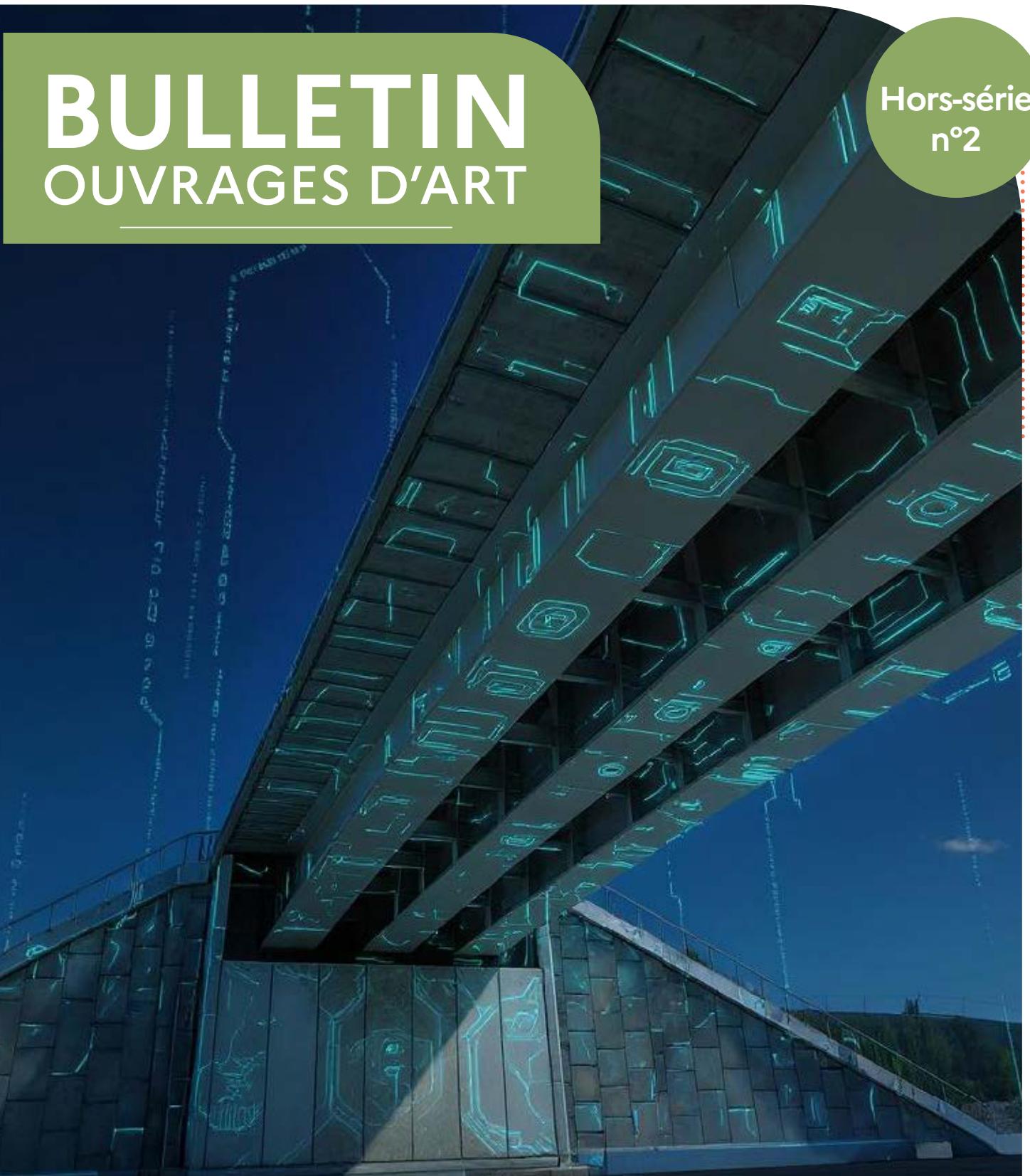


BULLETIN OUVRAGES D'ART

Hors-série
n°2



L'APPEL À PROJETS
Ponts connectés

Edito

L'état des ponts constitue un enjeu majeur de sécurité pour les usagers. Le rapport d'information du Sénat rendu en juin 2019 avait souligné le vieillissement de notre patrimoine et la lourdeur des investissements pour son entretien et sa surveillance. Les dernières innovations en matière d'instrumentation offrent des nouvelles perspectives aux gestionnaires, plus pratiques, plus performantes et moins coûteuses.

Pour répondre à ces enjeux, le gouvernement a lancé en 2021 l'appel à projets « Ponts connectés » dans le cadre du Programme National Ponts financé par France Relance et piloté par le Cerema. L'appel à projets « Ponts connectés » s'est voulu porteur de nouvelles solutions plus pratiques, plus performantes et moins coûteuses pour les collectivités afin de mieux surveiller et entretenir leur patrimoine. Cet appel à projets a mis en évidence le potentiel apporté par les progrès techniques autour des capteurs, de l'imagerie et de l'intelligence artificielle (IA). Ces techniques, en gestation depuis longtemps, deviennent matures et permettent des progrès en matière de gestion du patrimoine : imagerie couplée à l'IA pour l'inspection des ouvrages, capteurs couplés à l'IA pour la gestion prédictive.

Les 17 lauréats ont pu expérimenter leurs solutions en vraie grandeur sur des ouvrages de l'État ou de collectivités et ont présenté leurs travaux lors d'une journée de restitution organisée par le Cerema le 17 septembre 2024. Des tables rondes ont également apporté un éclairage global autour des solutions de surveillance, des outils de gestion prédictive et du traitement des données par l'IA.

Ce numéro spécial du Bulletin Ouvrages d'Art est intégralement dédié à l'appel à projets « Ponts connectés » et restitue de manière synthétique ses objectifs, son organisation, les résultats obtenus et l'éclairage apporté par les tables rondes de la journée du 17 septembre 2024. Il met en avant l'innovation comme levier majeur et identifie des perspectives d'avenir pour une gestion plus prédictive, plus fiable et plus économique des ponts.

Nathalie Cordier, Pierre Corfdir et André Orcesi, Cerema ITM.

■ L'appel à projets ponts connectés

L'appel à projets Ponts connectés - Genèse et objectifs

6

Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM

■ Résultats de l'appel à projets ponts connectés

Chiffres clés de l'appel à projets « Ponts connectés »

12

Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM

Aide à la surveillance en continu des ponts

13

AP'PONTS, CI3S, GeRICO, SURVOUT, VIGI

Aide à l'inspection des ponts

41

MIMIA, SOFIA, VIVOA, MIRAUAR

Aide à la gestion des risques

62

AUDACE, IA², SOS-A, VIASAGAX

Aide à l'auscultation des ponts

83

CAHPREEX, GEOPONT, MAJ, AINSPECTA

■ Synthèse des quatre tables rondes de la journée de restitution du 17 septembre 2024

Quelle surveillance pour quel patrimoine et quel apport de la gestion prédictive ?

104

Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM

Comment améliorer la gestion des ouvrages dans les petites collectivités ?

109

Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM

Quelles étapes à franchir pour industrialiser de nouveaux outils de gestion ?	115
<i>Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM</i>	
Comment évaluer et certifier le traitement et le diagnostic par l'IA ?	120
<i>Nathalie Cordier, Pierre Corfdir, André Orcesi, Cerema ITM</i>	

Remerciements : La mise au point et la validation des articles publiés dans le présent numéro du bulletin OA ont été faites par Pierre Corfdir, Nathalie Cordier, André Orcési et Antoine Théodore du Cerema ITM.

Version : du 29 septembre 2025

Directeur de la publication : Pascal BERTEAUD

Directeur délégué : David ZAMBON

Comité éditorial : Roland ABOU (Cerema ITM)

Lucas ADELAIDE (Université Gustave Eiffel)

Gaël BONDONET (Cerema ITM)

Cécile BOUVET AGNELLI (DRIEAT IF)

Jean-Christophe CARLES (Cerema Med)

Christelle CROS (Département des Pyrénées Orientales)

Renaud LECONTE (Setec Diades)

Franziska SCHMIDT (Université Gustave Eiffel)

Patrice TOUSSAINT (Service public de Wallonie)

Rédaction en chef : Antoine THEODORE (Cerema ITM)

L'appel à projets Ponts connectés

L'appel à projets Ponts connectés - Genèse et objectifs

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Le contexte

Les infrastructures de génie civil sont soumises à des environnements agressifs, au vieillissement de leurs composants et de leurs matériaux ainsi qu'à des évolutions ou à des conditions exceptionnelles d'exploitation, susceptibles de les mettre à mal, voire de provoquer leur ruine. Historiquement, en France, les effondrements d'ouvrage ont concerné des buses, des ouvrages en terre armée, des murs de soutènement ou des ponts. Outre le vieillissement ou le développement d'affouillements, les effondrements ont parfois été dus à des événements inattendus, tels que des chocs violents, le franchissement par un poids lourd en grande surcharge, ou encore à des phénomènes météorologiques rarissimes (ex : rupture fragile à très basse température d'un pont suspendu).

Le maintien du patrimoine d'ouvrages d'art dans un état permettant de répondre aux besoins des usagers dans des conditions de sécurité satisfaisantes, tout en optimisant les investissements nécessaires à son entretien, est un enjeu majeur pour les maîtres d'ouvrage et les gestionnaires d'infrastructures de transport. Le rapport du Sénat n°609 du 26 juin 2019 avait souligné le mauvais état général d'une partie des ponts, notamment parmi ceux des petites collectivités.

Face à ces enjeux, les maîtres d'ouvrage doivent se doter d'une politique de gestion de leur patrimoine permettant d'atteindre les objectifs principaux ci-dessous :

- assurer la sécurité des personnes et des biens,
- maintenir l'état fonctionnel de chaque ouvrage pour assurer, sur un itinéraire donné, le niveau de service requis,
- préserver et valoriser le patrimoine dans son ensemble.

La mise en œuvre d'une politique de gestion repose sur des actions de surveillance, sur l'analyse et l'exploitation d'observations et de données recueillies et sur des actions d'entretien ou de réparation. Elle inclut également une méthodologie de gestion basée sur une optimisation de ces actions, parmi lesquelles des visites, des inspections visuelles, des instrumentations et des auscultations, dans des proportions qui dépendent du patrimoine, des enjeux, des risques, des conditions d'accessibilité et des moyens du maître d'ouvrage. Les instrumentations et l'exploitation des données fournies doivent permettre, sur une durée raisonnable, la détection et la caractérisation d'une pathologie liée à une famille d'ouvrage, à un type de désordre ou à des actions particulières (par exemple des surcharges, des affouillements, des mouvements du sol, des vents extrêmes, etc.). Les méthodologies proposées doivent être techniquement pertinentes et économiquement rationnelles pour permettre leur déploiement par un gestionnaire sur un parc d'ouvrages.

II. Les principales pathologies affectant les ponts

Les pathologies qui affectent les ouvrages d'art, peuvent se traduire par des effets locaux ou globaux qu'il convient de bien connaître si l'on veut envisager de les détecter par une instrumentation. Parmi les actions appliquées aux ouvrages pouvant initier des désordres ou pathologies, il convient de suivre ou détecter par mesures directes ou indirectes :

- les actions climatiques : vents extrêmes, (variation de) températures et gradients thermiques, courant (affouillements), avalanches,
- les actions chimiques : corrosion en milieu humide, chlorures, sulfates ou autres agents chimiques,
- les mouvements du sol : séismes, glissements de terrain, tassements, effondrements de cavités souterraines,
- les actions d'exploitation et accidentelles : surcharges ou passages de charges exceptionnelles, chocs, incendies, explosions.

Ces actions induisent des effets, sollicitations, contraintes ou déformations, dépendant du type de structure et de leur état, eux-mêmes à l'origine des désordres et pathologies décrites ci-dessous.

Une première famille de désordres couramment relevés n'a pas d'impact immédiat sur la résistance et le comportement mécanique des structures, mais présente un risque élevé pour la durabilité des ouvrages et la sécurité des personnes. Cette famille comprend notamment :

- l'initiation de la corrosion d'armatures de béton armé ou d'acier de charpente,
- les éclatements du béton d'enrobage des armatures passives,
- les endommagements d'appareils d'appui,
- les défauts de l'étanchéité et de l'assainissement,
- les endommagements de certains équipements (joints de chaussée),
- les défauts d'étanchéité des gaines de précontrainte extérieure,
- les détériorations localisées de maçonnerie (chute de moellons, disjoints),
- l'initiation de fissures de fatigue dans les structures métalliques,
- l'initiation d'affouillements.

Ces pathologies, souvent repérables par les inspections visuelles ou des moyens déportés (lunettes, drones...), sont difficilement détectables par des instrumentations orientées sur l'analyse des comportements mécaniques (déformations, fréquences de vibration...). Pour détecter leurs effets mécaniques, il faudrait les laisser se développer bien au-delà des critères actuels de sécurité prévus dans une bonne gestion, ce qui entraînerait un risque pour les usagers et des surcoûts de réparation extrêmement élevés.

Une deuxième famille de pathologies liées à des insuffisances de résistance des structures ou de leurs appuis est susceptible d'entraîner des modifications du comportement mécanique global ou d'éléments de structures. Cette famille comprend notamment :

- les insuffisances d'acières passifs ou actifs, y compris haubanages,
- les insuffisances de résistance de structures métalliques,
- les détériorations importantes d'appareils d'appui (blocages, flambement),
- les dégradations importantes de matériaux comme les réactions de gonflement interne du béton,
- les détériorations importantes de maçonneries,
- les déplacements ou déformations des fondations,
- les affouillements.

L'instrumentation liée à ces pathologies et utilisée dans le cadre de la surveillance renforcée ou de la haute surveillance, a montré une bonne sensibilité dans le cas où les capteurs sont placés de manière optimale par rapport aux zones de pathologies recherchées. Malheureusement, cette condition n'est pas toujours simple à respecter avec un nombre « raisonnable » de capteurs. Elle peut être assez facilement respectée pour la flexion longitudinale des tabliers, les mouvements des fondations ou le fonctionnement des appareils d'appui, mais reste plus délicate pour des phénomènes seulement très locaux comme les insuffisances vis-à-vis de la flexion transversale ou de l'effort tranchant.

Une troisième famille de pathologies concerne les désordres non directement accessibles par inspections visuelles qui nécessitent généralement des moyens d'auscultation ou une instrumentation spécifique. Cette famille comprend notamment :

- les ruptures de fils ou de torons (précontrainte, suspentes, haubans),
- la perte de tension ou la surtension de câbles,
- les mouvements de sol et de fondations de faible amplitude,
- les réactions de gonflement interne du béton de pièces en béton non accessibles (ex : semelles de fondation),
- la pénétration d'agents agressifs dans le béton (chlorures, sulfates),
- l'initiation et la propagation de la corrosion d'armatures, avant apparition de fissures sur le parement béton.

Il est particulièrement intéressant, dans le cadre d'instrumentations et de collecte de données pour le suivi des ouvrages, de suivre à la fois les actions et leurs effets et de relier les deux, notamment pour la maintenance prédictive, la maîtrise ou le contrôle des actions d'exploitation et le renforcement éventuel de certains ouvrages.

III. Un appel à projet porteur de nouvelles solutions

L'entretien des infrastructures nécessite des investissements lourds alors que les budgets des gestionnaires sont de plus en plus contraints. Les avancées les plus récentes en matière d'instrumentation, de télécommunication, de traitement de données et d'IA, actuellement développées par les centres de recherches et les entreprises, sont susceptibles d'apporter des réponses efficaces aux problématiques de surveillance et de gestion des infrastructures. Dans ce contexte, l'appel à projets « Ponts connectés » s'est voulu porteur de nouvelles solutions plus pratiques, plus performantes et moins coûteuses pour les collectivités afin de mieux surveiller et entretenir leur patrimoine. Il visait à soutenir des initiatives innovantes pour la gestion des ouvrages d'art par l'instrumentation, offrant :

- des systèmes ou méthodes peu onéreux permettant leur large diffusion,
- des systèmes ou méthodes peu vulnérables aux intempéries ou au vieillissement, et économies en énergie,
- des systèmes ou méthodes qui contribuent à la gestion des ouvrages selon les méthodes classiques, comme celles portées par l'ITSEO (Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art),
- des systèmes ou méthodes « certifiables » quant à leurs performances,
- des méthodes de détection d'anomalies largement automatisées,
- des instrumentations permettant le suivi sur le long terme des ouvrages.

L'appel à projets a visé en particulier des actions de recherche, travaux exploratoires, incubateurs d'idées et études d'opportunités. Pour des projets plus matures, il a pu contribuer à accélérer le développement de prototypes. L'objectif a été d'évaluer, à travers des expérimentations en vraie grandeur et de nouveaux développements scientifiques, les capacités de ces méthodes, communément regroupées sous le vocable de « ponts connectés » ou « smart bridges », à assurer le maintien des performances intrinsèques des ouvrages d'art et la sécurité des personnes et des biens qui les empruntent.

Les propositions de projet devaient s'attacher à optimiser l'instrumentation pour limiter les coûts d'installation et d'exploitation, en incluant la durabilité des capteurs et des systèmes d'acquisition/transmission des données. Elles devaient détailler également la maintenance à réaliser pour le maintien en état de fonctionnement du système proposé (coût, fréquence, moyens mis en œuvre, ...).

Le Cerema, qui dispose d'une expertise historique dans le domaine des ouvrages d'art, a assuré le pilotage des expérimentations des 17 projets lauréats. Six thèmes d'innovation ont été proposés pour une gestion intelligente des ouvrages d'art :

- des ponts connectés en continu,
- l'apprentissage par l'instrumentation de familles d'ouvrages ou de familles de pathologies,
- l'apprentissage automatique basé sur l'IA appliquée à l'instrumentation des ouvrages,
- la surveillance des ouvrages d'art par télédétection,

- l'inspection par imagerie des ouvrages d'art,
- des capteurs innovants ou usage innovant de capteurs pour la surveillance des ouvrages d'art.

Avec 17 solutions expérimentées en grandeur nature, le format de l'appel à projets a été très ciblé autour de retombées pratiques et rapides, avec des objectifs ambitieux mais crédibles. Ce format est très attractif et s'est avéré bénéfique, tant du côté des acteurs des consortium que du Cerema pour donner une impulsion forte dans le domaine de l'innovation en génie civil.

Les groupements entreprises/universités/maîtres d'ouvrages se sont révélés adaptés pour les phases de R&D. Ils ont permis des avancées opérationnelles pour assurer un double succès, une gestion du patrimoine plus accessible aux collectivités et une industrie plus performante.

Résultats de l'appel à projets Ponts connectés

Chiffres clés de l'appel à projets « Ponts connectés »

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

23 avril 2021 : annonce des 17 projets lauréats

3 ans d'expérimentation et d'évaluation des 17 projets lauréats

48 entités lauréates comptant des entreprises, des collectivités, des centres de recherches

La typologie des 48 entités lauréates est la suivante :

- 32 % de grandes entreprises,
- 19 % de petites entreprises,
- 17 % d'équipes de recherche,
- 16 % de maîtres d'ouvrages publics,
- 10 % de moyennes entreprises,
- 6 % de maîtres d'ouvrages privés.

8 millions d'euros de financement

Les 17 projets, portés par 48 entités lauréates, ont mobilisé 8 millions d'euros, 4 millions directement financés par les lauréats et 4 millions financés par l'État. Les petites structures comme les plus grandes ont pu avoir accès à toute la gamme de montant des subventions, ce qui souligne que même les petites structures ont été à même de présenter des projets ambitieux.

6,5 : TRL moyen atteint par les projets

Le TRL (Technology Readiness Level) moyen atteint par les projets est de 6,5, ce qui ouvre la voie à des poursuites vers l'industrialisation à court terme pour la moitié des lauréats, les plus avancés, pour l'autre moitié les acquis du projet s'inscrivent dans un processus à plus long terme.

50% des projets poursuivent vers l'industrialisation.

60% des lauréats souhaitent poursuivre avec une assistance du Cerema.

Aide à la surveillance en continu des ponts

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Ce chapitre s'intéresse aux innovations pouvant apporter une aide vis-à-vis de la surveillance en continu des ponts.

Actuellement à l'exception d'ouvrages importants pour lesquels une instrumentation a parfois été mise en place lors de la construction, la mise en place d'une instrumentation est le plus souvent réalisée à la suite d'une inspection faisant apparaître un événement anormal (déformation, fissuration, mise en butée d'un tablier...). Cet événement entraîne normalement le suivi du phénomène, l'analyse de ses causes et des conséquences (analyse du dossier d'ouvrage, identification des causes du phénomène, re-calculation avec un modèle simple et/ou partiel jusqu'à un modèle complet, analyse des risques d'évolution et évaluation de leurs conséquences) mais il est alors impossible de connaître l'historique de l'évolution des phénomènes. Dans les cas complexes, le modèle numérique peut être précisé grâce aux résultats des mesures. Cette démarche conduit parfois à préciser l'instrumentation, mais elle aboutit surtout à caractériser une évolution et fixer des seuils pour des mesures d'exploitation et/ou d'engagement de travaux de réparation ou renforcement. Inversement, l'expérience montre qu'une instrumentation de suivi sans objectif précis ni procédure d'exploitation est vite abandonnée. Une solution de surveillance avec des moyens évolutifs reste sans doute à trouver.

Il était ainsi attendu des propositions d'instrumentations capables d'apporter une aide aux gestionnaires pour détecter des pathologies en amont ou en remplacement d'inspections visuelles, ou en prévention de ruptures brutales. Ces instrumentations pouvant être ciblées sur un nombre limité de pathologies et concerner des comportements de long terme ou des comportements discontinus. Il était également attendu une approche théorique du traitement des informations à l'aide de modèles mécaniques et de modèles ou données issus de l'instrumentation à confronter et à mettre en interaction.

Par ailleurs, l'instrumentation des ouvrages peut générer de grands volumes de données hétérogènes qui doivent pouvoir être interprétées de la manière la plus pertinente et la plus automatisée possible. Le traitement et l'interprétation de telles données nécessitent l'usage d'outils incluant des algorithmes mathématiques, facilitant le diagnostic comportemental et la prise de décision. Il était attendu des propositions d'usage de l'IA pour traiter et exploiter des grandes masses de données et réaliser un apprentissage automatique sur la base des données d'instrumentation.

Ce chapitre détaille les projets lauréats suivants :

AP'PONTS - Analyse modale opérationnelle appliquée aux ponts

Le projet porte sur la surveillance d'ouvrages par analyse modale avec capteurs MEMS (Micro-Electro- Mechanical-Systems) sous vibration ambiante. L'instrumentation a été appliquée à des ouvrages de typologies différentes pour permettre de localiser et de quantifier l'évolution des désordres ou changement de comportement structural.

CI3S - Surveillance des ouvrages et détection des désordres par capteurs et intelligence artificielle

Le projet porte sur la mise en place d'un système d'instrumentation composé d'un réseau de capteurs, d'un système d'acquisition et d'algorithmes de traitement des données employant des approches physiques et des méthodologies d'intelligence artificielle. Il vise à caractériser le fonctionnement de la structure avec l'ambition de localiser les désordres et informer le gestionnaire.

GeRICO - Surveillance d'ouvrages métalliques avec capteurs

Le projet porte sur la surveillance des ouvrages de type treillis métalliques à partir d'une instrumentation par cordes optiques et accéléromètres. L'objectif est d'analyser le comportement mécanique de l'ouvrage, de détecter voire anticiper les désordres tout en quantifiant la sollicitation des ouvrages par les charges de circulation.

SURVOUT - Surveillance d'ouvrages en maçonnerie sous trafic courant et convois exceptionnels

L'objectif principal du projet est de proposer une méthode permettant une bonne appréhension du fonctionnement des ouvrages en maçonnerie et de leur comportement mécanique sous trafic courant et sous l'impact éventuel de convois exceptionnels. Pour cela, le projet repose sur l'addition : d'une surveillance continue, dynamique, autonome et connectée ; d'une surveillance distribuée exhaustive, d'une surveillance des mesures de convergence et d'un modèle de calcul paramétré développé.

