

Pont d'Aigremont: remise en état d'un géant aux pieds d'argile

Construit à la fin des années 1970 pour éviter une zone active de glissements de terrain, le pont d'Aigremont a vu sa sécurité mise à mal par l'action combinée d'une masse en mouvement prenant appui sur l'une de ses piles et par l'érosion des fondations de cette dernière suite au déplacement du torrent de la Raverette. Parallèlement aux travaux de sécurisation, la dalle de roulement et les culées ont été rénovées.

Caroline Myhre, Georg Schaeren, Lucien Bidaud, Claude Broquet, Hartmut Mühlberg, Jean-Michel Zweiacker et Philippe Morel

Le pont d'Aigremont se situe à la sortie du Sépey (VD), sur la route cantonale RC 706 qui donne accès au village des Diablerets et au col du Pillon. D'une longueur de 514.8 m et d'une largeur de 9.8 m, il constitue le plus grand ouvrage construit sur les routes cantonales vaudoises. Ce pont de type flottant se compose de six travées variant de 48.3 m à 109 m et de cinq piles, dont la plus haute atteint 92.4 m (voir encadré p. 10).

Antérieurement à la construction du pont d'Aigremont, cette portion de la RC 706 longeait les flancs géologiquement instables du vallon de la Raverette. En 1972, suite à un accident, le Service des routes du Canton de Vaud (actuellement Direction générale de la mobilité et des routes [DGMR]) mandate un géologue afin d'effectuer des investigations sur le risque de chutes de blocs sur ce tronçon.

