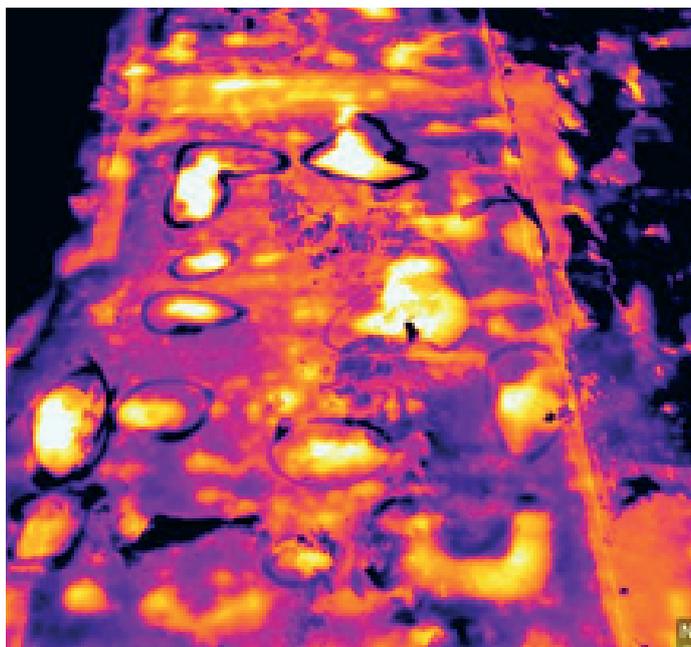
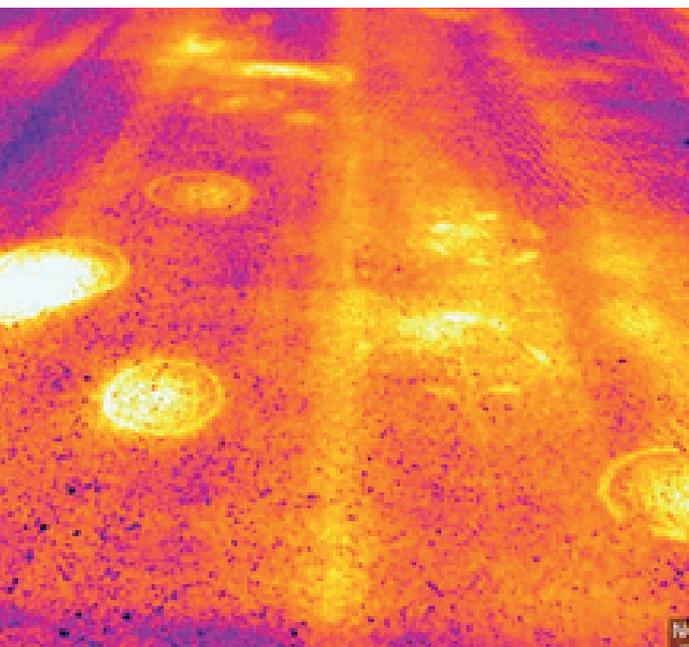




BULLETIN

OUVRAGES D'ART

n° 83



Février 2024

Sommaire

■ Les projets

Mise en œuvre d'une étanchéité sur support de grande porosité par température ambiante élevée 5

Laurent Chat, Laurent Sauger

Construction de la Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne – Partie 2 : Essais de réception et difficultés techniques rencontrées 13

Bruno Godart, François Toutlemonde, Pierre Marchand, Stéphane Rocher, Sophie Andreatta, Serge Favre, Sébastien Letort, Jérôme Moulin

■ La méthodologie

Les apports de l'imagerie et de la reconnaissance des formes pour la gestion de patrimoine des ouvrages d'art – Partie 2 : recensement et identification 36

Constantin Ruellet, Pierre Charbonnier, Philippe Foucher, Christophe Heinkele, Hervé Davias, Thibaut Perrin, Adrien Dodane

Site internet PILES 57

David Tronchet

■ Les dernières publications OA du Cerema

Note d'information – aciers autopatinables 63

Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art - Fascicule 32 : Ponts en béton précontraint 64

Analyse des risques des ponts en situation de crue 65

Remerciements : La mise au point et la validation des articles publiés dans le présent numéro du bulletin OA ont été faites par Christelle Cros du département des Pyrénées Orientales, Renaud Leconte de Setec Diades, Sébastien Defaux du Cerema NC, Jean-Christophe Carles du Cerema Méditerranée, Christian Tessier de l'Université Gustave Eiffel, Pierre Corfdir, Gaël Bondonet et Antoine Théodore du Cerema ITM.

Version : du 7 février 2024

Directeur de la publication : Pascal BERTEAUD

Directeur délégué : David ZAMBON

Comité éditorial :
Roland ABOU (Cerema ITM)
Gaël BONDONET (Cerema ITM)
Cécile BOUVET AGNELLI (Cerema ITM)
Jean-Christophe CARLES (Cerema Med)
Christelle CROS (Département des Pyrénées Orientales)
Renaud LECONTE (Setec Diades)
Franziska SCHMIDT (Université Gustave Eiffel)
Christian TESSIER (Université Gustave Eiffel)

Rédaction en chef : Antoine THEODORE (Cerema ITM)

Photo de couverture : Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel – Photo Pierre Marchand

Mise en œuvre d'une étanchéité sur support de grande porosité par température ambiante élevée

Laurent CHAT¹

Laurent SAUGER²

¹ Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux – Pôle des Évaluations et Avis Techniques – 110 rue de Paris - BP 214 - 77487 Provins Cedex – laurent.chat@cerema.fr

² Cerema Centre-Est – Direction Risques, Infrastructures et Matériaux – 25 avenue François Mitterrand - CS 92 803 - 69674 Bron Cedex – laurent.sauger@cerema.fr

Résumé

Le présent article reprend les constats de désordres réalisés suite à la mise en œuvre d'une étanchéité sur un support en béton de grande porosité par une température ambiante élevée sur quatre ouvrages neufs d'un réaménagement autoroutier.

En effet, des défauts de type « cloquage » sont apparus suite à la mise en œuvre d'un procédé de type feuille préfabriquée bitumineuse avec protection en asphalte appliqué sur quatre ouvrages d'art en béton armé, dont la formule de béton du tablier est de classe d'exposition XF4.

Ces défauts, situés entre la couche d'accrochage et la feuille, se sont manifestés pendant l'application par fortes températures ou quelques mois après la réalisation des couches de chaussée restées sans circulation lors d'un épisode de fortes chaleurs.

Les auteurs tiennent à remercier le maître d'œuvre Setec pour sa contribution à la rédaction de cet article.

I. Présentation de l'opération

L'opération concerne le réaménagement du nœud autoroutier de Chambéry comprenant des travaux sur le réseau routier national non concédé et sur le réseau autoroutier concédé, dont le Maître d'Ouvrage est AREA. Les trois communes concernées par ce projet sont Chambéry, La Motte-Servolex et Voglans, toutes localisées dans le département de la Savoie (73).

Le Cerema est intervenu en contrôle extérieur sur cette opération, pour le compte du maître d'ouvrage, pour une mission de contrôle de la mise en œuvre des feuilles préfabriquées par caméra thermique à réception.

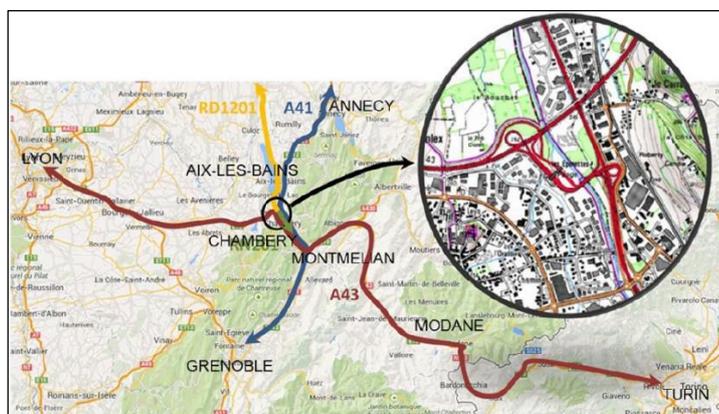


Figure 1 : Plan de situation

Ce nœud autoroutier de Chambéry permet d'assurer les échanges entre les 3 axes structurants suivants :

- L'autoroute A41 reliant Grenoble à Genève ;
- L'autoroute A43 reliant Lyon à Turin via Chambéry ;
- La VRU¹: ou RN 201 composée par la section à 2x3 voies en traversée de Chambéry.

Cette opération comprend notamment :

- la création d'une nouvelle bretelle VRU Sud (Chambéry) vers l'A41 direction Anney (①), nécessitant la construction de 3 nouveaux ouvrages d'art :
 - un ouvrage de type « saut-de-mouton » (②), permettant le passage de la voie d'accès à la VRU depuis le giratoire de La Motte-Servolex sous la nouvelle bretelle vers Anney,
 - un ouvrage au-dessus du bassin d'orage « Poivre Rouge » (③),
 - un ouvrage pour franchir la voie ferrée et la rue de Belle-Eau, en parallèle de l'ouvrage existant de l'A41.
- le remplacement des ouvrages d'art à 2 voies de franchissement de la Leysse (PI 3992 et PI 3991) par 2 nouveaux ouvrages d'art à 3 voies (④ et ⑤).

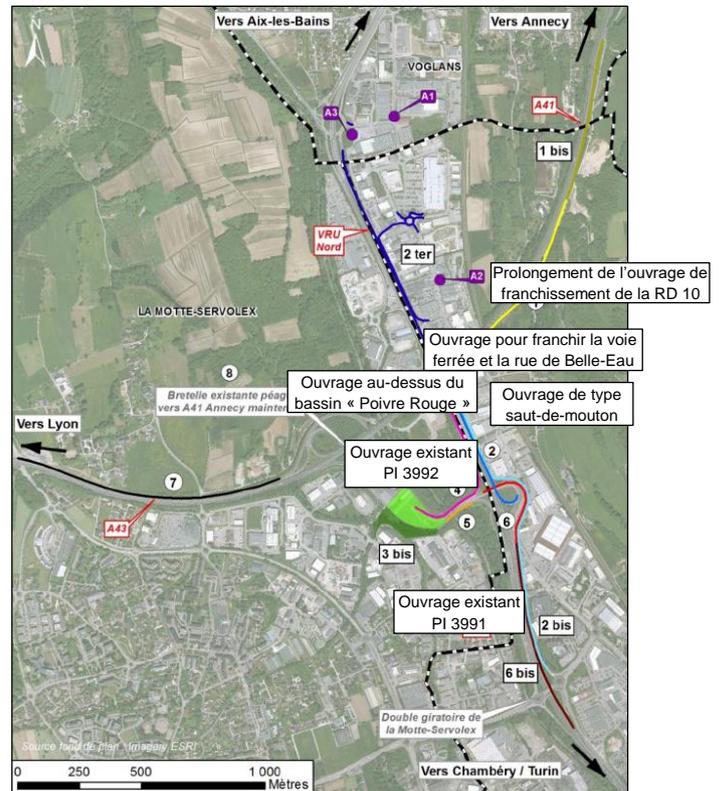


Photo 1 : Plan de description du projet (source Egis, mars 2017)

II. Caractéristiques des ouvrages d'art

Ouvrage 1 : OA Leysse Nord (④)

- Ouvrage en béton armé de classe d'exposition XF4,
- Ouvrage mixte acier-béton intégral de type multipoutre de 34,75 m de portée,
- Hourdis coulés sur prédalles semi-collaborantes (en transversal),
- Poutres HL 1100 M – S355 K2W+M (acier auto patinable).

Ouvrage 2 : Saut de mouton (②)

- Ouvrage PICF en béton armé de classe d'exposition XF4,
- Portée droite de 14,5 m,
- Traverse d'épaisseur constante de 80 cm mono déversée.

Ouvrage 3 : Bassin poivre rouge (③)

- Ouvrage en béton armée de classe d'exposition XF4,

¹ VRU : Voie rapide urbaine

- Structure monolithique sur 3 niveaux comportant un bassin au R-1, un local technique au RdC et la bretelle au R+1 avec la chaussée.

Ouvrage 4 : OA Lysse Sud (5)

- Ouvrage en béton armé de classe d'exposition XF4,
- Ouvrage mixte acier-béton intégral de type multipoutre de 34,75 m de portée,
- Hourdis coulé sur prédalles semi-collaborantes (en transversal),
- Poutres HL 1100 M – S355 K2W+M (acier auto patinable).

Ces ouvrages ont en commun :

- une formule de béton répondant à la classe d'exposition XF4,
- un procédé d'étanchéité de type « feuille préfabriquée bitumineuse avec protection en asphalte (FPA²) » sous Avis Technique Cerema.

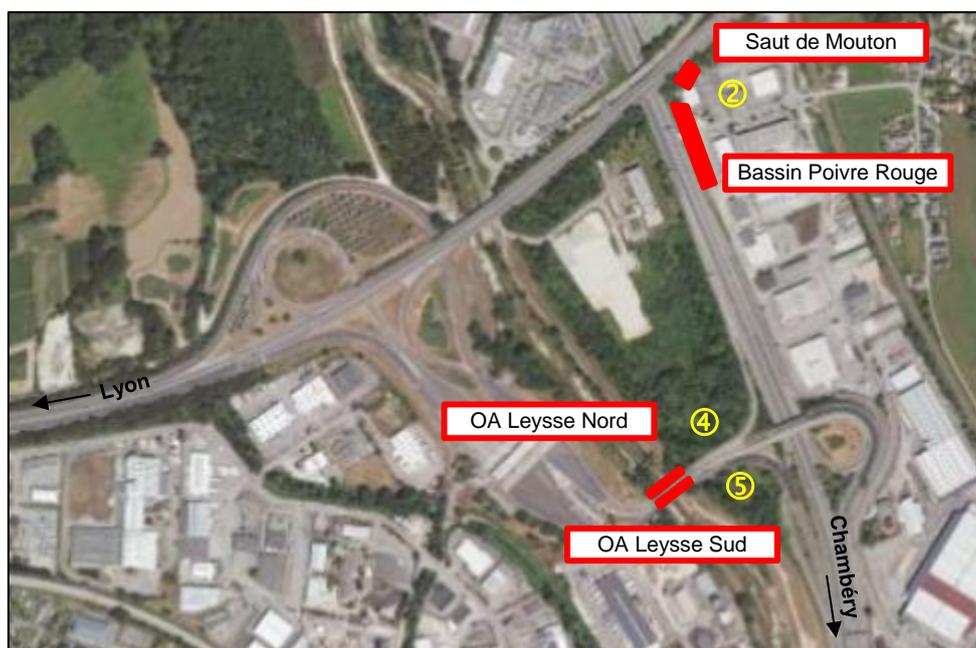


Photo 2 : localisation des différents ouvrages d'art étanchés (Géoportail)

III. Déroulé des travaux et constats par ouvrage

Ouvrage 1 : OA Lysse Nord, demi tablier Nord④

- Coulage du béton : juillet 2021
- Mise en œuvre de l'étanchéité « FPA » sur enduit d'imprégnation : fin août 2021
- Mise en œuvre des enrobés : début septembre 2021
- Mise en circulation à la suite des travaux
- Pas de désordres constatés à ce jour

Ouvrage 1 : OA Lysse Nord, demi tablier Sud④

- Coulage du béton : mai 2022

² FPA : Feuille Préfabriquée + Asphalte selon le fascicule 67 - titre I

- Suite aux désordres apparus sur les ouvrages précédemment étanchés (ouvrages 2, 3 et 4), réalisation de planches d'essais avec des feuilles préfabriquées (« FP » de « FPA » et « FPM ») mises en œuvre sur deux bouche-pores différents et protection par un géotextile blanc : août 2022
- Constatation d'un cloquage sévère des planches d'essais, à l'interface couche d'accrochage / feuille, dans les 24 heures suivant la mise en œuvre : août 2022 (mise en attente des travaux d'étanchéité)
- Enlèvement des planches d'essais non-concluantes : août 2022
- Décision de changement de procédé : août 2022
- Mise en œuvre de l'étanchéité « SEL³ » sur bouche-pore : septembre 2022 (le procédé initialement prévu avec « FPA » a été changé au profit d'un « SEL » suite aux désordres apparus sur les ouvrages précédemment étanchés)
- Mise en œuvre des enrobés : couche de liaison en septembre 2022, puis reprofilage et couche de roulement en décembre 2022
- Mise en circulation à la suite des travaux
- Pas de désordres constatés à ce jour

Ouvrage 2 : Saut de mouton^②

- Coulage du béton : juillet 2021
- Mise en œuvre de l'étanchéité « FP⁴ » sur enduit d'imprégnation : novembre 2021
- Protection par géotextile : entre décembre 2021 et janvier 2022
- Mise en œuvre de l'asphalte + protection par géotextile : janvier 2022
- Mise en œuvre d'une couche granulaire de 15 cm d'épaisseur sur la protection : février 2022
- Mise en œuvre des enrobés (épaisseur moyenne 7,5 cm. 2 zones à 5 cm mais non concernées par des défauts) : mars 2022
- Constat de déformation des enrobés (ouvrage hors circulation) suite à un épisode de forte chaleur : fin mai 2022



Photo 3 : localisation des défauts sur enrobé (Cerema)

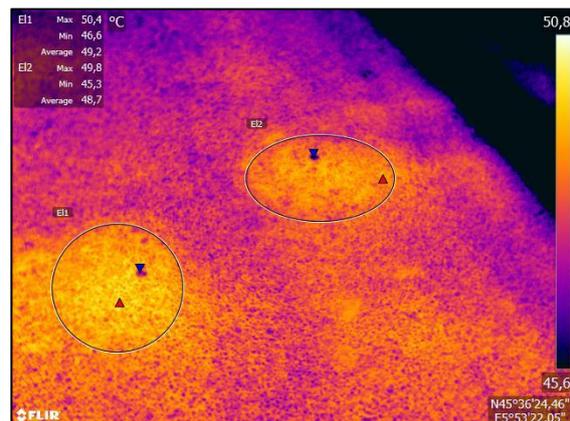


Photo 4 : repérage des défauts par infra-rouge (Cerema)

- Rabotage d'une partie de l'épaisseur de la couche de roulement, afin d'améliorer la détection des défauts par thermographie

³ SEL : Système d'Étanchéité Liquide selon le fascicule 67 - titre I

⁴ FP : Feuille Préfabriquée du procédé FPA



Photo 5 : localisation des défauts après rabotage (Cerema)

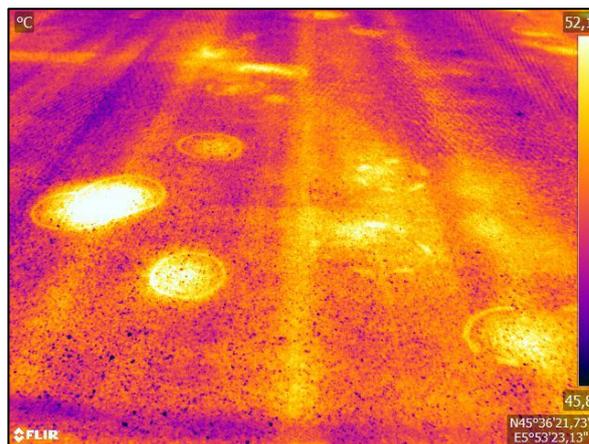


Photo 6 : repérage des défauts par infra-rouge (Cerema)

- Enlèvement de la couche de roulement et du complexe d'étanchéité : août 2022 (suite aux désordres apparus fin mai 2022)
- Décision de changement de procédé : août 2022 (suite à la réalisation de planches d'essais non-concluantes sur l'ouvrage du bassin « Poivre Rouge » - cf. ci-après)
- Mise en œuvre de l'étanchéité « SEL⁵ » sur bouche-pore : septembre 2022
- Mise en œuvre des enrobés : septembre 2022
- Mise en circulation à la suite des travaux
- Pas de désordres constatés à ce jour

Ouvrage 3 : Bassin poivre rouge^②

- Coulage du béton : septembre à octobre 2021
- Mise en œuvre de l'étanchéité « FP » sur enduit d'imprégnation : janvier 2022
- Mise en œuvre de l'asphalte + protection par géotextile recouvert d'une couche granulaire de 15 cm d'épaisseur à la suite : fin janvier 2022
- Mise en œuvre des enrobés (épaisseur moyenne 9 cm, mini 8 cm) : mars 2022
- Désordres constatés en même temps que sur l'ouvrage « Saut de Mouton » : mai 2022
- Rabotage d'une partie de l'épaisseur de la couche de roulement, afin d'améliorer la détection des défauts par thermographie : août 2022
- Enlèvement de la couche de roulement et du complexe d'étanchéité : août 2022
- Réalisation de planches d'essais de nuit avec des feuilles préfabriquées (« FP » de « FPA » et « FPM⁶ »), sous supervision du contrôle extérieur, dans des conditions de température descendante et avec mise en œuvre de deux bouche-pores et protection par géotextile blanc : août 2022
- Constatation d'un cloquage sévère à l'interface support / feuille (sous la feuille) dans les 24 heures suivant la mise en œuvre

⁵ SEL : Système d'Étanchéité Liquide selon le fascicule 67 - titre I

⁶ FPM : Feuille Préfabriquée Monocouche selon le fascicule 67 - titre I

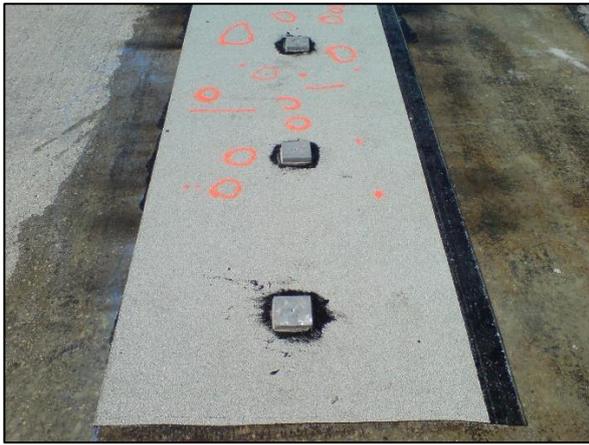


Photo 7 : localisation des défauts sur planche d'essais FPM (Cerema)

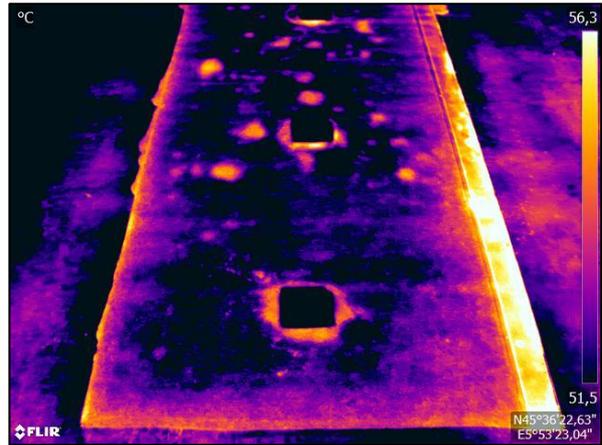


Photo 8 : repérage des défauts par infra-rouge (Cerema)

- Enlèvement des planches d'essais non-concluantes : août 2022
- Décision de changement de procédé : août 2022
- Mise en œuvre de l'étanchéité « SEL⁷ » sur bouche-pore : septembre 2022
- Mise en œuvre des enrobés : septembre 2022
- Mise en circulation à la suite des travaux
- Pas de désordres constatés à ce jour

Ouvrage 4 : OA Leysse Sud^⑤

- Coulage du béton : mai 2022
- Mise en œuvre de l'étanchéité « FP » sur bouche-pore : juillet 2022
- Constatation d'un cloquage sévère, à l'interface support / feuille (sous la feuille), dans les 24 heures suivant la mise en œuvre selon les prescriptions de l'Avis technique et du cahier des charges de pose du procédé



Photo 9 : localisation des défauts (Cerema)

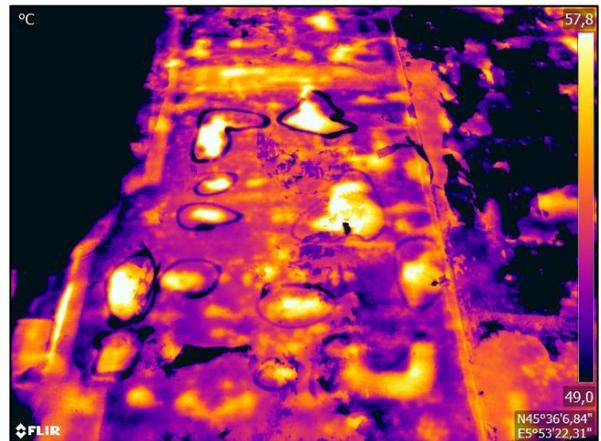


Photo 10 : repérage des défauts par infra-rouge (Cerema)

- Mise en place d'une protection granulaire et d'une couche d'enrobé pour mise en circulation provisoire lors de la réalisation de travaux sur l'ouvrage Leysse Nord : août 2022

⁷ SEL : Système d'Étanchéité Liquide selon le fascicule 67 - titre I

- Enlèvement de l'étanchéité « FP » : septembre 2022 (après rebasculement de la circulation sur l'OA de Leysse Nord)
- Décision de changement de procédé : août 2022 (suite à la réalisation de planches d'essais non-concluantes sur l'ouvrage du bassin « Poivre Rouge »)
- Mise en œuvre de l'étanchéité « SEL » sur bouche-pore : octobre 2022
- Mise en œuvre des enrobés : octobre 2022
- Mise en circulation à la suite des travaux
- Pas de désordres constatés à ce jour

V. Phénomènes possiblement en jeu

La classe d'exposition XF4, commune à toutes les formulations de béton utilisées sur les tabliers de ces ouvrages, concerne des bétons exposés à des sels de déverglaçage et soumis à des cycles de gel sévère, ou à des cycles de gel modéré, dans le cas particulier des pièces ayant une forte saturation en eau.