VIGI – Veille par Instrumentation des ouvraGes et Infrastructures

Le projet vise la surveillance par l'instrumentations des ouvrages avec des capteurs autonomes permettant d'offrir des indicateurs robustes, représentatifs du comportement structural des ouvrages par l'analyse du comportement dynamique. Le système peut être interrogé par le personnel en charge de la gestion lors de visites, qui bénéficie alors d'informations sur le comportement structurel pour une prise de décision argumentée.

Pour chacun de ces projets, les éléments de bilan fournis par les consortiums sont présentés dans les paragraphes ci-après : le consortium, le projet, les avancées techniques, les perspectives pour la gestion patrimoniale et les bénéfices pour la gestion de patrimoine.

Des perspectives générales pour l'aide à la surveillance en continu des ponts sont identifiées en fin de chapitre.

II. AP'PONTS - Analyse modale opérationnelle appliquée aux ponts

Le consortium

Partenaires : Apave, Sercel, CD38 et Ville de Paris



Ouvrages instrumentés (Figure 1) :

- Pont de Lagnieu (pont en arc en béton armé) enjambant le Rhin entre l'Ain et l'Isère dont le maître d'ouvrage est le Département de l'Isère,
- Passerelle Claude Bernard (structure en acier bardage en bois) enjambant le Boulevard Périphérique entre les portes d'Aubervilliers et de la Villette dont le maître d'ouvrage est la Ville de Paris,
- Travée VIPP, boulevard périphérique dont le maître d'ouvrage est la Ville de Paris,
- Pont de Rive de type pont à poutres préfabriquées précontraintes (PRAD) dont le maître d'ouvrage est le Département de l'Isère.

Le projet

Grâce aux évolutions récentes des systèmes d'acquisition de surveillance des structures, les méthodes connues d'analyse modales opérationnelles peuvent être améliorées soit pour caractériser les caractéristiques mécaniques des structures instrumentées, soit pour fournir directement des indicateurs structurels fiables facilitant la prise de décision en matière de gestion d'actifs.

D'un point de vue scientifique, il s'agit d'utiliser l'analyse modale opérationnelle couplée à un module de détection de dommages locaux en conditions réelles, afin d'identifier des changements d'états structuraux et comparer, sur la base d'un modèle numérique, les coefficients de sécurité associés aux différentes combinaisons d'actions.

Travée VIPP boulevard périphérique - Paris



Passerelle Claude Bernard – Paris



Pont de Rive (PRAD) - Isère



Pont de Lagnieu - Isère



Figure 1. ouvrages surveillés dans le projet AP'PONTS.

Dans le cadre du projet AP'PONTS, l'instrumentation a été appliquée à des ouvrages de typologies différentes : VIPP (Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension) de première génération, passerelle métallique piétonne, pont multi-travée de type arc en béton armé, ouvrage d'art à travée unique de type PRAD (Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence). Les résultats ont été analysés pour faciliter la détection de désordre et calibrer des modèles numériques nécessaires à la vérification des combinaisons d'actions réglementaires (Figure 2).

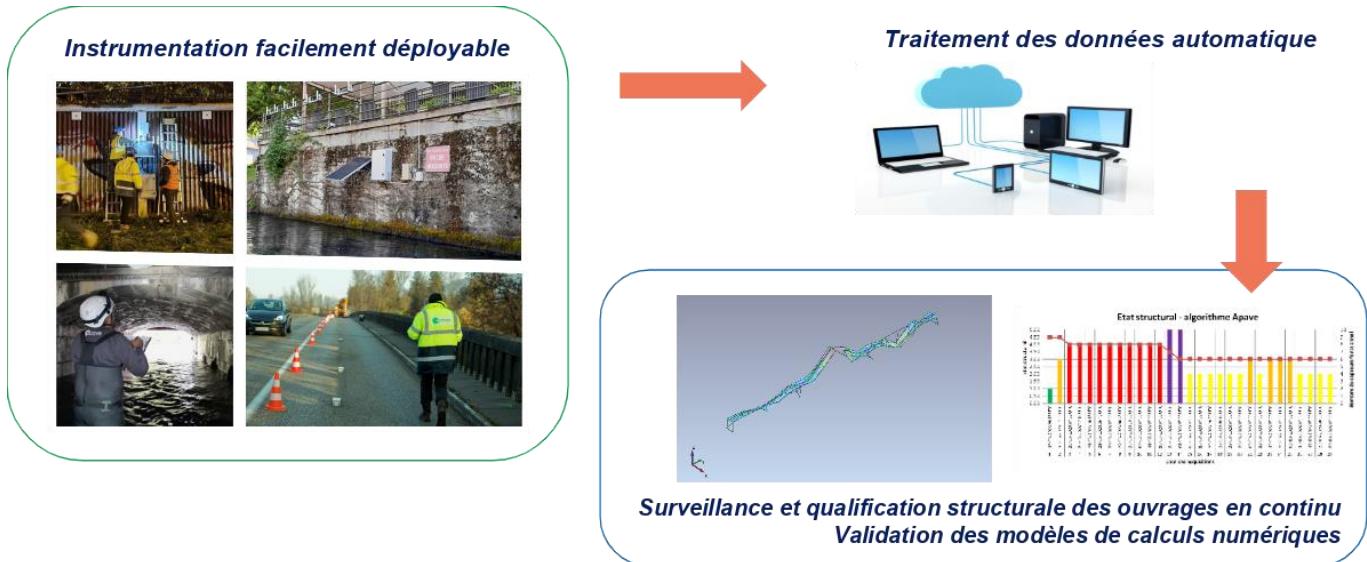


Figure 2. Solution de surveillance proposée dans le projet AP'PONTS. Crédits photo AP'PONTS

Avancées techniques

Le projet a permis de proposer une solution peu encombrante de surveillance des ouvrages basée sur l'exploitation des propriétés dynamiques et adaptable à un vaste panel d'ouvrages d'art, quelque soit leur matériau de construction. L'ensemble des capteurs a été éprouvé pour réaliser des audits préliminaires et surveiller des ouvrages sur le long terme. La méthode a été validée pour caractériser un ouvrage en comparant les données avec celles issues des rapports d'études précédentes.

De manière plus détaillée, la solution facilite la connaissance d'un ouvrage en mode audit avec :

- une instrumentation à haut rendement :
 - une prise des mesures sans caractère intrusif et à haut rendement,
 - des capteurs sans fil qui facilitent le déploiement en tout point d'un ouvrage,
 - une gestion centralisée des données qui facilite et réduit le temps de traitement ;
- l'amélioration de la connaissance structurale des ouvrages ;
- une connaissance fine et détaillée du comportement réel de l'ouvrage dans son environnement ;
- la définition d'une signature structurale qui peut être utilisée :
 - pour mesurer l'évolution du comportement à long terme (gestion patrimoniale),
 - pour recalier un modèle numérique sur la base modale du comportement réel.

La solution facilite la surveillance des ouvrages en mode SHM (« Structural Health Monitoring ») avec :

- une surveillance automatisée à grande échelle d'un ouvrage,
- la capacité à automatiser la détection d'un désordre (niveau 1 du SHM),
- la capacité à localiser automatiquement la détection d'un désordre (niveau 2 du SHM),
- la capacité à estimer automatiquement la gravité d'un désordre (niveau 3 du SHM),
- le déploiement du matériel facilité par des connexions sans fil et centralisées autour d'une gateway,
- une durée de vie des batteries importantes (entre 3 et 5 années).

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Les gains du projet pour les collectivités sont identifiés :

- Détection d'un nouveau désordre et localisation du désordre,
- Surveillance d'une pathologie connue,
- Consolidation des modèles numériques existants,
- Définition de la signature structurale afin d'estimer l'impact d'un désordre au cours du temps.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Cette solution s'adresse à l'ensemble des gestionnaires d'ouvrages et d'infrastructures, sans exception. Elle s'inscrit dans le cadre de la surveillance des ouvrages neufs et anciens pour surveiller l'évolution de l'état structural, ou pour surveiller, sur une période définie, l'évolution d'un désordre important survenu de manière imprévue.

L'analyse modale appliquée aux ouvrages présente l'intérêt d'apporter une vision globale du comportement mécanique de l'ouvrage. Cette méthode est actuellement peu utilisée dans le monde des ouvrages d'art compte tenu de la difficulté à acquérir des signaux à un prix raisonnable et à exploiter rapidement les résultats obtenus. La solution proposée dans le cadre de ce projet a pour objectif de souligner les gains importants de l'analyse modale opérationnelle pour la surveillance de l'état réel des ouvrages, employée à l'aide de nouveaux capteurs et appuyée par la définition de seuils d'alerte.

III. CI3S - Surveillance des ouvrages et détection des désordres par capteurs et intelligence artificiels

Le consortium

Partenaires : CIDEKO, Université Clermont Auvergne et Département du Puy-de-Dôme



Ouvrages instrumentés : 5 ouvrages dans le département du Puy-de-Dôme : Pont de Parentignat, Pont de Dallet, Pont de Longues, Pont de Cournon, et Viaduc de Rochefort.

Le projet

Le projet CI3S a réuni plusieurs partenaires stratégiques, chacun apportant une expertise complémentaire. CIDEKO, une entreprise innovante spécialisée en diagnostic et surveillance structurelle, s'est associée à l'Université Clermont Auvergne pour la recherche académique et au Département du Puy-de-Dôme pour les applications pratiques.

La solution intègre un système complet d'instrumentation basé sur le couplage de l'intelligence artificielle et les méthodes d'identification modale. Elle permet la détection et la localisation des désordres en temps réel, d'une part, et la planification optimale de la maintenance prédictive du parc d'ouvrages sous surveillance, d'autre part.

Le projet CI3S comprend :

- le développement d'un système de mesure complet de fabrication locale, capteurs et gateway, d'une grande précision et avec des coûts considérablement réduits (Figure 3) ;
- l'élaboration d'algorithmes performants d'intelligence artificielle et de méthodes d'identification modale, implémentés dans une plateforme d'exploitation dédiée ;
- la validation des moyens de mesure et des algorithmes sur des maquettes en laboratoire, sous des scénarios de dégradation maîtrisés ;
- l'application sur cinq ouvrages dans le département du Puy-de-Dôme, avec des typologies variées, afin de valider le caractère opérationnel de la solution développée.

Conception de l'électronique



Optimisation des capteurs



Tests de validation



Figure 3. Développement d'un système de mesure complet, de fabrication locale (grande précision et coûts fortement réduits). Crédits photo CI3S.

La localisation précise des désordres dans l'ouvrage est garantie par l'exploitation des techniques d'identification modale dans l'algorithme d'apprentissage profond. Différentes stratégies d'intelligence artificielle ont été appliquées et comparées, afin de valider le modèle retenu. Des procédures innovantes d'acquisition et de filtrage ont été spécifiquement développées pour garantir la robustesse de la méthodologie.

Après validation sur des maquettes en laboratoire, le système de surveillance a été installé sur cinq ouvrages du Puy-de-Dôme. Les accélérations mesurées et traitées par les algorithmes permettent d'obtenir les indicateurs de l'état de santé de l'ouvrage, y compris la localisation et la quantification des désordres. La plateforme numérique et les outils logiciels développés montrent de grandes performances en termes de détection et de localisation des désordres (Figure 4).

L'exploitation des données, sous conditions normales de trafic et lors de précédents essais de chargement réalisés par le Cerema sur le pont de Longues a permis de confirmer les performances de la solution CI3S. Des désordres de faible amplitude, correspondant à l'ouverture des joints engendrée par la décompression du béton précontraint, ont été localisés par nos algorithmes.

L'ensemble des résultats obtenus, et notamment le traitement des données mesurées sur les ouvrages en service, démontre le caractère opérationnel de la solution développée.

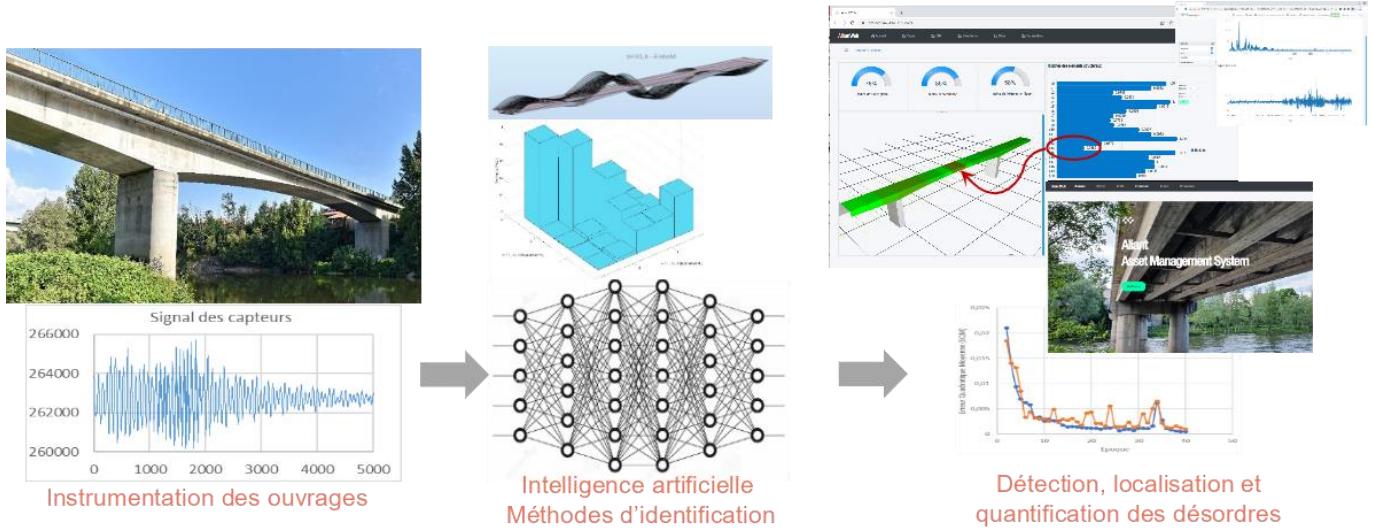


Figure 4. Élaboration d’algorithmes performants d’intelligence artificielle et de méthodes d’identification modale. Crédits photo CI3S.

Avancées techniques

Le projet CI3S a permis d’importantes avancées techniques par rapport à l’état de l’art :

- une capacité de détection et de localisation des désordres : identification et localisation des désordres dès leur apparition, même sous trafic normal et sans connaissance préalable des charges appliquées ;
- des algorithmes robustes : élaboration d’algorithmes performants couplant l’intelligence artificielle et l’identification modale pour détecter les évolutions infimes dans la signature numérique des ponts, réduisant ainsi les fausses alertes ;
- des procédures de filtrage et d’échantillonnage : techniques avancées pour l’analyse des courbures des modes vibratoires ;
- une chaîne de mesure optimisée : conception d’une chaîne de mesure intégrant capteurs, système de collecte et de transmission adaptés à la surveillance vibratoire ;
- une plateforme de surveillance en temps réel : développement d’une plateforme Web pour une surveillance continue et une gestion proactive des infrastructures.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Grâce aux avancées du projet CI3S, les perspectives suivantes sont envisagées :

- réalisation de POCs (preuves de concept) avec des maîtres d’ouvrages, pour confirmer les performances de la solution CI3S sur différents types d’ouvrages et de défauts ;

- implémentation de l'intelligence artificielle au niveau des dispositifs de mesure, pour limiter le volume des données transmises par les réseaux ;
- développement d'algorithmes adaptés à la détection des désordres préexistants dans l'ouvrage (avant la mise en place de l'instrumentation) ; c'est-à-dire utiliser la surveillance comme outil de diagnostic, sans état de référence ;
- extension des techniques de détection à de nouveaux types de désordres, comme par exemple la perte de précontrainte sans décompression, et les ruptures de fils dans les câbles des ponts haubanés.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

La solution CI3S offre aux maîtres d'ouvrage les bénéfices suivants :

- une maintenance prédictive efficace, grâce à une installation simple et un coût réduit ;
- une optimisation des interventions d'inspection, grâce à la localisation et à la quantification des désordres dans l'ouvrage ;
- la mise à disposition d'indicateurs de santé permettant de garantir la sécurité des ouvrages et d'anticiper l'occurrence des désordres ;
- une capacité de prévision de la durée de vie résiduelle, via une surveillance continue de l'état de santé de l'ouvrage.

IV. GeRICO - Surveillance d'ouvrages métalliques avec capteurs

Le consortium

Partenaires : SCE (porteur du projet) / STRAINS SA / OSMOS GROUP SA / Angers Loire Métropole. Autre partenaire : Département de Loire-Atlantique



Ouvrages instrumentés :

- Grand pont de Mauves-sur-Loire / RD 31 / CD 44: Pont cage en fer puddlé de 1882. Poutres latérales et treillis multiples rénové en 2020. 482 ml 11 travées, appuis sur pieux bois,
- Pont Du Haut Village / RD 37 St julien-de-Concelles / CD 44 : Pont cage en fer puddlé de 1882. Poutres latérales et treillis multiples. 225 ml 5 travées, appuis sur pieux bois,
- Pont de Verdun sur la Maine à Angers : Ouvrage en maçonnerie, 110ml, 8 travées, appuis sur pieux bois.

Le projet

Le projet GeRICO a comporté un premier volet d'instrumentation visant à recueillir un spectre large d'informations pour les ouvrages ponts-cages métalliques : charge des convois, comportement sous trafic, comportement à vide. L'instrumentation combine extensomètres en base longue de type corde optique pour les mesures de déformations dynamiques, accéléromètres pour les mesures de vibrations et inclinomètres pour les évolutions lentes et saisonnières. Le projet s'est attaché à considérer une approche globale de l'ensemble des données, à réaliser des analyses de corrélations croisées entre différentes grandeurs physiques (fusion de données) et à leur appliquer des méthodes statistiques d'apprentissage en vue de la détection d'anomalies.

De manière à préciser l'information recueillie et à la transformer en connaissance, un modèle de calcul EF est réalisé pour chaque ouvrage. Ce modèle inductif simule le comportement en

statique et en dynamique, pour des situations courantes et pour des situations accidentielles. Un lien bidirectionnel est donc réalisé entre le modèle issu de la mesure en continu (modèle déductif) et le modèle de calcul (inductif). Les calibrations/appairages se font surtout à partir d'analyses dynamiques sur la base de mesures à haute fréquence et sur la base d'analyses statiques (Figure 5).

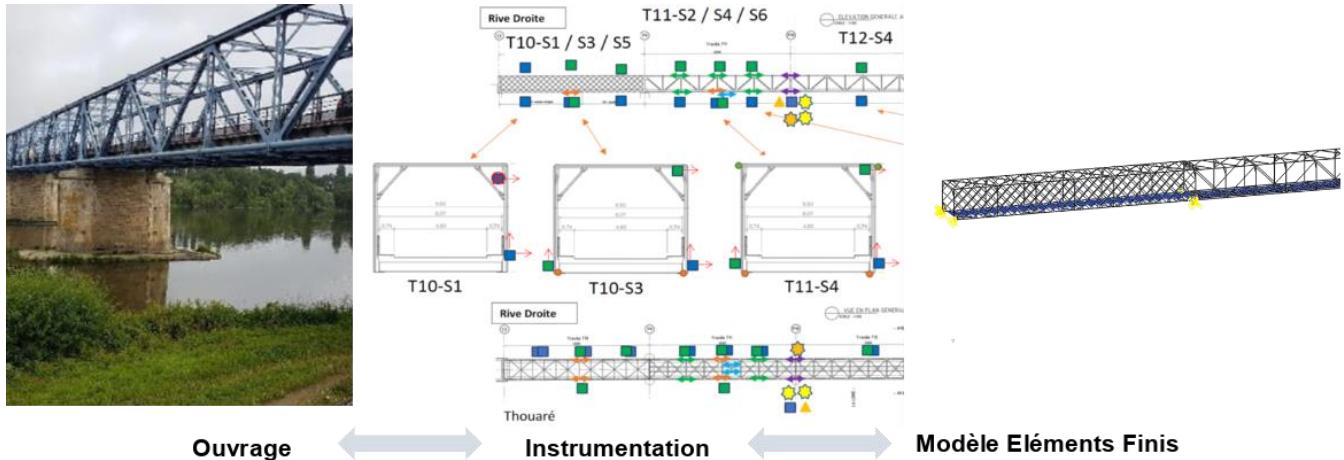


Figure 5. Illustration du dialogue entre mesures et modèle structurel. Crédits photo GeRICO.

Les objectifs spécifiques au projet GeRICO pour les ouvrages de type pont-cages métalliques étaient :

- de faciliter la corrélation jumeaux numériques/ouvrage réel en s'appuyant sur une chaîne d'acquisition de mesures à haute fréquence, par le biais de l'analyse des modes propres,
- d'effectuer le pesage et le comptage des véhicules >3.5t,
- de savoir rationaliser l'instrumentation des ouvrages nécessaire au développement d'une maintenance prédictive d'ouvrages d'art,
- de définir des indicateurs synthétiques du comportement des ouvrages, actualisés en continus
- de surveiller le comportement d'appuis présentant un risque d'affouillement,
- de définir une démarche méthodologique synthétique sur la typologie d'ouvrage de nature à homogénéiser les approches des bureaux d'études et gestionnaires.

Avancées techniques

L'instrumentation mise en œuvre, satisfaisant à l'exigence d'un taux d'échantillonnage important (100 Hz) et disposant d'une alimentation filaire, a permis de recueillir en temps réel et en continu toutes ces informations pendant 18 à 24 mois, d'évaluer les contraintes diffusées

dans la structure et de fournir des données d'entrée pour le recalcul et la modélisation, afin de définir des indicateurs pertinents pour suivre l'état de santé de l'ouvrage.

Le principe de mesure en continu déployé ainsi que son exploitation ont ainsi permis :

- Le calibrage de la réponse de l'ouvrage grâce à des tests de chargement ;
- L'enregistrement et l'horodatage de tout évènement structurellement significatif ;
- L'enregistrement et l'horodatage des passages de convois entraînant des déformations significatives ;
- L'évaluation de la souplesse des poutres et de leur évolution au cours du temps, ainsi que la vérification du retour de la structure à son état initial après ces passages ;
- L'analyse des modes de vibration des poutres sous sollicitations dynamiques, sous 30 Hz. A cet effet, les données ont été traitées par un algorithme de type « Eigensystem Realization Algorithm » (ERA). Il identifie les motifs correspondant à des modes de vibration propres par une analyse d'une matrice de covariance (dite Matrice de Hankel des paramètres de Markov) construite à partir des mesures d'un groupe cohérent de capteurs. On obtient ainsi un diagramme de stabilisation filtrant les fréquences les plus représentées et permettant d'associer à chacune d'entre elles un taux d'amortissement ainsi qu'une valeur par capteur, correspondant à sa contribution au mode identifié, et à partir de laquelle on peut déduire une forme de mode ;
- L'analyse du comportement à long terme de l'ouvrage en exploitant les valeurs moyennes des mesures sur des plages de temps définies : heure, jour, semaine, mois, année. Cette analyse est complétée par une étude des corrélations entre variations de température et évolutions de la structure afin de distinguer les tendances à long terme des tendances saisonnières ;
- Le constat que l'utilisation, aux fins de l'Analyse Modale Opérationnelle, des seules données dont l'enregistrement serait déclenché au passage de véhicule est suffisante plutôt que de réaliser des enregistrements longs sous bruit ambiant ;

Les Jumeaux numériques des deux ouvrages de type pont-cage ont été montés et confortés avec corrélation avancée des comportements dynamiques (modes propres). Les épreuves statiques et dynamiques réalisées en Avril 2022 ont permis de confirmer un calibrage fin des modèles réalisés avec deux niveaux de détail (Figure 6) :

- Modèles complexes réalisés avec le logiciel PYTHAGORE avec recours à des méthodes automatiques d'appairage peu usitées en Ouvrages d'Art, sur un nombre de modes important. La méthodologie suivie est largement inspirée du livre « Finite element model updating in structural dynamics » de M. I. Friswell et J. E. Mottershead.
- Modèles simplifiés réalisés avec le logiciel à barres ST1, modèles adaptés par rapport à ceux réalisés avant GeRICO pour des études statiques de portance. L'appairage des modes a été réalisé manuellement et restreint aux modes principaux.