Une situation géologique complexe

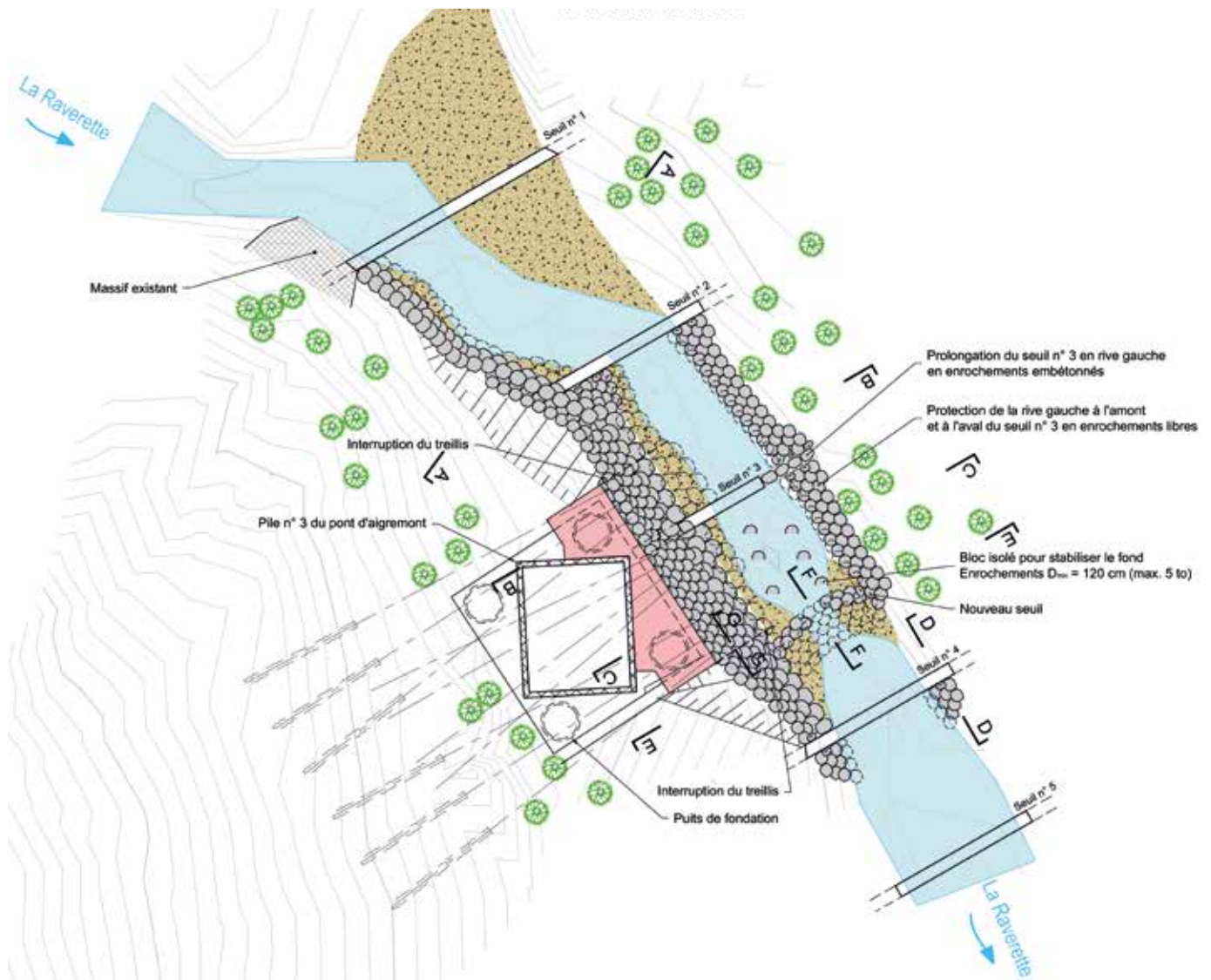
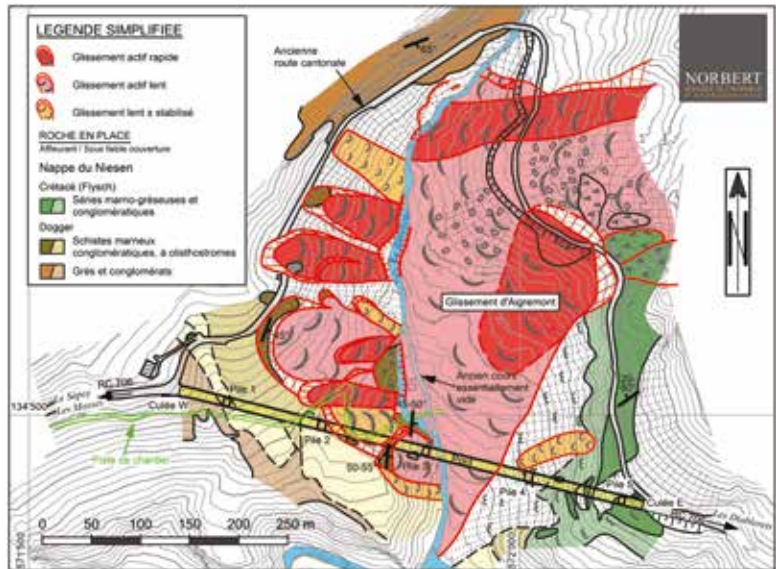
La rive gauche de ce vallon est en effet le siège d'une importante instabilité, combinaison complexe d'un tassement rocheux dans sa partie supérieure, d'un éboulement dans sa partie médiane et d'un glissement dans sa partie inférieure. Des mouvements rapides sont mis en évidence par les relevés topographiques à proximité de la route cantonale. En rive droite, le versant est très raide en amont de la route; le rocher affleurant ou subaffleurant est formé de grès et de conglomérats en bancs très redressés. En aval, le soubassement rocheux est constitué de

schistes argileux à gros blocs (olistostromes). Ce sont ces schistes s'altérant en matériaux argileux qui sont la cause fondamentale des glissements sur cette rive (**fig. 1**).

À la suite de nouvelles chutes de blocs et d'affaisements de la route, un deuxième rapport géologique datant de 1975 conclut, qu'au vu de l'ampleur des instabilités constatées, seul l'évitement de ce secteur dangereux par un pont représente une solution pérenne. Le Service des routes décide alors de réaliser ce nouvel ouvrage, construit entre 1978 et 1981. En raison de la nature du terrain, les piles 2 à 5 sont fondées chacune sur quatre puits de 2.6 m de diamètre allant chercher la roche saine comme appui. Parallèlement, sont entrepris des travaux visant à stabiliser le profil en long du torrent de la Raverette par l'aménagement de six seuils. Depuis sa construction, le pont d'Aigremont n'a jamais fait l'objet d'une réfection, seul l'entretien courant a été effectué.