La résistance au gel de ces bétons est améliorée par l'addition d'un adjuvant entraîneur d'air qui génère un réseau de fines bulles uniformément réparties dans la pâte cimentaire, accroissant la réserve d'expansion de l'eau interne en cas de gel et permettant ainsi une meilleure répartition des pressions hydrauliques.

Sur ces quatre ouvrages, a été mis en œuvre un procédé d'étanchéité de type « feuille préfabriquée bitumineuse avec protection en asphalte (FPA⁸) » sous Avis Technique Cerema. Ces procédés sont sensibles au cloquage qui se traduit par un soulèvement de la couche d'étanchéité, dû à une augmentation de pression de l'air et/ou de la vapeur d'eau à l'interface entre le support en béton et la couche d'étanchéité.

Il paraît envisageable que sur ces ouvrages, la concomitance d'un support ayant une porosité élevée avec la mise en œuvre d'un type de procédé sensible au cloquage par des températures élevées ait conduit aux désordres observés.

Il est à noter qu'actuellement il n'y a pas de prescriptions sur la classe d'exposition des formules de béton recouvertes par les procédés d'étanchéité. A noter également que sur d'autres ouvrages de cette opération, ce même type de procédé a été mis en œuvre sur des tabliers avec des formules de béton identiques, et donc répondant à la même classe d'exposition, sans que des désordres n'apparaissent.

VI. Suites données

Suite aux constatations des désordres, la Commission des Avis Techniques Cerema « Étanchéité des ponts routes » a mis en place un groupe de travail afin d'étudier les causes probables d'apparition de ces désordres.

Un premier recensement d'ouvrages d'art présentant les mêmes désordres fait apparaître plusieurs dénominateurs communs, à savoir un procédé d'étanchéité par feuilles préfabriquées bitumineuses, mis en œuvre par une température ambiante élevée en journée et présentant un faible écart jour/nuit, sur un support en béton à forte porosité.

À noter que figurent également dans ce recensement deux ouvrages d'art étanchés avec un SEL appliqué sur le même type de support à forte porosité.

⁸ FPA : Feuille Préfabriquée + Asphalte selon le fascicule 67 - titre I

En attendant les conclusions de ce groupe de travail, il est recommandé d'apporter une vigilance particulière lors de la réalisation de travaux d'étanchéité dans des conditions similaires à celles évoquées ci-avant.

Pour ce faire, nous décrivons ci-après quelques pistes de réflexion visant à limiter le cloquage.

Tout d'abord, dans le cas où, en application du tableau 8A du fascicule 65 du CCTG, la classe d'exposition XF3 ou XF4 est nécessaire, et lorsque cela est possible, il est recommandé de différer la mise en œuvre de l'étanchéité à des périodes où les températures sont plus douces en journée, ceci afin de limiter la création de vapeur d'eau.

D'autres dispositions peuvent également être appliquées :

- la mise en œuvre d'une protection thermique. Celle-ci peut être constituée par un géotextile blanc avec un arrosage ou recouvert d'une protection par couche granulaire. Dans ce cas, il est recherché une limitation de la montée en température des feuilles préfabriquées et donc de la génération de vapeur d'eau.
Il convient de veiller à ne pas dégrader l'étanchéité lors de la mise en œuvre des couches de protection et d'interdire toute circulation de véhicule sur ces couches.
- la réalisation des couches de chaussée dans les délais les plus brefs, en ayant pris soin de contrôler et réparer les défauts repérés sur l'étanchéité au plus proche de cette phase. Dans ce cas, cette couche apporte, outre l'isolation thermique, un effet de lest s'opposant au cloquage.
- la mise en œuvre d'une couche d'accrochage ayant une fonction de bouche-pore ou mieux de pare-vapeur.
- l'utilisation d'un procédé d'étanchéité moins sujet aux défauts de type « cloquage ».

Demande d'informations

Afin d'alimenter la réflexion du groupe de travail et d'essayer de mieux cerner les phénomènes en jeu, il est nécessaire d'effectuer un recensement.

À ce titre :

- les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, ayant des projets en cours de réalisation comprenant des supports en béton de classe d'exposition XF4 ou XF3, sont invités à réaliser un suivi particulier lors de la réalisation de l'étanchéité et après réalisation de celle-ci, et à faire remonter leurs constats (qu'il y ait apparition de désordres ou non) au Secrétariat de la Commission des Avis Techniques Cerema « Étanchéité des ponts routes » ou par l'enquête en ligne dont le lien⁹ figure en bas de page.
- de même, les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises confrontés à des désordres comparables à ceux décrits dans cet article, sur un support en béton de classe d'exposition équivalente ou non, sont également invités à communiquer leurs informations au Secrétariat de la Commission des Avis Techniques Cerema ou par l'enquête en ligne.

Ces informations permettront au groupe de travail de mieux apprécier la corrélation entre le type de procédé d'étanchéité, la classe d'exposition du béton support et les conditions météorologiques, pour s'orienter vers une éventuelle étude et des préconisations.

⁹ [Formulaire d'enquête en ligne](#)

Construction de la Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne

Partie 2 : Essais de réception et difficultés techniques rencontrées

Bruno Godart¹, François Toutlemonde², Pierre Marchand³, Stéphane Rocher⁴, Sophie Andreatta⁵, Serge Favre⁶, Sébastien Letort⁷, Jérôme Moulin⁸

¹ anciennement Université Gustave Eiffel / IFSTTAR, 5 Boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée cedex2, godart.br@orange.fr

² Université Gustave Eiffel, 5 Boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée cedex2, francois.toutlemonde@univ-eiffel.fr

³ (anciennement IFSTTAR), Cerema, ITM, DTOA, GITEX, Parc de la Haute Maison, 16 rue Galilée 77420 Champs-sur-Marne, pierre.marchand@cerema.fr

⁴ (anciennement SNC-LAVALIN), TPF Ingénierie, 3 Rue de la Renaissance, 92160 Antony, s.rocher@tpfi.fr

⁵ (anciennement SNC-LAVALIN), SETEC, 42-52 Quai de la Rapée, 75012 Paris, sophie.andreatta@setec.com

⁶ Léon GROSSE, 21 bis avenue Salvador Allendé, CS 50025 - 69676 BRON, s.favre@leongrosse.fr

⁷ Léon GROSSE, 4 Parvis Colonel Arnaud Beltrame CS 60009 – 78009 VERSAILLES, s.letort@leongrosse.fr

⁸ BAUDIN CHATEAUNEUF, 60 Rue de la Brosse, 45110 Châteauneuf-sur-Loire, jerome.moulin@baudinchateauneuf.com

Résumé

Dans le cadre du transfert de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) de son site parisien du boulevard Lefebvre à la cité Descartes à Champs-sur-Marne, une nouvelle plate-forme d'essais des structures (PFES) a été construite de 2011 à 2013. Un article précédent, paru dans le Bulletin Ouvrages d'Art n°82 du Cerema [1], a présenté les principes adoptés pour la reconstruction, le cahier des charges de cette structure, les hypothèses de conception et les diverses étapes détaillées de la construction. Deux types de béton ont été utilisés : un béton C60/75 sans fumée de silice pour le radier et les raidisseurs et un béton C80/95 avec fumée de silice pour le hourdis supérieur et les murs.

Le présent article décrit les essais de réception qui ont été menés, puis présente les études conduites pour mettre au point une formulation optimisée du béton C80/95 afin d'obtenir un module élevé, limiter les effets du retrait au jeune âge du béton et prévenir toute fissuration prématurée. Il retrace ensuite les difficultés rencontrées pour assurer une pose correcte en sous-face de la dalle des écrous nécessaires à la bonne réalisation des montages d'essai, pour aboutir à la mise en service d'un équipement exceptionnel qui aujourd'hui, dix ans après sa construction, est parfaitement fonctionnel et donne toute satisfaction à ses utilisateurs.

I. Essais de réception de la PFES

Après avoir décrit dans un article précédent [1] le cahier des charges, la conception et la construction détaillée de la Plateforme d'Essais des Structures (PFES) de l'université Gustave Eiffel, nous présentons dans le présent article les essais de réception de cet ouvrage. L'objectif des essais de réception de la dalle d'essai était de valider les rigidités calculées dans la note de calcul d'exécution, d'un point de vue statique et dynamique. Pour cela, l'entreprise Léon Grosse a rédigé en septembre 2013 une note de calcul des essais de réception de la dalle d'essai et des murs d'essai qui fait la description des essais de chargement et donne une prévision sur les déformations et modes propres susceptibles d'être mesurés. Les essais ont été réalisés par le bureau d'études Bâtiment Ouvrage d'Art Services en utilisant une partie du meccano existant de la PFES, ce meccano étant constitué par l'ensemble des bâtis métalliques et organes de fixations qui permettent de solliciter les corps d'épreuves.

I.1 Essais de chargement statique

Pour la dalle d'essai, une charge verticale descendante de 225 tonnes (2250 kN) a été appliquée et répartie sur un lot de 2*5 puits (2*5*22,5 tonnes). Pour appliquer cet effort, un portique métallique a été construit et ancré sur la dalle avec des réactions ascendantes appliquées sur deux groupes de lots de 2*5 puits de part et d'autre, soit 2*5*(11,25) tonnes (1125 kN) par groupe d'appuis. Les efforts ont été appliqués par 10 vérins, positionnés sous un châssis composé de 5 poutres métalliques (Figure 1). Le montage a été réalisé sur une alvéole de la zone d'about OUEST, sur une alvéole en zone courante (dalle d'épaisseur 90 cm), ainsi que sur une alvéole en zone de puits resserrés (dalle d'épaisseur 125 cm). Le chargement appliqué correspond à 0.75 fois le chargement fréquent (soit 0.45 fois la charge caractéristique).

Pour les murs d'essai, une charge horizontale de 40 tonnes (400 kN) répartie sur 2 puits (2 x 20 tonnes) en tête des murs d'essai a été appliquée à l'aide d'un châssis spécifique réalisé avec le meccano lié à la dalle d'essais. Quatre poteaux réalisés à l'aide de tubes et d'entretoises étaient ancrés à la dalle d'essais et travaillaient en compression, tandis que 6 tirants ancrés via des rotules à la dalle d'essais assuraient la reprise de l'effort de traction exercé sur le mur de réaction via un système de vérins (Figure 2). Le chargement appliqué correspond également à 0.75 fois le chargement fréquent (soit 0.45 fois la charge caractéristique).

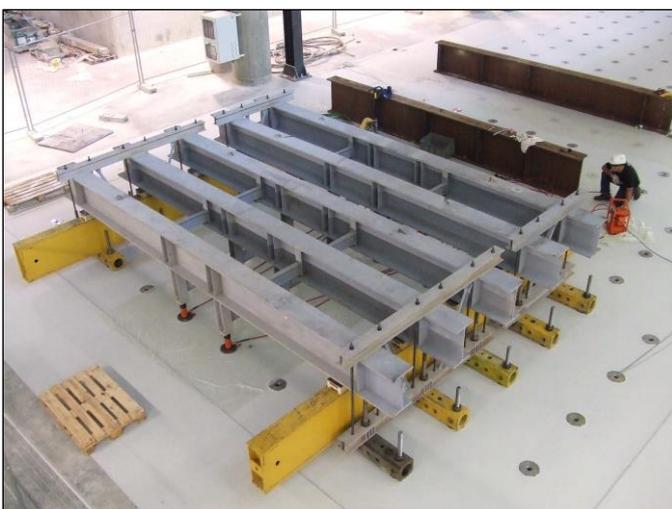


Figure 1 : Châssis de vérinage de la dalle monté en zone d'about

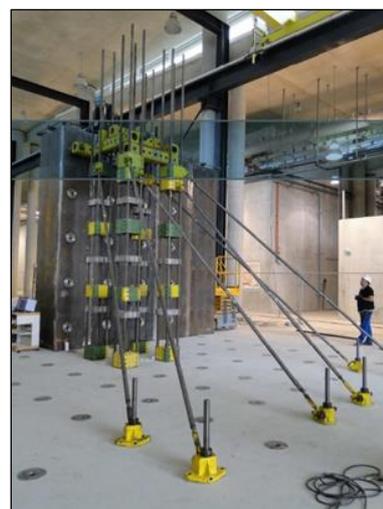


Figure 2 : Châssis de vérinage des murs monté sur le mur n°2 Est Ouest

Les mesures se sont résumées à des évaluations de flèches et de contre-flèches. La précision du dispositif de mesure (crochet + fil invar + poulie + poids + support palpeur) était de 3 µm.

Pour la dalle d'essai, les flèches mesurées lors des chargements au niveau des différentes alvéoles, représentent environ 50% des valeurs de calcul et les contreflèches associées environ 40%. Ces plus faibles déplacements traduisent un comportement plus rigide de la dalle, dû à une résistance à la compression du béton de la dalle supérieure aux hypothèses de calcul, et à une inertie correspondant à une partie fissurée de la section moindre que prévue, voire inexistante. Les déplacements résiduels se sont révélés négligeables ce qui a permis de vérifier le comportement élastique de la structure.

Les déplacements horizontaux mesurés lors des chargements des murs, représentaient 60 à 70 % des valeurs de calcul. Les déformations en pied de mur étaient quant à elles très faibles, inférieures à 30% des valeurs théoriques. Ces plus faibles déplacements des murs, à l'image de la dalle, traduisent un comportement plus rigide de ces derniers, dû à une résistance à la compression du béton supérieure aux hypothèses de calculs. Le comportement élastique des murs fut également vérifié.

I.2 Essais de chargement dynamique

Les essais dynamiques avaient pour objet de mesurer les premiers modes propres de la dalle (notamment les fréquences des premiers modes de translations horizontales et modes de torsion), évaluer si possible les déformées modales, et de valider expérimentalement les calculs réalisés au préalable (modèle numérique).

Cinq alvéoles ont été testées : deux en zone courante, deux en zone d'about et une en zone de puits resserrés. L'excitation de la structure a été réalisée à l'aide d'une masse de choc en effectuant des frappes répétées sur une traverse (poutre métallique percée) bridée sur deux puits. Des accéléromètres tri-axiaux aimantés ont été fixés sur les têtes de puits.

Les fréquences propres mesurées sur les cinq alvéoles sélectionnées lors des essais sont très proches des fréquences propres calculées (tableau 1). La première fréquence mesurée correspond à la translation horizontale transversale de la dalle, la seconde fréquence mesurée vraisemblablement à un mode de torsion avec une faible déformée modale, et la troisième fréquence à la translation horizontale longitudinale.

Alvéoles	Fréquences propres mesurées	Fréquences propres calculées	Ecart M/C
Zone 1	8.6 Hz	9.5 Hz	9.5 %
	11.3 Hz	10.8 Hz	4.4 %
	12.8 Hz	11.5 Hz	10.2 %
Zone 2	9.3 Hz	9.5 Hz	2.1 %
	11.1 Hz	10.8 Hz	2.7 %
	12.6 Hz	11.5 Hz	8.8 %
Zone 3	9.4 Hz	9.5 Hz	1.1 %
	Non excitée	10.8 Hz	-
	12.4 Hz	11.5 Hz	7.8 %
Zone 4	9.2 Hz	9.5 Hz	3.2 %
	11.6 Hz	10.8 Hz	7.0 %
	11.7 Hz	11.5 Hz	1.7 %
Zone 5	9.1 Hz	9.5 Hz	4.2 %
	11.0 Hz	10.8 Hz	1.8 %
	11.9 Hz	11.5 Hz	3.5 %

Tableau 1 - fréquences propres - essais dynamiques

Après cette présentation des essais de réception, nous allons présenter deux sujets qui ont fait l'objet de travaux approfondis pour pouvoir satisfaire les exigences correspondantes : la minimisation du retrait de la structure et la pose des écrous en sous-face de dalle.

II. Minimisation du retrait de la structure de la PFES

Afin de conserver la pleine rigidité de la structure de la PFES et d'éviter l'apparition de fissures de retrait notamment dans la dalle supérieure, une étude très poussée a été menée. En effet, afin de garder un comportement élastique et de maîtriser au mieux la flèche, il était demandé dans le cahier des charges, sous combinaison ELS fréquent, des contraintes de traction inférieures à $f_{ctk\ 0.05}$.

II.1 Solutions envisagées pour diminuer le retrait

Une première note de calcul a été rédigée par SNC LAVALIN afin d'évaluer les contraintes de traction de la dalle supérieure de la dalle d'essai dues au retrait. Avec les hypothèses de cette note (béton C80/95 avec fumée de silice et retrait modélisé selon l'Eurocode 2 partie Ponts, [2]), et sans dispositifs particuliers, la contrainte dépassait la valeur limite $f_{ctk\ 0.05}$ dans le cas ELS fréquent avec un retrait à 10 ans mais restait en dessous de la valeur f_{ctm} plus usuellement utilisée pour déterminer la fissuration d'une section. A 50 ans, ces deux valeurs étaient dépassées.

Le bureau d'études a donc proposé d'étudier plusieurs dispositions afin d'amoindrir les effets du retrait avec les hypothèses prises en compte dans le modèle aux éléments finis :

- Ajout de bandes de clavage lors de la construction de la dalle,
- Epaississement de la dalle de 90 cm à 110 cm,
- Ajout d'une couche étanche (résine) afin de diminuer la diffusion de la vapeur par la surface supérieure de la dalle supérieure,
- Création d'un joint dans la dalle au niveau de la face supérieure et des voiles,
- Contrôle de l'humidité à 65% dans le local.

Après réflexion, il s'est avéré que l'ajout de bandes de clavages et la création d'un joint dans la dalle au niveau de la face supérieure et des voiles étaient incompatibles avec le fonctionnement de la dalle d'essais, que le contrôle d'humidité à 65 % était techniquement et financièrement irréaliste compte tenu du volume énorme à climatiser. Seul l'ajout d'une couche étanche paraissait intéressant et faisable, mais cela ne suffisait pas et l'entreprise Léon Grosse a proposé de jouer sur la composition du béton pour essayer de diminuer le retrait du matériau, et surtout le retrait endogène.

Sur la base des épreuves d'étude et de pré-convenance réalisées un an avant la construction, l'entreprise avait indiqué un risque de fissuration du béton comportant des granulats provenant uniquement du Boulonnais.

On notera que si les ouvrages réalisés avec cette formule initiale C80 curée ne devaient pas fissurer, les parties non curées pouvaient présenter de la microfissuration. Sur la base de résultats d'essais à l'anneau de retrait, le service Béton de l'Entreprise Léon GROSSE a mis en évidence une « fissurabilité » à 7 jours sur les anneaux plutôt étonnante, car avec des granulats du Boulonnais on pouvait s'attendre à une absence de fissuration à 21 – 28 jours. L'entreprise expliquait que ce risque de fissuration provenait d'un retrait endogène du matériau qui avait lieu très rapidement, de façon concomitante à l'augmentation du module d'Young, alors que la résistance en traction n'était pas encore très développée. L'entreprise a donc proposé de limiter les risques de développement du retrait endogène au jeune âge.

En effet le retrait de dessiccation est en quelque sorte induit par le niveau de porosité et de perméabilité du béton et la proposition de mettre en œuvre une résine Sika Floor 161 en surface de la dalle permettant de réduire cette dessiccation, il convenait d'apporter une réponse au seul sujet du retrait endogène.

Ainsi le choix ambitieux d'une formulation C80 sur la base de 280 kg de CEM I SR3 St Egrève a été maintenu, et l'entreprise s'est attachée à réduire la valeur du retrait endogène par des modifications de sa formule. Toutefois une telle mesure reste délicate, car à 24 heures de démoulage des éprouvettes traditionnelles 7/7/28, on ne peut pas caractériser efficacement ce retrait car plus de 80 % de celui-ci s'est déjà produit. L'entreprise a alors mis au point un essai sur éprouvette 7/7/28 à partir de 12-14H après le coulage, et a cherché à corréliser ses résultats avec une méthode éprouvée mais relativement encore peu utilisée : le dispositif BT JADE (figure 3). Ce dispositif a été développé par un chercheur de l'Ifsttar, Claude Boulay, expert du retrait du béton afin de mesurer le retrait du béton au très jeune âge (voir Réf. [5] à [7]).

II.2 Essais de retrait au jeune âge avec le BTJADE

Les déformations endogènes du béton au jeune âge sont comptées à partir de la prise (t_0) et elles résultent du cumul des déformations de retrait endogène, des déformations de gonflement endogène et des déformations thermiques. Le retrait et le gonflement endogènes sont définis comme des déformations du béton en l'absence de séchage (sans variation de masse). Rappelons que le BTJADE est maintenu à température constante par une circulation d'eau extérieure, et ne mesure donc que le retrait endogène.

Trois formules ont été étudiées :

1. Une formule 1 C80/95 qui visait un retrait endogène inférieur à $100 \mu\text{m}$, soit environ 35% de réduction (Prélèvement 1 : une dizaine de litres de béton ont été prélevés d'une gâchée de 800 litres malaxée le 27 mars 2012) ;
2. Une formule 2 C80/95 initiale ou de référence (Prélèvement 2 : une dizaine de litres de béton ont été prélevés d'une gâchée de 800 litres malaxée le 20 avril 2012) ;
3. Une formule 3 C80/95 modifiée et visant une réduction de 80-90% du retrait endogène, soit environ $25 \mu\text{m}$ (Prélèvement 3 : une dizaine de litres de béton ont été prélevés d'une gâchée de 800 litres malaxée le 2 août 2012).

La formule de base (n°2) est donnée dans le tableau 2 et la troisième formulation est donnée dans le tableau 3.

Le sable mixte du Boulonnais est un sable silico calcaire comportant à la base un sable calcaire du Boulonnais auquel sont ajoutés une fraction de sablon Sibelco et un filler calcaire à hauteur de 6 %.

Les modules de déformation du béton, que ce soit pour la formule de référence ou la formule modifiée, sont identiques à 28 jours. On peut donc, raisonnablement, se baser sur le suivi du module d'élasticité mesuré sur le prélèvement 2 avec le dispositif BTJASPE (également mis au point par Claude Boulay [8]), pour fixer l'âge de la prise (à une température de 20°C) vers 8,1 h (figure 4).