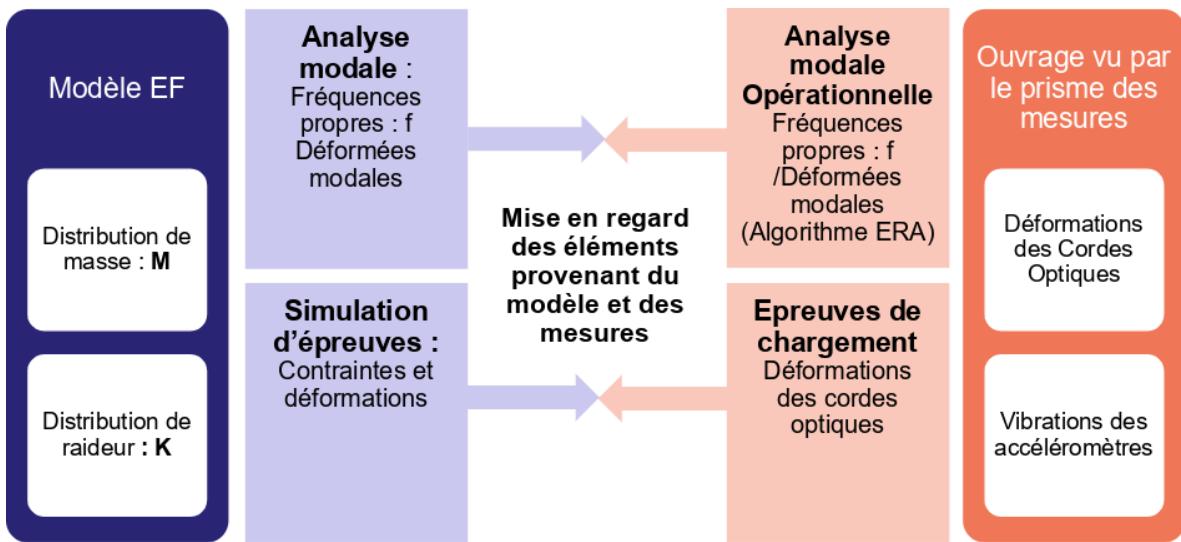


Figure 6. Visualisation des outils pour réaliser le dialogue entre ouvrage et mesures.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

➤ Retour d'expérience sur l'Analyse Modale Opérationnelle et la démarche de jumeau numérique

L'appairage effectif du jumeau numérique a permis de recouper et conforter, voire de préciser, des analyses permises avec les algorithmes de pesage en marche (Les algorithmes WIM restent seuls capables de contrôles opérationnels quasi immédiats). Des rapports statistiques ont été établis pointant des évènements exceptionnels (avec informations de vitesse, de poids et de direction, et confirmation de retour à l'état initial) s'avérant cohérents avec le suivi par le gestionnaire.

Il a été vérifié que les modes de flexion du tablier étaient aussi bien identifiés, avec des caractéristiques identiques, au moyen des cordes optiques qu'au moyen des accéléromètres.

Comme attendu, les modes de torsion sont assez éloignés et ne peuvent être ciblés pour l'analyse comportementale. Cela permet d'optimiser l'instrumentation d'un ouvrage dont l'analyse modale se limiterait aux modes en flexion, en s'affranchissant du recours à des accéléromètres par exemple.

Les influences saisonnières et des niveaux hydrauliques ont été également appréhendés, révélant une amplitude faible sur près de 20 mois d'instrumentation et pouvant être clairement distinguée des comportements liés à l'exploitation.

Quelques bonnes pratiques sont identifiées pour mener une démarche de recalage de modèle, par analyse modale opérationnelle ou autre :

- il est utile de monter le modèle numérique pour définir l'instrumentation. Le fait de faire un premier modèle, même imparfait ou simple, permet d'avoir une idée des modes propres de l'ouvrage et de la façon dont il se comporte. Cela permet d'aiguiller le choix de l'instrumentation ;

- le recalage ne permet pas de lever toutes les incertitudes, l'étape d'étude précise du dossier d'ouvrage est primordiale : son degré de précision, tant géométrique que sur la nature des matériaux, constitue un facteur de complexité important pour l'approche proposée. Il convient de lever les incertitudes par du contrôle non destructif (mesure des sections, plan précis, etc.). L'analyse du comportement du modèle et de sa corrélation ont permis aussi de cibler des investigations sur certaines membrures qui ont confirmé les doutes sur les sections réelles représentées sur archives. Le recalage de modèle intervient dans un second temps, en tentant de lever d'autres incertitudes sur le fonctionnement de l'ouvrage par exemple. Ainsi, le modèle doit appréhender les blocages potentiels d'appuis du fait de la corrosion par exemple ;
- Les cordes optiques mesurant des déformations doivent être placées aux endroits où le comportement de l'élément est un comportement de type poutre, en évitant donc les nœuds d'assemblage des structures, cela facilite grandement la comparaison entre les déformations d'un modèle « classique » et celles mesurées (sur 1 mètre) par la corde optique. Dans le cas contraire il faudra faire appel à des modélisations plus complexes ;
- L'ensemble du recalage est soumis à la formation des paires de mode, cet appairage doit être soigné.

➤ **Réponse aux enjeux de maintenance prédictive**

Le comportement de la structure a été simulé par introduction de défaillances locales dans la structure. Il apparaît que la typologie d'ouvrage et la redondance des éléments verticaux et diagonaux participe à une très faible sensibilité de la signature comportementale de l'ouvrage vis-à-vis des défaillances locales testées. Techniquement, il est difficile de détecter et de localiser ce type de désordre avec l'instrumentation en place dont l'objet est la surveillance du comportement global. Le constat a été similaire tant par le recours à une modélisation complexe qu'avec une modélisation simplifiée « bas coût ». De ce fait, la définition d'indicateurs synthétiques resterait propre à chaque ouvrage.

Pour surveiller ce type de désordre par le biais d'une analyse modale opérationnelle, il faudrait notamment considérer :

- L'application à des structures comportant moins de redondance des éléments structurels ;
- Un ciblage des catalogues de désordres sur les éléments particulièrement critiques de l'ouvrage.

Les effets d'une simulation d'affouillement se sont avérés plus nettement détectables : l'affouillement a un impact sur les modes transversaux de l'ouvrage. Pour suivre ce phénomène via une analyse modale opérationnelle il convient :

- De mettre en œuvre une instrumentation capable de capter les modes transversaux (là encore le montage d'un modèle numérique initial permet d'avoir une idée a priori de la forme de ces modes) ;

- De suivre leur évolution en fréquence. Une fréquence qui baisse peut être le signe d'un affouillement ;
- De suivre leur évolution en déformée : un mouvement latéral au-dessus d'une pile est un signe. Ce mouvement ne peut être vu que si des accéléromètres transversaux sont situés à l'aplomb de la pile. La tête de pile elle-même peut être instrumentée.

➤ Cas du pont de Verdun

Le pont de Verdun est d'une typologie très différente et son étude a été donc menée très distinctement de celle des deux ouvrages ponts-cages. Pour autant, l'objectif était de nature similaire, à savoir l'appairage d'un modèle numérique avec l'ouvrage instrumenté de manière à détecter des modes de ruine, et plus précisément des modes de ruine du fait d'affouillements.

Les voûtes, culées piles et pieds de pile du pont de Verdun ont été modélisés en 3D sur le logiciel Digital Structure. Deux méthodologies de calcul élastoplastique ont été développées : la première permet d'évaluer la capacité d'un ouvrage ayant subi un tassement différentiel qui ne serait plus évolutif (cas du pont de Verdun après renforcement en pied). La seconde traite du cas où l'affouillement serait toujours évolutif, fait que l'on peut supposer pour le pont de Verdun d'après les récentes données de capteurs.

Le constat a été fait qu'il est possible d'évaluer l'évolution des dégradations de l'ouvrage étant donné une évolution des tassements différentiels des appuis (homogène ou de rotation) de façon numérique. Cette évolution peut être construite indépendamment de la connaissance des fondations, puisqu'elle corrèle simplement un déplacement observé au niveau de l'ouvrage à un niveau de dégradation.

L'analyse des modes de rupture sur le cas particulier du Pont de Verdun a permis d'extrapoler que la démarche de surveillance, et donc d'instrumentation, dans le cas non évolutif de l'ouvrage doit continuer à se concentrer sur les sujets suivants (Figure 7) :

- l'apparition de doubles rotules en clef et au niveau des reins, caractéristique de la poursuite de l'affouillement homogène,
- l'apparition d'une fissuration « diagonale et traversante » dans les voûtes, caractéristique de la poursuite du phénomène de rotation d'appui,
- surveiller l'affaissement local des bords de voûte en clef, mécanisme probable de rupture sous poids propre si la voûte a fissuré antérieurement par rotation différentielle des appuis.

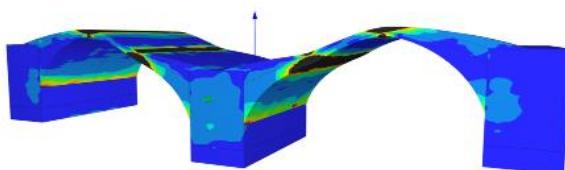


Figure 7. Affouillement et capacité portante Pont de Verdun.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

La consolidation des informations, sur les ouvrages métalliques de type treillis, permet de renforcer le partage d'expérience et la capitalisation à plus grande échelle des corrélations entre les constats permis par une instrumentation adaptée et le comportement même des ouvrages d'autre part.

La méthodologie d'appairage des jumeaux numériques par analyse modale opérationnelle est nouvelle pour des structures d'ouvrages d'art. La bonne corrélation trouvée sur des ouvrages complexes démontre que la voie est à explorer plus avant dans l'objectif d'une maintenance prédictive pour des ouvrages plus simples. La Maîtrise des effets d'un catalogue prédéfini de désordres possibles permettra au gestionnaire de prendre sans délai des dispositions adaptées lors de la survenance de défaillances, ou indices de défaillances, localisées ou plus étendues

Sans que le suivi à distance réalisé dans le cadre du projet Pont Connecté puisse se substituer complètement aux visites périodiques, il doit permettre un usage plus ciblé des modes d'investigation lourds et coûteux et conduire le gestionnaire à adapter au fil du temps les usages de son infrastructure, dans l'objectif d'une préservation patrimoniale pour les ouvrages treillis en particulier.

V. SURVOUT - Surveillance d'ouvrages en maçonnerie sous trafic courant et convois exceptionnels

Le consortium

Partenaires :

QUADRIC groupe ARTELIA, CD38



Ouvrages instrumentés : voûte de Brignoud / voûte de Saint-Christophe-en-Oisans/ voûte de Touvet

Le projet

Le projet SURVOUT a concerné la surveillance dynamique et connectée des voûtes en maçonnerie sous trafic et transports exceptionnels. Ce projet, piloté par QUADRIC en partenariat avec le Département de l'Isère (CD38), porte sur le suivi en continu et connecté, au moyen de capteurs autonomes, d'ouvrages d'art en maçonnerie sous circulation. Ce parc d'ouvrage se caractérise par un patrimoine important qui représente environ : 20% des ponts du réseau routier et 80% des murs, 44% du patrimoine SNCF, 85% des tunnels du réseau RATP.

La présence sur des itinéraires routiers stratégiques de ces constructions fait de leur préservation un enjeu prégnant, tant en termes de sécurité des biens et des personnes que d'optimisation des ressources environnementales et financières.

Une forte diversité de sites est rencontrée, avec des sites montagneux et un climat rude impactant le choix du matériel et de son autonomie, des ouvrages fortement circulés y compris par des convois bois ronds ou TE (Transport exceptionnel), qui peuvent être situés sur des axes stratégiques et des axes d'accès unique pour certaines communes. Dans le cadre du projet le suivi de l'ouvrage est réalisé par une instrumentation spécifique permettant de préciser, conforter et justifier l'analyse initiale et l'évolution future.

Dans ce contexte, l'objectif principal du projet SURVOUT a été de proposer une méthode permettant une bonne appréhension du fonctionnement des ouvrages en maçonnerie et de leur comportement mécanique sous trafic courant et sous l'impact éventuel de convois exceptionnels par le biais d'un suivi basé sur l'instrumentation en fonction de la présence des différentes pathologies.

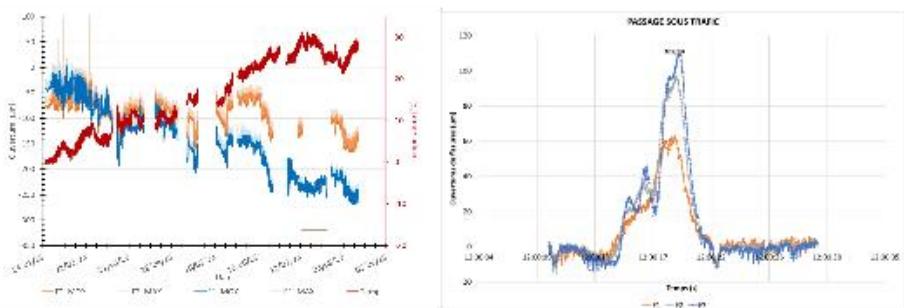
Le système de surveillance continue, dynamique, autonome et connecté, développé dans le cadre de ce projet, répond aux objectifs d'une technologie à bas coût et d'une instrumentation simple (Figure 8). Il se compose de capteurs de déplacement pouvant atteindre des fréquences de mesures dynamiques allant jusqu'à 100 Hz, permettant de déclencher des prises de clichés instantanées de poids lourds sur l'ouvrage (Figure 9). Le système intègre également d'autres types de capteurs tels que des distancemètres laser et des sondes de température, capables de réaliser des mesures en continu. Ce système autonome présente l'avantage de ne pas nécessiter de raccordement au réseau électrique et offre la possibilité de se connecter à distance aux mesures réalisées.

La surveillance distribuée exhaustive mais périodiques réalisée par le biais de la technologie innovante CFOD (fibre optique à mesure distribuée) a servi à étayer le projet aux étapes clés.

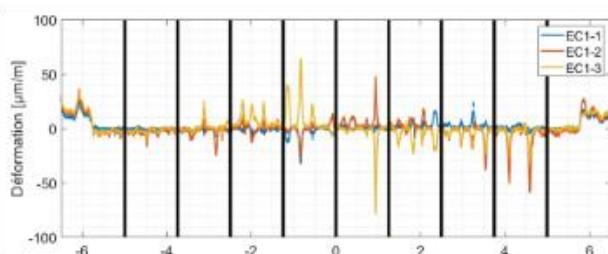
La confrontation des mesures expérimentales obtenues par les capteurs de déplacement et les CFOD, ainsi qu'avec le calcul réalisé avec le logiciel interne QUADRIC-VOUTE a permis l'enrichissement de chacune des approches, ainsi que la validation et optimisation de la méthodologie de suivi.



Prototype du coffret d'instrumentation



Mesures des capteurs de déplacement (fissuromètres)



Mesures des CFOD sur la longueur de la voute



Travaux d'installation des capteurs sur ouvrage

Figure 8. Capteurs autonomes, connectés et dynamiques et capteurs fibres optiques distribués (CFOD) développés dans le projet SURVOUT. Crédits photo SURVOUT.



Figure 9. Prise de vue déclenchée sur seuil. Crédits photo SURVOUT.

Avancées techniques

Le projet SURVOUT a fait l'objet de la création d'un prototype d'instrumentation embarquant la technologie Arduino qui présente un coût faible et de multiples possibilités, mais nécessite le développement de logiciels d'acquisition, de traitement et de transmission de données, contrairement à la mise en place de capteurs d'un fournisseur bénéficiant d'un environnement pré-intégré. Le test en laboratoire et les essais *in situ* ont permis de valider l'acquisition dynamique à 50 Hz assurant une surveillance sous circulation dans des conditions d'autonomie satisfaisantes.

Cette présente méthode d'instrumentation mise au point dans le cadre du projet SURVOUT, permettant l'évaluation de la capacité portante théorique et expérimentale d'un ouvrage en maçonnerie a fait l'objet d'une évaluation dans le cadre de la surveillance effectuée sur plus de 10 mois avec un taux de fonctionnement de plus de 80%. Ce taux de fonctionnement pourra être amélioré dans les prochaines versions du prototype.

Elle répond à un objectif de suivi des voûtes maçonnerie autonome, connecté et peu coûteux, en réalisant la prise de vue déclenchée sous seuil, permettant une surveillance spécifique dans le temps sous trafic et transports exceptionnels.

La Méthodologie SURVOUT peut assurer une surveillance sous trafic d'un ouvrage stratégique ou présentant des pathologies diverses, il est cependant important de retenir que l'instrumentation proposée réalise une surveillance s'appuyant sur les désordres induits (fissuration, ouverture de bandeaux, écartement de piédroits,...) indépendamment de sa cause (disjointolement important, défaut de conception, problème de fondation, ...) et doit être considérée comme un moyen permettant l'évaluation de la capacité portante dans le temps mais ne la garantissant pas.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Les potentialités de développement sont d'abord à mettre en relation du parc important d'ouvrages en maçonnerie existant, souvent vétuste, avec une récurrence des désordres observés. La présence sur des itinéraires routiers stratégiques de ces constructions fait de leur préservation un enjeu prégnant, tant en termes de sécurité des biens et des personnes que d'optimisation des ressources environnementales et financières.

Les maîtres d'ouvrage, soumis aux risques liés à l'exploitation d'ouvrages stratégiques pour leur réseau, pourraient être amenés à mobiliser des ressources financières pour mettre en place une surveillance.

En outre, le comportement réel des structures voûtes reste difficile à interpréter par le calcul en raison de l'absence fréquente d'archives ; de la méconnaissance de l'épaisseur des structures, de la géométrie du corps de la voûte et des matériaux ; des caractéristiques souvent mal-connues des pierres ; des connexions entre pierres (assemblages sans jeu, ...) ; du liant employé au niveau des joints, qui peut résulter en fonction de la profondeur du joint de plusieurs âges de rejoints ; du comportement des différentes interfaces dont l'interface sol-structure.

Le niveau de connaissance sur la capacité portante de tels ouvrages est ainsi limité. La méthodologie de surveillance des ouvrages en maçonnerie par instrumentation du projet SURVOUT peut s'avérer une réponse adaptée aux besoins de nombreux maîtres d'ouvrage. A ce stade, on peut envisager que les potentialités sont importantes. Cependant, elles nécessitent une démarche d'information et de communication sur cet outil auprès des services assurant la gestion du patrimoine de différents maîtres d'ouvrage.

L'industrialisation peut être envisagée à moyen terme, d'ici 5 ans. En effet, cette perspective ne s'ouvrira pleinement qu'après le déploiement du système sur d'autres ouvrages afin de poursuivre le développement et optimiser les composants.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Le suivi des ouvrages en maçonnerie ne comporte à ce jour pas de réglementation en matière de gestion de patrimoine et tout particulièrement d'instrumentation. Le projet SURVOUT a pour principal intérêt en termes de bénéfice collectif de démontrer que l'on peut réaliser un suivi pertinent de ces ouvrages par le biais d'une instrumentation en tirant des enseignements sur le fonctionnement de ces ouvrages.

Le suivi réalisé sur des ouvrages présentant à la fois des situations et pathologies très variées a démontré la possibilité de réaliser une surveillance dynamique, connecté et autonome répondant à la problématique de détection et suivi des voûtes maçonnerie sous trafic.

A noter que QUADRIC participe au Projet National DOLMEN de recherche sur la maçonnerie. QUADRIC souhaite également, par ce biais, apporter son expertise des ouvrages maçonneries pour faire évoluer la connaissance générale dans le cadre d'un bénéfice collectif.

VI. VIGI – Veille par Instrumentation des ouvrages et Infrastructures

Le consortium

Partenaires : EGIS, SAVE, Université Grenoble-Alpes, ATMB (Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc), ESCOTA (autoroutes Estérel-Côte d'Azur), CD74 (Conseil départemental Haute-Savoie)



Ouvrages instrumentés :

Nom de l'ouvrage	Gestionnaire	Lieu
Pont Joseph Blanc	CD74	Bouchet-Mt-Charvin (74)
Pont André	CD74	Rumilly (74)
Viaduc de Brassilly	CD74	Cran-Gévrier/Poisy (74)
Pont du Dard	ATMB	Passy (74)
PI 1 Amont	ATMB	Chamonix (74)
PS 1767	ESCOTA	Villeneuve-Loubet (06)
PS Super Antibes	ESCOTA	Antibes (06)
Viaduc du Var	ESCOTA	Nice (06)

Le projet

Le projet VIGI a eu pour objectif de développer un système léger d'instrumentation dynamique sous vibrations ambiantes et des outils de traitement et d'exploitation des résultats venant compléter les informations recueillies par ailleurs sur les ouvrages, et permettant au gestionnaire une prise de décision argumentée.

Pour cela, les actions prévues dans le cadre du projet VIGI ont visé à démontrer :

- la fiabilité et la capacité des systèmes d'instrumentation développés par Save à fournir des informations de même qualité que les systèmes (assez coûteux) actuellement utilisés,
- la capacité du personnel technique des gestionnaires de parc à s'approprier la technique de mesure pour recueillir très rapidement les données sur un grand nombre d'ouvrages,
- la complémentarité des indicateurs instrumentaux ainsi récoltés aux informations obtenues lors des inspections de type ITSEOA.

Le projet VIGI a été divisé en 5 phases :

1- Développement d'un système d'instrumentation autonome, exploitant une nouvelle génération de capteur performant associé à une électronique éprouvée, donc moins coûteux en termes de fabrication et de maintenance, simple d'emploi et surtout évolutif, adapté aux besoins des utilisateurs prestataires et gestionnaires ;

2- Acquisition des données sur les ouvrages ciblés selon la méthodologie actuelle (Solution Save 4D), fiabilisée par plus de 20 ans d'utilisation sur plusieurs centaines d'ouvrages.

Constitution d'un dossier de référence des ouvrages ciblés ;

3- Validation du système de mesure VIGI sur les ouvrages ciblés et sélection d'indicateurs robustes, représentatifs du comportement structural des ouvrages et dont la dérive pourrait traduire l'apparition d'une pathologie bien avant que celle-ci soit visible (Figure 10) ;

4- Acquisition de la méthode par les gestionnaires d'ouvrages et exploitants, formation du personnel à la prise de mesures sur les ouvrages, mise au point de la procédure après prise en compte des retours utilisateurs ;

5- Analyse en vue de l'intégration de la méthode dans les outils utilisés par les gestionnaires d'ouvrages, définition d'une base de données consolidant les résultats des mesures et les indicateurs utiles à la description de l'état structural d'un ouvrage, en vue d'une exploitation technique et statistique (big data) future destinée à optimiser la maintenance des ouvrages.

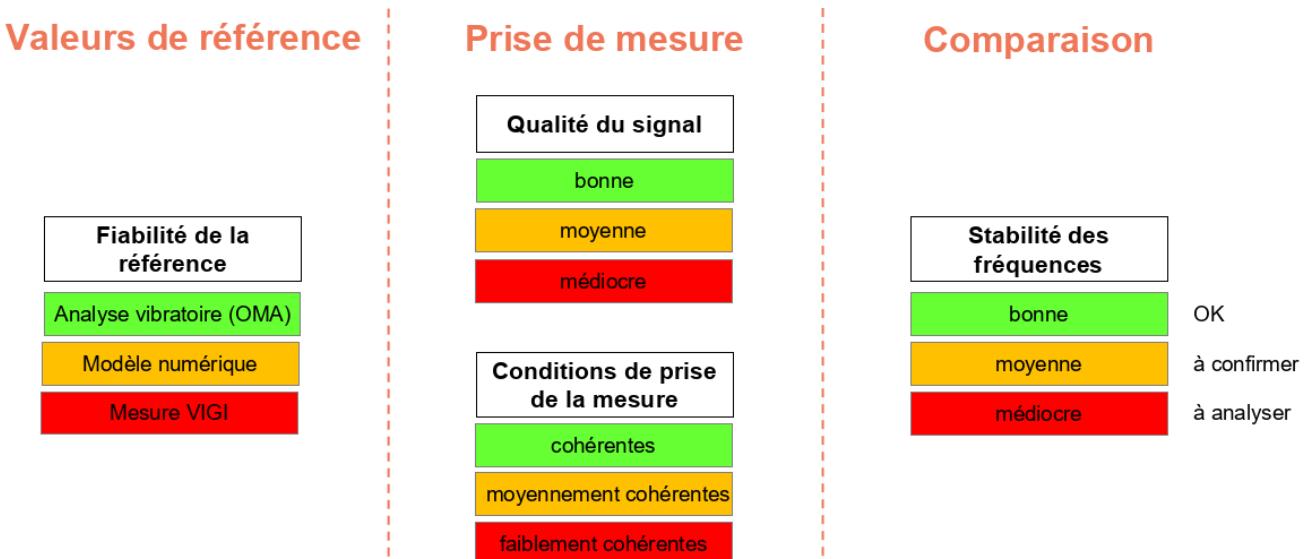


Figure 10. Vue schématique de la solution VIGI.