Glissements à répétition

Durant les années qui suivent, le glissement principal sur le versant gauche du vallon, régulier et de grande ampleur, provoque la déstabilisation des seuils aménagés et un abaissement du fond du lit de la Raverette, qui se voit poussé en direction de la pile 3, érodant les remblais stabilisants mis en place au pied de cette dernière lors de la construction et exposant les puits de fondation aval, dont la base se situe à une dizaine de mètres sous le fond du vallon (**fig. 5**).



- 1 Carte géologique du vallon de la Raverette (Norbert SA Géologues-Conseils)
- 2 Le pont d'Aigremont, entre Le Sépey et Les Diablerets; à l'arrière-plan, on distingue le tracé de l'ancienne route cantonale.
- 3 Plan du réaménagement du cours de la Raverette et des travaux de confortation de la pile 3 (Stucky SA)

En 1999, un glissement de terrain superficiel se produit en rive droite de la Raverette, à l'amont de cette même pile 3. L'instabilité se déclenche en haut du versant, qui recule de plusieurs mètres (6 m à l'axe du pont), et se répercute jusqu'à sa base. D'une longueur de 30 m selon la pente, pour une largeur de 50 m, la masse en mouvement se constitue d'une couche altérée de 3 à 8 mètres d'épaisseur glissant sur la roche saine sous-jacente; le plan de glissement présente une inclinaison d'environ 38°.

La partie centrale de cette masse ainsi qu'un gros bloc de 50 m³ déplacé d'une quinzaine de mètres s'appuient contre la pile (fig. 4) alors que les ailes du glissement débordent du massif de fondation, la partie nord descendant même jusqu'à la Raverette. L'épaisseur des matériaux s'appuyant contre la pile et le fait que le glissement s'arrête plus bas dans le versant montrent clairement que la pile subit leur poussée. Le glissement a entraîné également le soutènement par clouage mis en place dans le haut du versant à l'époque de la construction du pont.

Sécurité structurale insuffisante

En 2008, un complément d'étude réalisé dans le cadre de la surveillance du site indique que la pile ne montre pas de signes d'instabilité ou de fissures apparentes, bien que la sécurité structurale des puits soit jugée insuffisante. Toutefois, une poursuite de cette évolution risquerait de dénuder et d'affouiller toute la fondation. La moindre augmentation des efforts tranchants dans les puits pourrait alors déclencher leur rupture fragile.

En 2013, un contrôle des ancrages stabilisant le terrain au droit de la fondation de la pile 4 met en évidence une corrosion importante de leurs têtes: la tension résiduelle des tirants d'ancrage se révèle en général bien inférieure à la tension initiale appliquée lors de la construction de l'ouvrage. De plus, certains ancrages ont disparu. Il est donc devenu nécessaire de les remplacer totalement.

Après une inspection générale de l'ouvrage au printemps 2012, le Service des routes constate également la nécessité d'assainir la dalle du pont et de renouveler l'étanchéité et le revêtement, compte tenu des dégradations observées. Deux mesures distinctes se dessinent alors pour traiter la pathologie du pont d'Aigremont: une mesure sécuritaire qui concerne les fondations des piles 3 et 4; une mesure d'entretien relative à l'assainissement de la dalle du tablier.

Travaux de sécurisation

La situation impose de réaménager le lit du torrent en amont et en aval de la pile 3 afin de stopper l'érosion due à la Raverette, de protéger la fondation de cette pile, de créer un renforcement en béton sur la face adjacente au torrent et d'ancrer ce renforcement au moyen de deux rangées d'ancrages afin de garantir la sécurité structurale de cette fondation (fig. 6) et, enfin, de remplacer la totalité des ancrages de la pile 4 (fig. 7). Ces travaux ont débuté au printemps 2015.

Le réaménagement du cours d'eau (fig. 3) a consisté, d'une part, à protéger par enrochements embétonnés la berge en rive droite au droit de la pile 3 et, d'autre part, à stabiliser le profil en long de la Raverette par le renforcement des appuis latéraux des seuils existants ainsi que par l'aménagement d'un nouveau seuil en enrochements embétonnés de l'ordre de 1 m de hauteur en aval du secteur.

