95

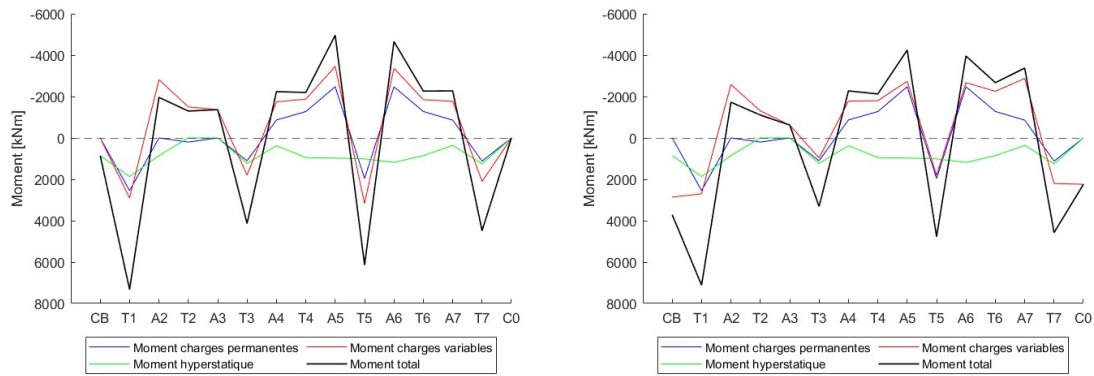


## C Calculs liés au projet d'intervention

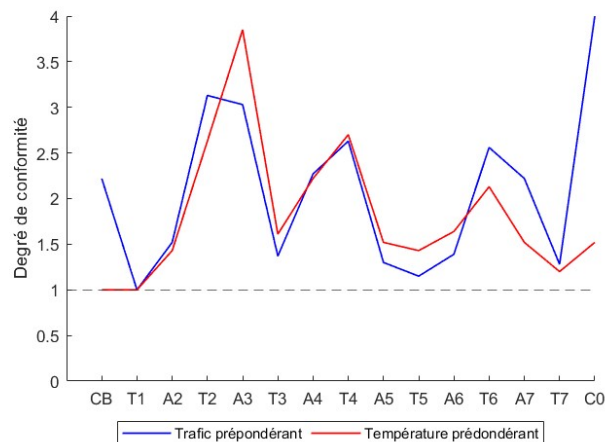
Voici les principaux calculs effectués durant le projet d'intervention.

### C.1 Redistribution des efforts lors des clavages

La figure suivante présente les redistribution des efforts de flexion dans le tablier. A gauche, le trafic est prépondérant. A droite, la température est prépondérante.



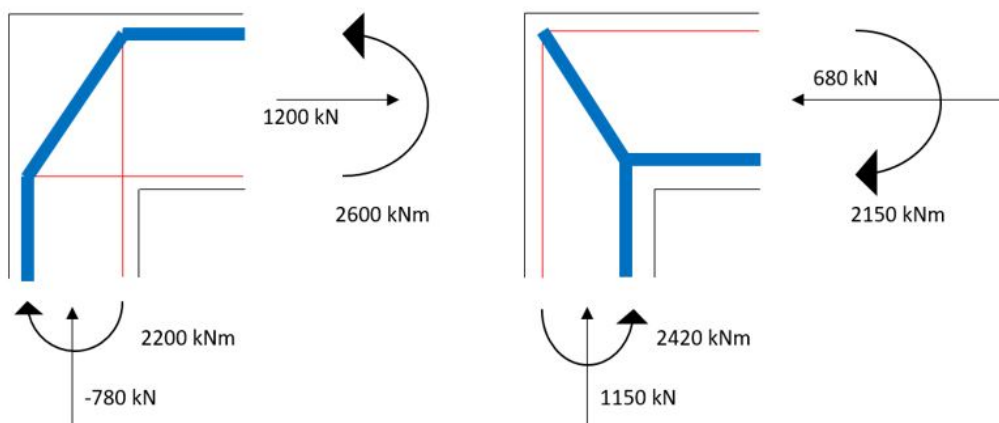
La figure suivante présente les degrés de conformité du tablier à la flexion. Le trafic est déterminant au milieu de l'ouvrage alors que la température devient déterminante près des culées.





## C.2 Efforts dans les culées clavées

La température (à gauche sur la figure suivante) et le trafic (droite) inverse le sens de la flexion aux culées :



## D Analyses économiques et écologiques

Voici la base des prix et des émissions unitaires des différents matériaux utilisés :

	Unité	Prix unitaire
<b>Hydro-démolition et traitement des déchets</b>	CHF/m <sup>3</sup>	3000
<b>Acier d'armature (y compris mise en place)</b>	CHF/to	1500
<b>CFUP (y compris mise en place)</b>	CHF/m <sup>3</sup>	3500

Les prix comprennent le coût de fabrication mais également le transport et la mise en place des matériaux.

Ci-dessous, le tableau explique les émissions des postes principaux. La démolition et le traitement des déchets ne sont pas pris en compte.

	Unité	Emission unitaire
<b>CFUP</b>	to CO <sub>2</sub> eq / to	0.669
<b>Acier d'armature</b>	to CO <sub>2</sub> eq / to	1.2
<b>Asphalte</b>	to CO <sub>2</sub> eq / to	0.08
<b>Transport</b>	kg CO <sub>2</sub> eq / to /km	0.118