Avancées techniques

Le prototype de mesure, réalisé en phase #1, a donné pleine satisfaction. Les résultats obtenus par ce capteur sont identiques à ceux recueillis à l'aide du système de référence. Les choix adoptés pour la configuration de ce matériel se sont donc avérés pertinents et, moyennant quelques adaptations mineures issues du retour d'expérience, laissent entrevoir une possible mise en production à court terme (Figure 11).

La réflexion sur le traitement des informations récoltées sur site a été relativement poussée et a abouti à la définition de différents indicateurs sur la qualité du signal enregistrée, les conditions de la mesure et les valeurs de référence auxquelles les données mesurées sur site seront comparées. Ce travail simplifie considérablement l'analyse et ouvre la voie à une automatisation des tâches.

La simplicité de mise en œuvre de l'instrumentation sur site, le traitement rapide des mesures effectuées et la facilité de compréhension des indicateurs de suivi des ouvrages, exprimés sous forme de codes couleur vert/orange/rouge ont été appréciés par les partenaires gestionnaires d'ouvrages.



	REFERENCE	VIGI	VIGI
qualité signal	MOYENNE	MOYENNE	BONNE
cohérence conditions		MÉDIOCRE	MOYENNE
stabilité mesures			
sens L		3,48%	4,35%
sens T		1,01%	1,36%
sens V		1,32%	3,15%

Figure 11. Vue du capteur VIGI autonome déclenché en direct ou par smartphone et définition d'indicateurs sur la qualité du signal, la cohérence des conditions de mesure, la fiabilité des références. Crédits photo VIGI.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Les partenaires sur ce projet ont fait part de leur intérêt à poursuivre de manière opérationnelle le suivi VIGI de plusieurs de leurs ouvrages. Cela permettra d'affiner et consolider les différentes procédures définies lors du projet et, le cas échéant, de les améliorer.

Il est à noter que la méthode VIGI peut également s'appliquer à d'autres types d'ouvrages que les ponts. En particulier, les gestionnaires sont confrontés de manière récurrente à des difficultés liées au suivi des murs de soutènement et VIGI pourrait être une réponse pertinente.

Si les gestionnaires partenaires sur le projet sont intéressés par la méthode VIGI et envisagent de s'équiper de capteurs VIGI et de se former à leur utilisation, ils estiment cependant qu'il sera préférable de confier l'instrumentation sur site à des prestataires externes. Ceux-ci pourraient

d'ailleurs être les mêmes que ceux en charge des inspections périodiques des ouvrages. Cela implique la production en série de capteurs de type VIGI et la mise à disposition des outils de suivi associés.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

L'instrumentation dynamique des ouvrages existe depuis un grand nombre d'années et a fait les preuves de son intérêt en matière de compréhension du comportement des ouvrages.

La réalisation du projet VIGI a démontré qu'un besoin existait pour des solutions simples et économiques d'instrumentation dynamique des ouvrages, permettant de couvrir la très grande partie du parc d'ouvrages pour laquelle des solutions de type SHM (« Structural Health Monitoring ») sont économiquement inaccessibles.

En apportant rapidement et facilement des informations objectives, car mesurées sur l'ouvrage réel dans des conditions connues, VIGI permet de détecter une évolution des indicateurs représentatifs du comportement structural de l'ouvrage pouvant signifier une pathologie naissante. La méthode complète ainsi parfaitement les autres outils à la disposition du maître d'ouvrage, généralement basés sur des inspections visuelles.

La connaissance des principales fréquences de vibration d'un ouvrage est également très utile pour évaluer la qualité du modèle numérique d'un ouvrage, puisque celui-ci est supposé représenter le plus fidèlement possible le comportement mécanique de l'ouvrage réel. De ce fait, l'utilisation de modèles numériques ainsi fiabilisés optimisera la pertinence des avis et l'efficacité des solutions qui pourront en être tirés.

VII. Perspectives générales pour l'aide à la surveillance en continu des ponts

Dans sa version actuelle, le fascicule 3 de l'ITSEOa réserve l'instrumentation aux ouvrages qui présentent un risque particulier ou dont la pathologie est déjà identifiée. Elle est mise en œuvre pour établir ou affiner un diagnostic ou surveiller l'évolution de pathologies dans le cadre d'une mise sous surveillance renforcée ou sous haute surveillance. Elle constitue un complément aux inspections visuelles, aux auscultations spécifiques (analyses de matériaux, mesures de précontrainte...) et aux recalculs des structures.

Les progrès technologiques permettent désormais d'envisager la surveillance en continu via une instrumentation de long terme (plusieurs années à plusieurs décennies) destinée à améliorer la connaissance de l'évolution du fonctionnement de la structure. Elle génère des indicateurs permettant d'aider le gestionnaire dans la connaissance de la durée de vie de ses ouvrages et la programmation de ses travaux d'entretien. Elle est notamment susceptible de quantifier l'endommagement de la structure et de détecter les comportements irréversibles de long terme.

L'instrumentation peut être prédictive si elle est en mesure d'indiquer à quelle date certains seuils de performance minimaux seront atteints et nécessiteront d'entreprendre des travaux. Ceci nécessite toutefois de pouvoir paramétriser des modèles prédictifs à l'aide des données collectées par l'instrumentation. Dans certains cas, une partie des mesures peut être associée à des seuils d'alerte et, donc, être intégrée dans un dispositif de haute surveillance.

L'émergence de l'instrumentation prédictive dans le domaine du génie civil est une opportunité pour les maîtres d'ouvrages d'accompagner la profession dans la mise au point de techniques innovantes et de faire émerger un marché naissant. Il convient toutefois, d'éviter des instrumentations généralisées, sans doute inutiles, qui ajoutent des coûts et de la complexité avec une fausse promesse de sécurité et des responsabilités difficiles à assumer.

Les points de vigilance ci-dessous sont ainsi notés :

- l'instrumentation doit être maintenue : la maintenance d'une instrumentation fait appel à des compétences que ne possèdent pas les services gestionnaires actuels. Ces services devront donc soit acquérir ces compétences, soit externaliser cette maintenance ;
- l'instrumentation est vulnérable : les instrumentations sont vulnérables aux dégradations volontaires, aux intempéries et au vieillissement, mais aussi aux opérations de maintenance, de renforcement ou de réparation des ouvrages. Ce dernier point doit être pris en compte pour toutes les interventions sur ouvrages. Les coûts induits peuvent être importants. Un budget de maintenance et de renouvellement de l'instrumentation est à prévoir ;
- l'instrumentation doit être intégrée dans la méthode de gestion des ouvrages : actuellement, la méthode IQOA et d'autres méthodes similaires permettent de définir, sur la base de catalogues de désordres, l'état des ouvrages courants à partir de cotations réalisées par du personnel formé, mais non spécialiste des ouvrages d'art. Elle réserve l'instrumentation aux ouvrages pour lesquels les pathologies ont été détectées, sous la responsabilité d'experts en ouvrages d'art ;

- l'instrumentation doit être certifiée : l'évaluation de la qualité des mesures, des méthodes de traitement et des outils de contrôle du fonctionnement des instrumentations sont actuellement maîtrisés par les seuls spécialistes du domaine. Cette situation ne pose pas de problème quand les personnes qui commandent ces prestations sont également spécialistes du domaine. En revanche, une utilisation large de l'instrumentation par des non spécialistes devra s'accompagner d'une garantie de la qualité des mesures par un contrôle extérieur lui spécialiste et de la certification des prestataires ;
- l'instrumentation peut générer des responsabilités nouvelles pour le maître d'ouvrage : la mise en place d'une instrumentation peut être la source de responsabilité nouvelle pour le gestionnaire en cas d'incident. Une responsabilité pourra être recherchée dans le cas où le gestionnaire ou son prestataire n'aurait pas interprété correctement les résultats des mesures, ou dans le cas où l'installation ne serait pas opérationnelle pour détecter les phénomènes censés être suivis ;
- l'instrumentation est tributaire des droits de propriété intellectuelles : le maître d'ouvrage garde normalement la propriété des données brutes issues de l'instrumentation de ses ouvrages. En revanche, il sera plus rarement propriétaire des outils d'interprétation des données, qui sont au cœur de la plus-value apportée par l'instrumentation. Le maître d'ouvrage n'aura en général que le droit d'usage de ces outils, droit qui pourra s'éteindre au terme du contrat ou en cas de résiliation. Ce problème de « boite noire » se pose également pour le maître d'ouvrage qui n'aura pas forcément accès à la méthode d'interprétation des mesures ;
- l'instrumentation a un coût : les coûts d'installation d'une instrumentation et de sa maintenance sont loin d'être négligeables mais peuvent être largement compensés par les économies que l'instrumentation peut apporter en matière de réparation. Un ordre de grandeur de quelques dizaines de k€ pour l'instrumentation d'un ouvrage courant incluant une maintenance de quelques années est à prévoir. Il peut ainsi être économiquement contestable de mettre en place une instrumentation sur un ouvrage neuf si l'on sait que, statistiquement, ce type d'ouvrages n'a pas de problème pendant la première moitié de sa durée de vie, soit environ 50 ans.

Ces points de vigilance ne remettent pas en cause l'intérêt du développement de la surveillance en continu des ponts. Ils sont plutôt à considérer comme des éléments de réflexion à intégrer dans une feuille de route de valorisation des acquis de l'appel à projets « ponts connectés », en associant des experts en instrumentation, en gestion d'ouvrages et en intelligence artificielle. Cette feuille de route devrait permettre de mobiliser de manière efficace toute la profession concernée pour des développements utiles, avec des démarches scientifiquement établies, en cohérence avec les travaux des groupes de réflexion structurés au niveau national ou international (SHM de la Cofrend, fib, IABSE, PIARC).

Aide à l'inspection des ponts

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Ce chapitre s'intéresse aux innovations pouvant apporter une aide à l'inspection des ponts.

Les techniques de télédétection (Remote Sensing) opèrent le plus souvent à partir d'images acquises par satellites, avions, voire drones. Associées à des techniques de photogrammétrie, d'interférométrie et de reconnaissance des formes, elles donnent des informations sur la nature et la structure des ouvrages, sur leur fonctionnement ou sur les mouvements de terrain susceptibles de les impacter. Elles ne nécessitent pas d'installation de matériel sur site (contrairement à la télésurveillance classique), et offrent en outre la possibilité d'accéder à des archives, permettant des analyses rétroactives ou diachroniques. Toutefois ces images doivent être adaptées aux ouvrages étudiés. Il était attendu d'aborder des enjeux de détection et localisation des ouvrages sur un territoire et de surveillance à bas coût d'un ensemble d'ouvrages d'art et de leurs abords (environnement naturel, remblais, murs de soutènement), à l'échelle d'un territoire

Par ailleurs, les technologies numériques d'acquisition d'images et de fusion de données permettent d'envisager de nouvelles approches pour la surveillance des ouvrages d'art. Le mot « images » est à prendre ici au sens large : dans les longueurs d'onde du visible, de l'infrarouge, de l'électromagnétisme (radar), etc. L'imagerie peut être classique, laser, voire acoustique, en 2D ou en 3D. Les exigences techniques de l'inspection des structures imposent une précision et une résolution importantes, donc les visites réalisées génèrent des volumes importants de données, dont il est nécessaire d'automatiser le traitement afin de dégager une plus-value par rapport aux visites traditionnelles. L'utilisation simultanée de plusieurs modes d'imagerie pourrait faciliter la détection de certaines catégories de défauts, mais nécessite l'emploi de techniques adaptées. L'intelligence artificielle, et plus particulièrement la reconnaissance des formes, permettrait de reconnaître, quantifier et classer les désordres sur les ouvrages et leurs équipements.

Il était ainsi attendu des propositions traitant un ou plusieurs des sujets suivants :

- utilisation de techniques de reconnaissance des formes et d'outils d'acquisition de données numériques pour recenser les équipements d'ouvrages d'art (joints de chaussée, dispositifs de retenue piétons et véhicules, glissières, trottoirs, écrans anti-bruit...), reconnaître leur catégorie voire leur modèle et relever leurs désordres,
- utilisation de techniques de reconnaissance des formes et d'outils d'acquisition de données numériques pour réaliser des visites d'ouvrage avec un niveau de rendu technique conforme à celui d'une visite IQOA traditionnelle au sens de l'ITSEOA

- (instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art) sur un type ou une famille d'ouvrage,
- création d'outils utilisant l'IA et les techniques d'acquisition de données numériques pour accompagner utilement un opérateur dans le cadre d'inspections détaillées (au sens de l'ITSEO).

Ce chapitre détaille les projets lauréats suivants :

MIMIA - Maintenance assistée par IMagerie et Intelligence Artificielle

Trois axes de développement sont visés par le projet : 1. Aide par intelligence artificielle au recensement géographique des ouvrages d'art et à l'évaluation des risques environnementaux associés ; 2. Création d'un outil d'aide au relevé photographique in situ d'un ouvrage d'art par un non-sachant, assisté par intelligence artificielle ; 3. Création d'outil de traitement d'images pour aide à la détection de défauts par Intelligence Artificielle.

SOFIA - Surveillance des Ouvrages d'art Fondée sur l'Intelligence Artificielle

Le projet vise à doter l'inspecteur spécialisé en ouvrages d'art d'un outil « intelligent » de recueil et d'analyse des défauts d'ouvrages. Cet outil permettra d'améliorer la fiabilité des jugements et d'instruire de manière automatisée les procès-verbaux d'inspection.

VVOA - Visites Immersives Valorisées des Ouvrages d'Art

Basée sur le traitement et l'analyse de vidéos panoramiques 360°, l'outil restitue, au travers d'une plateforme web de visualisation collaborative, une visite immersive valorisée de l'ouvrage, que l'on peut comparer à un « micro streetview détaillé ». Elle intègre également, grâce à un algorithme d'intelligence artificielle (IA), la localisation et l'identification des principaux désordres.

MIRAUAR - Méthode d'assistance à l'Inspection et à la visite d'ouvrages d'art par Réalité AUGmentée et intelligence ARTificielle

Le projet vise à développer un outil d'aide à l'évaluation des ouvrages par réalité augmentée. Une base de modèles numériques génériques est utilisée pour entraîner l'intelligence artificielle à reconnaître la typologie de l'ouvrage et à le décomposer automatiquement en éléments constitutifs élémentaires. Il est ensuite développé une ergonomie de type réalité augmentée couplée à un modèle d'intelligence métier afin de guider l'utilisateur lors de sa visite et un traitement par intelligence artificielle quantifiera les défauts puis les qualifiera grâce aux catalogues de désordres de l'IQOA (Image de la qualité des ouvrages d'art).

Pour chacun de ces projets, les éléments de bilan fournis par les consortiums sont présentés dans les paragraphes ci-après : le consortium, le projet, les avancées techniques, les perspectives pour la gestion patrimoniale et les bénéfices pour la gestion de patrimoine.

Des perspectives générales pour l'aide à l'inspection des ponts sont identifiées en fin de chapitre.

II. MIMIA - Maintenance assistée par IMagerie et Intelligence Artificielle

Le consortium

Partenaires :

SITES SAS, BE spécialisé en surveillance et maintenance des ouvrages Génie Civil, CORNIS, équipe d'experts en intelligence artificielle, TRE-ALTAMIRA, spécialisée dans les mesures des mouvements du sol (technologie InSAR), Collectivité de Corse.



Ouvrages instrumentés :

- axe 1 : ponts et murs de la Collectivité de Corse
- axes 2 et 3 : divers ponts et murs routiers (en béton armé et maçonnerie)

Le projet

La grande majorité des ouvrages d'art est gérée par les collectivités locales. Souvent, celles-ci ne disposent pas des moyens techniques, humains et financiers suffisants pour connaître et évaluer l'état de leur patrimoine. Assurer un recensement et une surveillance préventive satisfaisante des ouvrages implique la mobilisation et l'intervention sur site de personnels compétents avec des coûts, des émissions de CO₂ et des risques routiers associés non négligeables.

Le but de ce projet est de créer des outils destinés aux collectivités territoriales et facilitant la réalisation de prestations du domaine pour :

- Recenser et localiser leur patrimoine et identifier les ouvrages les plus exposés aux mouvements de sol (c'est l'objet de l'axe 1) ;
- Numériser de manière complète et fiable les ouvrages courants au moyen d'une application qui guide pas à pas un employé local et valide la numérisation de l'ouvrage (c'est l'objet de l'axe 2) ;
- Réaliser ou faire réaliser la visite et l'analyse de l'ouvrage, à distance, grâce à la numérisation systématique (décrise ci-dessus) et à la détection de pathologies assistée par Intelligence Artificielle (c'est l'objet de l'axe 3).

Les trois axes du projet MIMIA sont détaillés ci-dessous.

Axe 1 : Aide par intelligence artificielle au recensement géographique des ouvrages d'art et à l'évaluation des risques environnementaux associés

Les développements ci-dessous ont été considérés :

- Récolte et exploitation de données multi-sources issus des cartographies de l'IGN ;
- Élaboration d'un module d'IA permettant de faciliter le recensement des ponts et des murs de soutènement (Figure 12). Apprentissage de cette IA sur une base de données vérifiées en Corse ;
- Récolte et exploitation de données InSAR sur le territoire d'étude ;
- Élaboration d'un module IA intégrant les données InSAR et permettant de prioriser l'urgence des visites au regard des risques environnementaux au voisinage des ouvrages d'art recensés.

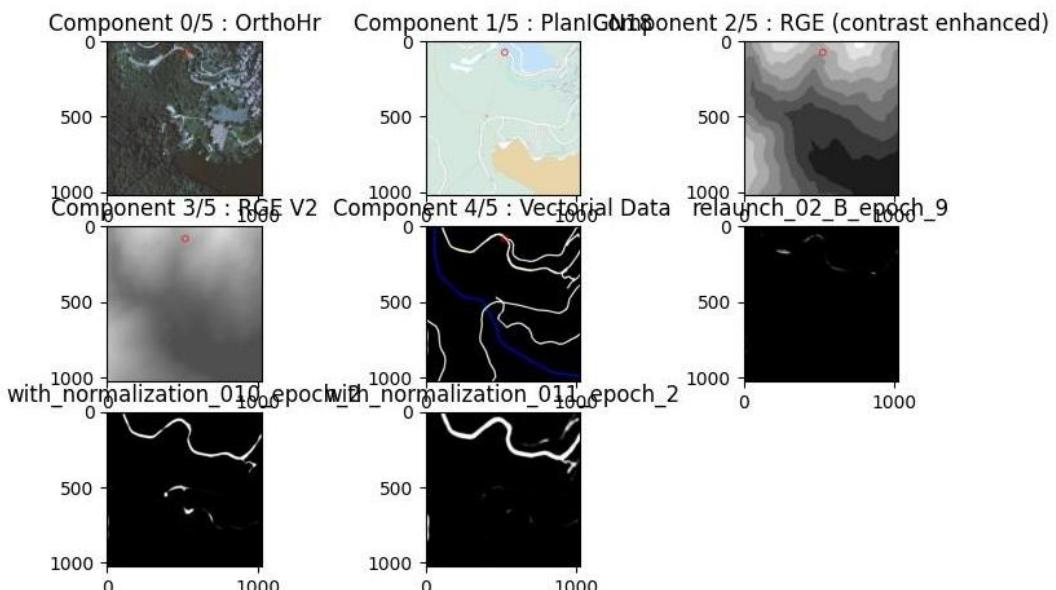


Figure 12. Représentations utilisées dans l'algorithme d'aide au recensement. Crédits photo MIMIA.

Axe 2 : Création d'un outil d'aide au relevé photographique in situ d'un ouvrage d'art par un non-sachant, assisté par intelligence artificielle

Les développements ci-dessous ont été considérés :

- Rédaction d'une méthodologie de relevé photographique de 4 ouvrages types par un « nonsachant », test in situ et mise à jour de la méthodologie suite à cette mise en pratique ;
- Transplantation de la méthodologie dans un algorithme d'IA pour aide et orientation à la prise de vue in situ ;

- Test in situ de l'outil (application sur hardware) et phase d'apprentissage (Figure 13) ;
- Amélioration et adaptation des méthodes et ajout des contrôles qualité des données.



Figure 13. Visuel de l'outil de saisie et relevé assisté par IA.

Axe 3 : Création d'outil de traitement d'images pour aide à la détection de défauts par Intelligence Artificielle

Les développements ci-dessous ont été considérés :

- Création d'une base de données de photographies issues d'inspections d'ouvrages d'art faits par SITES (Figure 14). Nettoyage et renseignement de la base de données (plusieurs milliers d'images) ;
- Apprentissage d'un module d'IA permettant de reconnaître les parties d'ouvrages et les zones de non-défauts et de défauts. Entraînement et itération de cette IA.

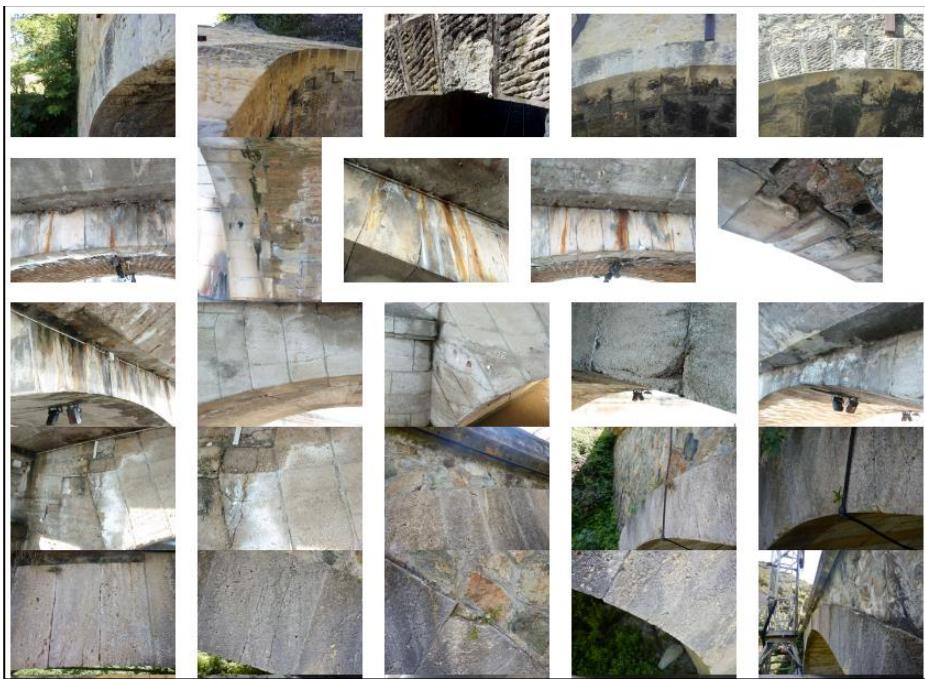


Figure 14. Visuel des photographies utilisées pour annotations. Crédits photos MIMIA.