Figure n°3 : Mesure du retrait endogène avec BTJADE

Constituants	Masse en kg pour 1 m ³ de béton
Sable 0/4 du Boulonnais	931
Gravillon 4/12 (G/S 0,96) du Boulonnais	978
CEM I 52,5 St Egrève PMES	280
Filler siliceux C480	120
Fumée de silice S95DM de Condensil	45
Eau	130
Glenium Sky 537	14 (litres)

Tableau n°2 : formule du C80/95 de base

Constituants	Masse en kg pour 1 m ³ de béton
Sable Mixte du Boulonnais	1011
Filler calcaire (des Aucrais)	20
Gravillon 4/12 (G/S 0,96) du Boulonnais	978
CEM I 52,5 St Egrève PMES	280
Filler siliceux C480	120
Fumée de silice S95DM de Condensil	45
Eau	130
Glenium Sky 537	14 (litres)

Tableau n°3 : formule du C80/95 modifiée

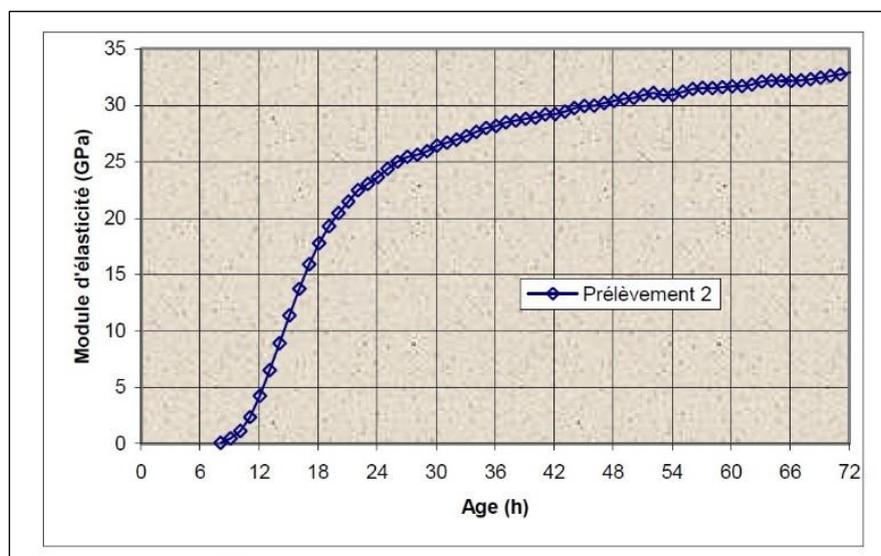


Figure n°4 : Évolution du module d'élasticité mesuré avec BTJASPE.

La valeur du coefficient de dilatation thermique est de $6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ avec une estimation de l'incertitude élargie égale à $1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Les mesures de masse ont montré qu'aucune entrée d'eau ne s'est produite lors des essais. Cette vérification résulte du maintien à 20° par circulation d'eau à T° constante de 20°C . Les conditions de l'essai sont donc bien endogènes.

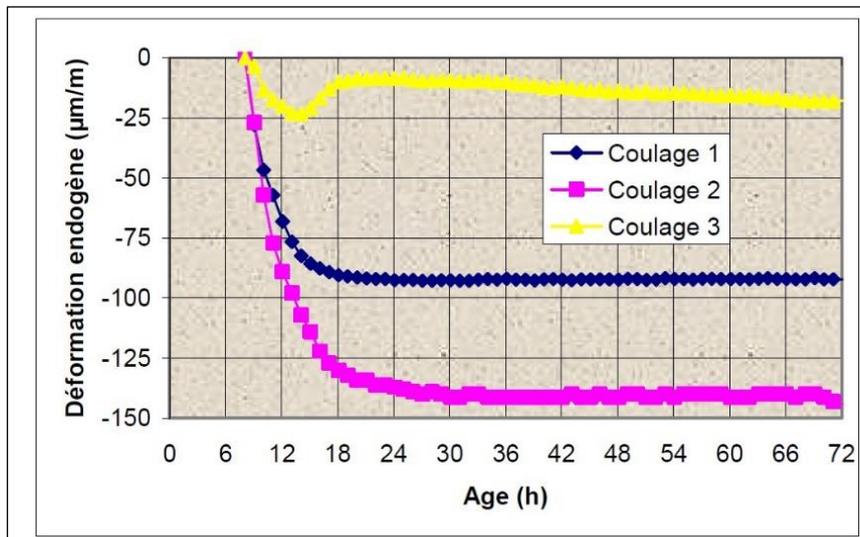


Figure n°5 : Comparaison des retraits endogènes des 3 prélèvements.

La figure 5 présente les retraits endogènes mesurés sur les 3 prélèvements. Pour le deuxième prélèvement effectué (coulage 2), l'évolution de la déformation endogène se concentre dans les 24 premières heures, comme pour le premier prélèvement, et n'évolue plus après, tout au moins dans les deux premières semaines. Une évolution faible est observée après 2 semaines ($10 \mu\text{m/m}$ en 3 semaines). La déformation endogène du premier prélèvement (coulage 1) initialisée au même âge que le deuxième prélèvement, présente une amplitude dans les premières 24 h moins élevée (90 au lieu de $140 \mu\text{m/m}$). L'effet de la modification finale sur la formule N°3 est évident (figure 5). L'évolution de la déformation endogène est inférieure à $35 \cdot 10^{-6}$ sur deux semaines.

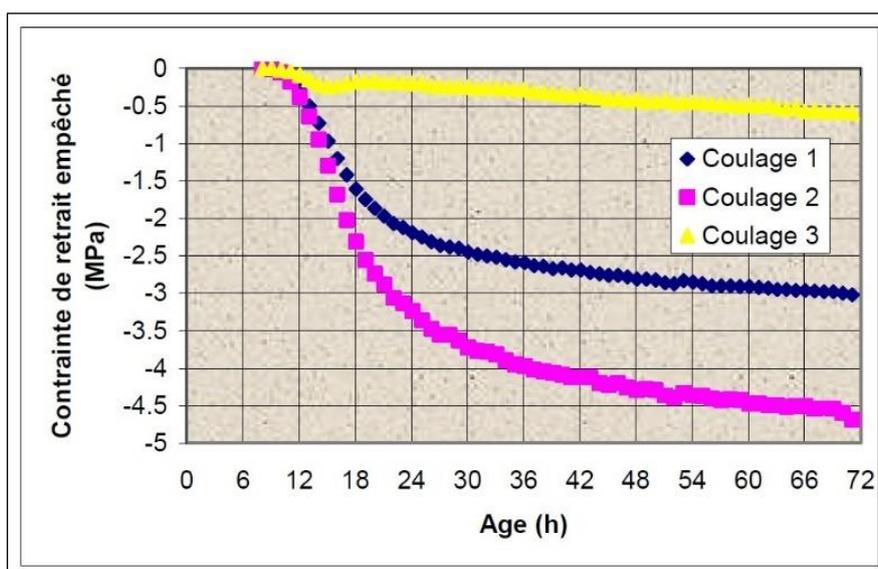


Figure n°6 : Contrainte par retrait empêché calculée à partir des déformations endogènes.

Le calcul d'une contrainte par retrait empêché à 72 h (figure 6) indique un effet 6 fois plus faible que le même calcul effectué pour le prélèvement 1 et 9 fois plus faible que pour le prélèvement 2. Les risques de fissuration de cette troisième formulation semblent donc limités.

Les résistances en traction pendant cette période de 72 h ne sont pas connues mais on observe que, pour les essais 1 et 2, les contraintes par retrait empêché sont proches de valeurs classiques de résistance à la traction alors que pour l'essai 3, l'estimation de la contrainte par retrait empêché évolue très lentement et est, a priori, très inférieure à une résistance en traction quelle qu'elle soit.

C'est finalement la formulation 3 qui a été adoptée pour le coulage de la dalle supérieure et des murs de réaction avec cependant une légère modification apportée lors de l'épreuve de convenance finale qui a eu lieu le 4 septembre 2012, en effet la quantité de filler calcaire des Aucrais a été portée de 20 à 34 kg pour 1 m³ de béton, afin d'ajuster la quantité de fines et éviter la formation d'un léger dôme au centre constatée lors de l'essai d'étalement réalisé en convenance.

II.3 Calcul poussé des déformations différées de la PFES

Une expertise a été demandée par SNC LAVALIN à NECS (Numerical Engineering & Consulting Service) pour modéliser de manière fine le comportement de la dalle d'essais induit par la dessiccation, le retrait endogène et le refroidissement et vérifier le critère de déformation sur la durée de vie de l'installation à savoir 50 ans sous l'action conjointe des chargements mécaniques court terme.

NECS a donc réalisé un modèle tridimensionnel aux éléments finis à l'aide du logiciel Code Aster afin d'estimer les sollicitations induites par le retrait thermique (depuis le maximum de la température induite par l'hydratation du béton), le retrait de dessiccation, le retrait endogène (depuis la prise du béton), ainsi que l'effet des cas de charges mécaniques (chargements de courte durée) y compris gradient thermique (cas statique). Ces sollicitations cumulées correspondent à la vérification de la limitation des déformations aux états limites de service à un âge correspondant à la fin de la durée d'utilisation de projet.

Pour le calcul des déformations différées, NECS a tenu compte également du fluage du béton, les calculs couvrant la durée de vie de l'installation, à savoir 50 ans.

Ce modèle a permis d'estimer finement le risque encouru par le béton de se fissurer et la profondeur de fissuration afin de pouvoir calculer l'évolution de l'inertie de la dalle supérieure et ainsi estimer la déformation issue de la superposition des analyses de déformation différée (retrait + fluage) et de chargement mécanique (de durée d'application courte). Le modèle aux éléments finis tridimensionnel a pris en compte l'évolution de la température (analyse thermique transitoire) ainsi que le transport d'eau et d'humidité (analyse hydrique).

Les cas de charges mécaniques ont été traités séparément et les sollicitations combinées avec les analyses de déformation différées avant de conclure sur le niveau de fissuration possible de la dalle, et l'abaissement de sa rigidité.

Pour le calcul du champ de teneur en eau, une analyse de diffusion non-linéaire selon le modèle de séchage de Mensi [9] avec le logiciel Code_Aster [10] a été utilisée. Les paramètres des lois de comportement des différents retraits sont calés à partir des données issues des essais du béton réalisé par Léon Grosse en août 2012, voir les figures 7 et 8 qui présentent les courbes rouges prises en compte pour le retrait endogène dans le calcul et donnent à titre indicatif les courbes vertes issues de l'Eurocode 2 [2]), et voir la figure 9 pour la courbe de retrait de dessiccation prise en compte et calée selon l'article B.103.2 de l'Eurocode 2- Ponts [3] pour un béton de 80 MPa de résistance en compression (ce retrait n'est pas achevé au bout de 50 ans). La loi de fluage considérée est celle du même article B.103 de l'Eurocode 2 [3].

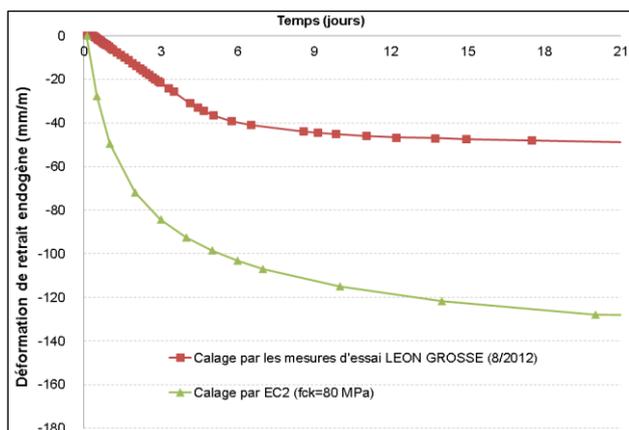


Figure 7 : Courbes de retrait endogène obtenues pendant les 21 premiers jours

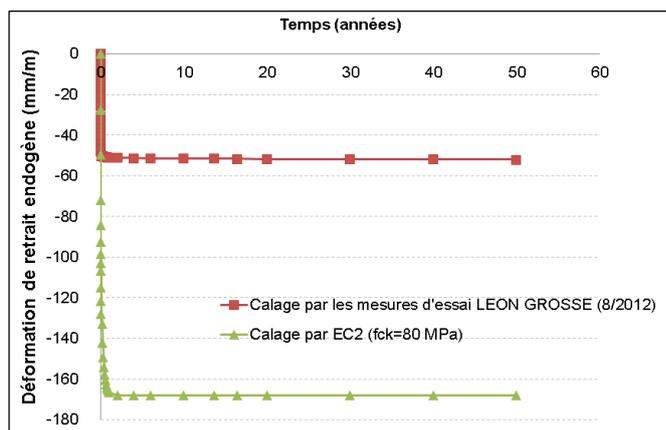


Figure 8 : Courbes de retrait endogène sur la durée de vie de 50 ans.

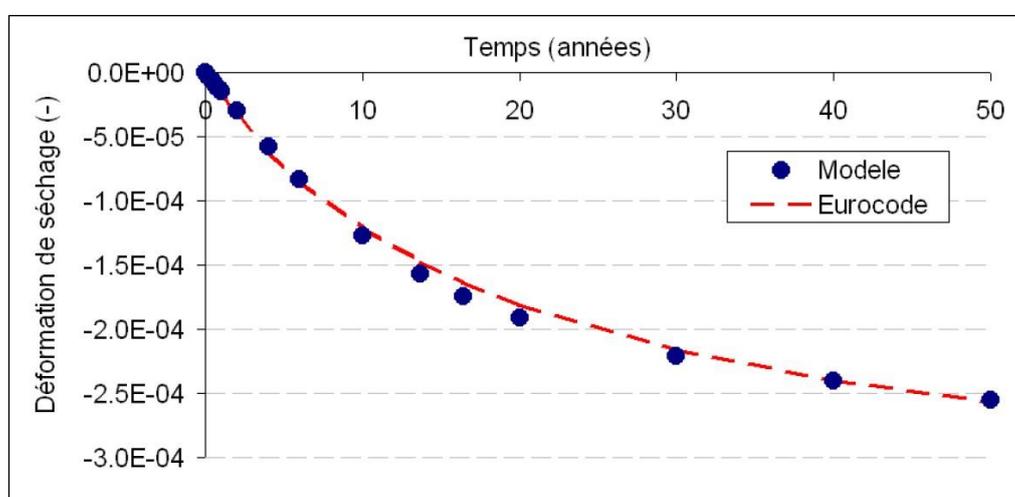


Figure 9 : Courbe de retrait de dessiccation prise en compte dans le calcul selon EC2, B.103.2 [2].

Le béton de la dalle est considéré au maximum de sa température d'hydratation, soit 50°C (température homogène), et saturé (hygrométrie homogène). L'analyse est démarrée à partir de t_0+1j afin d'évaluer le séchage de la dalle. NECS a considéré que le béton de la dalle supérieure commence son hydratation à partir de $t_0+0,1j$, afin d'évaluer le retrait endogène.

Le phasage de construction de la dalle supérieure par pianotage ainsi que du mur d'essai est également pris en compte.

Les résultats ont permis d'établir dans un premier temps une cartographie des contraintes superposant les contraintes engendrées par les déformations différées et celles engendrées par les cas de charges mécaniques (Figure 10) ; cette figure présente respectivement en haut et en bas les contraintes pour les cas de charge $Q + 0,6 T$ et $0,6Q + T$.

Cette cartographie a permis d'évaluer la section efficace (béton non-fissurée) pour la réévaluation de la réponse de la dalle sous chargements statiques, et ainsi vérifier les critères d'exigence de déformation.

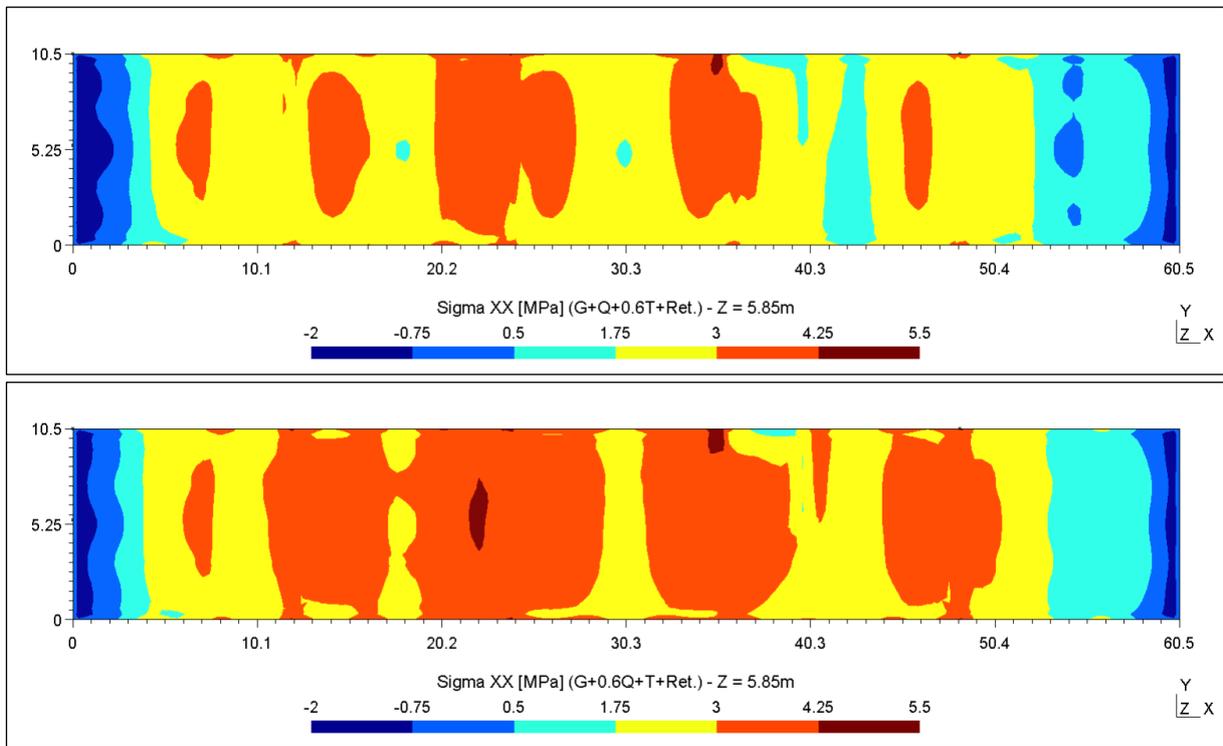


Figure n°10 : Contraintes de traction à l'ELS caractéristique pour un cas de montage A à 50 ans et à Z =5,85m (15 cm sous la surface de la dalle).

L'étude a conclu que l'état de sollicitation mécanique n'est pas suffisant pour amplifier la fissuration de peau créée par le séchage du béton. Les simulations à 50 ans ont montré que la section de la dalle reste quasiment intègre, alors que la fissuration de peau se limite à quelques centimètres.

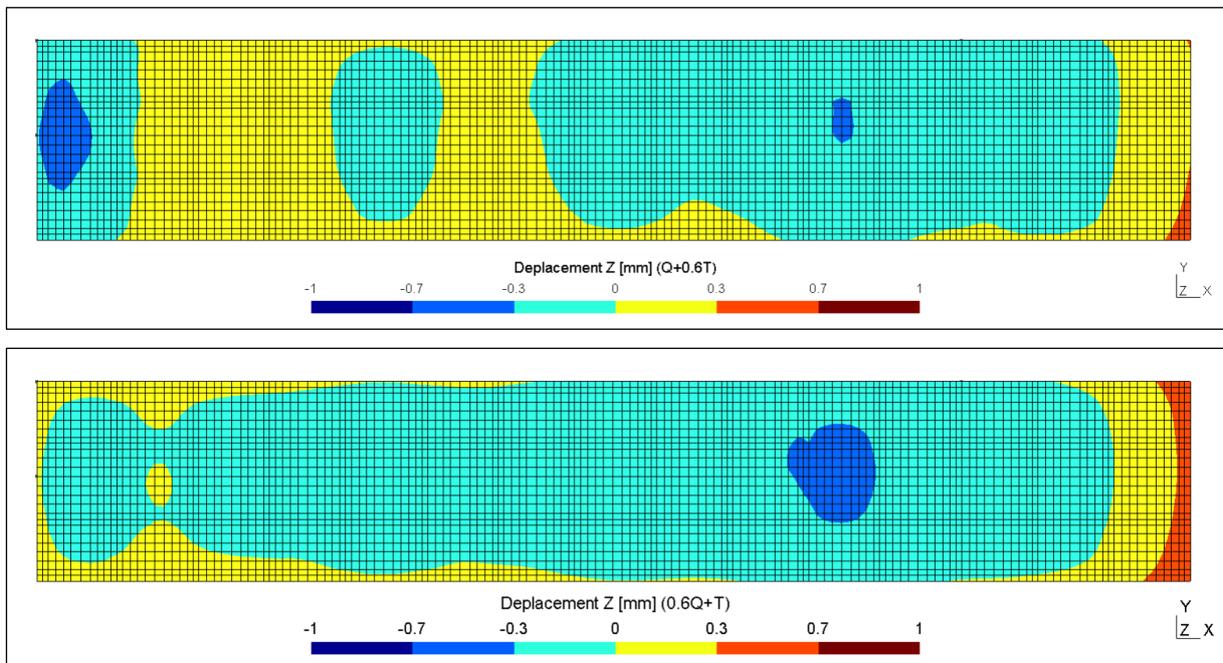


Figure n°11 : Déplacement vertical absolu de la dalle d'essai (ELS caractéristique), montage A

Les flèches estimées sont également faibles, avec au maximum 0,7 mm de déplacement absolu, en dessous du seuil défini à 1 mm (Figure 11) ; cette figure présente respectivement en haut et en bas les déplacements verticaux absolus de la dalle pour les cas de charge $Q + 0,6 T$ et $0,6Q + T$.

III. Pose des écrous en sous-face de dalle

III.1 Problématique

Dans la conception et le fonctionnement de la PFES, les montages d'essais nécessitent un bridage des installations d'essais par la mise en œuvre de barres de diamètre de filetage M50 (diamètre de la barre de 50 mm ou 46.6 mm suivant le type de fabrication) à travers la dalle et précontraintes à l'aide de vérins ; ces barres comportent donc des écrous à chaque extrémité, et pour éviter de devoir accéder par-dessous la dalle pour aller visser les écrous, le principe est de visser la barre par le dessus sur un écrou qui est soudé en face inférieure de dalle. Ce principe de fonctionnement nécessite que cet écrou soit parfaitement horizontal et centré, sinon il peut s'avérer impossible de visser une barre en raison des conflits géométriques avec le tube coffrant du puits traversant la dalle d'essais.

Pour que l'on puisse réutiliser les barres du meccano, il fallait également que l'on fabrique des écrous dont le pas de vis était identique à celui des écrous de la dalle d'essai de Paris. Des écrous furent donc récupérés sur l'ancienne dalle et donnés à l'entreprise pour la fabrication des nouveaux écrous.

Le CCTP spécifiait une tolérance sur l'inclinaison des puits inférieure à $0,1 \cdot 10^{-3}$ rad (soit 0,5mm à 5m) et présentait un schéma de puits (Figure 12) avec la présence d'une plaque d'acier circulaire rapportée et soudée avant soudage de l'écrou. Il faut bien reconnaître que ce schéma (Figure 12), issu des documents de conception de l'installation historique, n'était pas très explicite sur la façon de positionner l'écrou comme nous le verrons par la suite.

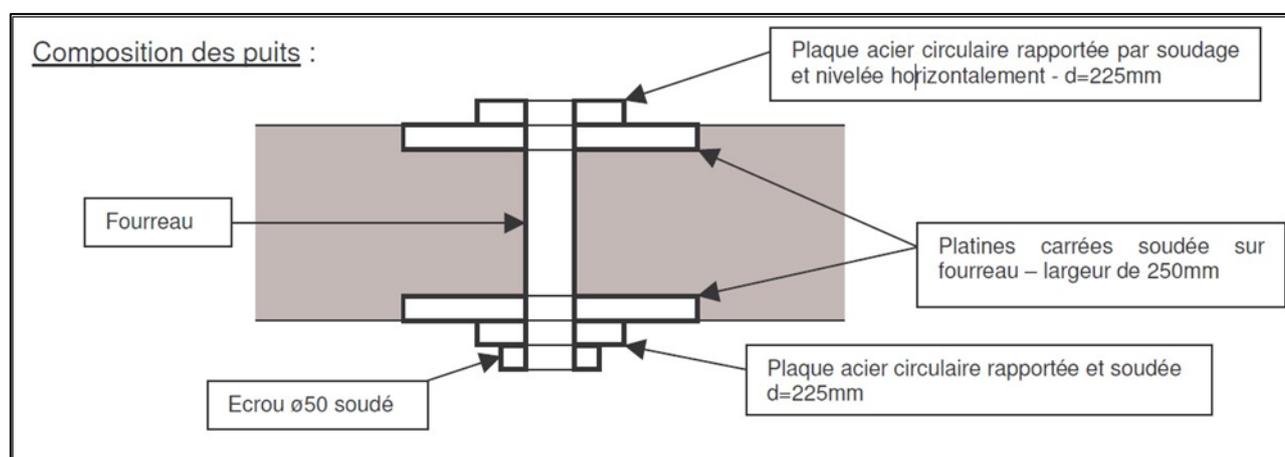


Figure n° 12 : Schéma du puits figurant au CCTP

III.2 Rappel sur la constitution initiale des puits

Les puits sont constitués de tubes de diamètre intérieur 70 mm (diamètre extérieur 80 mm et épaisseur 5 mm) soudés sur des platines à l'aide d'un gabarit de fabrication qui permet une précision de l'ordre de 0,2 mm et assure le meilleur parallélisme possible des platines (Figure 12). Puis les lots de puits sont montés sur des gabarits réalisés par découpe laser, de façon à viser une géométrie inter-puits de +/- 0,2 mm. Enfin, les gabarits sont assemblés par des UPN et des cornières. Un lot de 20 puits fabriqué avec ce type de process permet une tolérance finale de +/- 1mm.