Au final, plus de 40 m de berge en rive droite ont été protégés sur une hauteur moyenne d'environ 2.5 m. Plus de 500 t d'enrochements et 200 m³ de béton ont été nécessaires au renforcement de la Raverette dans une zone difficile d'accès. Des mesures environnementales ont été intégrées lorsque la configuration du cours d'eau le permettait, le passage à poissons au droit des seuils aménagés a ainsi été amélioré par l'aménagement de bassins en pied d'ouvrage. Ces travaux ont été réalisés conjointement aux travaux de sécurisation de la pile 4 par la mise en place de nouveaux ancrages (la force totale des tirants d'ancrage atteignant 30 000 kN).

Dès les travaux en rivière terminés, les travaux d'ancrage et de sécurisation de la pile 3 ont été exécutés entre avril et novembre 2015. Il a été décidé de reprendre la poussée de terre agissant contre le pied de la pile 3 par des tirants d'ancrage. Une étude géotechnique a permis de quantifier les efforts. A l'origine, le pied de cette pile n'était pas ancré. Le tracé des tirants d'ancrage (total de la force de précontrainte: 18 600 kN) devait éviter les quatre puits de fondation, l'armature inférieure de la fondation ainsi que l'évidement situé dans la partie centrale de la pile. Il a été décidé de créer un massif d'ancrage autour de la pile, ce qui permet non seulement l'introduction des efforts d'ancrage dans le pied de la pile, mais en plus de faire passer un certain nombre de tirants d'ancrage à côté de la fondation de la pile.

Le dossier d'appel d'offres prévoyait d'acheminer les matériaux au pied des piles moyennant un blondin. Malgré une pente de près de 30°, l'entreprise adjudicataire a privilégié la remise en service de l'ancienne piste de chantier. L'accès au pied des piles représente une partie importante des coûts des travaux. Les précipitations de début mai 2015 ont réactivé un glissement du versant droit, créant une niche d'arrachement de près de 1 m de hauteur en aval de la pile 2. Au fond du vallon, l'ouvrage provisoire de la piste de chantier traversant le torrent de la Raverette a été démolie par les eaux de crues. Ces dégâts ont nécessité la réfection et la modification de la piste.

Rénovation du tablier

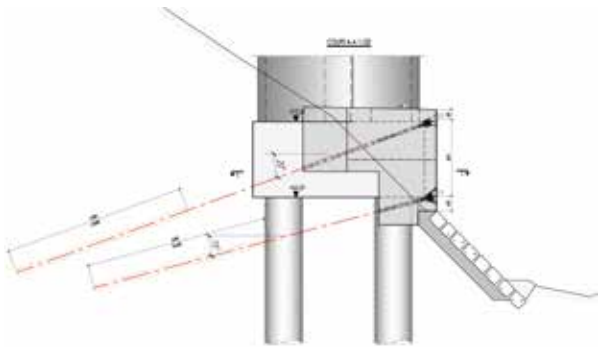
Après 35 ans d'exploitation, la structure en béton armé précontraint du pont d'Aigremont était en général en bon état. Des traces de corrosion localisée des armatures étaient visibles sous les porte-à-faux du tablier, autour des puits d'évacuation des eaux et des pipettes, où l'eau chargée de chlorures s'est infiltrée et a dégradé la structure.