Avancées techniques

Axe 1

Une population cible a été identifiée, constituée des 21 ouvrages ayant les valeurs les plus élevées pour ce déplacement médian du sol dans leur voisinage.

Il a ensuite été constitué un ensemble d'ouvrages devant servir de témoin. Pour chaque ouvrage de la population cible, il a été essayé de trouver un ouvrage situé sur la même route départementale, ayant un déplacement médian du sol dans son voisinage négligeable.

Ces deux populations d'ouvrages ont été mélangées et anonymisées, puis confiées à un binôme d'inspecteurs d'ouvrages du groupe dédié SITES. Il leur a été demandé de suivre un protocole technique visant à les aider à détecter ce qui peut être un “désordre potentiellement imputable à un mouvement du sol”.

In fine, 8 ouvrages d'art sur 42 présentent des désordres qui sont imputables (sans discussion) à des mouvements de sol. Tous sont des murs de soutènement. Parmi eux, 6 appartiennent à la population cible, et 2 à la population témoin.

Les désordres associés relèvent de désorganisation, tassement et réseau de fissuration sur la chaussée. Il est aussi vu des fractures verticales sur le parapet et le parement vertical. Enfin, à noter des décalages dans la ligne de tête de mur.

Avec aussi peu de données, il est bien sûr difficile de tirer des conclusions définitives, mais la différence entre la proportion d'ouvrages cibles (6/21) et la proportion d'ouvrages témoins (2/21) présentant des désordres directement imputables à des mouvements de sol incite tout de même à penser que cette étude mériterait d'être approfondie et étendue à une plus large

échelle, afin de confirmer la pertinence de l'utilisation des données INSAR dans la priorisation des visites d'ouvrages.

Axe 2

Dans le cadre de cet axe, il a tout d'abord été développé à l'aide de connaissances experts, des méthodologies d'inspection photographique. Ces méthodologies sont destinées à être suivies par des non-sachants pour acquérir numériquement des ouvrages d'art.

Des études comparatives ont permis de valider l'utilité de ces méthodologies afin de permettre aux gestionnaires d'ouvrages de réaliser des pré-inspections. Ces pré-inspections leur permettront ensuite de cibler les pathologies nécessitant une inspection approfondie par un expert.

Il a ensuite été intégré ces méthodologies dans une application Android développée par nos équipes.

Après des tests terrains et plusieurs itérations, cette application paraît prometteuse et cohérente. Elle intègre par ailleurs des modules d'intelligence artificielle destinés à aider l'utilisateur dans son acquisition et fiabiliser la complétude et la qualité des données.

Enfin, la collaboration avec un gestionnaire d'ouvrages a convaincu de l'utilité et l'intérêt que peut avoir l'outil sous sa forme actuelle afin d'aider à prioriser et optimiser la surveillance de leur patrimoine.

Axe 3

En ce qui concerne l'axe 3, plusieurs approches d'intelligence artificielle ont été testées visant à accélérer l'expertise de données terrain.

Le travail a tout d'abord porté sur des photographies isolées. Sur ces données :

- L'IA semble performante pour le classement d'images selon la zone d'ouvrage ciblée ;
- En revanche, la problématique d'accélération de la détection de défauts semble plus complexe. Il est généralement nécessaire à l'expert d'avoir accès à plusieurs images d'une même pathologie, afin de rendre un avis. L'IA proposée ne semble pas encore complètement pertinente à ce niveau.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Axe 1

A l'issue du projet, les performances obtenues pour le système d'aide au recensement sont clairement en dessous de nos attentes. Compte tenu des performances finales, il est difficile d'imaginer actuellement une exploitation en interne des systèmes développés dans cet axe. Toutefois, le travail sur les données de l'IGN a permis de mieux appréhender les données disponibles en open source. Elles seront éventuellement utilisées de nouveau dans d'autres

projets. Par exemple pour accélérer le travail de pré-recensement d'intersections contenant potentiellement des ponts.

Axe 2

Après échange avec plusieurs gestionnaires d'ouvrages (notamment des collectivités), il a été fait part de l'intérêt pour découvrir l'outil et pouvoir apporter leur analyse et remarques.

D'une manière générale, la prise en main fut immédiate et quelques précisions ont été remontées (améliorer l'illustration de l'angle de prise de vue des photos, meilleure précision sur certaines localisations).

À la suite de ces visites, des échanges ont porté sur les critères d'analyse des photos et le développement d'une plateforme permettant le stockage ordonné et la visualisation des photographies associés aux ouvrages numérisés.

Axe 3

Il a été identifié des données sur lesquelles le potentiel d'accélération était plus élevé. Il s'agit des orthophotos (reconstitution hautes résolutions de grandes surfaces). Sur ces données, l'IA proposée a obtenu des performances déjà intéressantes. Cela incite à continuer dans cette direction et a permis des premières mises en production et utilisation par nos experts.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Avec ces outils, une collectivité pourra recenser ses ouvrages, prioriser le relevé pour les ouvrages les plus à risques, réaliser le relevé de manière autonome et faire réaliser à distance la visite de l'ouvrage par des personnes qualifiées. Ces outils permettront de réduire les coûts environnementaux et financiers tout en donnant le maximum d'autonomie aux collectivités sur la connaissance et la maîtrise de la gestion de leur patrimoine.

III. SOFIA : Surveillance des Ouvrages d'art Fondée sur l'Intelligence Artificielle

Le consortium

Partenaires :

Socotec Monitoring, ME spécialisé en surveillance et maintenance prédictive ; CEA-List, experts en intelligence artificielle en vision assistée par ordinateur ; Sanef, maintenance des ouvrages.



Ouvrages instrumentés : ouvrages des autoroutes de la SANEF

Le projet

SOFIA a visé une rupture technologique majeure dans les méthodes d'inspection. Le projet a cherché en effet à assister de manière plus objective et plus rapide l'expert-inspecteur dans ses visites obligatoires et fastidieuses grâce à l'intelligence artificielle, pour en faire un « inspecteur augmenté ». Les objectifs ont été les suivants :

- Développer un outil d'aide à l'inspection fondé sur l'intelligence artificielle
- Entraîner des algorithmes d'IA sur la base d'images d'inspection d'ouvrages d'art
- Proposer une note d'inspection pour aide à la maintenance prédictive
- Intégrer la solution à une application cloud

Avancées techniques

La technologie principale utilisée repose sur des algorithmes à l'état de l'art de Deep Learning en Computer Vision, plus particulièrement des algorithmes de classification multi-classe multilabel et de segmentation sémantique. Ces algorithmes permettent d'associer une note de sévérité pour chaque image. Des algorithmes de Machine Learning viennent compléter le processus en prenant en compte l'ensemble des notes de sévérité pour attribuer une note finale sur l'ensemble de la structure et l'ensemble des actions à entreprendre (Figure 15).

Les avancées techniques et résultats obtenus sont listées en détails ci-après :

- structuration d'une base de données regroupant 139 455 images de 118 992 rapports d'inspection sur 2 553 ouvrages d'art entre 1996 et 2021 ;
- application et amélioration d'architectures et méthodes d'entraînement de l'état de l'art en Deep Learning (Vision Transformers, DINO, SupMAE, SAM de Meta AI) ;
- classification de 13 classes de défauts et 13 classes d'éléments d'ouvrages d'art ;
- 5 911 images annotées manuellement et assistées par des outils d'IA pour la segmentation ;
- segmentation de 4 classes de défauts et extraction de métriques issues des masques ;
- 1^{ère} place au Challenge CODEBRIM pour la classification de défauts structurels <https://dacl.ai/> ;
- 2 articles publiés dans des actes de conférence (Eurostruct2023 et ICVS2023). Les articles portent respectivement sur la classification multi-label des défauts segmentation de 4 types de défauts avec l'architecture des Vision Transformers ;
- une solution logicielle qui intègre l'ensemble des algorithmes de Deep et Machine Learning au sein d'une même pipeline hébergée sur le Cloud et utilisant les services AWS (S3, RDS, Lambda, Sagemaker) ;
- colloques et salons nationaux de référence (Le Pont Toulouse 2023, Big Data & AI Paris 2023, AUGC Saclay 2023).

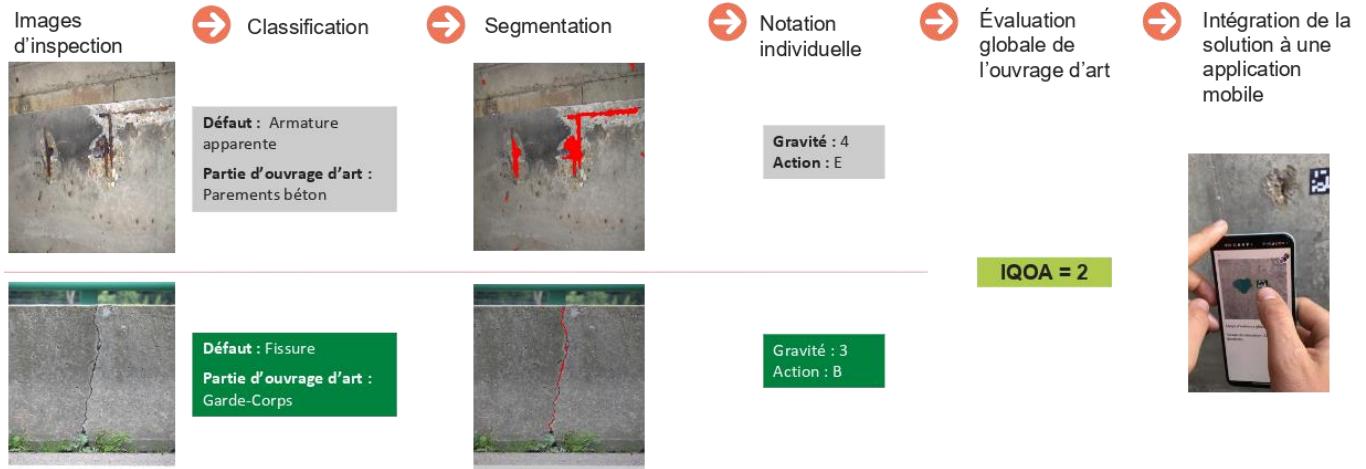


Figure 15. Présentation de l'outil intelligent d'inspection sur mobile. Crédits photos SOFIA.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

L'étape suivante consistera à faire tester la solution par des acteurs extérieurs et avoir leur retour métier. A l'horizon 2026, il est envisagé que la solution soit appliquée à différents niveaux de l'écosystème de maintenance d'ouvrages d'art : parcs gérés par les communes et collectivités locales, l'Armée, concessionnaires d'autoroutes et tunnels, ...

En parallèle, il est envisagé d'intégrer d'autres acteurs disposant de technologies de pointe en instrumentation (caméras infrarouges, drones) afin d'apporter des fonctionnalités supplémentaires pour faciliter l'adoption de l'outil.

D'un point de vue de la connaissance scientifique, l'exploration et l'adaptation des derniers algorithmes à l'état de l'art sur des données non disponibles en grand nombre en open data (spécificité des défauts de structures) permet de mieux juger de la performance des architectures employées. La personnalisation des architectures pour l'intérêt métier est aussi à souligner. En effet, les algorithmes de classification ont été adaptés pour prendre en compte des contraintes « métiers », à savoir la présence ou l'absence de défauts sur certaines parties d'ouvrages.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Chaque année en France, environ 5 000 ponts sont soumis à une inspection détaillée. L'inspection visuelle est la technique traditionnelle d'évaluation de leur état de conservation. Le projet SOFIA vise ainsi en une révolution numérique dans les méthodes d'inspection en assistant l'expert-inspecteur dans ses visites obligatoires et fastidieuses.

Le projet SOFIA met aussi l'accent sur deux aspects importants de l'utilisation d'IA :

- IA simple et interprétable : la solution proposée met l'expert humain aux commandes de l'outil d'intelligence artificielle, plutôt que de laisser l'IA prendre le contrôle total du processus. Ceci est d'autant plus important qu'il y a de graves implications pour la vie humaine. Le design de l'outil SOFIA se veut être adapté aux besoins de l'expert grâce à des configurations reprogrammables et une grande interactivité au sein des workflows. L'interprétabilité et l'explicabilité se fait notamment aussi grâce à l'utilisation d'un arbre de décision qui illustre le workflow des décisions pour la détermination de la note globale ;
- IA durable et respectueuse de l'environnement : l'industrie de la construction a un impact important sur l'environnement, tant lors du processus de construction mais aussi pour les maintenances ultérieures. Pour une infrastructure, le coût carbone est principalement lié à la phase de construction. Plus longue est la durée de vie d'un pont, moins il y aura d'émission globale de carbone. Ainsi, l'optimisation des actions de maintenance est essentielle pour trouver le juste équilibre entre l'allongement de la durée de vie de l'ouvrage et la réparation de la structure lorsqu'elle est dans un état critique.

IV. VIVOA - Visites Immersives Valorisées des Ouvrages d'Art

Le consortium

Partenaires :

Sixense Engineering (mandataire), spécialisée en surveillance et diagnostique des ouvrages d'art, Sixense Mapping, spécialisée en relevé des structures, Sixense Digital, spécialisée en développement logiciel, Ville d'Angers, gestionnaire des ouvrages d'art.



Ouvrages instrumentés : plusieurs ouvrages d'art de la ville d'Angers ont été numérisés.

Le projet

Destiné aux collectivités territoriales, le projet VIVOA a eu pour objectif de simplifier la gestion de leurs ouvrages d'art en facilitant la collecte de données sur le terrain, afin d'améliorer la connaissance du patrimoine et faciliter la prise de décision.

La solution VIVOA combine des technologies de pointe et propose une solution intégrée et novatrice au travers d'un outil pratique, performant et peu onéreux. Son utilisation permet la création en autonomie d'une documentation numérique du patrimoine courant d'ouvrages d'art (Figure 16).

Basée sur le traitement et l'analyse de vidéos panoramiques 360°, la solution développée restitue, au travers d'une plateforme web de visualisation collaborative, une visite immersive valorisée de l'ouvrage, que l'on peut comparer à un « micro street-view détaillé ».



Figure 16. Chargement de la vidéo sur la plateforme VIVOA

La visite immersive, dont le parcours est centré sur l'ouvrage, permet de naviguer par exemple autour d'un pont ou d'un mur de soutènement. Elle intègre également, grâce à un algorithme d'intelligence artificielle (IA), la localisation et l'identification des principaux désordres.

Une numérisation en 3 étapes :

1. Captation des vidéos : munie d'une caméra 360° grand public, l'opérateur sur le terrain capture une vidéo immersive en parcourant l'ouvrage ou le site à documenter. Cette caméra, fixée sur un casque ou une perche, enregistre l'environnement sous tous les angles.
2. Création de la visite virtuelle : la vidéo 360° est ensuite téléchargée sur la plateforme sécurisée VIVOA. Alors, l'algorithme intelligent transforme la vidéo brute en une visite virtuelle immersive et interactive (Figure 17).
3. Exploration et analyse collaborative : la plateforme VIVOA offre une navigation intuitive permettant d'explorer l'ouvrage virtuellement. Les utilisateurs peuvent suivre le parcours géolocalisé, visualiser les points de vue à 360°, zoomer sur des détails et identifier des désordres. Des annotations et commentaires peuvent être ajoutés directement sur les images, enrichissant ainsi la visite virtuelle et facilitant le partage d'informations avec les collaborateurs et les entreprises partenaires. Enfin, un module de comparaison temporelle permet de suivre l'évolution de l'ouvrage ou des points singuliers de l'ouvrage dans le temps en synchronisant temporellement les prises de vue.

La solution VIVOA intègre donc parfaitement les besoins d'inventaire et de surveillance du patrimoine bâti. Le gestionnaire de patrimoine voit sa gestion simplifiée au travers d'un outil collaboratif et accessible instantanément, facilitant la préparation et le suivi de chantier.



Figure 17. Exemple d'utilisation pour une visite immersive. Crédits photo VIVOA.

Avancées techniques

Le projet a été divisé en plusieurs composants fonctionnels et développé de manière incrémentale.

Les principaux sujets de recherche et développement ont été les suivants :

1. Phase exploratoire : ce premier volet du projet VIVOA avait pour objectif d'évaluer le potentiel et les limites de la capture vidéo 360° pour la documentation d'ouvrages. Des tests approfondis, réalisés avec différentes caméras grand public dans diverses conditions, ont permis d'identifier les paramètres clés pour une acquisition optimale et de définir les bonnes pratiques. Les résultats ont confirmé l'intérêt technique de ces caméras pour la création de visites immersives, tout en soulignant les contraintes liées à la résolution et à la précision du positionnement et des conditions de captation.

2. Génération du tracé géolocalisé : cet incrément du projet s'est focalisé sur le développement d'un algorithme de création et de géolocalisation du parcours de la caméra (parcours utilisateur). L'algorithme SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) utilisé a démontré sa robustesse en générant des tracés précis dans des conditions variées. L'intégration de données GNSS pour les caméras compatibles a permis d'automatiser la géolocalisation des parcours, tandis qu'une fonctionnalité d'ajustement manuel a été développée pour le traitement des vidéos sans couverture GNSS (intérieur de l'ouvrage par exemple).

3. Détection de désordres par IA : l'automatisation de l'identification des défauts devait initialement s'appuyer sur l'adaptation d'une solution d'IA déjà développée par l'entreprise. Cependant, la base de données d'images annotées existante et conçue pour le traitement et la production d'orthoimages, s'est avérée incompatible avec les images 360°. Des différences significatives de résolution, de qualité et de distorsion ont été notées. Pour lever ce verrou technique, une nouvelle base de données a donc été créée spécifiquement pour VIVOA à partir de plus de 180 séquences vidéo 360° d'ouvrages variés. Les images ont été annotées par des inspecteurs en génie civil à l'aide d'une interface de visite immersive développée spécifiquement pour le projet. Bien que les premiers résultats de détection soient prometteurs, il est nécessaire de continuer à enrichir la base de données pour améliorer les performances globales de l'algorithme IA.

4. Développement de la plateforme : cette partie du projet s'est focalisée sur le développement d'une plateforme web dédiée à la gestion des visites immersives des ouvrages d'art. L'application permet aux utilisateurs de créer des projets, d'y associer des vidéos 360° et de visualiser les résultats des traitements. La plateforme se distingue par son système de transfert de données robuste et sécurisé, conçu pour gérer les fichiers volumineux. Elle intègre également un module de visualisation immersive, offrant une navigation fluide dans les scènes 360°. De plus, un tracé géolocalisé permet de contextualiser les données et de se repérer dans le parcours immersif. Des fonctionnalités viennent encore enrichir la solution VIVOA, en offrant ainsi la possibilité d'annoter les images 360° et de comparer plusieurs parcours à des intervalles de temps différents permet une analyse plus approfondie des désordres et points singuliers, et de leur évolution.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Sixense a entrepris l'industrialisation et la commercialisation de la solution VIVOA. Cette phase vise à automatiser le traitement simultané de plusieurs vidéos, optimiser la fluidité d'affichage

des images 360° et gérer plusieurs parcours par ouvrage, tout en intégrant les exigences du RGPD (anonymisation des visages et plaques d'immatriculation).

Une première version de la solution est commercialisée depuis fin 2023. Elle n'inclut pas le module de détection automatique par IA, qui sera intégré dans la prochaine version.

VIVOA cible non seulement les gestionnaires d'ouvrages d'art, de patrimoine mais également les ingénieries et les entreprises de travaux de construction. La robustesse de la solution lui permettra également de s'intégrer au logiciel de gestion d'ouvrages et de patrimoine.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Le projet vise à fournir aux collectivités une solution accessible pour documenter rapidement et facilement l'état de leurs ouvrages, notamment ceux dont l'information est limitée voire inexiste. L'objectif est d'améliorer la connaissance globale du patrimoine et de son état.

La solution VIVOA offre plusieurs avantages clés :

- Autonomie accrue des collectivités : tout agent muni d'une caméra 360° peut documenter un ouvrage lors d'une visite de routine ;
- Collaboration simplifiée : le partage d'un simple lien web permet aux différents acteurs de collaborer autour des données collectées, limitant ainsi les déplacements ;
- Fiabilisation des inspections : la plateforme facilite le partage d'images et de vidéos probantes. Elle permet la validation des observations par des experts à distance qui apportent leur soutien aux opérateurs moins spécialisés. Les levées de doutes et la prise de décision sont donc facilitées.

V. MIRAUAR - Méthode d'assistance à l'Inspection et à la visite d'ouvrages d'art par Réalité AUgmentée et intelligence ARtificielle

Le consortium

Partenaires : Setec Diadès, Geodesial-Sogelink Bloc-In-Bloc, Liris



Ouvrages instrumentés : Ouvrages courants de type Ponts Cadres, Ponts Dalles, Ponts Voutes

Le projet

Le projet MIRAUAR est destiné à assister les gestionnaires de ponts, sachant ou non, dans la visite et la qualification IQOA de l'état de leurs ouvrages, leur permettant d'enclencher in fine au juste moment les investissements nécessaires en maintenance / réparation.

Dans ce contexte, l'objectif du projet MIRAUAR a été de produire un outil d'aide à la qualification de l'état d'un ouvrage d'art au travers de l'implémentation d'une Méthode d'assistance à l'Inspection et à la visite d'ouvrages d'art par Réalité AUgmentée et intelligence ARtificielle, sur la base de la méthodologie IQOA.

Cet outil s'articule autour de 4 étapes :

1. la définition et l'identification de l'Ouvrage : l'opérateur s'inscrit sur une plateforme dématérialisée qui lui permet de gérer son parc d'ouvrages et de créer des projets de visite. Pour une visite MIRAUAR, l'ouvrage doit appartenir à une famille prédéfinie d'ouvrages, appelés OAPP (Ouvrage d'Art Potentiel Paramétrique). Si c'est une première visite, l'opérateur devra effectuer un scan 3D de l'ouvrage pour créer un modèle géométrique précis,

2. la virtualisation : Dans le cadre de sa première visite, la virtualisation consiste à réaliser le scan 3D de l'ouvrage par l'intermédiaire d'une application fournie sur une tablette tactile. La virtualisation permet de faire correspondre les modèles d'information (géométrique & sémantique) de l'OAPP à la réalité de l'ouvrage,

3. la visite et l'identification des pathologies : lorsque le modèle virtualisé est disponible, l'opérateur utilise une interface en réalité augmentée pour déambuler autour de l'ouvrage, scanner les surfaces et identifier les défauts. Deux méthodes de détection et d'identification fonctionnent en parallèle :

- a. automatique : le système détecte et enregistre automatiquement les pathologies,
- b. manuelle : l'opérateur signale manuellement un défaut de surface, l'application enregistre sa position et produit une analyse du défaut.

Le calcul de la note IQOA est mis à jour en temps réel. Si des informations manquent pour son évaluation, l'application guide l'opérateur pour recueillir les données manquantes, via des questions et un système expert, ceci permettant d'évaluer la gravité des pathologies identifiées,

4. la transmission des informations : à la fin de la visite, l'application s'assure que l'opérateur a inspecté l'intégralité de l'ouvrage. Toutes les informations sont transmises à la plateforme dématérialisée, les acteurs concernés peuvent accéder aux données et générer un Procès-Verbal de visite de l'ouvrage selon le formatage réglementaire.

La définition des ouvrages d'art concernés par le projet MIRAUAR est basée sur les ouvrages de la Liste I - chapitre VII du guide « Classification des ouvrages » (DT383) et chapitre I du guide « Guide de visite en subdivision » (DT382) de la méthode IQOA.

Au titre de cette première phase faisant l'objet de l'appel à projet « Ponts Connectés », les développements se sont focalisés sur les ouvrages de type PIPO et PICF dont les décompositions géométriques sont plus simples, avec l'utilisation du seul matériau béton (Figure 18). Ceci constitue par ailleurs une famille représentative des structures que l'on peut rencontrer sur le réseau routier français.

Par ailleurs, dans ce projet, le contrôle s'effectue dans un premier temps au niveau des éléments structurels des ouvrages, c'est-à-dire en excluant les superstructures, les équipements et les abords/accès.