Les platines additionnelles supérieures ont un diamètre de 225 mm de diamètre et une épaisseur variable de 15 et 20 mm pour corriger les défauts éventuels de nivellement des puits et comportent un trou central de 52 mm.

Le CCTP prévoyait la mise en place des platines supérieures et écrous M50 par soudage avec établissement d'un mode opératoire de soudage. L'écrou devait être soudé sur une platine additionnelle elle-même soudée sur la platine inférieure du puits. Lors de l'exécution, les écrous M50 (en acier S355) ont été soudés directement sur les platines inférieures des puits (Ø270, ép. 20mm), afin d'assurer un contact parfait entre les 2 pièces métalliques ; en effet, la platine inférieure additionnelle Ø225 étant soudée à l'écrou, elle se retrouvait déformée par le soudage et donc n'assurait pas un contact convenable ; celle-ci fut donc supprimée.

De plus, afin de vérifier la bonne fabrication des filets des écrous M50, l'IFSTTAR a transmis 2 tiges filetées du meccano à Léon GROSSE pour en vérifier le bon vissage.

III.3 Pose des écrous par l'entreprise

Pour pouvoir poser les écrous, l'entreprise a fabriqué une barre (dénommée barre LG) qui disposait d'un filetage en extrémité et qui permettait de tenir l'écrou et de le centrer correctement par rapport au puits. La platine additionnelle inférieure qui n'apparaissait pas utile n'a pas été mise en œuvre, et l'écrou a été soudé directement sous la platine du puits (Figure 13) après un pointage préalable par soudure lorsque sa position était jugée bonne (Figure 14). Ces dispositions ont évidemment été validées en amont de l'exécution avec le BET SNC LAVALIN et les représentants de l'IFSTTAR, par le biais des différents documents d'exécution diffusés.

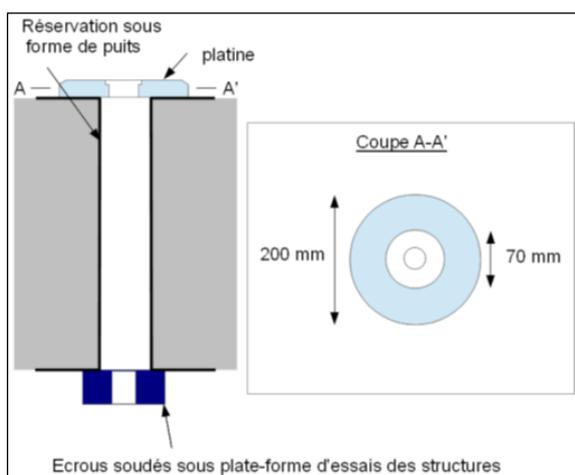


Figure n°13 : Schéma de pose des écrous.



Figure n°14 : Exemple d'écrou soudé sous le puits

III.4 Vérification par l'IFSTTAR de la pose des écrous

En juin 2013, alors que Léon Grosse a soudé environ une soixantaine d'écrous sous les puits de la PFES, l'IFSTTAR constate des difficultés pour visser ses propres barres dans les écrous et observe que si l'on place une poutre avec trois tirants au-dessus de trois puits, alors on arrive à descendre les tirants dans les puits jusqu'au contact du filetage, mais si ensuite on essaie de visser les tirants dans les écrous de la dalle, alors certains tirants sont très difficiles à visser. Sur deux des puits (numéro 285 et 290), le serrage est quasi impossible avec les barres IFSTTAR et très difficile avec une barre LG.

Si l'on surélève légèrement la poutre, le serrage des tirants redevient possible, quoique parfois difficile, et l'on constate parfois une mise en butée des tirants sur les trous de la poutre dans des positions quasi-symétriques.

Les platines supérieures ayant un trou de 52 mm, il y a au minimum deux fois 1 mm de battement pour que les barres de 50 mm puissent être enfilées dans les puits. Lorsqu'une barre ne peut être mise en place, deux causes peuvent être envisagées : un mauvais centrage entre platine et écrou ou une mauvaise orientation de l'écrou. Cela signifie que l'erreur d'inclinaison sur l'horizontale de l'écrou est supérieure à 1 mm/m (0.001 rad) et/ou celle de centrage de l'écrou est supérieure à 1 mm.

Le 12/09/2013, plusieurs essais de vissage et de positionnement de poutres ont été réalisés par l'entreprise LG en présence de l'IFSTTAR (Figure 15). Il en ressort que le vissage dans les puits s'effectue sans difficultés avec la barre LG avec même un certain jeu, et que certains essais de mise en place de poutres se sont faits avec difficultés. Le jeu subsistant après vissage des barres interroge sur la capacité des barres vissées à reprendre les efforts de traction en exploitation. De même, les difficultés de mise en place des poutres peuvent laisser supposer que les écrous ne sont pas posés dans les tolérances d'implantation indiquées dans le CCTP.

L'entreprise s'efforce alors d'améliorer sa procédure de soudage des écrous en vérifiant le bon positionnement des écrous avant soudage en vissant (avec un couple modéré, exercé à la main) une barre IFSTTAR, puis en vérifiant que la barre IFSTTAR, une fois vissée dans l'écrou pointé, ne penche pas plus d'un côté que de l'autre.



Figure n°15 : Essai d'enfilage d'une poutre du meccano sur 3 barres de 2 m de longueur.

III.5 Vérification de la position des platines supérieures

En mars 2014, après que l'entreprise ait posé l'ensemble des platines supérieures et des écrous et exécuté un relevé précis de la position des platines, l'IFSTTAR présente son analyse des résultats de mesures en (x,y) de la position des platines supérieures sur la base des résultats transmis par Léon Grosse. Sur la base d'une analyse des défauts en distance sur platines espacées de moins de 4 mètres, il est constaté que :

- seulement 12.4% des platines respectent l'exigence du DCE (+/- 0, 1mm pour des platines à 4 m de distance).
- 9 % des platines ont entre 0,1 mm et 0,2 mm d'écart de positionnement
- 28 % des platines ont entre 0,2 mm et 0,5 mm d'écart de positionnement
- 31 % des platines ont entre 0,5 mm et 1 mm d'écart de positionnement
- 15 % des platines ont entre 1 mm et 1,5 mm d'écart de positionnement

- 4 % des platines ont entre 1,5 mm et de 2 mm d'écart de positionnement
- 1 % des platines ont plus de 2 mm d'écart de positionnement

Cette analyse fait donc apparaître un très fort pourcentage de positions non conformes. Il est également clair pour l'IFSTTAR que si on conjugue des défauts d'écart de positionnement en (x,y) de 1 à 2 mm avec des écarts de verticalité de puits, cela posera de sérieux problèmes d'utilisation du meccano, voire des impossibilités d'utilisation.

Après cette vérification, l'entreprise LEON GROSSE reprend et vérifie alors l'entièreté des platines supérieures afin d'obtenir un positionnement des platines selon les exigences du DCE.

En mars 2014, l'IFSTTAR propose une procédure de relevé d'inclinaison des puits qui sera réalisé par l'IGN.

III.6 Vérification par l'IGN de la position des platines supérieures

En mai 2014, l'Unité Travaux Spéciaux du Service de Géodésie et Nivellement de l'IGN (Figure 16) remet son rapport sur les mesures réalisées sur un échantillon de 59 puits d'ancrage choisis par l'IFSTTAR. Une tige de 2 m de longueur en tube creux de diamètre 25 mm, équipée d'un pas de vis M50 a été fabriquée spécialement. L'autre extrémité de la tige est équipée d'un repère centreur afin d'y insérer un prisme de précision (Figure 17). Les platines supérieures quant à elles, sont équipées d'une rondelle de centrage permettant de positionner un prisme de précision au centre de la platine. Les mesures d'angle et de distance sont réalisées sur ce prisme depuis les deux stations générales et permettent de déterminer le positionnement des centres des platines.



Figure 16 : Relevé par l'IGN de la position d'un écrou.



Figure 17 : Barre IGN en position dans un puits.

L'écart-type obtenu à la suite du calcul en bloc pour les coordonnées des platines est de 0,3 mm mais le positionnement de la rondelle support de prisme sur la platine n'est pas toujours optimal (très léger jeu sur certains puits). On peut considérer que la précision des coordonnées des centres de platines se situe entre 0,5 et 1 mm.

L'IGN remet son rapport final le 20 mai 2014. La figure 18 fournit le décalage existant entre l'écrou et le centre de la platine, tandis que la figure 19 donne les inclinaisons des écrous. La figure 20, la plus importante, montre le décalage entre l'axe de l'écrou et le centre de la platine au niveau de la platine.

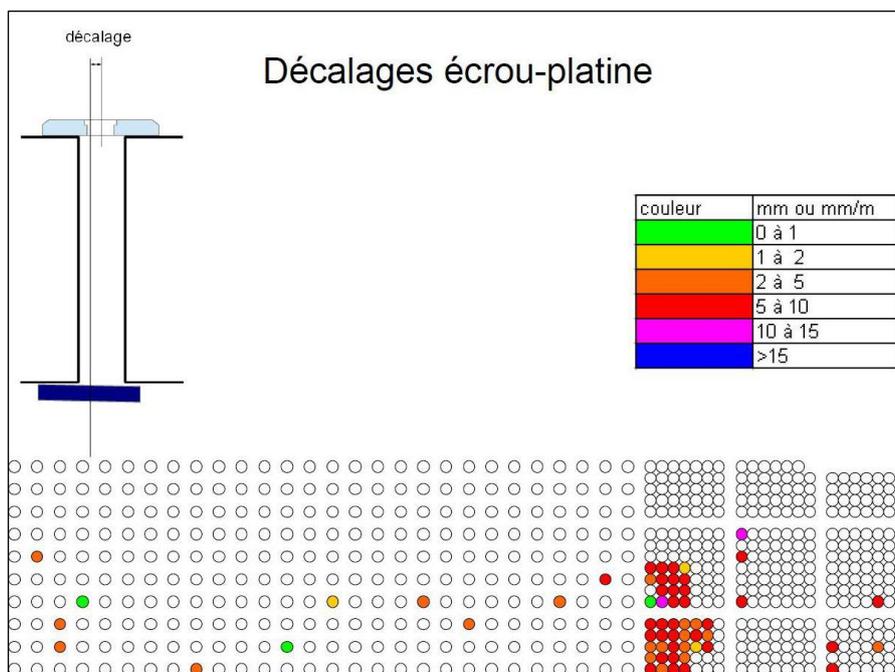


Figure n° 18 : Décalage existant entre l'écrou et le centre de la platine.

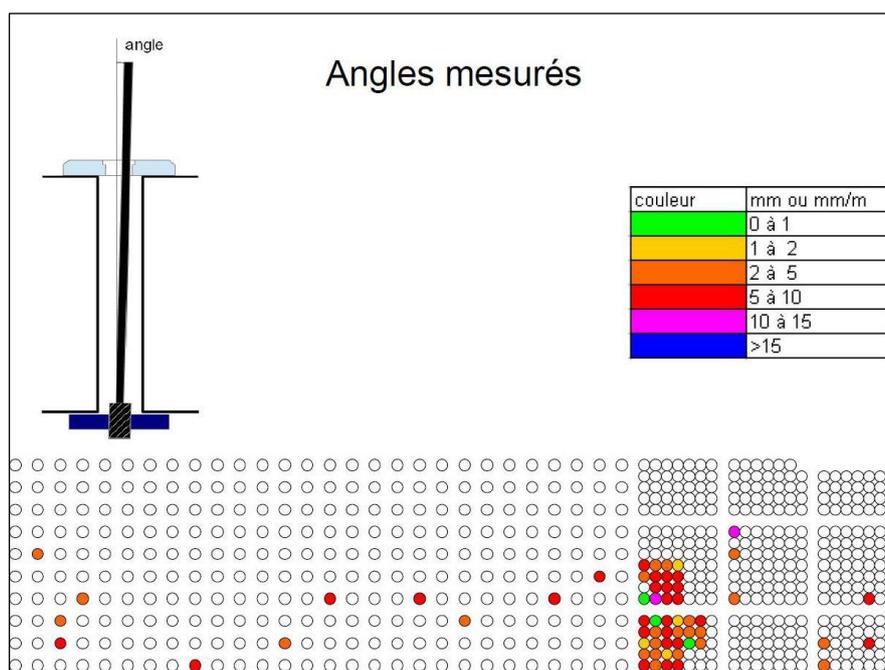


Figure 19 : Inclinaisons des écrous mesurées par l'IGN.

En juin 2014, le constat est fait que le positionnement des écrous sous la dalle d'essais est loin des exigences du DCE : l'inclinaison de l'écrou est supérieure à 5 mm/m sur plus de 50 % des cas mesurés par l'IGN et le décalage en alignement de l'écrou est supérieur à 5 mm sur plus de 50 % des cas mesurés par l'IGN.

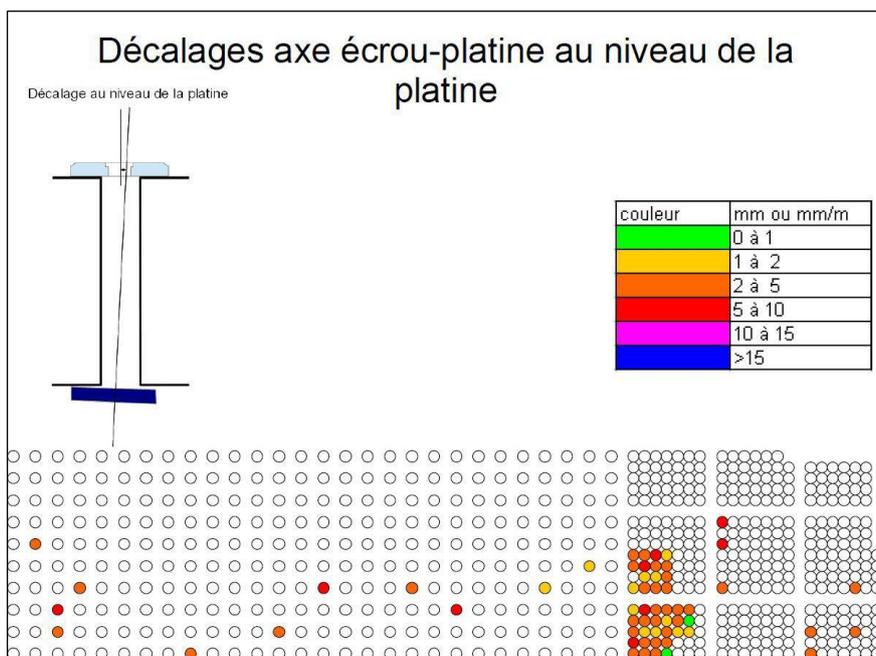


Figure n°20 : Décalage entre l'axe de l'écrou et le centre de la platine au niveau de la platine.

III.7 Réception des platines supérieures et des écrous inférieurs

La solution préconisée par l'entreprise est d'utiliser des barres avec un filetage offrant un jeu supérieur au jeu des barres utilisées sur la dalle d'essai de Paris, et de réduire le diamètre des tirants hors zone fileté. Ceci se ferait après validation par essais de rupture statique sur ces nouvelles barres et écrous filetés, afin de vérifier que malgré le jeu plus important entre le filetage de l'écrou et le filetage de la barre, le niveau de sécurité reste conforme aux normes et textes existants pour ce type d'assemblage. Le but est d'éviter la rupture du filetage lors des opérations de bridage.

Cette solution ne convient pas à l'IFSTTAR car cela signifie que l'on ne peut pas réutiliser les anciennes barres du mecano et qu'il faut toutes les refabriquer, que le niveau de qualité atteint est inférieur à celui qui prévalait sur la dalle de Paris, ce qui a un impact potentiel significatif sur la qualité des essais (maîtrise de la direction des efforts appliqués).

In fine l'IFSTTAR accepte de réceptionner les platines supérieures, même si certaines d'entre elles ne respectent pas les exigences du DCE, mais refusent de réceptionner les écrous qui présentent beaucoup trop d'écart par rapport aux exigences du DCE en inclinaison sur l'horizontale et en défaut d'alignement par rapport à la platine.

En juin 2015, l'IFSTTAR peut commencer à reprendre ses montages d'essai sur la PFES (figure 21) mais sans que ces derniers ne mobilisent d'efforts significatifs au niveau des puits d'ancrage.



Figure n°21 : Essai sur une dalle en BFUP de la thèse de T. Guénet [11], premiers essais « de recherche » réalisés sur la nouvelle installation en 2015 : montages en cadre fermé, non connecté à la dalle d'essais et avec efforts modestes.

III.8 Repositionnement des écrous

L'IFSTTAR décide de reprendre la maîtrise d'ouvrage pour le repositionnement des écrous, et pour cela rédige un marché assez spécifique, puisque ce marché prévoit le désoudage des 822 écrous et la pose de 822 nouveaux écrous. Le marché prévoit une tranche ferme de dépose et repose de 10 écrous et une tranche conditionnelle de dépose et repose de 812 écrous.

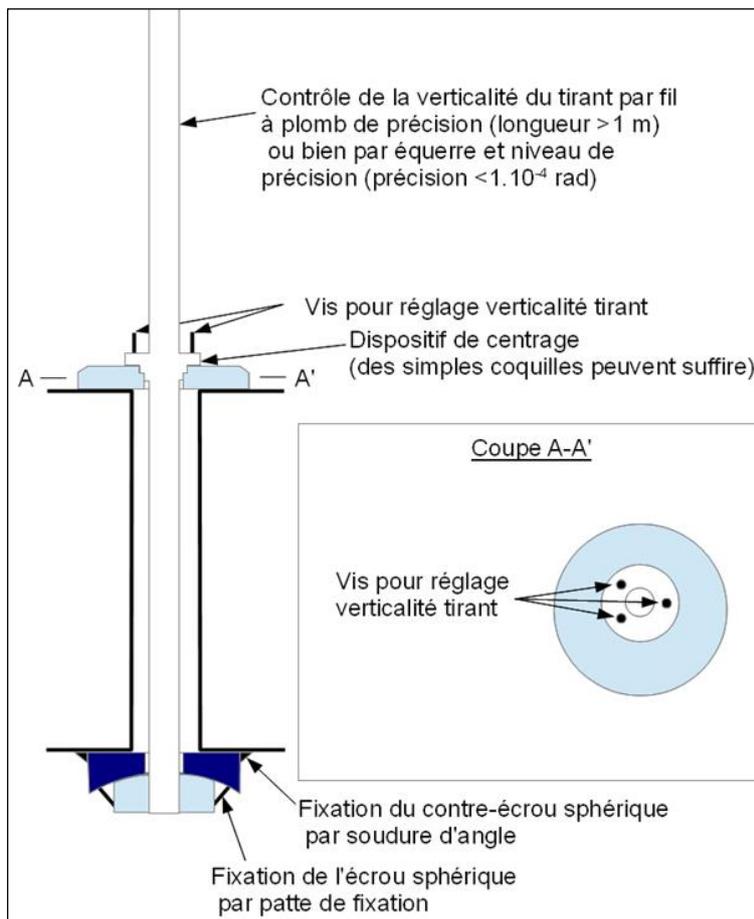


Figure n°22 : Schéma spécifié dans le CCTP du marché de l'IFSTTAR

Dans ce marché, le principe de pose est celui qui avait été utilisé avec succès pour la dalle d'essais de Paris, à savoir la mise en œuvre d'un contre-écrou sphérique par soudure d'angle sur la platine inférieure du puits, puis la mise en œuvre d'un écrou sphérique avec soudure de pattes de fixation (figure 22). En outre, l'entreprise pouvait venir voir un puits récupéré sur l'ancienne dalle d'essai de Paris (Figure 23). C'est l'offre de l'entreprise Baudin Chateauneuf qui est retenue.



Figure n°23 : Ecrou et contre-écrou récupérés sur un puits de la dalle

Le diamètre de filetage M50 n'étant pas un diamètre normalisé selon la norme NF EN ISO 4032, les dimensions de l'écrou sont définies sur la base des dimensions du M48 et M52. Le matériau retenu pour l'écrou et le contre-écrou est l'acier de construction à haute limite élastique S460 M (selon NF EN 10025-3). Les tolérances de fabrication des écrous et des contre-écrous respectent le grade A des tolérances définies respectivement dans le §4 de l'ISO 4759-1 et le §3 de l'ISO 4759-3. Le filetage de l'écrou est du type M50*5 avec une classe de tolérance 6h selon NF EN 22768-2. Deux justifications sont menées selon l'Eurocode 3 (EN1993-1-1) [4] : pression de contact entre l'écrou et la rondelle, et cisaillement du filetage de l'écrou.

La procédure de pose proposée par l'entreprise est visée par l'IFSTTAR.

Après pose des 10 premiers écrous en janvier 2017, il apparaît une « non-conformité » pour 4 écrous sur 10. Les barres IFSTTAR sont vissables sans aucune difficulté sur les 10 écrous, mais la tolérance (0,5 mm/m) sur la verticalité de l'axe de l'écrou ou la tolérance (0,5 mm) sur l'alignement entre l'axe de l'écrou et l'axe de la platine ne sont pas respectées pour 4 écrous.

Après une phase de discussion assez longue, il est décidé de faire un avenant au marché en reconduisant une tranche ferme de positionnement de 10 nouveaux écrous.

L'entreprise décide de reprendre les études des outillages de chantier afin d'augmenter la longueur de guidage de l'outillage et de réduire le plus possible les jeux internes pour augmenter la précision de positionnement des écrous. Un joint torique est ajouté dans la partie basse de la pièce de guidage support. Un autre niveau de plus grande plage de lecture est utilisé et une nouvelle procédure de pose est adoptée, consistant principalement à augmenter la précision de réglage de la verticalité de l'outillage durant les différentes phases de soudage de l'écrou (figures 24 et 25).

De son côté, l'IFSTTAR révisé ses exigences : la barre Baudin Chateauneuf vissée dans l'écrou doit pouvoir présenter un angle inférieur à 0,3 mm/m par rapport à la verticale avec la barre placée dans la position la plus favorable par rapport à la platine supérieure. Le jeu au niveau du filetage barre-écrou permet en effet d'incliner quelque peu la barre. L'exigence sur l'alignement entre écrou et platine supérieure est abandonnée car difficile à mesurer et un défaut sur ce point entraîne nécessairement une

difficulté de vissage ou une inclinaison importante de la barre. Ces dispositions (exigences d'alignement entre écrou et platine et exigences d'inclinaison verticale de la barre vissée dans son écrou) restent donc toutefois différentes et moins pénalisantes que celles du DCE initial que l'entreprise LEON GROSSE avait en charge de respecter.



Figure n°24 : Mise en place de l'outillage de réglage.



Figure n°25 : Outillage de réglage avec son vérin annulaire de mise en contrainte de la tige.



Figure n°26 : Ecrus en configuration finale

En septembre 2017, l'entreprise Baudin Chateauneuf positionne les 10 nouveaux écrous. Les contrôles étant satisfaisants (figure 27), la tranche conditionnelle est débloquée et de décembre 2017 à janvier 2018, les 802 écrous restants sont positionnés (figure 26), ainsi que les 4 écrous non conformes du début. La réception des travaux a lieu de février à avril 2018 à la suite de laquelle l'admission est prononcée.

NUMERO DU PUIT (suivant plan IFSTTAR N° LG PB RDJ EXE PLAN 04 03-05-2013 LG0054 C)						243
VERTICALITE OUTILLAGE APRES SOUDURE DE LA RONDELLE		VERTICALITE OUTILLAGE APRES SOUDURE DE L'ECROU		VERTICALITE TIGE OUTILLAGE (en mm/m)		
dans plan transversal (en mm/m) (critère <0,2mm/m)	dans plan longitudinal (en mm/m) (critère <0,2mm/m)	dans plan transversal (en mm/m) (critère <0,2mm/m)	dans plan longitudinal (en mm/m) (critère <0,2mm/m)	dans plan transversal (critère <0,3mm/m)	dans plan longitudinal (critère <0,3mm/m)	
+0,1	+0,1	0	0	-0,3φ+0,3	-0,3φ+0,3	
HORIZONTALITE PLATINE SUPERIEURE		dans plan transversal (en mm/m)		dans plan longitudinal (en mm/m)		
VISSABILITE TIGE IFSTTAR / ECROU		Facile / Difficile / Impossible		OBSERVATIONS :		

Figure n°27 : Exemple de fiche de contrôle lors des opérations de soudage des écrous

IV. Conclusions

Dix ans après la construction de la Plate-forme d'Essai des Structures de l'IFSTTAR, maintenant intégrée à l'Université Gustave Eiffel, on peut affirmer que la PFES répond pleinement aux attentes de ses utilisateurs. La construction de cette structure hors du commun, combinant les exigences du génie civil et de la mécanique industrielle, a pu être menée à bien grâce à la coopération et à l'investissement de tous les acteurs, les discussions techniques qui ont eu lieu tout au long de la construction amenant parfois à des modifications substantielles du projet comme pour les murs de réaction, tout en essayant de rester dans l'enveloppe financière prévue.