4



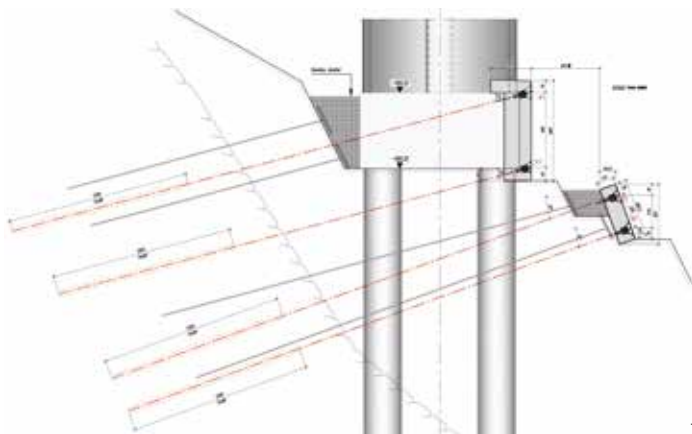
5



6a



6b

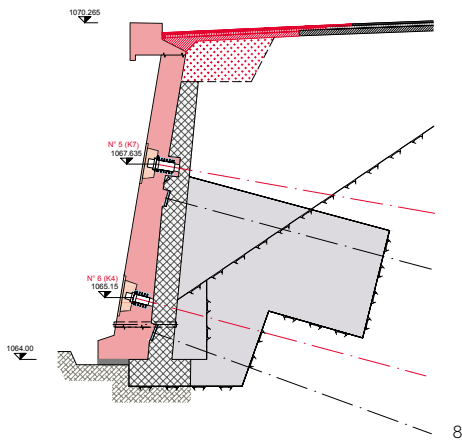


7a



7b

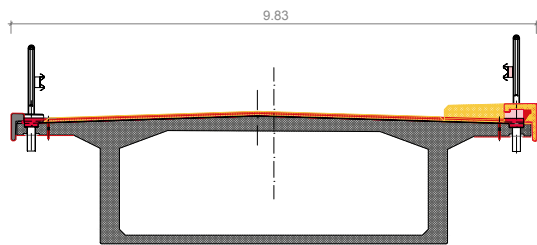
- 4 Glissement de terrain venant s'appuyer contre la pile 3
- 5 Erosion du remblai de protection au droit de la pile 3
- 6 Travaux de sécurisation de la pile 3, en coupe (a) et sur le terrain (b) (Monod-Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA)
- 7 Travaux de sécurisation de la pile 4, en coupe (a) et sur le terrain (b) (Monod-Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA)



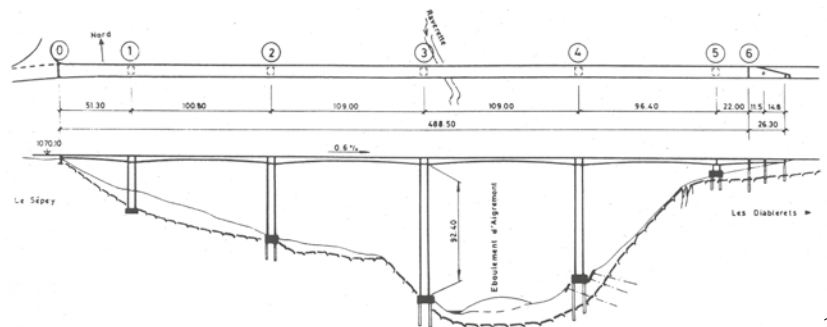
8



10



9



11

- 8 Parement aval de la culée du côté Le Sépey (INGPHI SA)
 9 Section type du tablier (INGPHI SA)
 10 Réfection de la dalle de roulement
 11 Situation et coupe longitudinale
 (Sauf mention, tous les documents illustrant cet article sont de la DGMR.)

Le revêtement en béton bitumineux était usé et fissuré. Le trottoir disposé côté aval a subi les agressions du gel. En effet, les bordures étaient déchaussées et le revêtement fissuré. Les joints de chaussée disposés au droit de chacune des culées n'étaient plus étanches et laissaient l'eau s'infiltrer dans les culées. En conséquence, des traces de corrosion ont été décelées sur un des appuis glissants du pont à la culée côté Le Sépey. Cette dégradation pouvait conduire à court terme au déchaussement de la plaque de glissement suite aux mouvements saisonniers du tablier.

Le trottoir a été démolé pour permettre le remplacement de l'étanchéité du tablier sur toute sa largeur. Compte tenu de la configuration de la route cantonale RC 706, du nombre restreint de piétons sur cet axe et selon accord avec la commune d'Ormont-Dessous, le trottoir n'a pas été reconstruit, d'autant plus qu'il compliquait les opérations de déneigement. Les éléments de bordure du tablier au droit des grilles d'évacuation ont été remplacés avec l'assainissement de chaque puits. De nouveaux joints de chaussée similaires au modèle existant ont été mis en place. Une étanchéité de type lés bitume polymère a été collée sur toute la surface du tablier. Afin de ne pas surcharger le tablier avec des épaisseurs de revêtement plus importantes que les couches d'origine, la mise en œuvre de deux couches