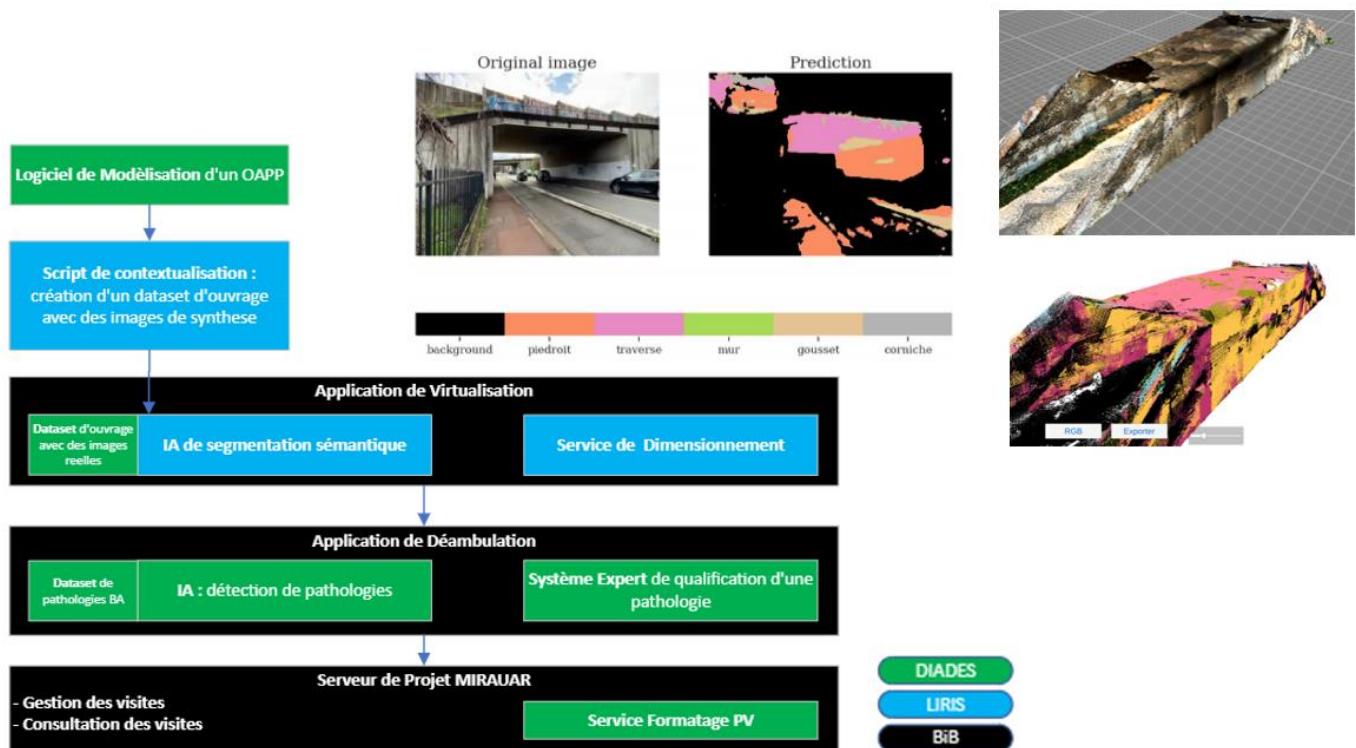


Figure 18. Logigramme fonctionnel de l'application MIRAUAR, virtualisation et reconnaissance sémantique sur ouvrage. Crédits photos MIRAUAR.

Avancées techniques

À l'issue du projet MIRAUAR, toutes les fonctionnalités initialement prévues sont opérationnelles dans un démonstrateur capable d'effectuer un cycle complet de toutes les opérations nécessaires.

L'expérimentation a validé l'intérêt de la méthodologie et démontré que l'ergonomie de la réalité augmentée (RA) est adaptée aux visites IQOA. Elle a également mis en lumière les défis technologiques restants pour garantir une « expérience utilisateur » convenable.

Le projet MIRAUAR a été l'occasion de produire plusieurs livrables techniques avec divers niveaux de maturité. Il a mis en évidence l'intérêt scientifique de l'apprentissage d'une IA à partir de données synthétiques (prouvant ainsi son efficacité dans un contexte pratique) et a proposé un modèle de représentation géométrique et sémantique des ouvrages (OAPP).

Sur le plan de l'ingénierie informatique, le projet a permis d'identifier et de mesurer les obstacles technologiques à surmonter. Il s'agit notamment des contraintes matérielles qui influencent les performances des IA et les défis liés à la qualification des données issues des processus d'annotation d'images d'ouvrages.

En outre, le projet MIRAUAR a été un véritable défi d'intégration, réussissant à combiner avec succès des technologies hétérogènes et complexes. Ces avancées et observations offrent une base solide pour la poursuite des travaux et l'amélioration continue de la méthodologie et des outils utilisés.

A l'issue du projet, les indices TRL des grandes phases du projet vont du TRL 4 au TRL 7

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Le projet MIRAUAR offre une visibilité précieuse sur plusieurs éléments de valeur, qui constituent aujourd'hui des briques métiers valorisables dans d'autres activités métiers. En effet, la transformation numérique du métier de la gestion d'ouvrages repose sur la constitution et l'exploitation d'un patrimoine numérique de ces ouvrages. L'approche mise en place dans le projet MIRAUAR a abordé de manière originale ces deux aspects.

Dans le domaine de la constitution d'un patrimoine numérique, la numérisation d'un ouvrage (ou d'un autre objet) constitue un préalable essentiel à toutes les opérations digitales et ne se limite pas à la capture de la représentation géométrique de l'ouvrage. Il a été proposé une approche basée sur le scan d'un nuage de points fourni par le LIDAR d'un iPad, l'utilisation de modèles géométriques (génériques et paramétriques) et l'utilisation d'une intelligence artificielle pour construire une représentation numérique comprenant la géométrie et la labellisation des différents composants de l'ouvrage. L'intégration de ces trois composants pour réaliser un outil de virtualisation constitue une avancée technologique innovante reconnue par la communauté scientifique.

Concernant l'exploitation du patrimoine numérique appliquée à la gestion d'ouvrages d'art, la fonction de virtualisation et la réalité augmentée se sont révélées être des modalités ergonomiques intéressantes pour les différents travaux de réflexion sur l'exploitation de jumeaux numériques. La constitution d'une base de connaissances pour le système expert de visites type IQOA peut elle aussi être utilisée pour assister à l'édition de rapports de visite pour l'ensemble des inspecteurs.

Le projet MIRAUAR a permis de faire des avancées significatives vers la mise en place d'IA spécialisées. Notons en particulier l'utilisation d'images de synthèse en phase d'entraînement, en complément d'images réelles, très chronophages à annoter pour fiabiliser les apprentissages. Cela permet d'ouvrir des perspectives dans la constitution de bases de données d'apprentissage pour certains sujets spécifiques. Le projet MIRAUAR a permis également de perfectionner les IA destinées à la détection de pathologies.

Par ailleurs, il y a eu un progrès significatif sur la manière d'embarquer les modèles d'IA dans des applications mobiles, capables d'effectuer leurs inférences et analyses en temps réel.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Au terme de ce développement, à partir d'un outil simple de type tablette ou smartphone, l'opérateur, sachant ou non, sera en mesure de réaliser des visites basées sur la méthodologie IQOA avec une assistance en temps réel pour la reconnaissance de la typologie/morphologie de la structure (si celle-ci lui est inconnue), la projection sur l'image réelle de l'ouvrage de diverses « couches d'informations », notamment les cartographies des pathologies.

Il aura ainsi en temps réel, lors de la visite, une aide à la détection des pathologies et à la caractérisation des désordres à partir de l'IA implémentée éventuellement assistée par un système expert, ainsi qu'une aide à la cotation de l'ouvrage.

Au fur et à mesure des actions de surveillance (annuelles et/ou triennales), la base de données sera enrichie des visites précédentes permettant de constater, *in situ*, une éventuelle évolution de dégradations et d'aider à prendre la juste décision afin d'enclencher les bonnes actions de surveillance, de maintenance ou de diagnostic complémentaire éventuel.

VI. Perspectives générales pour l'aide à l'inspection des ponts

Les outils de prise d'image génèrent désormais des millions de points qui permettent de créer des jumeaux numériques des infrastructures de transport. Pour permettre une utilisation massive de ces données, des solutions d'IA de plus en plus efficaces sont aujourd'hui disponibles. Il s'agit d'une réelle transformation numérique des métiers de l'inspection, où le développement de technologies et services numériques innovants permettent d'envisager le développement de nouveaux indicateurs de gestion de patrimoine.

L'enjeu est de réussir la transformation d'usages liée à l'acquisition des nouveaux appareils de mesure en intégrant l'ensemble des acteurs, en optimisant et sécurisant le processus de stockage des données et leur diffusion. C'est aussi de disposer de données qualifiées afin de pouvoir les visualiser et les exploiter de manière efficace.

Il s'agira de valoriser les développements de l'appel à projets favorisant les révolutions techniques en cours (standard des données, Intelligence Artificielle, imagerie) pour les mettre au service de la gestion du patrimoine avec des partenariats de recherche et d'innovation pour aller vers une gestion plus prédictive, plus fiable et plus économique. On peut citer les pistes suivantes :

- développement de partenariats entre les différents acteurs de la profession (académiques, industriels, ingénierie, maîtrise d'ouvrage),
- exploitation des différentes bases de données par traitement à l'aide de l'intelligence artificielle,
- numérisation des procès-verbaux d'essais et des rapports d'inspection,
- outil d'autodiagnostic des défauts et de leur classement pour les gestionnaires (aide au traitement d'image, particulièrement intéressante pour les petites collectivités),
- construction de bases de tests, en imagerie et en modèles de structure pour l'évaluation des outils des industriels.

Un autre enjeu est de favoriser les innovations dans la formation pour passer d'une formation traditionnelle à une formation innovante :

- intégrant la révolution des métiers,
- massifiée afin de s'adresser aux petites collectivités via des outils simples,
- offrant un appui des experts (via la réalité augmentée ou encore des chatbot experts) auprès des agents sur le terrain lors de l'exécution de travaux,
- permettant de passer d'un mode d'apprentissage théorique à un mode plus expérimental où les objets sont accessibles en 3D pour pratiquer et ainsi augmenter le savoir-faire.

Le Cerema développe différentes plates-formes numériques qui pourront servir de support aux développements innovants pour la gestion de patrimoine :

- SOS Ponts, pour l'appui aux petites collectivités,
- Expertises.Territoires (Communauté Ponts, CTT) pour tous les acteurs de la gestion,

- la plate-forme de formation en appui à différentes actions de formation ouvrages d'art.

Aide à la gestion des risques

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Ce chapitre s'intéresse aux innovations pouvant apporter une aide vis-à-vis de la gestion des risques pour les ponts.

Les ponts sont concernés par la problématique de vieillissement mais également par la survenue d'actions telles que des surcharges, des inondations, des chocs, des incendies ou encore des explosions. Il s'agit alors de pouvoir détecter des comportements discontinus et/ou des ruptures brutales. On peut citer les exemples de comportements brutaux ou discontinus :

- défaillance de fondation (semelle superficielle et affouillements, rupture de pieux en bois...),
- rupture d'élément structurel suite à un choc ou incendie (pile, poutre, hauban ou suspente),
- rupture sans signe préalable (rupture fragile pour des éléments en béton précontraint ou des éléments en acier fragile, instabilité élastique, propagation de fissure de fatigue),
- échappement d'appui (suite à défaillance d'appareil d'appui, mouvement d'appui, ...).

Assurer la sécurité de la structure exige le plus souvent une exploration des scénarii d'endommagement mais aussi et surtout de ruine. Dans cette analyse la notion de robustesse intervient, en intégrant les dispositions favorables à la robustesse et à la ductilité : utilisation de matériaux ductiles, dispositions robustes évitant les instabilités élastiques, les discontinuités de comportement, les échappements d'appuis, utilisation de redondance structurale. Pour un maître d'ouvrage, il peut être intéressant d'envisager d'instrumenter ses ouvrages pour prévenir les effondrements sur l'ensemble de son patrimoine. Néanmoins, l'absence de signes précurseurs de risque d'effondrement peut limiter l'efficacité d'une instrumentation préventive.

Il était ainsi attendu des propositions d'instrumentations capables d'apporter une aide aux gestionnaires pour gérer différents types de risques. En ce qui concerne les chocs violents sur ouvrages, une détection des chocs pourrait être envisagée pour aider les gestionnaires à évaluer l'efficacité des mesures de prévention et les alerter en cas de risque pour la tenue de la structure. Pour les effondrements dus à des affouillements d'appuis, le risque d'affouillement est actuellement traité par des inspections de surface et subaquatiques complétées éventuellement par des relevés bathymétriques, réalisés à intervalles réguliers ou à la suite de crues importantes. La mise au point d'une instrumentation financièrement soutenable, capable de détecter ou d'anticiper ce type de désordre, serait une avancée pour la maîtrise de ce risque. Enfin, en ce qui concerne le risque d'effondrement dû à des convois en surcharge, une

instrumentation de l'ouvrage adaptée serait une avancée pour informer le gestionnaire et lui permettre de cibler les contrôles routiers nécessaires au respect de la réglementation.

Ce chapitre détaille les projets lauréats suivants :

AUDACE - AUto-Diagnostic Après un Choc Endommageant

Le projet s'attelle à la surveillance des tabliers de ponts vis-à-vis de l'aléa de chocs dû au passage de poids lourds sous l'ouvrage. Il vise à mesurer en temps réel, grâce à de nouveaux capteurs connectés innovants, certains paramètres de comportement de l'ouvrage pour identifier toute anomalie issue d'un choc de véhicule routier. Il associe au signal détecté une description de l'évènement et de ses effets grâce à un algorithme d'analyse des données permettant d'en évaluer la gravité et de déclencher une action rationnelle et graduée du gestionnaire.

IA² - Indicateur Adimensionnel par Instrumentation et Assimilation de données pour le contrôle de santé des ouvrages : application aux affouillements

L'objet du projet est la détection des affouillements pour les ponts grâce à la caractérisation d'indicateurs de santé structurelle, statiques ou dynamiques. Le procédé est basé sur la détection de la perte de raideur d'un appui dû à l'assouplissement structurel occasionné par un affouillement. La méthodologie ambitionne avec des instrumentations et des maquettes numériques de déterminer pour chaque famille d'ouvrage une formule simple établissant la variation de grandeurs d'usage ainsi que des seuils d'alerte.

SOS-A - Détection des affouillements par capteurs, imagerie et modélisation

Le projet porte sur une solution robuste et financièrement abordable à destination des collectivités territoriales en charge de la gestion d'un parc d'ouvrages d'arts en rivière. Cette solution s'appuie sur du traitement de données géographiques (morphologiques) en temps réel, complété par une instrumentation des ouvrages. Toutes les données sont transmises à une plateforme de gestion 3D desdits ouvrages, permettant le suivi continu et l'envoi d'alertes au gestionnaire.

VIASAGAX - Détection des surcharges poids lourds

Le projet s'intéresse à la détection du dépassement des charges autorisées à circuler sur les ouvrages, avec la lecture automatique des plaques d'immatriculations des poids lourds et l'affichage sur 'Panneau à Messages Variables' des dépassements. Le système de pesage dynamique proposé s'appuie sur des géophones compensés en température à l'aide sondes, insérés dans la chaussée. L'alerte donnée pour un convoi trop lourd peut entraîner l'analyse du comportement de l'ouvrage à la suite du passage, afin de quantifier les effets.

Pour chacun de ces projets, les éléments de bilan fournis par les consortiums sont présentés dans le paragraphes ci-après : le consortium, le projet, les avancées techniques, les perspectives pour la gestion patrimoniale et les bénéfices pour la gestion de patrimoine.

Des perspectives générales pour l'aide à la gestion des risques sont identifiées en fin de chapitre.

II. AUDACE - AUto-Diagnostic Après un Choc Endommageant

Le consortium

Partenaires : SISGEO, LEMTA (Université de Lorraine) et SNCF Réseau



Ouvrages instrumentés : après une première expérimentation dite « CRASH TEST » portant sur la mesure du comportement d'un tablier de pont rail soumis à une série de heurts contrôlés, réalisée à Vignacourt (80), quatre ouvrages de type pont rail (PRA) de la SNCF ont été équipés : Villeneuve-le-Roi (94) (« VLR »), St Georges sur Loire (49) (« SGL »), Trignac (44) (« TRG ») & Mulhouse (68) (« MLH »).

Le projet

Le projet AUDACE (AUto-Diagnostic Après un Choc Endommageant) a mis au point une solution économiquement abordable composée de capteurs connectés et d'un algorithme intégrant de l'IA afin qu'elle soit adaptable à l'ensemble des ponts (ponts rail ou ponts route) potentiellement soumis à l'aléa « heurt » (heurt routier le plus souvent) pour en détecter l'occurrence, en évaluer les conséquences de façon automatisée et créer des alertes.

Le projet s'est articulé autour de trois objectifs majeurs :

1. Développer des capteurs autonomes capables d'acquérir de façon fiable les données nécessaires et suffisantes.
2. Concevoir un algorithme automatique de détection et d'évaluation des chocs à partir des données collectées.
3. A terme, la solution doit pouvoir être industrialisée et diffusée à grande échelle.

Avancées techniques

Les développements des capteurs autonomes ont porté sur trois types de capteurs. Deux de ces trois types ont fait l'objet d'un développement à partir d'une feuille blanche : la série dénommée « VeRi » et la série dénommée « WSN » (Figure 19).

Dans le cadre du projet AUDACE, ces capteurs ont été utilisés pour suivre l'évolution des déplacements des accotements/tabliers par rapport aux appuis. Cette donnée permet de qualifier un heurt « critique » puisqu'il aura eu pour conséquence de déplacer l'ouvrage par rapport à ses appuis.

Le troisième type de capteur utilisé constitue une évolution d'un système industrialisé de suivi de la signature vibratoire de structure dénommé Ad-Signum (www.ad-signum.fr). Ce système passif autonome composé de plusieurs capteurs (géophones & accéléromètres) et d'une capacité de traitement intégré (Edge Computing) est destiné au suivi global de l'état de la structure basé sur l'analyse fréquentielle opérationnelle en suivant l'évolution de la répartition des fréquences propres de la structure soumise au seul « bruit ambiant ». Le « capteur d'acquisition » des données de la solution Ad-Signum est dénommé PROBE-2.

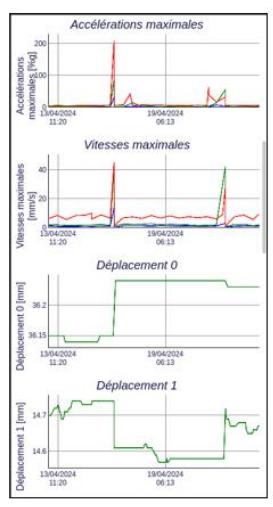
L'indicateur de probabilité d'endommagement fourni par le système est une quantification du changement de la réponse vibratoire de la structure.

Dans le cadre du projet AUDACE, le capteur PROBE-2 a été adapté pour également pouvoir répondre à la problématique de détection et d'évaluation des heurts, y compris le déclenchement de la transmission de la photographie de zone sous l'ouvrage.

En résumé, le capteur PROBE-2 détermine in-situ les paramètres de tous les heurts potentiels, réduit l'information à quelques paramètres et ne transmet que des messages courts à très haute densité d'information. Les caractéristiques des détections sont ensuite analysées ex-situ conjointement avec les photographies et les mesures de déplacement pour qualifier de façon certaine les heurts endommageant (voir plus bas) et déterminer les paramètres critiques qui peuvent ensuite être utilisés par le capteur, pour procéder à une discrimination in-situ des heurts.

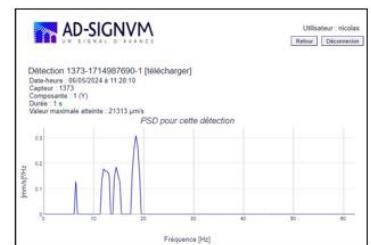


Système Ad-Signum autonome d'auscultation continue de l'ouvrage



Détection d'événements exceptionnels avec déplacements du tablier (choc ou autre)

Caractérisation automatique de l'événement



SMS +
Photos envoyés en temps réel

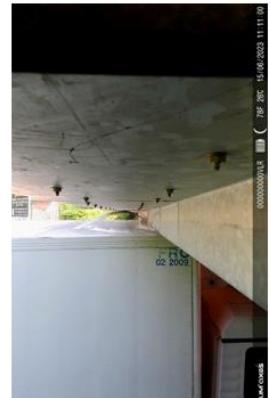


Figure 19. Système automatique de détection précoce d'endommagement du projet AUDACE.
Crédits photos AUDACE.

Synthèse des résultats obtenus par le LEMTA sur les données récoltées

Plusieurs modèles basés sur différents algorithmes d'apprentissage supervisés ont été entraînés sur les données d'une année provenant de deux ponts différents. Le modèle le plus performant qui a donné la meilleure précision (99,99%) dans la classification des signaux enregistrés par les capteurs a été retenu. Il utilise l'algorithme de la forêt aléatoire (Random Forest ou RF). Ce travail a fait l'objet d'une communication à une conférence internationale en 2023 et d'un article accepté pour publication dans une revue scientifique en 2024.

Des informations supplémentaires issues de l'analyse spectrale (DSP densité spectrale de puissance) ont été intégrées dans les données d'entraînement du modèle sur la période couverte par le capteur Ad-Signum du Pont Rail (PRA) VLR, avec le piège photo asservi. Sur les données d'entraînement, la précision de ce modèle était de 100% (19 chocs détectés sur 19 validés par les photos). Quand ce modèle a été utilisé pour classer les signaux enregistrés sur ce même PRA entre les 03/03/2023 et le 15/06/2023, il a classé 35 événements comme des chocs dont seulement 10 ont été signalés aux autorités. En examinant les données temporelles sur ce pont à la même période pour les 25 signaux restants, 21 chocs ont pu être identifiés comme pouvant correspondre à des heurts mais sans certitude absolue.

L'approche de l'apprentissage non supervisé a également été développée pour s'affranchir des difficultés liées à l'étiquetage des données notamment pour les chocs de faible intensité. L'algorithme des k-moyennes (K-Means) a été utilisé pour classer les signaux enregistrés sur VLR avec le capteur Ad-Signum. Alors qu'au total, 29 heurts ont pu être validés par les photos et les signalements aux autorités, le modèle a détecté 41 anomalies parmi lesquelles 25 correspondent effectivement à des chocs validés. En analysant les données, il s'est avéré que pour les 4 autres chocs, la vitesse n'a pas dépassé le seuil de déclenchement du capteur.

Pour résumer, le modèle supervisé entraîné sur des données labellisées sur la base des observations pendant le « crash test » et les observations complémentaires effectuées sur VLR, a permis d'obtenir une précision de prédiction très satisfaisante de 99,99% sur des données de 1 an sur deux ponts. Ces résultats ont fait l'objet d'un article scientifique accepté dans le journal « Artificial Intelligence and Applications » en 2024. L'intégration des données spectrales fournies par le capteur Ad-Signum en supplément a légèrement amélioré la précision sur les données d'entraînement mais n'a pas été aussi performante sur les données de test sur la courte période étudiée. Le modèle non supervisé a réussi à détecter plus de 90% des chocs avérés sur la période de test de 6 mois mais a détecté d'autres anomalies qui ne sont pas validées par d'autres données.

A l'issue de ces travaux, le modèle retenu est celui utilisant l'algorithme de la forêt aléatoire (RF) entraîné sur les données issues d'environ une année de surveillance sur les ouvrages VLR et SGL et validé sur les autres données disponibles.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

La détection des heurts est qualifiée. La caractérisation de ces derniers est qualifiée sur un ouvrage. Il convient maintenant de déployer le système sur d'autres types d'ouvrages et notamment plus légers car ils constituent un caractère plus risqué pour SNCF Réseau notamment en cas de déplacement de la voie supportée par l'ouvrage. Cette phase permettra

d'ajuster les seuils de déclenchement d'une alerte avec pour objectif que ces seuils soient déterminés de façon automatique par auto-apprentissage.