Dix ans après la construction, alors que la PFES a déjà été sollicitée par de nombreux montages d'essai (Figures 28 à 30), aucune fissure structurelle n'est apparue et aucune fissure de retrait n'est visible sur l'ensemble des éléments du caisson.

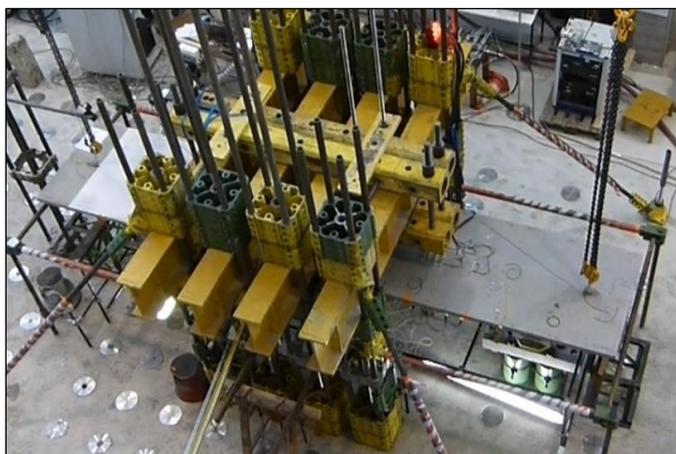


Figure n°28 : Essai d'effort tranchant sur poutre en T en BFUP – vue de dessus du montage ([12])



Figure n°29 : Essai d'effort tranchant sur poutre en T en BFUP – vue de profil ([12])



Figure n°29 : Essai de compression + flexion cyclique de poteau (projet Badifops [13])

Les deux figures suivantes illustrent l'utilisation de la PFES, avec sur la figure 31 le premier essai conduit faisant appel aux murs de réaction, un essai de renforcement par composites d'un encastrement poteau-poutre vis-à-vis du séisme dans le cadre du projet ANR ILISBAR [14], et sur la figure de droite (Figure 32) une vue générale de la PFES prise en décembre 2019 avec au premier plan un énorme anneau en

béton précontraint destiné à tester en compression un anneau de tunnel à voussoirs compressibles susceptibles de représenter l'une des solutions de stockage de containers de déchets nucléaires à grande profondeur pour l'ANDRA [15].



Figure 30 : essai de renforcement par composites d'un encastrement poteau-poutre vis-à-vis du séisme (mai 2019).

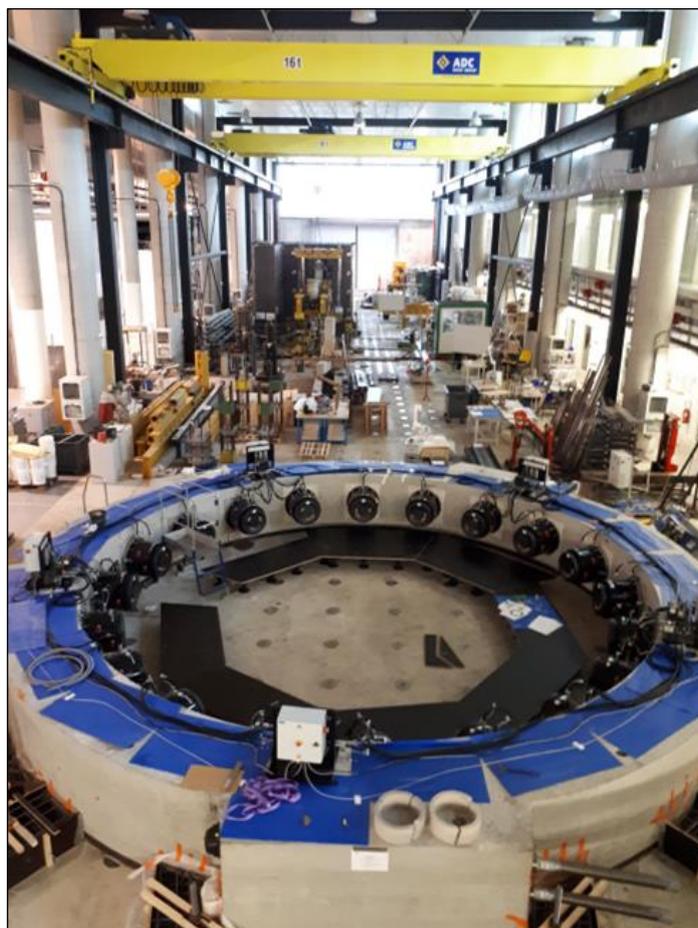


Figure 31 : Vue générale de la PFES en décembre 2019, avec au premier plan l'anneau précontraint pour essai ANDRA.

V. Références bibliographiques

- [1] Godart B., Toutlemonde F., Marchand P., Rocher S., Andreatta S., Favre S., Letort S., Moulin J., « Construction de la Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne – Partie 1 : cahier des charges, conception et exécution. », Bulletin Ouvrages d'Art n°82, Cerema, pp. 5-32, 2023.
- [2] Norme AFNOR NF EN1992-1-1 - Calcul des structures en béton, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [3] Norme AFNOR NF EN 1992-2 - Calcul des structures en béton, Partie 2 : Ponts en béton — Calcul et dispositions constructives. Mai 2006. (Eurocode 2 Ponts)
- [4] AFNOR NF EN 1993-1-1 - Calcul des structures en acier, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005 (Eurocode 3)

- [5] Boulay C., « Développement d'un dispositif de mesure du retrait endogène d'un béton au jeune âge », Actes des 8èmes Journées Scientifiques du RF2B, Montréal, 5-6 juillet 2007, pp. 48-57.
- [6] Bentur A. : "Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems", Chapter 2 of Early age cracking in cementitious systems, Report number 25 of RILEM Technical committee TC 181-EAS, 2003, 337 pages.
- [7] Boulay C., "Test rig for early age measurements of the autogenous shrinkage of a concrete", CONCRACK3 – Proc. (PRO 85) of the RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures, March 15th -16th, Paris, France, 2012, pp. 111-122.
- [8] Boulay C., Staquet S., Delsaute B., Carette J., Crespini L., Yazoghli O., Merliot E., Ramanich S., "How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age?", *Materials and Structures* 47(1-2), Avril 2013.
- [9] Mensi R., Acker P., Attolou A. « Séchage du béton : analyse et modélisation », *Matériaux et Constructions*, vol. 25 n°5, 1988
- [10] EDF, "Finite Element Code_aster – Analysis of Structures and Thermodynamics for Studies and Research.", Published : Open source on www.code-aster.org. 2017
- [11] Guenet T., « Modélisation du comportement des bétons fibrés à ultra-hautes performances par la micromécanique : effet de l'orientation des fibres à l'échelle de la structure », Thèse de l'université Paris-Est, 2016..
- [12] Herrera A., « Fonctionnement des jonctions âmes-membrures en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) », Thèse de l'université Paris-Est, 2017.
- [13] Marchand P., Baby F., Khadour A., Rivillon P., Renaud J.C., Baron L., Généreux G., Deveaud J.P., Simon A., Toutlemonde F., "Response of UHPFRC Columns Submitted to Combined Axial and Alternate Flexural Loads", *Journal of Structural Engineering* 145(1):04018225, 2019.
- [14] <https://emgcu.univ-gustave-eiffel.fr/linstitut/mast2/laboratoires/emgcu-ifsttar/themes-de-recherche/posters-2020> - Film de T. Rault « Expérimentation sur une structure en béton armé d'une solution de renforcement parasismique par composites » visible sur le lien https://vimeo.com/386691018?embedded=true&source=video_title&owner=14702008
- [15] Terrade B., Zghondi J., Armand G., Kerner L., Toutlemonde F., Bosgiraud J.-M., "A unique device for testing the long-term behavior of a whole segments ring of a deep tunnel", 8th int. conf. on clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, Nancy (France), 13-16 june 2022, poster communication.

Maîtrise d'ouvrage : MEEDTL
Conducteur d'opération : DDE 77.
Cahier des charges : LCPC, puis IFSTTAR
Maîtrise d'œuvre : bureau d'études SNC-Lavallin, associé à l'agence d'architecture Pargade,
Appui calcul maîtrise d'œuvre : NECS
Bureau de contrôle : DEKRA
Etudes d'exécution : bureau d'études structure CTE
Réalisation gros oeuvre: entreprise Léon Grosse
Pose des écrous des puits : Baudin Chateauneuf
Réalisation fondations : Spie fondations
Contrôle extérieur : CETE IDF et CETE Nord-Picardie

REMERCIEMENTS : Les auteurs souhaitent remercier de nombreux autres participants à la construction de la PFES :

S. Guarnera (Directeur de Projet, Léon Grosse), M. Plazzotta (Directeur de Travaux, Léon Grosse), G. Lamarque (Directeur du département Génie Mécanique, Baudin Chateauneuf), J.M. Ginefri (MEEDTL, Maître d'ouvrage), M. Bancharam (DDE 77, conducteur d'opération), S. Andreatta et A. Nicolas (SNC LAVALIN, Maître d'oeuvre), C. Bonifas (Cerema Nord-Picardie, Contrôle extérieur), G. Chevin (Cerema Ile de France, Contrôle extérieur), P. Leguen (DEKRA, Bureau de contrôle), M. Pargade (Architecte), J. Moulin (Baudin Châteauneuf, Responsable d'affaires) V. Motyka (IFSTTAR, Directeur adjoint), R.-P. Martin (IFSTTAR, en charge de l'équipe technique de la PFES), F. Baby (IFSTTAR, ingénieur de recherche dans l'équipe de la PFES), J.-C. Renaud (IFSTTAR, technicien supérieur métrologue de l'équipe de la PFES), J. Billo (IFSTTAR, technicien supérieur de l'équipe de la PFES)

Les apports de l'imagerie et de la reconnaissance des formes pour la gestion de patrimoine des ouvrages d'art

Partie 2 – surveillance et diagnostic des ouvrages

Hervé Davias¹, Pierre Charbonnier², Philippe Foucher², Christophe Heinkele², Constantin Ruellet³, Thibaut Perrin⁴, Adrien Dodane⁵

1 Cerema Agence d'Angers / Groupe Ouvrages d'Art, 23 Av. Amiral Chauvin, Les Ponts-de-Cé

2 Cerema Agence de Strasbourg / Groupe ENDSUM, 11 rue Jean Mentelin, Strasbourg

3 Cerema DTecITM, Directeur adjoint du CNPS, 62 rue de la Gare, Verneuil-l'Étang, Responsable d'études gestion de patrimoine ouvrages d'art à ITM/DGIPI au moment de l'étude

4 PMM Synergies & Solutions, 6 rue Macedonio Melloni, Dole, Responsable du groupe Ouvrages d'Art à l'Agence de Strasbourg du Cerema au moment de l'étude

5 DREAL Bourgogne Franche-Comté Service Transports et mobilités, 5 voie Gisèle Halimi, Besançon

Résumé

En accompagnement de l'appel à projets « ponts connectés » qui mobilise 17 groupements (de MOE, MOA, BE, entreprises...) pour le développement d'outils nouveaux permettant une meilleure gestion du patrimoine, le Cerema dresse les perspectives d'évolution de la gestion patrimoniale des ouvrages d'art au travers de l'intégration des technologies numériques de l'imagerie et de la reconnaissance de forme. Cette réflexion s'est traduite par une production orientée sur la maîtrise d'œuvre, avec un article publié dans le Bulletin OA n°81 de janvier 2023. Deux publications complètent la réflexion sur la gestion patrimoniale des ouvrages d'art, la première, publiée dans le Bulletin OA n°82 de juillet 2023 [1], dressait un état des lieux des technologies que le lecteur est invité à lire avant de poursuivre la lecture du présent article qui aborde l'utilisation de ces technologies dans la gestion des ouvrages d'art.

I. Introduction

Avec des besoins croissants d'actes de gestion pour assurer la pérennité du patrimoine d'ouvrages d'art des collectivités territoriales, il convient de profiter au mieux de l'émergence de technologies novatrices qui laissent espérer de grands bénéfices en termes d'efficacité, de fiabilité et de coût. Ces technologies de haut niveau demeurent à maîtriser et le présent article explore leur apport en examinant leurs atouts et faiblesses actuels dans diverses situations d'emploi. Les développements présentés ici concernent les phases de gestion allant de l'inspection au diagnostic.

II. Apport des outils numériques pour la surveillance des ouvrages

Toutes les politiques de gestion de patrimoine sont fondées sur la connaissance de l'état des ouvrages constitutifs du patrimoine. C'est pourquoi il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'état des structures, que nous avons déjà introduites dans la première partie de cet article [1].

Les trois premiers paragraphes de cette partie décrivent les interventions de type Contrôle annuel ; Visite d'évaluation et Inspections détaillées. Les trois types d'actions de surveillance suivants sont décrits précisément dans l'ITSEOA de 2010 [2] qui définit l'organisation de la surveillance :

- contrôle annuel ;
- visites d'évaluation ;
- inspections détaillées (initiales, périodiques, exceptionnelles, de parties d'ouvrages).

II.1 Contrôle annuel

L'objectif de ce contrôle est de :

- déceler l'évolution manifeste de désordres connus ;
- constater la présence de désordres graves nouveaux ou de menaces de désordres graves ;
- dresser, en cas de besoin fort, la liste des actions d'entretien courant à réaliser.

Le contrôle annuel doit permettre de voir rapidement les parties d'ouvrages accessibles sans moyens particuliers ainsi que la zone d'influence et de déceler toute évolution manifeste. L'ITSEOA rappelle qu'il est souhaitable de réaliser simultanément le contrôle annuel et les travaux d'entretien courant.

La détection des désordres importants reste l'objectif principal du contrôle annuel. Cet aspect a déjà été évoqué dans le paragraphe III.2 Relevé et suivi géométriques de l'ouvrage de l'article [1], avec l'exemple des tassements d'appui, des bombements de murs, des chocs sur parapet et des désalignements de garde-corps, et sera abordé dans le paragraphe III de cet article avec notamment la problématique de la fissuration pour les structures béton qui représentent une part importante des ouvrages en service. Le contrôle annuel consiste donc à détecter l'évolution ou l'apparition d'un désordre significatif. D'un point de vue méthodologique, il y a donc une phase de détection (d'un défaut de type mouvement comme la linéarité d'un garde-corps ou d'un mur de front, d'un défaut de surface de type existence d'une importante zone d'humidité en intrados ou de corrosion sur une âme de poutre ou d'un défaut de type fissure) puis une phase de comparaison avec un état précédent connu. Par choix et au vu du niveau de détail attendu de ces visites axées sur les désordres graves, la reconnaissance et l'identification du désordre observé ainsi que sa localisation ne sont pas développées dans ce paragraphe.

Pour les deux phases du contrôle annuel, des outils numériques sont utilisables ou adaptables. La détection d'un mouvement d'un élément ou d'une partie de la structure utilise des techniques intégrant mesures de distance et quantification de la différence entre le réel et des lignes droites/courbes théoriques, mesures de surface et comparaison entre le réel et des plans théoriques. Avec certains logiciels, il est ensuite possible de comparer deux relevés consécutifs ou alors, le cas échéant, deux modèles 3D entre

eux, afin de suivre l'évolution des désordres d'un ouvrage. Dans le cas d'une comparaison 3D, il est cependant nécessaire au préalable de recalibrer les modèles entre eux.

La détection de défauts de surface (tâches par exemple) peut être réalisée à partir de techniques d'analyse d'images basiques. On peut ainsi repérer les différences de contraste ou d'aspects colorimétriques majeures sur l'image globale ou autour d'une zone repérée par l'opérateur. La zone correspondant à un désordre est alors délimitée et sa taille quantifiée. Pour connaître l'évolution du désordre, une comparaison entre deux états de la taille de la surface identifiée est réalisée grâce à des outils numériques de calcul de distance entre objets. Ces fonctions sont déjà intégrées dans des logiciels de visualisation de modèles 2D ou 3D. Le recalage automatique des données entre elles reste cependant parfois problématique.

Au vu de la nature des désordres à repérer dans le cadre d'un contrôle annuel, la détection de fissures et de fractures d'ouverture importante est envisageable par des outils numériques interactifs ou entièrement automatiques. Parmi les méthodes interactives, on peut citer les méthodes de relevés de fissures à partir d'un algorithme dit de *fast-marching* [3],[4],[5]. Ce dernier permet, à partir d'un point sélectionné par l'opérateur (une extrémité de fissures par exemple, de guider l'opérateur dans le suivi de la fissure et faciliter ainsi grandement sa saisie (voir Figure 1).

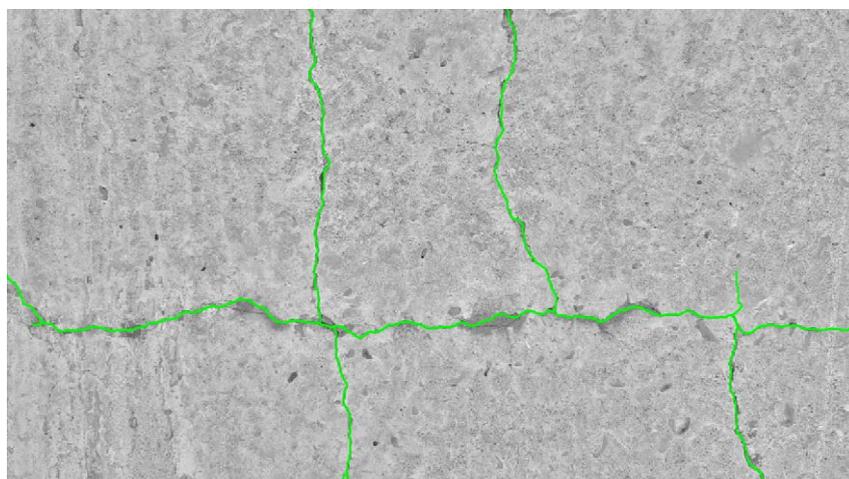


Figure 1 : Relevé (en vert) de fissures sur des parois en béton par des méthodes basées sur l'algorithme de Fast-marching [3, 4] dans une version optimisée [5]

Des méthodes automatiques peuvent aussi être mis en place, basées sur les méthodes d'apprentissage. Sur la Figure 2, on peut voir un exemple de détection zones présentant un fer apparent ainsi que la zone épauffrée autour de l'armature. Ces résultats sont encore du domaine de la recherche [6].

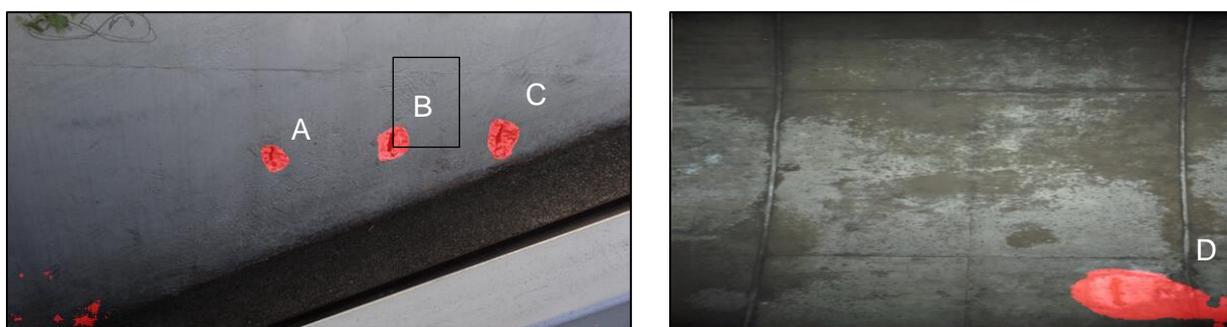


Figure 2 : Détection automatique de fers apparents et des épaufrures associées. Les zones en surimpression rouge notées A, B, C et D détectent correctement les fers apparents et épaufrures. Les autres zones correspondent à de fausses alarmes.

Ensuite, pour la seconde phase de détermination de l'évolution du désordre, une comparaison entre deux états de la taille de la fissure identifiée (longueur et ouverture) est réalisée grâce à des outils numériques opérationnels et ayant fait leur preuve, ou des outils de comparaison d'images.

Evaluation de l'apport

Le contrôle annuel correspond au premier niveau formalisé de surveillance des ouvrages. Il complète le patrouillage notamment d'un point de vue sécurité. C'est une opération relativement rapide et qu'il est conseillé de mener simultanément aux travaux d'entretien courant.

L'outil numérique imaginé pour réaliser ces contrôles annuels permettrait de mieux tracer ce type de visite, d'uniformiser l'approche et le contenu du contrôle et d'en améliorer la précision et l'exhaustivité. De plus, il semble évident que cet outil sera rapidement capable d'aller au-delà du cadre des contrôles annuels, qui ne doivent traiter que les évolutions évidentes, en quantifiant l'ensemble des désordres relevés notamment. De ce fait, on atteindra le niveau de constatations attendu pour une visite d'évaluation.

Faisabilité du projet envisagé

Le tableau n°1 ci-dessous décrit la faisabilité des apports envisagés.

	Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes	Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers	Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques
Détection des désordres importants de type mouvement	Détection d'un mouvement important.		
Détection des désordres surfaciques importants	Détection d'un désordre surfacique important.		
Détection des désordres importants de type fissure	Détection des fractures importantes.		
Evaluation de l'évolution / Apparition	Réaliser des comparaisons de résultats numériques provenant de différents relevés. Pour les désordres surfaciques, réaliser des comparaisons sur des objets globaux (poutre, garde-corps, bordure de trottoir) provenant de différents relevés.		Décomposition automatique des objets pour réaliser des comparaisons de relevés sur ces objets (poutre, pile, mur de front, ...).

Tableau n°1 : Faisabilité de la réalisation du contrôle annuel

Limite des apports

L'outil ayant pour mission d'évaluer le caractère évolutif des désordres ou de déterminer l'apparition des désordres, tout comme, dans une moindre mesure, les outils de détection des désordres, nécessite une programmation complexe et un investissement coûteux pouvant sembler démesuré au regard du caractère courant et « simple » que représente le contrôle annuel.

Cet outil numérique ne doit pas faire passer au second plan l'entretien courant des ouvrages régulièrement réalisé en parallèle du contrôle annuel, qui nécessitera le déplacement d'une équipe sur site.

II.2 Visite d'évaluation

La visite d'évaluation est un examen visuel dont l'objet est de constater l'état apparent de l'ouvrage, de rechercher les signes révélateurs de nouveaux défauts ou désordres importants et de contrôler l'évolution de ceux qui sont déjà connus. La visite d'évaluation permet d'établir une cotation de l'état apparent de chaque partie de l'ouvrage, puis sa cotation globale. Les ouvrages du réseau routier national sont évalués selon la méthodologie IQOA tous les trois ans. En général, cette visite d'évaluation se pratique sans moyen d'accès particulier.

Tout comme le contrôle annuel, la première vérification à mener concerne la localisation et l'identification de l'ouvrage. Les propositions des paragraphes III.1 Détection et localisation d'ouvrage et III.3 Identification des ouvrages de la partie 1 de cet article [1] ont déjà évoqué ces éléments.

Le repérage précis (détection, localisation et orientation) des désordres nouveaux, l'évaluation des désordres connus et leurs notations sont les trois principales phases de la visite d'évaluation. Ces aspects seront partiellement évoqués dans le paragraphe III du présent article.

Pour les deux premières phases que sont le repérage et l'évaluation, des outils numériques sont utilisables ou adaptables, de la même manière que pour le contrôle annuel : détection des désordres de type mouvement, fissure ou défaut de surface. Toutefois, une attention particulière est à porter sur leur localisation et leur orientation en vue de la cotation de l'ouvrage. On pourra retrouver les techniques d'imagerie suivantes : mesures de distance et quantification de la différence entre le réel et des lignes droites/courbes théoriques, mesures de surface et comparaison entre le réel et des plans théoriques, modèles 3D, analyse d'images et outils numériques. La notation de chaque désordre suivant la méthode retenue par le gestionnaire semble plus complexe. Elle passe par la reconnaissance du désordre et sa localisation et fait appel à des approches de type apprentissage automatique (deep learning) extrêmement performantes après un apprentissage conséquent.