LE PONT D'AIGREMENT

Ouvrage en béton armé précontraint construit par encorbellements successifs, le pont d'Aigremont compte six travées (d'une longueur de 51.3 m, 100.8 m, 109 m, 109 m, 96.4 m et 48.3 m) et cinq piles (92.4 m pour la plus haute). Le tablier est constitué d'un caisson de hauteur variable de 5.5 à 2.3 m avec des âmes verticales. La largeur hors tout du tablier est de 9.82 m. Le système statique est celui d'un pont flottant où les trois piles centrales sont liées au tablier alors que ce dernier repose sur les piles d'extrémités et les culées au moyen d'appuis glissants. Les piles sont des caissons d'une forme de tronc de pyramide à base rectangulaire dont les quatre faces ont un fruit de 1.2%. La culée côté Sépey et la pile 1 sont fondées directement sur de la roche saine par l'intermédiaire de semelles superficielles. Les piles 2 à 5 ainsi que la culée côté Diablerets sont fondées sur un massif en béton supporté par un groupe de puits de 2.6 m de diamètre (**fig. 11**).

d'asphalte coulée MA 11S a été retenue. La première de 45-55 mm assure la fonction de protection pour l'étanchéité et de liaison et la seconde de 30 mm celle de couche de roulement.

Rénovation des culées atteintes par la RAG

Les murs d'aile de la culée côté Le Sépey présentent un réseau de fissures généralisées dues aux effets de la réaction alcali-granulat (RAG) dans le béton. Le mur amont est largement fissuré dans sa masse alors que celui aval est moins atteint par ces effets de gonflement. Le mur d'aile amont a été reconstruit. Le mur aval a été hydrodémoli sur des profondeurs de 5 à 30 cm et un nouveau parement d'une épaisseur minimale de 45 cm a été bétonné devant le mur d'origine (**fig. 8**).

Les deux culées du pont d'Aigremont sont stabilisées par des tirants précontraints ancrés dans le rocher. Ces ancrages ont été testés afin de déterminer leur charge résiduelle. Toutefois, les scellements réalisés sur toute la longueur des tirants n'ont pas permis le décollement de leur tête et par conséquent la vérification de leur ancrage au massif. Compte tenu du risque de rupture des ancrages précontraints sur la stabilité des culées, des nouveaux tirants d'ancrage permanents ont été mis en œuvre. La vérification des forces d'ancrage nécessaires selon la méthode du prisme de poussée a montré que les unités mises en place lors de la construction étaient bien adaptées. La totalité de la capacité des ancrages existants a ainsi été installée pour les nouveaux ancrages. Leur mise en tension a été limitée à

une force correspondant à 70% de la force d'ancrage de manière à ne pas créer de désordre dans le sol derrière le mur et pour ne pas surcharger les nouveaux tirants lors de la rupture des anciens.

Les travaux d'assainissement du tablier et des culées ont débuté au printemps 2016 pour se terminer en automne de la même année. Etant donné la situation géographique de l'ouvrage, seule la période estivale offrait des conditions météorologiques favorables pour garantir des travaux de qualité.

Les ingénieurs et les entreprises de construction ont proposé des solutions très intéressantes pour les diverses interventions sur cet ouvrage, permettant ainsi de contenir les coûts: la facture finale se monte à 4.8 mio pour un budget de 6.15 mio.

Caroline Myhre, géologue dipl. SJSU, Norbert SA Géologues-Conseils (géologie)

Georg Schaeren, géologue dipl. EPFZ, hydrogéologue dipl. UNINE, Norbert SA Géologues-Conseils (géologie)

Lucien Bidaud, ingénieur environnement EPFL, Stucky SA (aménagement du cours d'eau)

Claude Broquet, dr ès sciences techniques, ingénieur civil EPFL, INGPHI SA Lausanne (assainissement du tablier et des culées)

Hartmut Mühlberg, ingénieur REG A, Monod-Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA (renforcement des fondations des piles 3 et 4)

Jean-Michel Zweiacker, ingénieur, Direction générale de la mobilité et des routes, Canton de Vaud (représentant du maître d'ouvrage)

La nouvelle forme.

Fenêtres pour toit plat VELUX avec vitrage bombé

Compatible
avec des produits
VELUX de protection
contre la chaleur
et le soleil



La nouvelle forme qui empêche l'eau de pluie de s'accumuler sur la vitre. La nouvelle forme qui permet un montage sur un toit affichant un angle d'inclinaison de jusqu'à 0°. Fenêtres pour toit plat VELUX avec vitrage bombé. Disponibles en huit dimensions différentes. Conviennent à chaque besoin et à chaque pièce. Ouvrez la voie à un nouveau type de fenêtres pour toit plat. Objets BIM VELUX et informations complémentaires sur velux.ch/vitragebombe

VELUX®