Il conviendra également de développer une plateforme utilisateur dédiée multi-paramètres combinant les données issues des systèmes Ad-Signum à celles issues des capteurs de déplacement, avec mise à disposition d'un cliché si accessible. Un système d'alerte devra être proposé à l'utilisateur pour recevoir des notifications une fois le système activé et opérationnel.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

La solution française innovante, Ad-Signum, semble d'ores et déjà satisfaire les objectifs généraux de l'Appel à Projets « Ponts connectés », à savoir :

- un système peu onéreux permettant une large diffusion,
- un système peu vulnérable aux intempéries, au vieillissement et économe en énergie,
- un système qui contribue à la gestion des ouvrages selon les méthodes classiques, comme celles portées par l'ITSEOA,
- un système « certifiable » quant à ses performances,
- une méthode de détection d'anomalies largement automatisée,
- une instrumentation permettant le suivi long terme des ouvrages.

Elle a été améliorée grâce au projet AUDACE pour la détection, la caractérisation automatique des heurts (et/ou événements anormaux) et la prise de photo asservie. AUDACE améliorera la prise en charge des conséquences des heurts sur les ouvrages d'art.

S'agissant des collectivités, les conséquences d'un arrêt du trafic sur ou sous le pont sont significatives puisque les voies de communication sont économiquement des points névralgiques de notre société. La disponibilité des ponts à court terme, moyen terme et long terme sera donc améliorée si l'on détecte et quantifie les conséquences d'un heurt sur l'intégrité de la structure.

III. IA² - Indicateur Adimensionnel par Instrumentation et Assimilation de données pour le contrôle de santé des ouvrages : application aux affouillements

Le consortium

Sixense Engineering, Sixense Monitoring, Université Gustave Eiffel, COFIROUTE, Département du Lot



Sixense
Engineering



Sixense
Monitoring

**Université
Gustave Eiffel**

LOT
LE DÉPARTEMENT

Ouvrages instrumentés :

- Viaduc sur la Loire de l'A85 à Langeais (bipoutre mixte)
- Pont de Gagnac sur Cère (pont voûte en maçonnerie)

Le projet

L'objectif initial du projet IA² était de concevoir un procédé industriel, sans intervention humaine, sobre en instrumentation sur ouvrage comme en calcul, capable de détecter et localiser des anomalies typiques de ponts : affouillements en pied de piles ou endommagements du tablier.

L'outil s'appuiera sur la généricité inhérente à deux familles d'ouvrages, les ponts mixtes et les ponts voûte en maçonnerie.

Deux ouvrages réels représentatifs de ces 2 familles ont été instrumentés pour les besoins du projet : le pont bipoutre mixte de l'A85 sur la Loire et le pont voûte de Gagnac sur Cère (Lot).

Deux pistes de recherche ont été explorées :

- **Volet dynamique** : exploitation de données fournies par des accéléromètres sous bruit ambiant
- **Volet statique** : exploitation des données fournies par des jauge de contraintes sous charges de trafic

Les Avancées techniques

Volet dynamique

L'affouillement d'une fondation de pile est réputé réduire la raideur de celle-ci. Cet assouplissement impacte certains paramètres dynamiques de l'ouvrage. La solution projetée cherche à repérer cet impact à travers l'analyse vibratoire de l'ouvrage afin de détecter, de manière précoce, indirecte et conséquentielle l'apparition d'un affouillement.

Les travaux menés sur la base d'une maquette numérique en accès libre ont montré que cette méthode permettait d'identifier les pertes de raideur au niveau des fondations d'une manière robuste, dans le cas du pont mixte (Figure 20). Les études paramétriques montrent que la qualité de la méthode est peu altérée par les incertitudes relatives aux conditions d'appui, à la nature du sol et aux variations de géométrie de l'ouvrage.

La validation de la méthode se fonde actuellement sur la maquette numérique du pont mixte de Langeais et sur des scénarios virtuels d'endommagement.

Pont de Langeais

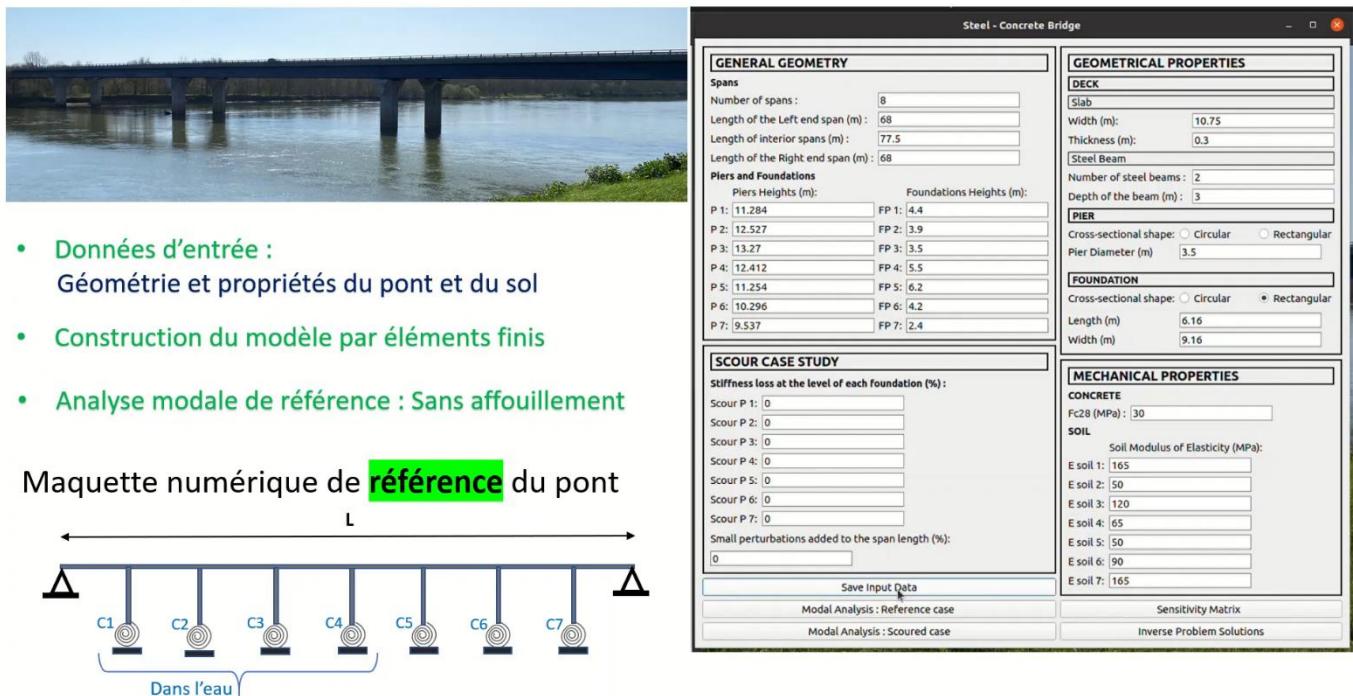


Figure 20. Illustration du volet dynamique du projet IA² dans le cas du Pont de Langeais.
Crédits photos IA2.

Volet statique

L'endommagement du tablier est réputé assouplir localement celui-ci. Cet assouplissement modifie la réponse du tablier (mesurée par des jauge de déformation) sous les charges de trafic. La solution projetée consiste à calibrer les paramètres de raideur de chaque élément du maillage d'une modélisation numérique du pont, de sorte que les réponses du modèle et du

pont réel convergent (algorithme d'optimisation sous des cas de charges donnés). En suivant l'évolution au cours du temps de ces paramètres de raideur, on détectera l'apparition éventuelle d'endommagement. La modélisation sera issue d'un modèle générique paramétrique propre à la famille du pont surveillé.

Les travaux menés ont permis de développer les modèles numériques génériques du pont mixte et du pont voûte (Figure 21). L'exploitation des données de déformation fournies par l'instrumentation du pont mixte, associées aux informations fournies par le pesage en marche ont permis de calibrer de manière satisfaisante les raideurs du modèle numérique.

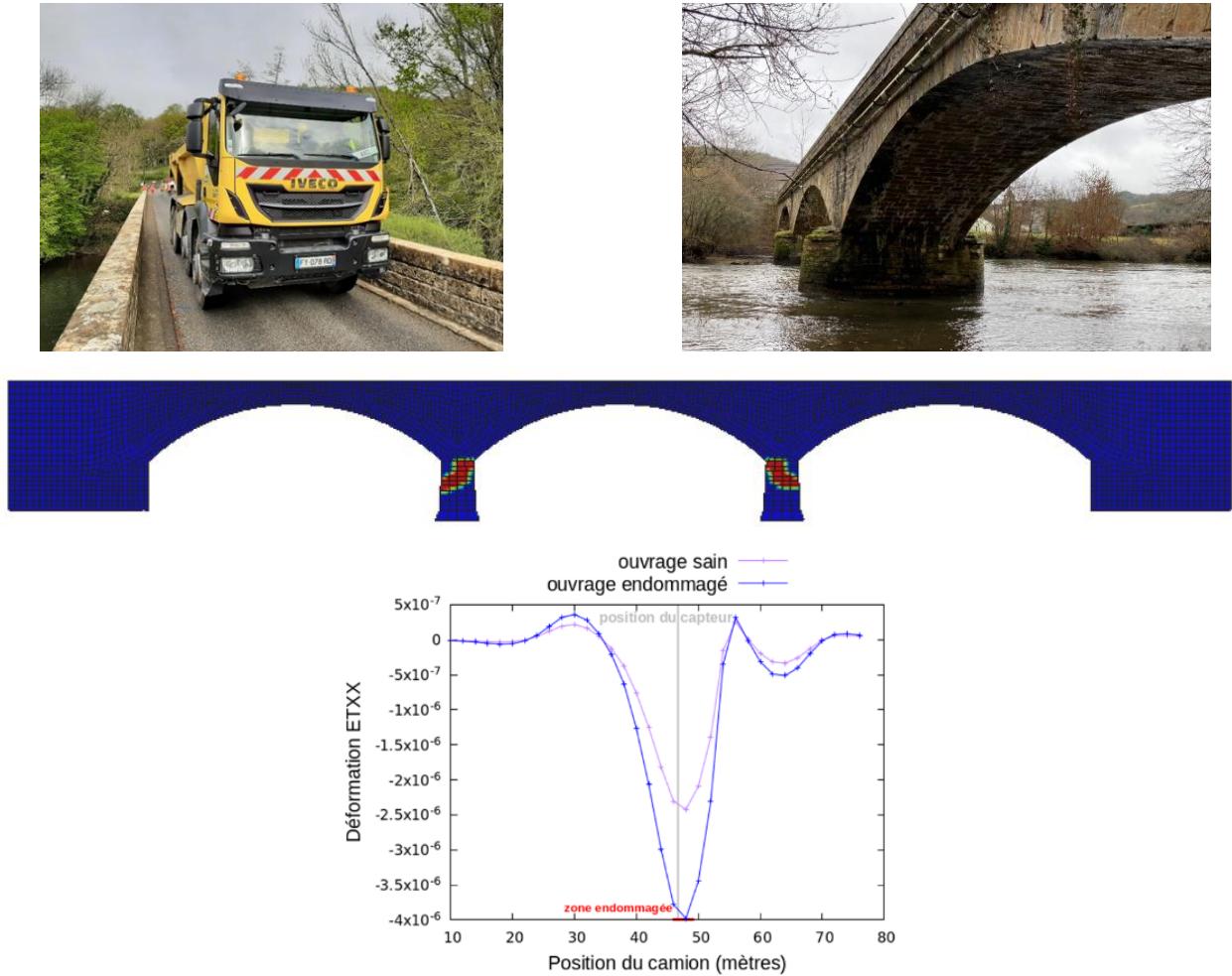


Figure 21. Illustration du volet statique du projet IA² - Exploitation des données fournies par des jauge de contraintes sous charges de trafic. Crédits photos IA2.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Volet dynamique

Les développements futurs nécessaires pour finaliser l'outil du volet dynamique sont :

- rejeter les effets de la température sur les paramètres modaux pertinents,
- définir un protocole d'instrumentation et d'analyse modale opérationnelle suffisamment performant pour déceler l'impact de l'affouillement,
- étendre la solution à la famille des ponts voûte en maçonnerie.

Enfin, il faudrait idéalement valider la méthode sur une maquette représentative ou un ouvrage existant présentant un affouillement.

Volet statique

Les développements futurs nécessaires pour finaliser l'outil du volet statique sont :

- définir un protocole d'exploitation des mesures de déformation afin d'évaluer le poids des véhicules et définir les cas de charge nécessaires à l'algorithme d'optimisation,
- établir un indicateur global d'endommagement prenant en compte l'incertitude des mesures et de la modélisation,
- définir un protocole d'optimisation de la position et du nombre de capteurs en fonction de la géométrie de l'ouvrage et des scénarios d'endommagement redoutés,
- étendre la solution à d'autres familles de pont.

Enfin, il faudrait idéalement, comme pour le volet dynamique, valider la méthode sur une maquette représentative ou un ouvrage existant dont le tablier serait sujet à un endommagement réel.

Bénéfices pour la gestion de patrimoine

Le bénéfice attendu des outils IA² est la mise à disposition d'un système de télésurveillance sobre en capteurs, permettant la détection robuste et précoce d'affouillement ou d'endommagement.

En fine, ces outils contribueront à :

- maîtriser les risques liés au vieillissement des infrastructures,
- optimiser leurs coûts d'entretien et de maintenance.

IV. SOS-A - Détection des affouillements par capteurs, imagerie et modélisation

Le consortium



Ouvrages instrumentés : 8 ponts dans les Pyrénées Atlantiques

Le projet

Le projet SOS-A (SOS Affouillement) a mis au point une solution robuste et financièrement abordable à destination des collectivités territoriales en charge de la gestion d'un parc d'ouvrages d'arts en rivière. Cette solution s'appuie sur du traitement de données géographiques (morphologiques) en temps réel, complété par une instrumentation des ouvrages. Toutes les données sont transmises à une plateforme de gestion 3D desdits ouvrages, permettant le suivi en continu et l'envoi d'alertes au gestionnaire.

3 actions majeures ont été mises en œuvre :

- L'exploitation de données libres de droit, fournies par l'IGN pour le suivi morphologique des cours d'eau, l'analyse en plan et volumétrique des bancs de graviers en amont, autour et en aval de l'ouvrage, permettant de probabiliser leurs mouvements autour des piles et culées en périodes d'eaux moyennes et en crues (Figure 22). L'exploitation d'images satellites complète la connaissance en offrant une mise à jour de la situation après chaque crue ;

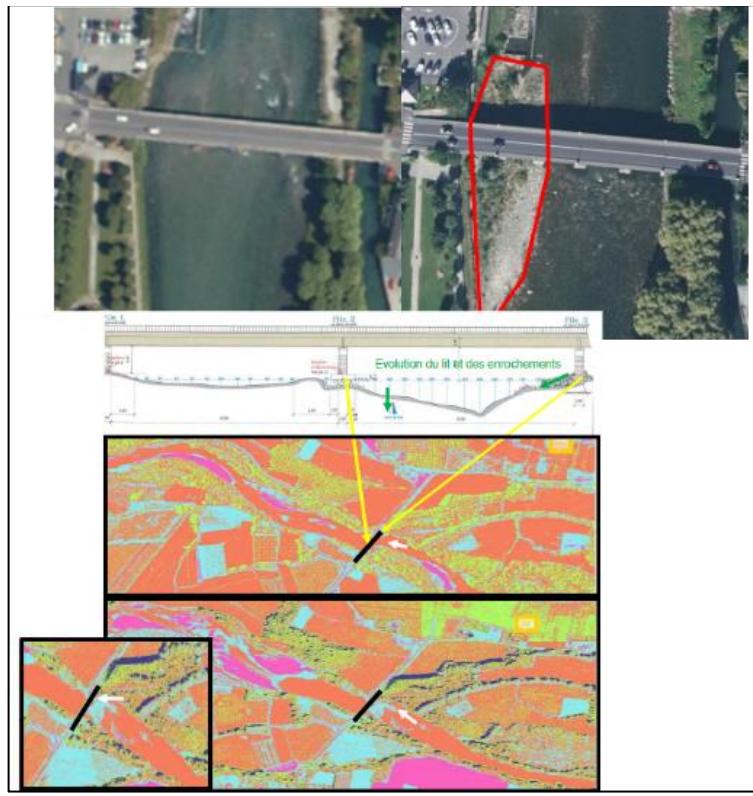


Figure 22. Automatisation des processus de traitement de tous types d'images pour le suivi morphologique (suivi du déplacement des bancs, suivi des déformations du lit mineur...).

Crédits photos SOS-A.

- L'exploitation de données fournies par des clinomètres et un « scourmeter » permettant le suivi des mouvements des piles et/ou culées d'ouvrage et du bilan sédimentaire vertical des sédiments au pied de ces piles (Figures 23 et 24) ;

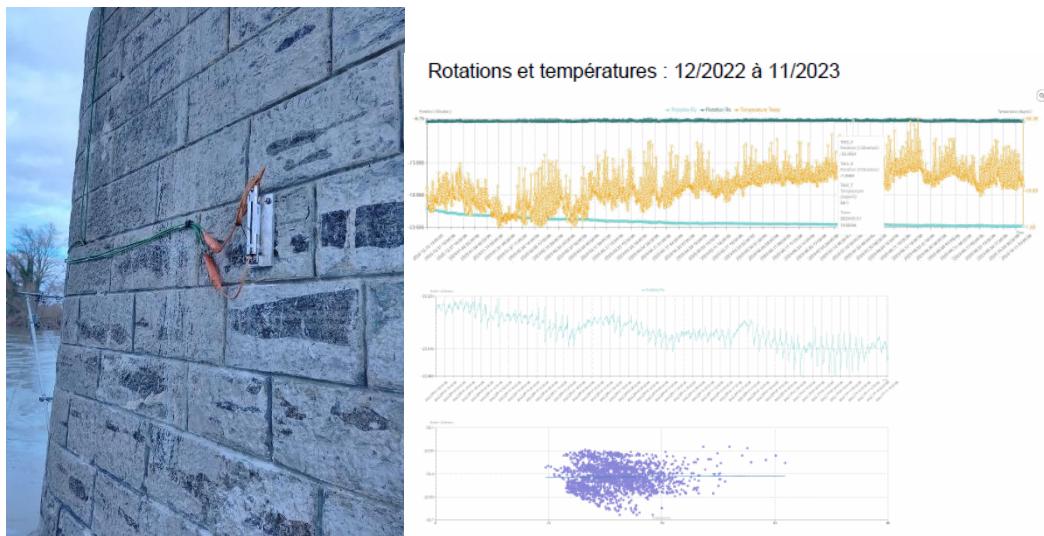


Figure 23. Utilisation de « capteurs éprouvés » et traitement spécifique des données par SOS-A permettant un suivi fin de l'ouvrage. Crédits photos SOS-A.

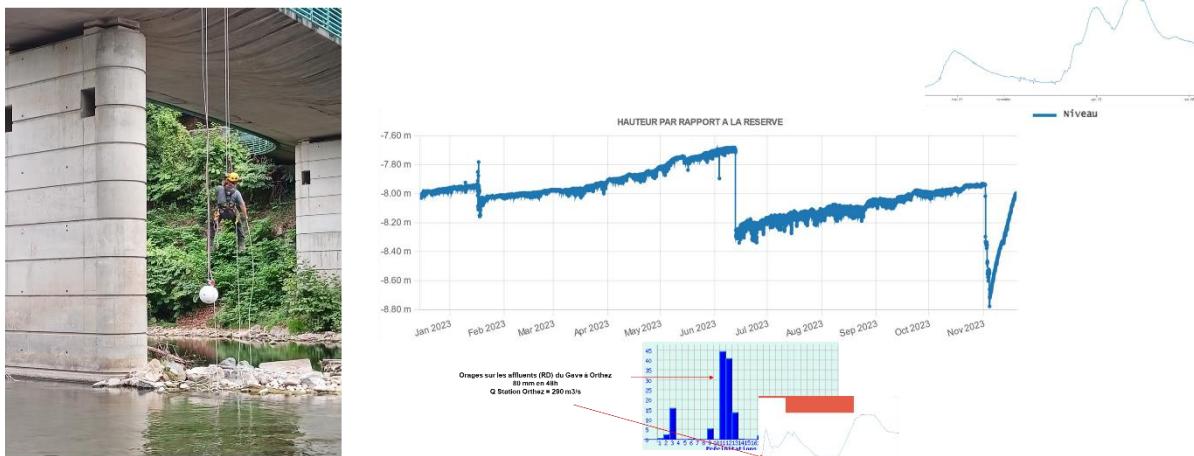


Figure 24. Développement d'un « scourmeter » et premiers résultats exploitables de mesures « directes » d'un affouillement. Crédits photos SOS-A.

- Une plateforme de gestion d'ouvrages d'arts (modélisation 3D de l'ouvrage, intégration des paramètres fournis par les 2 outils précédents), permettant de disposer de seuils de dangerosité adaptés à l'ouvrage en particulier.

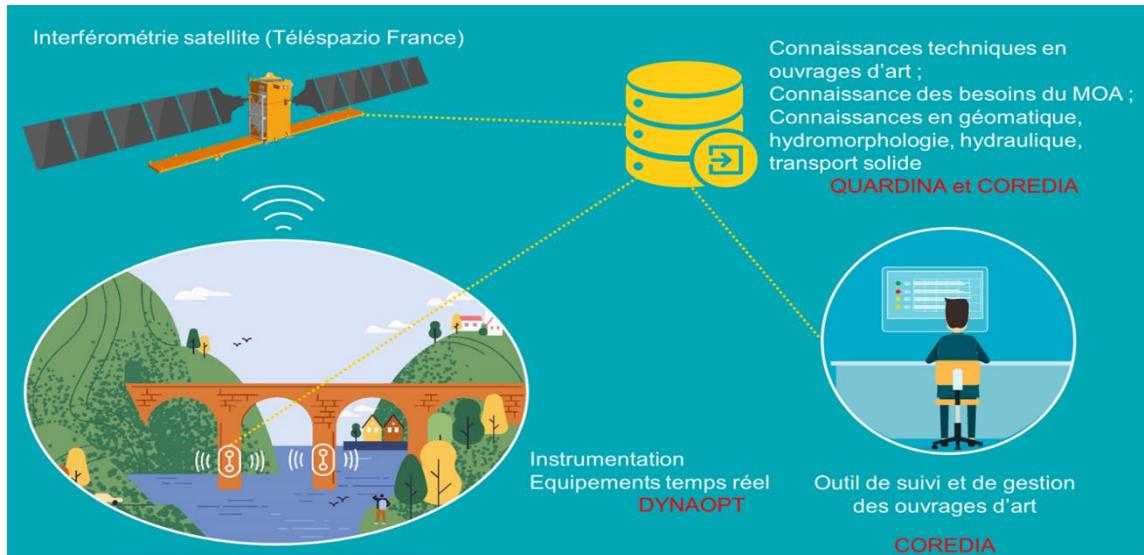


Figure 25. Approche pluridisciplinaire du projet SOS-A.

Les Avancées techniques

Le projet a montré que l'exploitation des données des clinomètres permettait d'obtenir des informations très précoces et fines sur les mouvements des ouvrages.

Les traitements numériques sous SIG ont montré qu'il est possible à la fois d'extraire différentes informations sur les bancs de sable et de graviers, et ce de manière automatique à partir de

plusieurs supports aériens, et à la fois qu'il est envisageable de suivre les mouvements de bancs avant et après une crue, ce qui couplé à du transport solide affine les connaissances sur les remobilisations durant les crues.

La création d'un outil de mesure (très simple) permet d'envisager un suivi de plus en plus fin de variation de hauteur et in fine de stocks sédimentaires dans l'environnement proche des ouvrages.