Evaluation de l'apport

La visite d'évaluation est le premier niveau de surveillance des ouvrages réalisé par une personne ayant une connaissance des ouvrages d'art.

Lors d'une visite d'évaluation, la qualité des observations est directement liée à l'accessibilité du dessus et du dessous de l'ouvrage. Par exemple, un ouvrage situé au-dessus d'un large cours d'eau présente souvent, dans sa cotation, des parties non évaluées (NE). Le premier apport d'un outil numérique serait donc de compléter les observations visuelles de l'agent chargé de la visite pour les zones difficiles d'accès.

L'outil numérique imaginé pour réaliser ces visites d'évaluation présente de nombreux atouts. Il permet de régler une partie des problèmes de sécurité liés à l'intervention de l'évaluateur et améliore de manière notable la précision et l'exhaustivité des relevés en quantifiant l'ensemble des désordres relevés notamment. De ce fait, on atteint un très bon niveau de constatations.

Faisabilité du projet envisagé

	Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes	Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers	Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques
Détection des désordres importants de type mouvement	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision de l'ordre de 1 cm.(1)	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision inférieure à 1 cm.	
Détection des désordres surfaciques importants	Détection d'un désordre surfacique avec une précision de l'ordre de 10 cm.	Détection d'un désordre surfacique avec une précision inférieure à 10 cm.	
Détection des désordres importants de type fissure	Détection semi-automatique des fissures conséquentes (ouverture de fissure supérieure à 1 mm).	Détection semi-automatique des fissures d'ouverture moyenne (ouverture de fissure supérieure à 0,3 mm).	Détection semi-automatique des fissures de faible ouverture (ouverture de fissure inférieure à 0,3 mm).
		Détection automatique des fissures supérieures à 1 mm sur l'image.	Détection automatique des fissures supérieures à 0.5 mm sur l'image.
Evaluation de l'évolution / Apparition	Réaliser des comparaisons de résultats numériques provenant de différents relevés. Pour les désordres surfaciques, réaliser des comparaisons sur des objets globaux (poutre, garde-corps, bordure de trottoir) provenant de différents relevés.		Décomposition automatique des objets pour réaliser des comparaisons de relevés sur ces objets (poutre, pile, mur de front, ...) avec une précision de 1 cm.
Identification du désordre en vue de sa notation		Premier niveau d'identification (éclatements de béton avec armatures corrodées, corrosion d'une partie de la charpente métallique, fissure).	Second niveau d'identification (flache sur la chaussée, traces de ruissellement sèches/humides, efflorescences sèches/humides).
Localisation et orientation du désordre identifié en vue de sa notation	Envisageable sur l'ensemble des désordres dès lors que les prises de vue / nuages de points soient orientés.		

Tableau n°2 : Faisabilité de la réalisation d'une visite d'évaluation

(1) : Cette détection est réalisable mais requiert l'utilisation de technologie nécessitant un post-traitement.

Limites des apports

Comme dans le paragraphe précédent, le développement des outils, notamment celui permettant l'évaluation de l'évolution, s'annonce difficile et coûteux.

De plus, l'identification des désordres dans le but d'obtenir sa notation est à ajouter. La complexité et la diversité des types de désordres va rendre très délicate la phase d'apprentissage déjà lourde par défaut.

II.3 Inspection détaillée (périodique, initiale, de parties d'ouvrage)

L'inspection détaillée périodique constitue un « bilan de santé » complet de l'ouvrage. Les ouvrages concernés sont les ouvrages importants qui méritent une attention particulière (notamment les ouvrages exceptionnels ; les ouvrages complexes ; les ouvrages métalliques ou mixtes supportant un fort trafic poids lourds ; les grands ouvrages en béton précontraint ; tous les tunnels et les tranchées couvertes ; les murs présentant des éléments structurels enterrés ; tous les ouvrages « malades »...). Cette inspection a lieu tous les six ans au plus pour les ouvrages cités ci-dessus.

L'inspection détaillée est en général un examen visuel qui peut, le cas échéant, être complété par des auscultations et des mesures. L'inspection peut aussi être approfondie par des contrôles non destructifs ou destructifs. Sa consistance est fonction de la nature, de l'importance et de l'état de l'ouvrage, mais l'ensemble de ses parties doit obligatoirement être examiné. En général, cette inspection nécessite l'utilisation de moyens d'accès particuliers, de façon à pouvoir toucher le parement à la main. Le service organisationnel effectue donc en amont la programmation des moyens (réservation de passerelle, nacelle, bateau ou plongeurs subaquatiques, etc). Dans ce paragraphe, les inspections de parties d'ouvrage sont aussi étudiées. Elles ont pour but de compléter, si nécessaire, les actions classiques de surveillance périodique quand celles-ci n'ont pas permis d'évaluer l'état d'un ouvrage d'art par défaut d'examen d'une partie majeure de la structure.

Tout comme lors du contrôle annuel et de la visite d'évaluation, la première vérification à mener concerne la localisation et l'identification de l'ouvrage. Les propositions des paragraphes III.1 Détection et localisation d'ouvrage et III.3 Identification des ouvrages de [1] ont déjà évoqué ces éléments.

Le repérage précis (détection, localisation et orientation) de tous les désordres nouveaux, l'évaluation de tous les désordres connus, leurs représentations sur un schéma, leurs analyses et leurs notations sont les principaux objectifs de l'inspection détaillée. Ces aspects sont très partiellement évoqués dans les paragraphes précédents et dans le paragraphe III de cet article.

Les phases de détection des désordres nouveaux, de localisation des désordres et d'évaluation de l'évolution des désordres connus sont différentes des éléments évoqués dans les paragraphes précédents. Cette différence réside au niveau de l'exhaustivité attendue pour une inspection détaillée et donc du niveau de précision à atteindre par les outils numériques (fissures d'ouverture 0,1 mm, perte de section des armatures, zones qui « sonnent creux », distorsion des appareils d'appui, ...). Des avancées notables sur les outils cités dans les deux paragraphes précédents sont nécessaires pour pouvoir prétendre au niveau de précision exigé par l'inspection détaillée. De plus, les défauts de surface de type « traces de ruissellement » sèches et humides, les zones de béton qui « sonnent creux » sont aussi relevés lors des inspections détaillées grâce au touché des surfaces par les inspecteurs et au sondage au marteau. Le développement de méthodologies numériques basées notamment sur l'utilisation de la thermographie infrarouge est alors nécessaire pour identifier ces zones particulières.

La représentation des désordres sur une cartographie semble tout à fait envisageable après rattachement de tous les clichés et reconstitution photogrammétrique de l'ouvrage.

L'analyse des désordres doit fournir au maître d'ouvrage des précisions sur l'origine ou les origines probables des désordres ainsi que le lien éventuel entre plusieurs désordres et leurs conséquences sur la structure à court, moyen et long terme. Tout comme la notation de chaque désordre, ces phases sont

complexes et techniques. Elles passent dans un premier temps par la reconnaissance du désordre et font donc appel à des approches de type apprentissage automatique. Toutefois, la suite du processus est compliquée à imaginer sans la prise en main d'une personne qualifiée en inspection d'ouvrage. Des travaux de recherche commencent cependant à être menés pour aider la personne qualifiée dans la compréhension des phénomènes d'apparition de désordres. Ainsi, dans [7], les auteurs s'appuient sur l'extraction automatique des hyperboles d'une image GPR d'une structure en béton (Figure 3) pour estimer les propriétés physiques du matériau, notamment l'état du béton et la profondeur des armatures. L'objectif est de tenter de faire le lien entre ses propriétés et l'état observé en surface du béton.

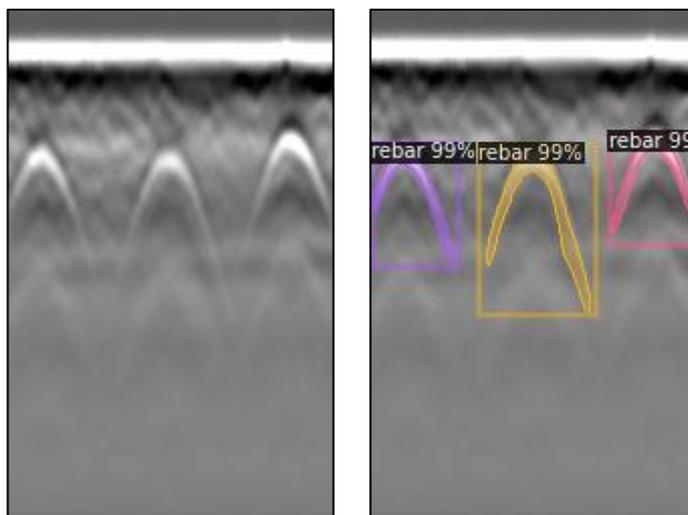


Figure 3 : Détection automatique d'hyperboles matérialisant les armatures dans des images GPR d'une structure en béton

Evaluation de l'apport

L'outil numérique imaginé pour dresser la liste exhaustive des désordres permet de régler une partie des problèmes de sécurité et d'exploitation liés à l'intervention de l'équipe d'inspection. De plus, il peut permettre d'améliorer la précision de la localisation des désordres sur les cartographies pour certaines configurations d'ouvrage. Selon les ouvrages et l'accessibilité des zones à inspecter, l'utilisation de capteurs embarqués sur un véhicule (par exemple pour des ouvrages linéaires de faible hauteur) ou embarqués sur un drone peut être envisagée pour l'acquisition.

Faisabilité du projet envisagé

	Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes	Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers	Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques
Détection des désordres de type mouvement	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision de l'ordre de 1 cm.	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision inférieure à 1 cm.	
Détection des désordres surfaciques	Détection d'un désordre surfacique visible avec une précision de l'ordre de 10 cm.	Détection d'un désordre surfacique visible avec une précision inférieure à 10 cm.	Détection d'un désordre surfacique visible avec une précision inférieure à 1 cm. Détection d'un désordre surfacique non-visible (type zone qui « sonne creux »).

Détection des désordres de type fissure	Détection semi-automatique des fissures conséquentes (ouverture de fissure supérieure à 1 mm).	Détection semi-automatique des fissures d'ouverture moyenne (ouverture de fissure supérieure à 0,3 mm).	Détection semi-automatique des fissures de faible ouverture (ouverture de fissure inférieure à 0,3 mm).
		Détection automatique des fissures d'ouverture supérieure à 1 mm sur l'image.	Détection automatique des fissures supérieures à 0.5 mm sur l'image.
Détection des désordres subaquatiques	Détection d'un désordre surfacique avec une précision de l'ordre de 10 cm.	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision de l'ordre de 3 cm. Détection semi-automatique des fractures conséquentes (ouverture de fracture supérieure à 3 cm). Détection d'un désordre surfacique avec une précision de 3 à 10 cm.	Détection d'un désordre de type mouvement avec une précision inférieure à 3 cm. Détection automatique des désordres de type fissures (ouverture de fissure inférieure à 3 cm). Détection d'un désordre surfacique avec une précision inférieure à 3 cm.
Réalisation de la cartographie	Représentation des désordres détectés sur un plan 2D (intrados, élévation, extrados, face d'un appui, ...).	Semi-automatisation de la détection des désordres sur un plan 3D.	
Evaluation de l'évolution / Apparition	Réaliser des comparaisons de résultats numériques provenant de différents relevés. Pour les désordres surfaciques, réaliser des comparaisons sur des objets globaux (poutre, garde-corps, bordure de trottoir) provenant de différents relevés.		Décomposition automatique des objets pour réaliser des comparaisons de relevés sur ces objets (poutre, pile, mur de front, ...) avec une précision de 1 cm ou sur des désordres de type fissure avec une précision de 0,1 mm.
Analyse des désordres			Déterminer l'origine de chaque désordre, faire le lien entre différents désordres. Indiquer leur impact sur la structure dans le temps.
Identification du désordre en vue de sa notation		Premier niveau d'identification (éclatements de béton avec armatures corrodées, corrosion d'une partie de la charpente métallique, fissures).	Second niveau d'identification (flache sur la chaussée, traces de ruissellement sèches/humides, efflorescences sèches/humides).

Tableau n°3 : Faisabilité de la réalisation d'une inspection détaillée

Limite des apports

Comme dans le paragraphe précédent, le développement des outils, notamment celui permettant l'évaluation de l'évolution ou l'identification des désordres, s'annonce difficile et coûteux.

De plus, le niveau de précision attendu pour une inspection détaillée n'existe pas avec les outils numériques connus actuellement et ayant fait leur preuve. Par conséquent, l'intervention d'une personne compétente est, à moyen terme, indispensable.

II.4 Outils développables à court terme

Les technologies numériques actuelles et les matériels existants pourraient dès à présent être assemblés et intégrés dans un outil capable de contribuer à l'évaluation d'ouvrages d'art. Toutefois, comme le montrent les tableaux de faisabilité présentés dans cette partie visites d'ouvrages, cet outil serait à déployer sur des ouvrages propices et nécessiterait encore une intervention humaine pour certaines détections de désordres.

La réalisation de visites d'ouvrages est indispensable pour une bonne connaissance et une bonne gestion d'un patrimoine d'ouvrages d'art. Le contrôle annuel, qui complète le patrouillage, est la visite formalisée la plus régulière. Elle est effectuée par un agent de l'unité locale du gestionnaire qui observe les parties accessibles de l'ouvrage et relève les désordres importants.

En utilisant un drone capable de réaliser des prises de vue de l'ensemble d'une structure, la surface des parties « observées », notamment pour des ouvrages situés au-dessus de larges cours d'eau par exemple, est considérablement augmentée. L'utilisation d'un scanner ou d'un LIDAR pourrait compléter les images collectées par un(des) nuage(s) de points. L'utilisation de ce(s) matériel(s) présente un double avantage : augmenter les surfaces visitées et mémoriser des données sur la structure à un instant t. De plus, une amélioration de l'uniformisation des contrôles découle de ce procédé.

Une fois les données sur site collectées, la détection des désordres serait réalisée en post-traitement. De manière automatique, une image serait constituée pour les différentes parties de l'ouvrage avec l'assemblage de prises de vue réalisées par le drone et corrigées. A partir de ces images, les désordres de type fissure et de type surfacique seraient repérés. Ces repérages seraient faits semi automatiquement dans un premier temps, c'est-à-dire qu'un opérateur interviendrait pour cliquer sur les désordres de type fissure et pour double-cliquer sur les désordres de type surfacique, par exemple. Pour les désordres de type mouvement, plusieurs scénarios semblent possibles : l'analyse des images ou l'analyse des nuages de points. Dans les deux cas, l'outil reconstituerait un élément de la structure ou une partie de l'ouvrage et comparerait sa forme géométrique avec des courbures parfaites (ligne droite ou partie de cercle), comme illustré dans la Figure 4.



Figure 4 : Comparaison des formes géométriques réelles et théorique permettant de détecter un tassement des appuis (Cerema)

Chaque désordre repéré serait mémorisé de manière numéraire dans un premier temps. Pour les désordres de type surfacique, le nombre de désordres par partie d'ouvrage serait enregistré ainsi que, pour chaque désordre, sa surface (ou un ratio de sa surface par rapport à la surface totale de la partie d'ouvrage). De même, pour les désordres de type fissure, le nombre de fissures par partie d'ouvrage serait enregistré ainsi que, pour chaque fissure, sa longueur (ou un ratio) et son ouverture (ou un ratio). Enfin, pour les défauts de type mouvement, la distance maximale entre la courbure parfaite et la géométrie réelle de l'élément de l'ouvrage observé serait gardée (ou un ratio).

Les algorithmes permettant d'automatiser le relevé des désordres restent encore du domaine de la recherche et du développement et ne sont donc pas opérationnels à court terme.

III. Diagnostic

Les actions de surveillance, et essentiellement l'inspection détaillée, peuvent, le cas échéant, être complétées par des auscultations (non destructives ou destructives) et des mesures, soit pour mieux définir l'état de la structure, soit pour anticiper des modes de défaillance. A cette fin, une large gamme de capteurs et de technologies a été développée au fil du temps par le réseau scientifique et technique et le secteur privé. Le développement important des technologies numériques ouvre également de nouvelles perspectives dans ce domaine, que ce soit en termes de nouveaux capteurs, de nouvelles approches ou de nouveaux modes de transmission. Les paragraphes qui suivent introduiront les apports envisageables des technologies numériques sur ces questions.

III.1 Suivi de fissuration

Dans le cadre des actions de surveillance d'un patrimoine ouvrages d'art, des relevés exhaustifs de fissuration, par exemple en intrados d'une dalle, d'une traverse supérieure ou sur un piédroit en béton armé sont réalisés pour, dans un premier temps (inspection détaillée initiale), faire un état des lieux initial de l'état de la structure, puis, dans un second temps (inspections détaillées périodiques), suivre l'évolution de cet état et ainsi statuer sur le comportement attendu ou anormal, en déduire les éventuelles pathologies des structures.

Le gestionnaire d'un patrimoine d'ouvrages d'art peut également mettre en œuvre, sur la base des conclusions des actions de surveillance précitées, des actions de type « surveillance renforcée » qui nécessitent par exemple une instrumentation légère de type jauge permettant de suivre l'ouverture d'une ou de plusieurs fissures, ponctuellement, et/ou qui nécessitent, dans le cas d'une réaction de gonflement interne du béton, des mesures d'indices de fissuration sur une ou plusieurs parties d'ouvrage.

Depuis plusieurs années déjà, les technologies numériques ont été associées à la détection et au suivi de la fissuration, d'abord sans moyen de locomotion (de manière statique, depuis le sol). Ces dernières années, l'utilisation des drones pouvant embarquer des capteurs optiques et/ou infrarouges s'est largement répandue.

Des prestations d'inspections détaillées à l'aide de drones sont ainsi aujourd'hui commercialisées par le secteur privé. De son côté, le réseau scientifique et technique développe et expérimente cette technique d'inspection détaillée notamment avec les équipes de l'agence d'Autun et de la direction technique risques, eaux et mer du Cerema et celles de l'université Gustave Eiffel (UGE). Un rapport présente et compare les résultats d'une inspection détaillée traditionnelle sur des piles du pont de Cheviré sur la Loire et d'inspections détaillées sur les mêmes piles à l'aide de drones du secteur privé et du Cerema [9].

Par ailleurs, depuis 2017, le Cerema et l'UGE travaillent sur le sujet de la modernisation de la méthode d'essai n°47 [10] par l'utilisation de capteurs optiques et le développement d'une application de post-traitement des images numériques. Le rapport de synthèse de ce travail a été diffusé en décembre 2020 et connaîtra une suite au cours des prochaines années, avec les mêmes partenaires.

Evaluation de l'apport

Il faut distinguer plusieurs cas de figures pour juger de l'apport des technologies numériques pour l'application du suivi de la fissuration :

- 1er cas : une ou plusieurs jauges Sagnac de type G1 ont été fixées sur différentes parties d'ouvrage accessibles uniquement par des moyens d'accès spécifiques tels que passerelles négatives ou nacelles positives ou cordes. Les technologies numériques embarquées sur un drone permettent tout à fait (à condition que le vol soit autorisé, que les espaces d'évolution ne soient pas trop exigus) de faire la lecture de ces jauges et représentent donc une économie financière (prestation drone inférieure à location passerelles/nacelles) pour le gestionnaire et lui évitent des contraintes d'exploitation ;
- 2ème cas : relevés de fissuration ou mesures d'Indices de Fissuration (IF) ne nécessitant pas l'utilisation de drones, à proximité (entre 1 et 4 mètres) des parements inspectés/auscultés. Moyennant l'utilisation de capteurs optiques d'au moins 18M de pixels [10], la détection de fissures est tout à fait possible avec cependant des limites dues au contraste du support, aux conditions d'ensoleillement (surexposition, contre-jour), à la discrimination des artefacts (fissure ou toile d'araignée), à des formes géométriques particulières (parements architecturaux matricés, angles à 90°), à la présence d'obstacle entre le support observé et l'objectif (nombreux réseaux par exemple dans une tranchée couverte), à la présence de mousse/lichens, à la présence de tags... La quantification de l'ouverture des fissures est plus incertaine et dépendra prioritairement de la définition du capteur optique utilisé (50M de pixels étant recommandé et accessible financièrement), de la distance entre le support observé et le capteur, de la calibration de l'image et des performances de l'application de post-traitement. Les travaux relatifs à la modernisation de la méthode d'essai n° 47 montrent néanmoins des résultats proches entre les mesures d'IF faites par un inspecteur et celles réalisées, dans le cadre de cette étude, à l'aide d'un capteur de 18M de pixels à 1 m du parement, avec calibration de l'image puis post-traitement via une application ANDROA développée par UGE pour l'occasion ;
- 3ème cas : relevés de fissuration ou mesures d'Indices de Fissuration (IF) réalisés à l'aide de drones volants. La détection de fissures est possible mais avec, par rapport au 2ème cas, encore plus de limites liées à l'utilisation d'un drone volant (stabilisation de la prise de vue, difficulté de réaliser des vols programmés, stationnaires et à proximité des parements spécifiquement pour les grands ouvrages au niveau desquels le vent est très souvent une contrainte, repérage des clichés les uns par rapport aux autres pour les assembler lors du post-traitement, autorisations à obtenir au préalable, certaines zones ne peuvent pas être survolées par un drone...). Le REX du pont de Cheviré [9] montre que la détection des fissures réalisée par le secteur privé est loin d'être exhaustive (au maximum, 50% du réseau de fissuration a été détecté). Concernant la quantification de l'ouverture des fissures, toujours sur la base du REX du pont de Cheviré, les fissures dont les ouvertures sont inférieures à 3/10 mm ne sont que rarement détectées. Lorsque des ouvertures sont annoncées, les valeurs sont minorées de 3/10 mm environ dans le cas du REX du pont de Cheviré.

Faisabilité du projet envisagé

	Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes	Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers	Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques
Lecture de jauges fixées sur parements béton accessibles uniquement avec moyens d'accès spécifiques	Lecture réalisable avec capteur optique depuis le sol pour les jauges les plus proches et depuis un drone équipé de capteur optique pour les jauges les plus éloignées.	Difficultés dans le cas d'espaces exigus (poutres entretoisées, intérieur de poutres-caissons, par exemple).	Impossibilité si interdiction de voler (par exemple, en tête d'un pylône de pont suspendu).
Mesures de suivi d'Indices de Fissuration selon la Méthode d'Essai LPC n°47	Si acquisition « statique » (depuis le sol), détection du réseau de fissuration.	Si acquisition « statique », quantification de l'ouverture des fissures possible avec certaines limites. Si acquisition « dynamique » (à l'aide d'un drone volant), détection du réseau de fissuration partiellement réalisable (50% environ).	Si acquisition « dynamique », quantification de l'ouverture des fissures trop imprécise et aléatoire.
Relevé de fissures	Idem ligne précédente.		

Tableau n°4 : Faisabilité de la réalisation du suivi de fissuration

Limite des apports

Au-delà des limites qui ont déjà été évoquées dans le premier paragraphe de cette partie, les outils informatiques à développer pour des traitements automatisés sont des outils complexes et coûteux. De plus, à l'heure actuelle, les capteurs optiques haute définition, embarqués sur drones, restent onéreux : la calibration de l'image prise à partir d'un drone, sa stabilisation et son repérage sont autant de sujets qui ne sont pas aujourd'hui ni complètement traités et encore moins réglés.

Un test de faisabilité concernant la détection exhaustive de fissures a été réalisé par l'agence d'Angers du Cerema sur un socle d'une pile du pont de Cheviré : les résultats sont en cours d'analyse.

La piste du drone « rampant » a déjà été explorée par certains gestionnaires et/ou bureaux d'études. Elle présenterait moins de contraintes relatives aux autorisations de travailler mais également relatives aux aléas climatiques et enfin relatives au repérage des acquisitions. Cependant, son utilisation nécessiterait des temps d'acquisition et de post-traitement beaucoup plus importants.

III.3 Déformée d'ouvrage ou de partie d'ouvrage

Sur la base des conclusions des actions de surveillance (de type inspections détaillées périodiques par exemple) d'un patrimoine Ouvrages d'Art, un gestionnaire peut décider de mettre en œuvre un suivi périodique d'une déformation d'ensemble d'un ouvrage (par exemple, mesure de flèches sur travées) et/ou d'une déformation d'une partie d'ouvrage (par exemple, mesure de déversement d'un mur en aile).

Ces actions sont mises en place dans le cadre d'une surveillance renforcée de la structure pour suivre l'évolution d'une pathologie avérée ou pour disposer d'éléments permettant de statuer sur la pathologie dont la structure est affectée. Si les origines et objectifs de ces actions diffèrent des objectifs du paragraphe III.2 Relevé et suivi géométriques de l'ouvrage de la partie 1 de cet article [1], les technologies

et modes opératoires mis en œuvre sont identiques avec un niveau de précision recherché qui sera variable selon les situations (de l'ordre du centimètre pour un déversement de mur et de l'ordre du 1/10 mm pour la mesure d'une flèche d'un tablier). Néanmoins, pour certains types d'ouvrages et de suivis, notamment les buses métalliques, les précisions nécessaires demandent un suivi réalisé avec un LIDAR statique. En effet, les niveaux de précision obtenus sont plus élevés avec des mesures statiques qu'avec des mesures dynamiques.

Dans cette approche de suivi géométrique, d'une durée limitée, l'outil pourrait effectuer des comparaisons entre les relevés périodiques et le relevé de référence. En fonction de la situation, des différences géométriques maximum peuvent être définies (valeur limite de déversement d'un mur de soutènement par exemple). Lorsque cette valeur limite est atteinte, l'outil alerte automatiquement le gestionnaire afin que celui-ci regarde les images ou les représentations de l'objet afin de mettre en place les actions préalablement définies.

Evaluation de l'apport

En s'affranchissant de la neutralisation partielle de la circulation sur et/ou sous ouvrage, autrement dit en réduisant considérablement les contraintes d'exploitation pour le gestionnaire de l'ouvrage, l'apport de l'utilisation de l'imagerie et du LIDAR serait très important : de fait, il permettrait de gagner en régularité et en exhaustivité du relevé tout en réduisant le temps à passer sur les ouvrages pour réaliser ces mesures, permettant ainsi un gain pour la sécurité des agents et l'exploitation du réseau.

Concernant l'utilisation de LIDAR statiques, notamment pour les ouvrages hydrauliques tels que les buses métalliques par exemple, son apport réside principalement et essentiellement dans l'exhaustivité de la mesure, dans l'amélioration de la connaissance de l'état de la structure et dans la possibilité de réaliser un suivi périodique représentatif et fiable des déformations d'ensemble et localisées.

Faisabilité du projet envisagé

	Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes	Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers	Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques
Déformée d'ouvrage ou de partie d'ouvrage	<p>Scan 3D permet d'être plus exhaustif quant à l'évaluation d'ouvrages tels que buses (métalliques par exemple), murs de soutènement (maçonnerie, terre armée par exemple).</p> <p>Définition de la précision recherchée en fonction des objectifs poursuivis, (flèche, déversement, tassement...).</p>	<p>Les incertitudes liées aux mesures réalisées à l'aide du Scan 3D doivent être connues.</p> <p>Adéquation entre la précision recherchée des mesures et les technologies pressenties (imagerie et précision de 1/10 mm pour flèche, par exemple).</p> <p>Développement d'outils informatiques permettant d'exploiter automatiquement les mesures et de déclencher le cas échéant des alertes.</p>	<p>Impossibilité d'utiliser le drone dans certaines circonstances (survol des zones circulées et habitées).</p> <p>Impossibilité de détecter des mouvements de structures immergées (radier de buse métallique ou d'ouvrages en maçonnerie par exemple).</p>

Tableau n°5 : Faisabilité de la mesure de la déformée d'ouvrage ou de partie d'ouvrage

Limite des apports

Les mesures de suivi de déformations d'ensemble ou localisées s'appuient sur une comparaison avec un état de référence. Afin de réaliser cette comparaison et de déduire automatiquement d'éventuelles alertes, il faut être en mesure d'identifier correctement l'objet et il faut pouvoir comparer deux mesures sans avoir une cible servant de point fixe. Cela pouvant s'appliquer à une variété assez importante d'objets, les

développements informatiques sont conséquents. De plus, à l'heure actuelle, les capteurs optiques haute définition, embarqués sur drones ou dans un véhicule routier, restent onéreux : leur calibration, la stabilisation de l'image et le repérage des différentes acquisitions sont autant de sujets qui ne sont pas aujourd'hui ni complètement traités et encore moins réglés.

Concernant le drone, une des difficultés est son utilisation au-dessus de voies circulées ou de terrains privés.

L'utilisation du Scan 3D pour le suivi périodique de déformations nécessite la connaissance des incertitudes de mesures selon les différents cas de figures d'utilisations. Les données fabricant étant en la matière insuffisantes, la Direction Territoriale Ouest du Cerema a réalisé une vérification métrologique de la précision de la mesure d'un Scan 3D, pour les applications liées au domaine des ouvrages d'art, en fonction de la distance d'acquisition [10]. Les perspectives d'utilisation généralisée de ce type de matériel existant reposent essentiellement sur des protocoles de qualifications métrologiques et de réalisation puis d'exploitation des nuages de points.

III.4 Les méthodes électromagnétiques

Le sujet étant l'auscultation des ouvrages pour une gestion de patrimoine, nous allons nous concentrer sur les méthodes non destructives. Parmi les principales méthodes non destructives, nous n'explorerons pas les méthodes par gamma densimétrie car la source radioactive présente des difficultés pratiques et nous nous concentrerons ici sur les méthodes électromagnétiques, qui se développent beaucoup aussi pour être appliquées aux mesures in situ.

Ces méthodes sont basées sur la propagation d'un signal au sein de la structure, considérée comme un solide diélectrique multicouche, dans le but de caractériser certains paramètres de cette dernière. Le principe est de disposer d'antennes émettrices et réceptrices et de comparer le signal émis et réfléchi au cours du temps. Les matériaux étudiés sont modélisés comme des milieux diélectriques, au sein desquels il peut y avoir présence d'eau. La propagation de ces ondes électriques obéit aux équations de Maxwell, donc les champs électrique et magnétique sont couplés. Le type de signal émis peut être amené à varier, en fonction de son intensité et de sa fréquence. Ces variations permettent de décliner les réponses des milieux sollicités et ainsi d'affiner l'analyse. La source émettrice peut prendre des formes différentes, en fonction des caractéristiques d'antennes choisies.

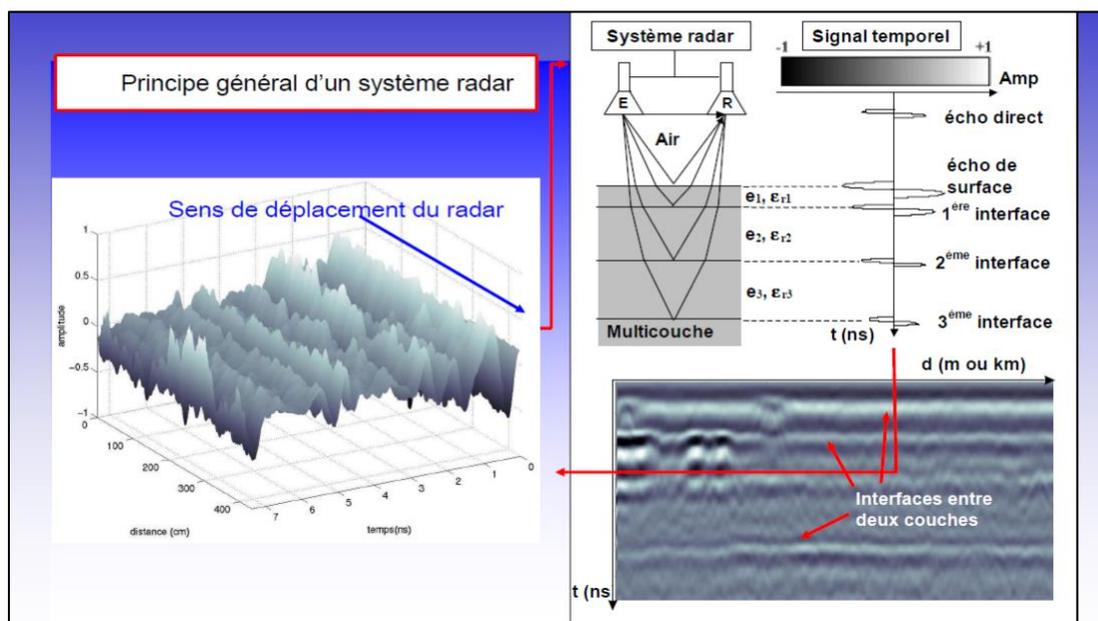


Figure 5 : Principe général d'un système Radar (Source : Cyrille Fauchard - ENDSUM)

Les radars les plus couramment utilisés sont les radars impulsions et les radars à saut de fréquence. Les méthodes radars sont fondamentalement des méthodes électromagnétiques, dont la fréquence du signal émis varie entre quelques MHz à 20 GHz, ce qui permet des auscultations de quelques centimètres à quelques mètres.

Le principe est illustré sur une structure multicouche sur la Figure 5.

Évaluation de l'apport

Les méthodes radars sont sensibles aux variations diélectriques des milieux et visent à produire une imagerie de subsurface du milieu considéré (voir Figure 5). Les variations du signal permettent de faire de la tomographie radar et, après inversion, d'accéder aux propriétés physico-chimiques des milieux (présence de métal, état de corrosion par la teneur en ions chlorure...). L'apport principal est donc la capacité à fournir une information sur l'état d'un milieu sans avoir à effectuer de prélèvements qui risqueraient de fragiliser ou d'endommager la structure de l'ouvrage. Dans le domaine des ouvrages d'art, le radar est fréquemment utilisé pour la détection de câbles de précontrainte, pour le repérage d'armature, pour estimer l'épaisseur des structures et des couches de chaussée. La demande est forte car les gestionnaires sont couramment à la recherche de données absentes des dossiers d'ouvrage.

Certaines feuilles d'étanchéité préfabriquées sont aujourd'hui dotées de réflecteurs pour faciliter la détection radar de l'étanchéité et des épaisseurs de chaussée (ex : système breveté Echo-detect®). D'autres applications sont encore au stade du développement comme la détection de zones d'humidité et d'hétérogénéité dans le béton avec comme objectif de faire de l'auscultation à grand rendement (ex : cartographie de conductivité apparente du béton sous la chaussée – société Bridgology). Par la réalisation de plusieurs profils radar d'un tablier et le post-traitement des données, l'objectif est d'identifier des zones de défaut de l'étanchéité avec possibilité de corrosion (voir Figure 6).

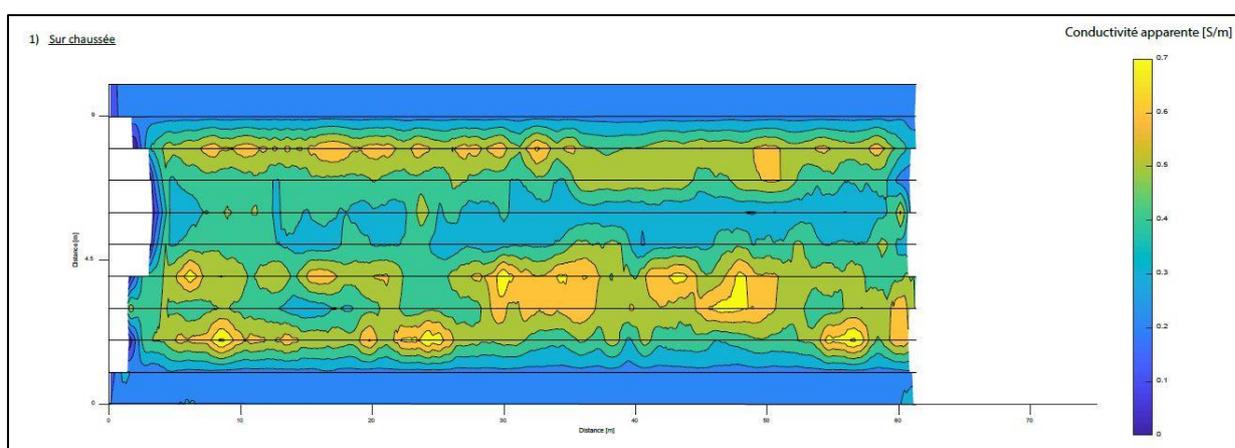


Figure 6 : Plan de conductivité apparente d'un tablier d'après données radar
(Source : société BRIDGOLOGY)

Faisabilité du projet envisagé

Les techniques radar sont bien connues en ouvrages d'art mais sont plutôt déployées manuellement en fonction des besoins par des opérateurs qualifiés. Le développement des méthodes à grand rendement énoncées ci-dessus a déjà débouché sur plusieurs prototypes testés et validés principalement en laboratoire, mais encore trop peu portés sur le terrain. Les relevés de mesures sont tout à fait possibles mais les traitements des données restent compliqués car nous sommes confrontés à une problématique de big data. Il n'est pas à l'heure actuelle de solution complète 'sur étagère', car le choix et la calibration des antennes (notamment en fréquence) dépendent du cas d'étude : il faut toujours avoir une idée de ce que l'on veut identifier avant de procéder aux mesures.

Limite des apports

Beaucoup de méthodes sont actuellement à l'étape de recherche, car ce type de données spécifiques demande une compréhension physique poussée et des développements en traitement du signal avancés pour procéder à l'interprétation des résultats. L'analyse des images radar est encore réservée à des experts, ce qui rend l'exploitation des mesures encore moins accessible car demande une formation lourde. La seule utilisation des techniques radar est déconseillée en expertise. Il faut la coupler avec d'autres méthodes destructives telles que des carottages. Le radar permet de disposer de données sur un grand linéaire et d'identifier les zones pertinentes à sonder pour limiter les techniques destructives.

IV. Exemple d'application aux murs de soutènement

Afin de donner corps à la réflexion entamée dans cet article, nous proposons un exemple plus approfondi d'utilisation des technologies numériques pour construire un outil métier. L'évolution des besoins, les avancées de la recherche et l'étude d'opportunité nous ont encouragés à travailler sur l'évaluation structurelle des murs de soutènement.

Les données numériques présentent un intérêt pour aider à l'inspection des murs de soutènement si elles répondent efficacement aux besoins des gestionnaires. Cette efficacité dépend à la fois de la qualité des informations numériques collectées (qualité des données, exhaustivité, relevés, mesures) mais aussi du gain pour l'exploitation de l'ouvrage (sécurité des agents, période de fermeture de l'ouvrage, temps d'inspection...). L'utilisation peut s'envisager à différents niveaux : l'acquisition à grand rendement des données avec les étapes associées à cette phase : le repérage, la localisation et la modélisation des murs d'une part et l'analyse automatique des données collectées d'autre part.

Repérage et modélisation des murs de soutènement

Le premier défi à remplir dans l'inspection des murs de soutènement consiste à les répertorier. La plupart d'entre eux sont bien identifiés par les gestionnaires mais il semble que l'existence ou la position exacte d'un certain nombre de murs de soutènement n'est pas connue des exploitants ou des inspecteurs. Il s'agit en général de murs relativement petits (mais dont la hauteur est supérieure à 2 m), situés sur le réseau secondaire voire des voies vicinales et/ou entre parcelles ou étendues privées. Certains d'entre eux peuvent par ailleurs être cachés par la végétation. Repérer ces murs de soutènement avec des techniques d'intelligence artificielle reste encore du domaine de la recherche. Les images aériennes, satellites, drones, couplées éventuellement à des bases de données topographiques et orthophotographiques sont les sources de données à considérer pour mettre au point des algorithmes de détection automatique de murs de soutènement. En attendant l'avènement de techniques entièrement automatisées, un travail peut cependant être réalisé par un opérateur pour interpréter ces données visuellement. Le développement de logiciels spécialisés pourrait être prévu à cet effet.

Pour les murs déjà (ou prochainement) répertoriés, le développement d'un outil d'aide à l'inspection au moyen de données numériques passe par une phase de collecte des données (images ou nuages de points) des ouvrages. Signalons que l'inspection de l'infrastructure concerne à la fois le mur en lui-même et sa zone d'influence, définie en fonction des dimensions de l'ouvrage, et au sein de laquelle on peut notamment trouver des symptômes d'instabilité générale. L'acquisition des données doit donc couvrir l'ensemble de la zone à inspecter.

Pour répondre à un objectif d'aide à l'inspection à grand rendement, les acquisitions doivent se faire en dynamique à partir de capteurs embarqués sur un porteur mobile. Pour un linéaire de murs de soutènement accessibles et visibles depuis la route, les capteurs peuvent être embarqués sur un véhicule en circulation. L'utilisation de drones nous semble plus appropriée pour effectuer des acquisitions sur des sites difficiles d'accès, du fait de la pente ou de la hauteur de l'ouvrage par exemple. Il faut veiller à garder une homogénéité dans les référentiels de positionnement quel que soit le porteur utilisé. Il conviendra également de proposer des méthodes alternatives (mesures statiques, mobiles complémentaires portés)

dans le cas où une partie de murs ou de sa zone d'influence ne peut être numérisée à partir du mobile choisi.

Dans l'objectif de campagnes d'acquisition à grande échelle, il serait judicieux de prévoir une méthodologie générale d'acquisition, dans laquelle les capteurs, le sens d'acquisition de l'ouvrage par exemple pourraient être prédéfinis. Cette méthodologie doit bien entendu pouvoir être modulée en fonction des situations particulières. Dans cette phase d'acquisition, il conviendra en particulier de veiller à la bonne qualité de localisation des données obtenues, soit à partir des positions GNSS, soit à partir de moyens définis dans le paragraphe II. Etat des lieux des technologies de la première partie de l'article [1]. Le protocole d'acquisition doit intégrer la possibilité d'utiliser différents types de capteurs utilisés de manière synchrone ou en plusieurs passages. Un travail de recalage des données issues des différents capteurs est nécessaire. Rappelons que les informations issues des différents capteurs sont le plus souvent complémentaires et que leur utilisation combinée représente un atout pour l'aide à l'inspection.

La visualisation des murs de soutènement peut se faire sous forme de séquences d'images ou de données localisées. Des outils « grand public » sont disponibles pour la visualisation mais il est préférable d'utiliser des outils logiciels incorporant l'expertise métier pour permettre la navigation sur un schéma d'ouvrage, l'annotation des données, la mesure. Cette approche présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et ne demande pas de ressource matérielle spécifique. Pour avoir une vision plus globale de l'infrastructure, il est préférable d'aller plus loin dans la visualisation et proposer une modélisation 3D du mur (voir Figure 7). Cela permet de mettre en évidence des déformations structurelles et effectuer des mesures 3D. La précision des mesures obtenues sur les modèles 3D doit être évaluée, en termes métrologiques.

Signalons également que l'on peut apporter de l'information sémantique en annotant le modèle à partir d'outils d'assistance à l'annotation ou de méthodes plus automatisées, telles celles envisagées dans la partie II.



Figure 7 : Modélisation 3D d'un mur de soutènement à partir d'images acquises par un drone par la société DRONE SUPERVISION

Analyse automatique des données

Il est envisageable d'explorer, d'évaluer et de déployer les méthodes d'intelligence artificielle en général et celles utilisant l'apprentissage supervisé en particulier pour assurer un certain nombre de tâches présentant un intérêt dans le cadre d'une aide à l'inspection : la classification des murs selon leurs typologies, la détection d'équipements et la recherche de désordres.

- L'identification des types de murs de soutènement apparaît possible à partir d'algorithmes de classification. L'objectif est d'assigner automatiquement une image d'un mur à des catégories de murs. Ces catégories peuvent être définies à partir de la liste IQOA sans pour autant aller dans le

même degré de finesse car certaines typologies ne peuvent être définies uniquement par l'image. Dans un premier temps, des catégories plus larges, qu'on peut appeler familles de murs (par exemple béton, gabions, maçonnerie) pourront être utilisées. Cette classification typologique peut être une étape préalable à la détection de désordres, qui peuvent différer selon le type de murs. Il faut rappeler que l'apprentissage est réalisé à partir d'exemples annotés. Dans l'IQOA, il existe deux listes de types de murs de soutènement. Pour les types de la liste 1, représentant des murs à la typologie usuelle pour lesquels un catalogue exhaustif de désordres est défini, trouver un nombre suffisant d'exemples représentatifs des typologies est probablement envisageable. Le problème est différent pour les types de mur appartenant à la seconde liste, qui regroupe des murs plus rares ou plus complexes et dont les désordres ne font pas l'objet d'un catalogue exhaustif. L'application de méthodes de reconnaissance de forme pour la classification de typologie est encore du domaine de la recherche. Ces approches ont été explorées pour classer des piédroits de tunnel en trois catégories : béton, roche, maçonnerie. Il semble possible de s'inspirer de la méthodologie proposée dans ces travaux pour réaliser ce genre de classification avec un nombre plus élevé de types de murs de soutènement.

- Les équipements classiques d'un mur de soutènement sont : la chaussée soutenue ou protégée, les trottoirs, bordures, plinthes, corniches, escaliers, les dispositifs de retenue, de signalisation et d'éclairage et les murs anti-bruit... Outre ces équipements, les dispositifs d'assainissement, tels que les barbacanes peuvent également faire partie des éléments à inspecter. Le relevé automatique de ces équipements peut être effectué à des fins d'inventaire et/ou d'inspection. On peut par exemple imaginer la détection des dispositifs de retenue afin de contrôler leur état (alignement). Cette inspection vient en complément d'une inspection sur le terrain. Il apparaît par exemple difficile de vérifier le scellement de dispositifs à partir des données numériques. Les équipements sont souvent présents en nombre sur les murs de soutènement, ce qui représente un avantage pour réaliser l'apprentissage. La variabilité des équipements et la complexité de l'environnement dans lequel ils sont implantés doivent cependant être pris en compte pour constituer la base de données. Certains équipements tels que la signalisation, l'éclairage ou des dispositifs de retenue seront peut-être plus faciles à apprendre que des équipements plus variables, tels que les bordures ou trottoirs.
- Les défauts recherchés (gonflements, fissures, eau, pertes de matière...) sur les murs de soutènement peuvent être répertoriés dans un catalogue selon les typologies des murs. L'hétérogénéité d'apparence des désordres, la rareté de certains d'entre eux, leurs étendues parfois réduites rendent la problématique de leurs détections et/ou segmentations automatiques particulièrement ardue. Le cas des pathologies sur les murs de soutènement n'échappe pas à ce constat. Il peut être envisagé une approche en deux étapes. La première, plus sûre et réalisable à court terme, consiste à développer des outils d'assistance à la saisie des désordres à partir de méthodes d'intelligence artificielle, non basées sur l'apprentissage automatique. On peut par exemple envisager qu'un opérateur clique sur une zone d'intérêt du mur de soutènement (une tache par exemple) et cette zone est automatiquement détournée. La deuxième étape consistant à mettre à disposition un outil entièrement automatisé de détection et ou segmentation de désordres sur des murs doit être envisagée à plus long terme.

Conclusion

L'utilisation des données numériques pour l'aide à l'inspection des murs de soutènement peut être envisagée à plusieurs niveaux et à plusieurs échéances. Dans l'immédiat, les techniques d'acquisition par drone ou à partir de véhicules sont opérationnelles et peuvent être déployées dans le cadre de campagnes d'acquisition. Des protocoles expérimentaux pourraient être rédigés pour unifier les méthodes de collecte des données et faciliter l'exploitation future. Des logiciels de visualisation spécialisés doivent être proposés pour naviguer dans les données des murs de soutènement, et les exploiter. Il nous semble que ces

logiciels doivent être conçus de manière globale, l'ouvrage « murs de soutènement » n'étant qu'une brique logicielle parmi d'autres. Ces logiciels doivent intégrer la possibilité d'utiliser des données multi-capteurs et tendre vers un outil de visualisation 3D des modèles reconstruits des ouvrages.

Automatiser entièrement les tâches de classification reste relativement complexe. Cela peut être envisagé à moyen terme pour identifier la typologie des murs ou effectuer du relevé de certains équipements, en particulier ceux qui sont standardisés, la signalisation ou l'éclairage par exemple. L'objectif doit être visé à plus long terme pour la détection automatique de pathologies par intelligence artificielle. Quel que soit le type d'objet à classer, un des nœuds de la problématique reste la collecte ou la mise à disposition des données et la constitution de bases de données conséquentes pour réaliser les apprentissages. Pour toutes les fonctionnalités automatiques qui sont envisagées et qui seront intégrées à un logiciel d'exploitation, il est nécessaire qu'un opérateur, spécialiste du domaine, puisse garder la main sur les relevés pour les compléter ou les modifier.

V. Conclusion et perspective

De nombreux progrès (représentation 3D d'ouvrage, instrumentation avec transmission en direct, analyse automatique de défauts, etc.) sont en cours et l'impulsion donnée par le ministère dans le cadre de l'appel à projet « ponts connectés » apparaît tout à fait bénéfique. Les bases de données permettant l'apprentissage d'outils automatisés s'enrichissent, les outils permettant la saisie d'images se perfectionnent et se démocratisent.

Les plus-values envisagées de ces nouvelles approches sont nombreuses et importantes. Néanmoins, les cas de la surveillance et du diagnostic d'ouvrages sont complexes car ce sont des prestations qui demandent, par nature, des compétences métiers fortes. De nombreux outils d'aide permettraient toutefois des gains d'exhaustivité liés à une accessibilité facilitée, des gains d'exploitation des infrastructures et des gains de sécurité pour les opérateurs. Il reste cependant différents objets qui demandent des niveaux de détection et de précision qui ne sont pas possibles avec des moyens dynamiques et qui nécessiteront des acquisitions statiques. Enfin, les gains envisageables pour les diagnostics d'ouvrage résident dans le développement de nouveaux outils et dans le traitement amélioré de grandes quantités de données.

Des défis demeurent ainsi pour aller vers une industrialisation et une offre commerciale claire et fiabilisée. La grande diversité des acteurs et des ouvrages est bien sûr un frein à surmonter, chaque produit devant trouver son utilisation la mieux adaptée à chaque gestionnaire. Les développements en cours trouveront à n'en pas douter un succès commercial à court ou moyen terme, ceux-ci pouvant trouver un écho à l'échelle mondiale, les mécanismes d'analyse étant universels. La mise en confiance des acteurs est comme toujours une condition fondamentale au bon développement commercial d'outils aussi nouveaux, utiles à la gestion du patrimoine, mais sophistiqués. La labellisation/certification des performances des outils offre une voie pertinente pour contribuer à l'émergence d'offres de service matures et sécurisées.

VI. Références bibliographiques

- [1] Les apports de l'imagerie et de la reconnaissance des formes pour la gestion de patrimoine des ouvrages d'art – Partie 1 : recensement et identification des ouvrages, Bulletin ouvrages d'art n°82, 18 pages, juillet 2023.
- [2] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), Circulaire du 16 février 2011 relative à la publication de la nouvelle instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. 25/04/2011.
- [3] L. Cohen, R. Kimmel, 1997. Global Minimum for Active Contour Models: A Minimal Path Approach. *Int. J. Comput. Vis.* 24, 57–78.
- [4] J.A. Sethian, 1996. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 93, 1591–1595.
- [5] P. Charbonnier, J.-P. Tarel., 2018. Optimisation de formes en sciences de l'ingénieur: Méthodes et applications, in: Peigney, M. (Ed.), Collection de l'Ifsttar.
- [6] G. Decor, G., 2023. Reconnaissance des formes pour l'inspection visuelle des tunnels (PhD Thesis). Université de Strasbourg.
- [7] P. Foucher, R. Le, A. Mansouri, X. Dérobert, C. Fauchard, 2023. Concrete structure inspection based on deep learning approaches from visible and radar images, in: Jovancevic, I., Orteu, J.-J. (Eds.), Sixteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision. Albi, France, p. 127490C.
- [8] P. Fasseu, M. Michel, Détermination de l'Indice de Fissuration d'un parement de béton, *Méthode d'Essai n°47, Techniques et méthodes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 13 pages, 1997.
- [9] Pont de Cheviré – RN 844 – Retour d'expériences – Utilisation de drones pour l'inspection détaillée des piles S2 et S3. Comparaison avec les résultats de l'inspection détaillée « au contact ». Perspectives – Développements, Cerema, avril 2020.
- [10] H. Davias, B. Bérenger, J.-M. Moliard, Détermination de l'Indice de Fissuration d'un parement de béton et fissuromètre numérique, Modernisation de la Méthode d'Essai LPC n°47, *Rapport du Groupe ATI-OGC Cerema-UGE*, Action 17-6, décembre 2020.
- [11] W. Bouchet, P. Rosala, Qualification métrologique du Scan-3D pour les applications liées au domaine des ouvrages d'art, Cerema, 42 pages, mars 2023.

Site internet PILES

<https://piles.cerema.fr>

David TRONCHET (Webmestre PILES)

david.tronchet@cerema.fr

Cerema ITM / Parc de la Haute Maison - Bâtiment C2 - 14 Allée Lavoisier - 77420 CHAMPS-SUR-MARNE

I. Introduction



Figure n°1 : Page d'accueil du site internet PILES

La Plateforme d'Informations et de Libre Echange sur les Structures (PILES) a pour objectif de constituer un lieu d'accès aux connaissances dans le domaine des ouvrages d'art en proposant notamment des bibliothèques de documents et textes techniques et réglementaires, une vidéothèque sur la construction de grands ouvrages, des logiciels de calculs et d'aide à la rédaction de pièces écrites techniques, des présentations techniques de conférences et un agenda des événements et rencontres : soit plus de 800 références.

La plateforme PILES s'adresse à tous les acteurs impliqués dans la conception, l'exécution, la gestion, l'entretien, la maintenance et la réparation des ouvrages d'art. Il s'agit principalement des maîtres d'ouvrage et gestionnaires d'infrastructures de transport (Conseils Départementaux, Communes, Directions Interdépartementales des Routes (DIR), sociétés d'autoroute, RFF, RATP, ...) et des bureaux d'études.

En 2021, le site PILES a fait l'objet d'un diagnostic qui a abouti à sa refonte complète. En 2022, le site a comptabilisé 13 400 visites et plus de 10 000 téléchargements de documents. Les visiteurs proviennent majoritairement d'Europe (84% : France, Italie, Pays-Bas, Allemagne, Royaume-Uni, ...), d'Afrique (8% : Maroc, Algérie, Tunisie, ...), d'Amériques (8% : Nord, Sud et Centrale), d'Asie et d'Océanie.

Pays	FR	US	IT	CH	NL	DE	GB	MA	DZ	CN	RU	TN	ES	UA	SK	CA	BE	PL	CI	RE	SN
Visites	8242	540	530	466	394	354	308	237	201	183	177	171	133	127	80	64	62	60	53	52	45

Figure n°2 : Visites site PILES en 2022 selon les pays

Anciens Fascicules et Règlements

Classés par thématique :

Aciers et Armatures (fascicule 4) ; Charges et épreuves (fascicule 61) ; Directives communes (DC71 et 79), Calcul des OA BA (règlements, BT n°2, fascicules 61, 62 et 74) ; Calcul des OA BP (règlements, BT n°7 et 9, fascicule 62) ; Calcul des OA métalliques (fascicule 61) ; Calcul des ouvrages mixtes acier-béton (règlements) ; Exécution des OA en Béton, BA et BP (fascicule 65) ; Exécution des ouvrages métalliques (fascicules 56 et 66) ; Exécution des maçonneries (fascicule 64) ; Exécution d'étanchéité (fascicule 67) ; Fondations (fascicules 62 : calculs ; fascicule 68 : exécution) ; Chaussées (fascicules 25 et 26 : exécution ; fascicule 27 : fabrication).

Dossiers pilotes du Sétra

Documents de références (Guides, Bulletins Techniques et Recommandations)

Classés par thématique :

Appareils d'Appui (AA) – Appuis ; Assainissement ; Buses métalliques ; Charges EC – Chargement d'épreuves ; Conception, Calcul et réparation : documents généraux ; Défaut des ouvrages – Prévention – Réhabilitation ; Démolition ; Dispositifs de Retenue (DR); Ecrans acoustiques ; Equipements (hors DR et AA) ; Fondations ; Incendie ; Matériaux (BHP, BFUP, Composites) ; Nomenclatures parties d'ouvrages ; Passerelles ; Ponts BA ; Ponts BP ; Ponts bois ; Ponts haubans ; Ponts maçonnerie ; Ponts métalliques et mixtes acier-béton ; Ponts mixtes bois-béton ; Ponts suspendus ; Ponts innovants ; Portiques, Potences et Hauts-Mâts (PPHM) ; Séisme ; Soutènements ; Tranchées couvertes ; Transports exceptionnels.

Notes d'informations Ouvrages d'Art

Bulletins Ouvrages d'Art

Compilation des sommaires avec possibilité de recherche d'article par mot clé.

Fiches techniques MEMOAR (Mémento pour la mise en œuvre sur OA)

Actions préparatoires ; Fondations ; Aciers passifs ; Aciers de précontrainte ; Ouvrages provisoires ; Préfabrication ; Bétonnage ; Mise en œuvre des AA, des DR, des chapes d'étanchéité et des joints de chaussée ; Audit de chantier ; Opérations préalables à la réception ; Dossier d'ouvrage ; Ouvrages métalliques ou mixtes : Produits, Montage et Protection.

Vidéos du Sétra sur la construction de grands ouvrages

Visionnage en ligne de films :

- Viaduc de Meaux ; Changement de la suspension du pont d'Aquitaine ; Pont de l'île de Ré ; Pont de Seyssel ; Nouveau pont bow-string de St Gilles ; Passerelle de Montigny-lès-Cormeilles ; Nouveau pont de Térénez ; Réparation du pont d'Illzach ;

Logiciels Ouvrages d'Art

Présentation des outils de modélisation ouvrages d'art du Cerema :

- CDS (calcul de sections) ; MUR (calcul des murs de soutènement) ; PCP (calcul de structures à barres) ; ST1 (calcul de structures à barres) ; CHAMOA (calcul de ponts courants) ; CONVOA (Convois exceptionnels).

Et du logiciel PETRA (rédaction de pièces écrites de marché) ;

II.2 Conférences Techniques

Conférences (Clubs Ouvrages d'Art ; Conférences Techniques Territoriales ; Rencontres Ouvrages d'Art ; Rencontres Régionales Ouvrages d'Art et Conférences Techniques Interdépartementales sur les Transports et l'Aménagement) classées par thème :

- Aciers autopatinables ; Capteurs de trafic ; Chaussée ; Conception ; Contrôles et essais ; Démolition ; Dispositifs de retenue ; Domanialité ; Etanchéité ; Gestion des ouvrages ; Ouvrages innovants ; Projets et travaux de construction ; Projets et travaux de réparation ; Sismique ; Transports exceptionnels ; Transports par câbles.

II.3 Agenda des rencontres et événements

II.4 Dossiers thématiques

Gestion du patrimoine

Analyse des risques

- Guides méthodologiques (ponts en maçonnerie ; murs en maçonnerie ; ponts en site affouillable ; murs BA sur semelle ; tranchées couvertes et tunnels creusés avec parements rapportés ; buses métalliques ; ouvrages en remblai renforcé type TA ; VIPP).
- La méthode SISMOA (évaluation préliminaire du risque sismique sur les OA existants).

Méthodes d'évaluation structurelle des OA

- Les méthodes IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art), VSC (Visite Simplifiée Comparée) et MD (Méthode Départementale).

Méthode IQOA

- Guides méthodologiques ; Procès-Verbaux de visites et catalogue des désordres : pour les ponts, murs et tranchées couvertes.

Méthode des Visites Simplifiées Comparées (VSC)

- Principes ; Guides.

Méthode Départementale (MD)

- Guide ; Procès-Verbaux de visite et catalogues de désordres : ponts en maçonnerie.

Stratégie de maintenance des Ouvrages d'Art

- Notes d'information Ouvrages d'art N°5 (Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France Conseils aux gestionnaires et concepteurs - Avril 2021) et N°6 (Politique de gestion des patrimoines d'ouvrages d'art - Apports récents sur les volets technique et financier - Octobre 2021).

Surveillance et entretien des Portiques, Potences et Hauts Mâts de signalisation (PPHM)

- Guide méthodologique ; Catalogue des désordres.

Gestion des ouvrages communaux

- Carnet de santé ; Guide technique.

Surveillance / Entretien des ouvrages d'art

- ITSEOA 2010 (fascicules 0 à 3) et ses guides techniques (fascicules 4 à 53).

Auscultation / Diagnostic des Ouvrages d'Art

- Collection des cahiers interactifs (méthodes d'auscultation et de diagnostic).

Ingénierie des ouvrages existants

Guide évaluation structurale VIPP ; Guide conception réparations structurales et renforcements OA ; Guide évaluation stabilité ponts en maçonnerie ; Guide utilisation programme VOUTE ; Anciens règlements de calculs BA, BP, Métal et Mixte ; Anciennes charges d'exploitation des ponts-routes ; Anciens agréments des matériaux (armatures de précontrainte ; poutrelles précontraintes ; métal ; armatures de BA) ; ...

Convois militaires – Transports Exceptionnels et lourds

Textes généraux sur les convois militaires ; Textes spécifiques aux convois militaires et aux transports lourds de bois ronds ; Cartes et conditions de circulation des TE ; Historique des règlements de charges.

Gestion des risques

Risque hydraulique

- Guide analyse de risque des ponts en site affouillable ; Présentations ROA et COTITA ; ...

Risque sismique

- Référentiels réglementaires ; Guides et recommandations ; Articles du BOA ; Présentations COTITA, JOA et ROA ; ...

Aides pour la rédaction de pièces écrites techniques

Logiciel PETRA ; Fiches « bien prescrire les bétons » ; Recommandations ; Normes et Fascicules de documentation sur les bétons ; ...

Mercuriale des prix de réparation des Ouvrages d'Art

Présentation de la Mercuriale ; Catalogues de prix pour les ponts, murs et tunnels.

Joints de chaussée et Etanchéité

Avis techniques (en cours de validité) des joints de chaussée et des étanchéités des ponts-routes.

Evaluations des Procédés Géotechniques (EPG)

Démarche pour une évaluation d'un procédé géotechnique ; Avis sur différents procédés géotechniques.

Club Ouvrages Portuaires

Présentation et contacts.

III. Gestion du site

Mélanie Wattré est en charge de la gestion des droits d'accès à la Mercuriale des prix.

David Tronchet assure la fonction de Webmestre de la plateforme PILES.

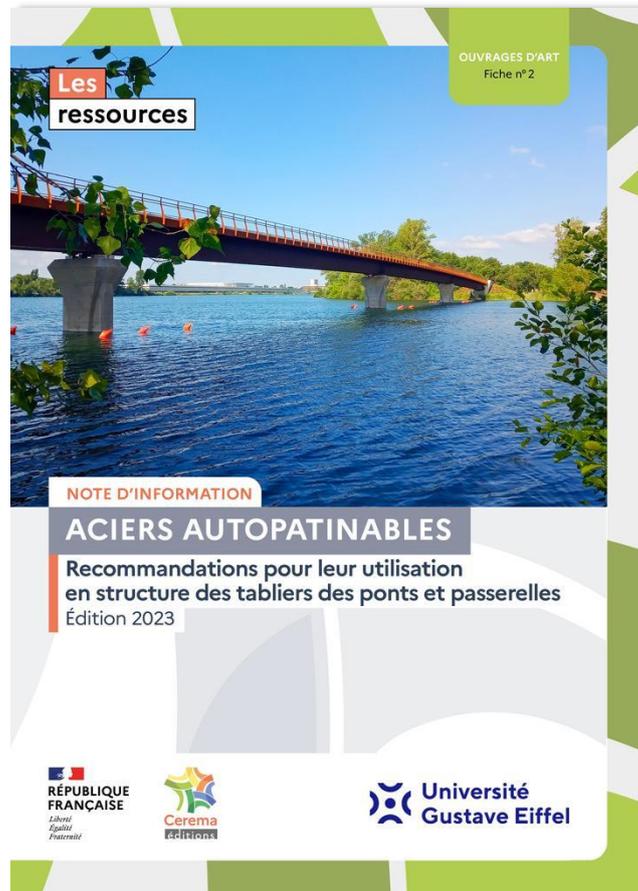
Ce site est le vôtre ; n'hésitez pas à nous contacter par mail (Piles.CTOA.DTeciTM@cerema.fr) pour nous apporter vos idées, vos propositions et surtout vos contributions qui enrichiront progressivement son contenu.

Pour en savoir plus : <https://piles.cerema.fr> .

Les dernières publications OA du Cerema

Note d'information aciers autopatinables

Recommandations pour leur utilisation en structure des tabliers des ponts et passerelles

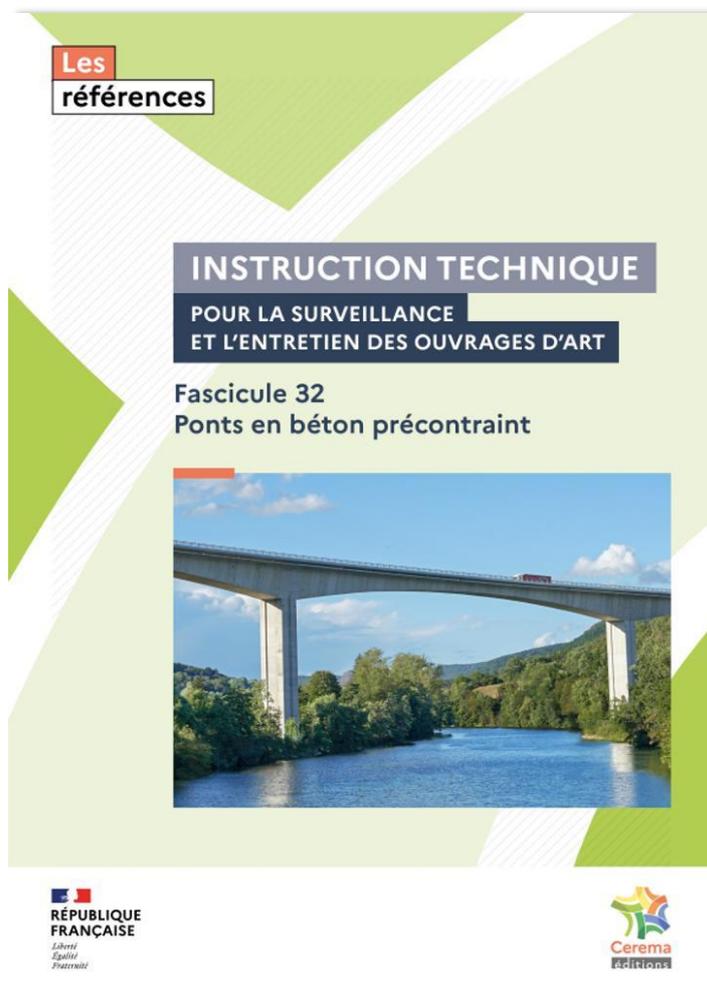


Apparu à la fin des années 1960 dans les ouvrages d'art, l'acier autopatinable fait l'objet d'un réel engouement depuis une vingtaine d'années du fait de ses avantages. En effet, l'absence de peinture limite ou supprime les contraintes de mise en œuvre, les coûts de maintenance ainsi que la production de déchets liés à la protection anticorrosion des ouvrages. L'emploi de cet acier dans les ouvrages d'art nécessite cependant le respect de règles strictes concernant la conception et la mise en œuvre afin d'assurer la formation d'une patine protégeant efficacement l'acier.

La note d'information n° 2 parue en 2015 est mise à jour pour intégrer les apports suivants : des recommandations relatives à la prise en compte de la fatigue dans les ouvrages afin de garantir leur pérennité ; la mise à jour du corpus normatif concernant les aciers autopatinables ; des précisions sur l'environnement des ouvrages, leur conception, leur exécution et l'inspection. La présente note s'appuie sur la norme matériaux NF EN 10025-5:2019, la norme d'exécution des structures métalliques NF EN 1090-2:2018, la norme de conception NF EN 1993 (en particulier sa partie 1-9:2005 pour le calcul à la fatigue) ainsi que sur les retours d'expérience acquis par toute la profession sur le sujet. Elle détaille les préconisations de conception, de mise en œuvre ainsi que d'inspection des tabliers de ponts et passerelles en acier autopatinable.

Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art

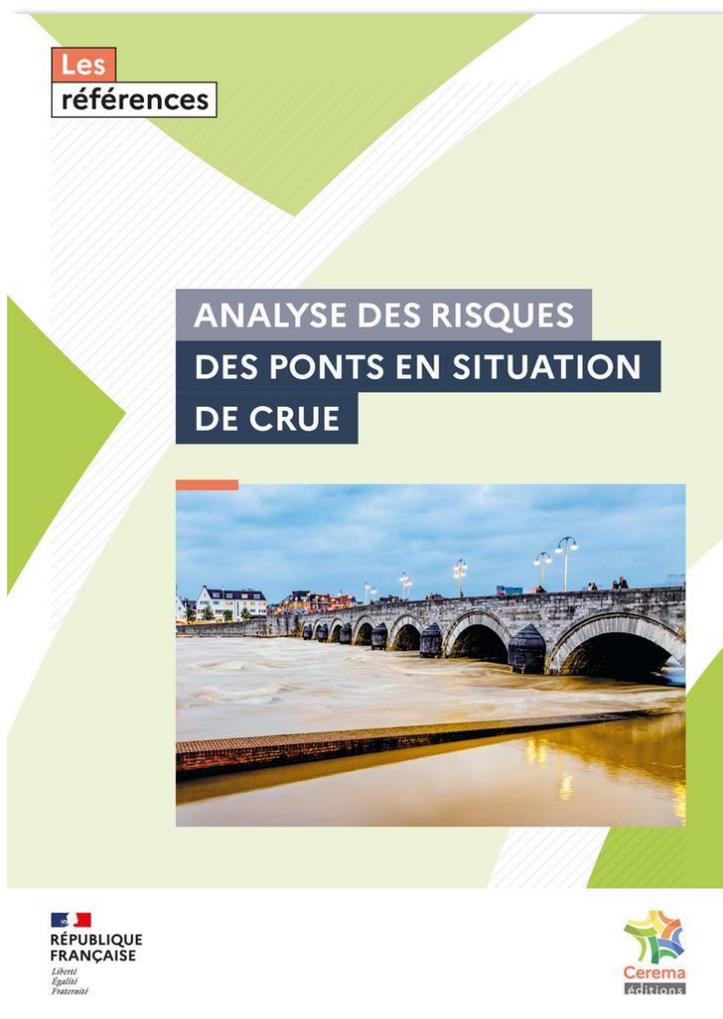
Fascicule 32 – Ponts en béton précontraint



Le présent ouvrage est l'un des fascicules techniques constituant le corpus technique de la nouvelle Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA).

Les ponts en béton précontraint sont parmi les types d'ouvrages d'art les plus fréquemment construits depuis les années 1960. C'est donc une technique de construction durable et qui bénéficie d'un vrai recul. Cependant, les conditions de dimensionnement de ces ouvrages et les technologies utilisées, ont été très différentes suivant les époques et les types d'ouvrages. Ainsi, différentes pathologies typiques ont pu se développer que ce guide aidera à reconnaître. Il traite plus généralement de la surveillance, de l'évaluation, de l'entretien et de la réparation de ces ponts. Il s'adresse principalement aux personnels techniques des organismes chargés de la surveillance, des bureaux d'études et laboratoires spécialisés ainsi qu'aux gestionnaires de réseau d'infrastructures de transport. Ce document accompagne l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art de 2010 en remplacement du fascicule 32 de janvier 2019.

Analyse des risques des ponts en situation de crue



Les crues majeures des rivières constituent un aléa dont la fréquence et l'intensité ont tendance à augmenter avec les effets du changement climatique. La gestion de ces inondations est une préoccupation tant pour les acteurs de la gestion des risques que pour les gestionnaires des ouvrages d'art qui franchissent ces cours d'eau. Les capacités de résistance des ouvrages dépendent de leur conception : la nature des matériaux utilisés, le type de fondation, la structure du tablier, etc.

Compte tenu des risques pour la sécurité des populations et pour l'économie, analyser la résistance des ponts face aux agressions en période de crues apparaît essentiel. Ce guide constitue une déclinaison de la démarche générale d'analyse des risques développée par le Cerema. Il propose une méthode pragmatique et efficace de recensement et de classement des ouvrages les plus sensibles et exposés à cet aléa.

**Toutes les publications présentées sont disponibles sur la plateforme
documentaire du CEREMA : <https://doc.cerema.fr/>**

Bulletin Ouvrages d'Art du Cerema

<https://www.cerema.fr/fr/activites/infrastructures-transport>

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Mise en page › Cerema ITM - DTOA

Crédits photos de la couverture › Cerema

Crédits photos › Cerema, Université Gustave Eiffel, ENDSUM, Bridgology, Drone Supervision

ISBN › 978-2-37180-668-9

Pour toute correspondance › Redaction-BOA.DTOA.DTeciTM.cerema@cerema.fr

www.cerema.fr › Rubrique « Nos éditions »

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30