Les développements ont principalement porté sur :

- une méthodologie transférable d'un cours d'eau à un autre et d'un type de support photographique à un autre (image satellite à image de drone par exemple). Cette méthodologie bâtie sur du deep-learning permet de traiter n'importe quelle portion du territoire, sans modification importante des filtres (dans le cas de cours d'eau à fond mobile et granulométrie grossière) ;
- un traitement spécifique des données des clinomètres permettant la mise en évidence, bien avant la mise en péril de l'ouvrage, du comportement anormal de ce dernier. Des mesures couplées à des observations de terrain et aux données sur les mouvements de sédiments, (avec l'objectif d'automatiser la partie terrain en la remplaçant par les mesures du scourmeter) et la variation de mouvements des protections de pieds des piles par exemple. La création de cet outil de suivi en continu de la « cote » des sédiments autour des piles (scourmeter), permettant de compléter l'approche numérique de suivi morphologique, fournissant par la suite des informations pour les mesures d'assouplissement ou de raidissement des piles et culées ;
- la création, avec Infranuage, de jumeaux numériques permettant le justifier les seuils de déclenchement des alarmes et la localisation des capteurs sur l'ouvrage.

Synthèse des résultats

A ce jour, a été développé un outil, piloté via l'application INFRANUAGE de Coredia qui traite et « interprète » :

- les données remontées, en temps réel, de l'instrumentation (clinomètres - Dynaopt) équipant les piles ou/et les culées de l'ouvrage, qui quantifient les mouvements parallèles et perpendiculaires à l'axe de ce dernier ;
- les données remontées (également en temps réel) par le(s) « scourmeter(s) » qui permettent de suivre « l'approfondissement » de la cuvette d'affouillement ;
- les données relatives aux volumes de sédiments disponibles calculés par SIG (Quardina) - à la fois en état initial, mais également au temps court (passage de satellite Sentinel 1 et 2, permettant de suivre le déplacement des bancs), au temps long (comparaison annuelle ou bisannuelle d'images aériennes fonction des survols IGN) – qui permettent de fournir des éléments pour estimer la rigidité des fondations des piles et du sol autour de ces dernières (interaction sol-structure) ;

- les traitements interférométriques des données EGMS (lorsque ces dernières sont disponibles puisque coûteuses), qui peuvent permettre de suivre directement les variations altimétriques de l'ouvrage.

Par ailleurs :

- l'interprétation de ces données est susceptible de déclencher automatiquement différents niveaux d'alertes allant de la nécessité d'un diagnostic sur site à l'arrêt de l'utilisation de l'ouvrage ;
- l'interprétation résulte d'une modélisation fine de l'ouvrage et notamment de l'interaction sol-structure nécessitant de connaître la géométrie des fondations ainsi que le sol environnant.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Les perspectives d'avenir sont les suivantes :

- un calcul 3D de transport solide permettant d'améliorer ce calcul de volumes ;
- une amélioration du scourmeter (en cours), permettant de résoudre les problématiques de pose en zone complexe.

Ces deux améliorations fourniront des éléments de double validation (variation de profondeur du scourmeter et variation des volumes de sédiments).

En remontant ces informations à la plateforme Infranuage, la comparaison entre les résultats théoriques et les mesures permettra de déduire l'état des piles sans nécessité de vérification sur site.

La chaîne de traitement sera totalement automatisée elle permettra de fournir des données de suivi dont la fréquence sera optimisée en fonction des particularités et des conditions environnementales de chaque ouvrage

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Avec cet outil, les gestionnaires de patrimoine pourront accéder à une information continuellement mise à jour sur l'environnement hydraulique de leurs ouvrages, ce qui à terme leur permettra de :

- recevoir des alertes en cas d'inondation ;
- disposer de données sur les capacités des ouvrages à subir plusieurs stimulations (crue, freinage, surcharge) ;
- au final, un apprentissage permanent sur les réactions de l'ouvrage aux différentes sollicitations permettra d'affiner les indicateurs d'alerte dans le temps. Un modèle spécifique (intégrant de l'IA) permettra de suivre l'ouvrage au plus près, réduisant les coûts de gestion et le nombre d'études de suivi.

V. VIASAGAX - Détection des surcharges poids lourds

Le consortium

Partenaires : CD34, EUROVIA, FREYSSINET



Ouvrages instrumentés : Pont suspendu de Thézan-lès-Béziers (34)

Le projet

Le projet ViaSagax a visé à détecter les surcharges sur les Ouvrages d'Art, préventivement de préférence et également avec une quantification des effets quand elles surviennent. Dans le cadre de ce projet, un ouvrage représentatif est proposé par le CD 34, également partenaire du projet, pour déployer une solution complète de classification des charges roulantes et de qualification des effets de leur passage. L'ouvrage est le pont sur l'Orb à Thézan-lès-Béziers.

Le projet s'est articulé à la fois autour de l'instrumentation des chaussées et l'exploitation des données grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle pour un avertissement en temps réel sous le dépassement des charges autorisées (Smart Via), et de l'instrumentation de la structure du pont, afin de reconnaître l'endommagement de l'ouvrage ou de ses équipements en fonction de la modification des modes propres de l'ouvrage ainsi que le dépassement des contraintes (Smart Pontem). Le couplage des deux concepts (Figure 26) a pour intérêt de croiser les données issues des différents capteurs, le dépassement d'un seuil de poids pouvant être confirmé par les deux systèmes. De plus, l'alerte donnée pour un convoi trop lourd peut entraîner l'analyse du comportement de l'ouvrage à la suite du passage, afin de quantifier les effets.

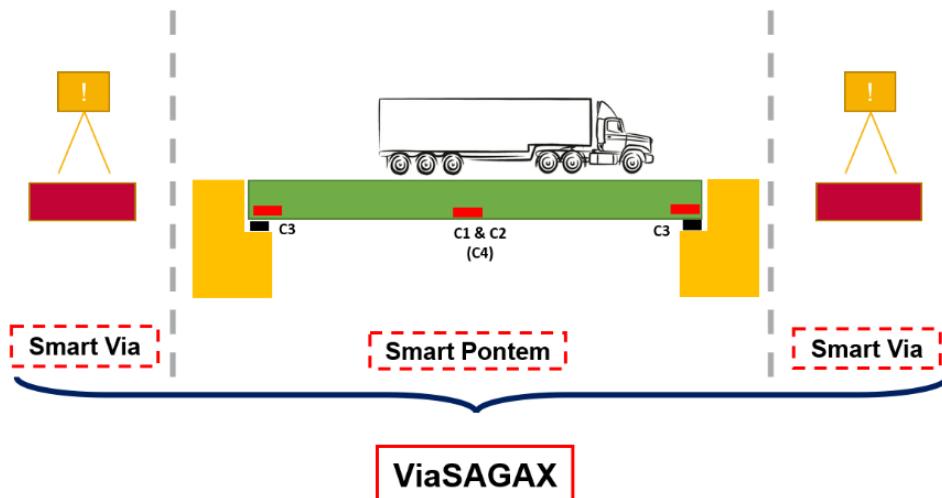


Figure 26. Couplage de la pesée dynamique des véhicules (SmartVia) et de l'instrumentation et mesures des déformations de l'ouvrage (Smart Pontem) pour analyser l'état de la structure.

Les avancées techniques

La partie Smart Via est située en amont et en aval de l'ouvrage concerné afin de prévenir le passage d'éventuelles surcharges. Elle est basée sur la mesure du poids des véhicules roulant sur la chaussée par pesée dynamique à l'aide de géophones. L'étalonnage des mesures est réalisé à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle permettant de déduire la charge sur chaque essieu, afin d'alerter lors du passage d'un convoi dangereux pour l'ouvrage.

Un premier prototype de capteur permettant la mesure de la déflexion de chaque essieu d'un véhicule lors de son passage a été réalisé et testé lors d'une campagne d'essai sur l'ouvrage (Figure 27). Les essais comprenaient le passage de plusieurs convois calibrés à différentes vitesses, pour différentes charges et pour plusieurs températures de chaussée. Il s'agit d'un capteur cylindrique réalisé par A3IP intégrant six sondes de température et un géophone relié à un ordinateur pour l'acquisition des données. Ce capteur est intégré dans la chaussée après carottage.

Les signaux de déflexion reçus montrent aisément le passage des convois et diffèrent en fonction de la charge et de la vitesse, ce qui valide le bon dimensionnement du capteur. Les mesures ont été traitées afin d'extraire le pic maximal de déflexion de chaque essieu lors des passages et d'entraîner un algorithme d'apprentissage automatique. L'analyse des résultats a mis en évidence la présence de corrélations entre les différentes variables (déflexion, charge sur la roue, vitesse du véhicule, température de l'enrobé, jumelage des roues du véhicule) mais aussi la présence d'une importante variation dans les données enregistrées que l'on suppose être due à l'effet des surcharges dynamiques du véhicule et à l'axe de passage de la roue du véhicule au-dessus du capteur. Le traitement par modèle d'IA met en évidence la limitation de certains modèles et leur forte dépendance à la qualité des données d'entraînement.

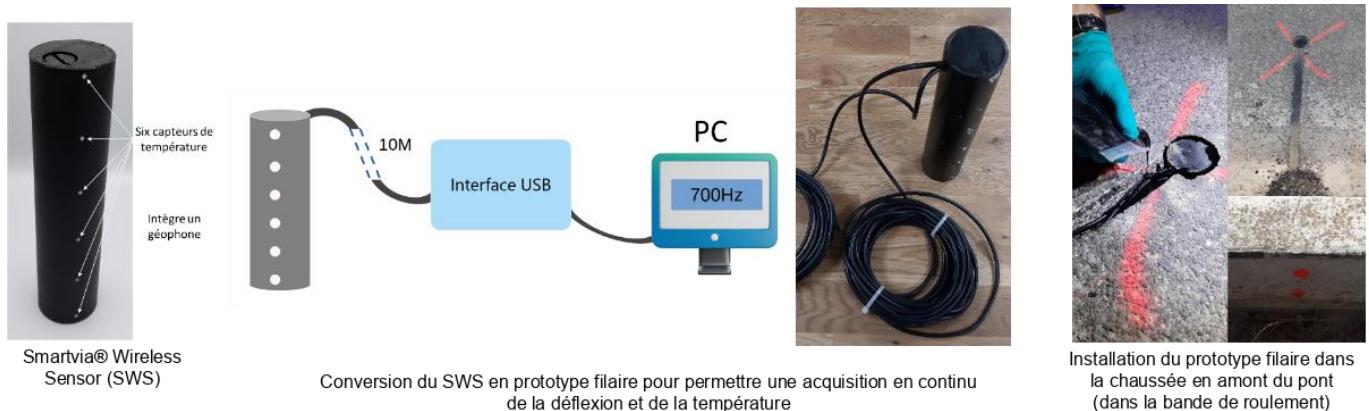


Figure 27. Développement d'un prototype de capteur filaire de mesure de la déflexion sur chaque essieu : cylindre intégrant 6 capteurs de température et un géophone. Crédits photos VIASAGAX

La partie Smart Pontem se concentre sur l'ouvrage et consiste à positionner des capteurs adaptés à la nature de l'ouvrage et aux points sensibles à surveiller, par exemple le monitoring des joints de chaussées ou des appareils d'appui. L'ouvrage a aussi été modélisé par éléments finis afin de comparer les résultats de l'expérimentation à la théorie.

Neuf suspentes du pont suspendu, réparties au centre de la travée ou proche des appuis, ont été équipées de capteurs dynamométriques, d'accélémètres et de sonde de température, afin de déterminer les efforts dans les suspentes ainsi que les déplacements du tablier pendant le passage des convois calibrés (Figure 28). Ces capteurs ainsi que la centrale d'acquisition sont déjà à disposition pour d'autres applications de monitoring et ont été adaptés pour fonctionner sur l'ouvrage et récolter les signaux.

Un protocole de traitement des mesures a été mis en place permettant de concentrer les informations reçues afin de les rendre exploitables.

L'analyse des résultats valide la capacité de l'instrumentation à différencier et classifier le passage des convois en fonction de la vitesse et du poids, même pour les véhicules non calibrés passant entre les passages tests lors de la campagne d'essai. La différence de contrainte mesurée correspond aux résultats du modèle pour la plupart des suspentes. Des différences ont été observées, que l'on peut attribuer à un défaut de connaissance de l'ouvrage, en particulier le pesage des suspentes. Les principaux modes propres mesurés de l'ouvrage sont ceux prédis par la modélisation et le positionnement des capteurs permet d'en observer plusieurs.



Instrumentation de la chaussée par un géophone



Passage d'un convoi calibré sur l'ouvrage instrumenté



Instrumentation de l'ouvrage (accéléromètre et dynamomètre)

Figure 28. Deux campagnes d'essais réalisées in situ sur le pont sur l'Orb à Thézan-lès-Béziers. Crédits photos VIASAGAX

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Les travaux réalisés tendent à valider le principe de la pesée dynamique de véhicules (notamment de poids lourds) par la mesure de la déflexion de la chaussée au passage du véhicule, bien qu'il reste encore des incertitudes. Cependant cette pesée dynamique ne peut pas être effectuée avec un seul capteur. Un chapelet de capteur est nécessaire pour palier les incertitudes et biais relevés par l'étude. Des propositions de dispositions de capteurs sont ainsi effectuées.

Une autre manière de procéder est possible pour lier la charge du poids lourd à la mesure de déflexion, il s'agit de l'utilisation du calcul inverse avec, par exemple, le modèle BURMISTER disponible via les logiciels de dimensionnement de chaussée ALIZE-LCPC ou ODIN. Cela sera le sujet de prochains travaux.

Enfin, il reste un aspect de la physique de l'enrobé qui a été mis de côté ici. Il s'agit de l'étude de l'impact de l'évolution des propriétés de la chaussée instrumentée (fatigue) sur la valeur de

la déflexion et de son influence sur la pesée dynamique. C'est un aspect primordial pour une validation définitive du concept et qui fera l'objet de prochaines études.

Les données issues de l'instrumentation Smart Pontem et leurs analyses confirment la sensibilité de l'ouvrage au trafic et la qualité des relations qui peuvent être établies comme lois de comportement.

Le traitement utilisé préfigure l'algorithme qui pourrait agir sur les mesures dans le cadre d'une surveillance de l'ouvrage, et qui procurerait :

- une classification du trafic par période, en sens de passage, vitesse de traversée et masse du véhicule traversant,
- une détection des dérives de fréquences modales susceptibles de révéler des modifications de raideur,
- une détection des dérives des amortissements modaux après passages, susceptible de révéler un endommagement.

Cependant, pour ces deux dernières possibilités, un travail complémentaire sur la modélisation de l'ouvrage est requis pour procurer les emplacements préférentiels, les sensibilités nécessaires et les dérives à évaluer.

Ce qui a été déployé pour cette campagne n'a pas été totalement optimisé pour cela, emplacements et matériels, mais a pu montrer que des informations utiles étaient accessibles assez facilement.

Une nouvelle campagne pourrait permettre de valider le comportement prédit de l'ouvrage par le modèle, situant les emplacements les plus sensibles, du type de ceux effectués ou d'autres, avec un traitement permettant de révéler des caractéristiques en rapport avec un état structurel. L'ensemble des résultats pourrait permettre de constituer des indicateurs de bonne santé.

Bénéfices pour la gestion de patrimoine

Le projet répond aux objectifs généraux de l'appel à projets « Ponts connectés », à savoir :

- un système peu onéreux permettant une large diffusion,
- un système peu vulnérable aux intempéries, au vieillissement et économique en énergie,
- un système qui contribue à la gestion des ouvrages selon les méthodes classiques, comme celles portées par l'ITSEO,
- un système « certifiable » quant à ses performances,
- une méthode de détection d'anomalies largement automatisée,
- une instrumentation permettant le suivi long terme des ouvrages.

La solution apporte aux gestionnaires d'infrastructures un système d'alertes préventives et précoces, permettant non seulement de verbaliser les dépassements mais aussi d'anticiper les

maintenances. Il en résulte une diminution du risque d'accidents liés au dépassement des contraintes et une meilleure anticipation des travaux à effectuer sur l'ouvrage.

VI. Perspectives générales pour l'aide à la gestion des risques

Les risques suivants ont pu être considérés dans l'appel à projets « Ponts connectés » :

- l'affouillement des appuis situés dans le lit des cours d'eau : cause récurrente d'effondrements d'ouvrages, il s'agit le plus souvent d'ouvrages anciens en maçonnerie, pour lesquels les techniques de l'époque ne permettaient pas de réaliser de véritables fondations profondes. En cas de crue, ils peuvent présenter un risque d'effondrement si les appuis n'ont pas été protégés ;
- les effondrements dus à des chocs violents, qui ne peuvent être traités que par la prévention (détection de véhicules hors gabarits, protections ou renforcements des appuis, signalisation). Parmi ces dispositifs, la seule signalisation se révèle souvent insuffisante si elle n'est pas accompagnée de restrictions physiques ;
- les effondrements dus au passage de convois en surcharge, comme par exemple l'effondrement du pont suspendu de Mirepoix sur le Tarn en 2019, qui ne peuvent être évités que par des dispositifs disposés en amont des ouvrages (ex : câbles piézoélectriques noyés dans la chaussée ou instrumentation d'un ouvrage situé en amont de l'ouvrage à protéger) et capables de signaler à l'usager la situation de surcharge avant qu'il ne s'engage sur l'ouvrage. Toutefois, la mise en sécurité peut être à compléter par un dispositif de fermeture physique de la voie.

D'autres risques pourraient être considérés à l'issue de l'appel à projets « Ponts connectés », notamment : les risques d'effondrement de buses, les effondrements de massifs en terre armée ou encore les ruptures fragiles à basse température.

La sensibilité et la robustesse des ouvrages peuvent être très variables suivant leur génération, leur conception, les règlements de calculs employés pour leur dimensionnement ainsi que leur technique de construction. Suivant les cas, il est possible de rencontrer une diminution progressive de la performance par dégradation des matériaux, ou une rupture fragile pouvant conduire à une défaillance soudaine. Les ouvrages, suivant les pathologies qu'ils rencontrent, doivent faire l'objet de diagnostics détaillés incluant des expertises concernant les matériaux et un recalculation précis.

Néanmoins, il y a un réel intérêt à pouvoir bénéficier d'une instrumentation intégrée dans le processus d'analyse des risques. Cette instrumentation peut être utilisée afin d'affiner les modèles numériques, d'identifier les causes principales des désordres et les ouvrages les plus vulnérables, et/ou dans certains cas de prévenir de l'occurrence d'évènements extrêmes. Ce nouvel usage est d'autant plus pertinent dans le cadre d'une stratégie d'adaptation au changement climatique, pour améliorer la résilience des infrastructures et optimiser les coûts d'exploitation et de maintenance. L'instrumentation de surveillance ne serait donc plus seulement réservée aux ouvrages les plus à risques qui sont mis sous haute surveillance dans l'attente de leur réhabilitation, mais pourrait avoir un rôle plus amont et servant les outils d'analyse de risque. Une extension des instrumentations est possible dans ce contexte, sous réserve que son coût ne soit pas disproportionné par rapport aux enjeux.

Aide à l'auscultation des ponts

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Ce chapitre s'intéresse aux innovations pouvant apporter une aide à l'auscultation des ponts.

Selon le fascicule 03 de l'ITSEO, l'auscultation est un ensemble d'examens et de mesures spécifiques faisant le plus souvent appel à des techniques élaborées et qui vise à mieux connaître l'état réel d'un ouvrage pour aboutir à un diagnostic de sa pathologie.

L'auscultation est effectuée :

- lorsque l'état d'un ouvrage est douteux ou défectueux (cas le plus fréquent) ;
- dans le cadre de l'étude approfondie de la réparation ou du renforcement d'un ouvrage, au même titre que les calculs ou recalcus ;
- pour suivre des paramètres caractéristiques du vieillissement ou de l'endommagement d'un ouvrage dans le cadre « d'inspections ciblées », déclenchées à des moments opportuns pour favoriser des travaux d'entretien préventif ;
- lorsqu'il est envisagé d'apporter à un ouvrage en état normal ou quasi-normal, une modification touchant à la structure.

Les trois objectifs principaux de l'auscultation sont :

- l'établissement du « bon » diagnostic ;
- la détection, la localisation, l'évaluation de l'ampleur et de la gravité des désordres ;
- la définition ou la confirmation d'hypothèses de calcul.

L'objectif de ce sujet au sein de l'appel à projets « Ponts connectés » est de favoriser l'implantation sur ouvrages d'art de capteurs innovants en cours de développement, qui permettrait de répondre à des besoins de surveillance aujourd'hui non satisfaits.

Il était ainsi attendu des propositions de capteurs à bas coût, faible consommation d'énergie (ou nulle), facilement installables et/ou interrogeables sur un ouvrage en service. Les capteurs peuvent être noyés dans le matériau et interrogeables à la demande, de manière ponctuelle ou en continu. Il peut s'agir de capteurs passifs dont l'alimentation en énergie est réalisée par le dispositif d'acquisition au moment de la mesure, pour suivre des phénomènes lents ou faire des vérifications post-aléa, dans des zones inaccessibles pour lesquelles les instrumentations habituelles sont peu adaptées (maintenance/durées du monitoring).

L'enjeu est la justesse des résultats, la fiabilité face aux dysfonctionnements potentiels, et la pérennité du système d'instrumentation pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Ce chapitre détaille les projets lauréats suivants :

CAHPREEX - Détection de la corrosion des haubans et des câbles par capteurs autonomes

La corrosion des câbles à l'intérieur des ancrages ou des gaines PEHD n'est aujourd'hui pas facilement détectable lors d'inspections. Le projet porte la mise en oeuvre de capteurs autonomes permettant de détecter la corrosion des haubans et des câbles : des capteurs RFID (Radio Frequency Identification) de corrosion sont immergés dans la zone d'enrobage puis ensuite interrogés afin de détecter le début de la corrosion initiée par la présence d'ions chlorures.

GEOPONT - Auscultation d'ouvrages par propagation d'ondes

Le projet consiste à utiliser les techniques du radar (ondes électromagnétiques) et de la sismique (ondes mécaniques) pour caractériser les pathologies du béton.

MAJ - Détection d'endommagement des joints de chaussée par capteurs acoustiques et intelligence artificielle

Le projet vise à reconnaître l'endommagement des joints de chaussée par leur instrumentation en développant une oreille numérique experte, entraînée par intelligence artificielle, analysant le signal sonore sous passages de poids lourds.

AINSPECTA – Aide au diagnostic d'ouvrages par intelligence artificielle et imagerie (réalité augmentée)

Le projet porte sur le développement d'une application capable de détecter, analyser et identifier les types de défauts présents sur les ouvrages d'art, principalement les ouvrages métalliques, afin de mieux envisager leur entretien avec trois axes : 1.la détection se fait à partir d'images captées par drones ; 2.l'analyse de ces images utilise des réseaux de neurones pour détecter les défauts et alimenter le rapport d'inspection ; 3.dès l'inspection, l'inspecteur a un retour en direct des défauts et pathologies présents sur l'ouvrage d'art via une tablette, puis à l'aide d'une lunette à réalité augmentée, il peut visualiser les défauts et pathologies.

Pour chacun de ces projets, les éléments de bilan fournis par les consortiums sont présentés dans les paragraphes ci-après : le consortium, le projet, les avancées techniques, les perspectives pour la gestion patrimoniale et les bénéfices pour la gestion de patrimoine.

Des perspectives générales pour l'aide à l'auscultation des ponts sont identifiées en fin de chapitre.

II. CAHPREEX - Détection de la corrosion des haubans et des câbles par capteurs autonomes

Le consortium

Partenaires :

Université Gustave Eiffel : université unique et pionnière composée de six organismes couvrant des thématiques multidisciplinaires destinées à répondre à la continue transformation des villes.

Université Bretagne occidentale : établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel pour le développement de la recherche et à l'élévation du niveau scientifique, culturel et professionnel de la nation.

APRR : Concessionnaire d'autoroutes

ARTELIA : Groupe d'ingénierie indépendante & multidisciplinaire



Ouvrage instrumenté : Viaduc de Sylans sur A40

Le projet

Le projet CAHPREEX s'est intéressé à la détection de la corrosion des câbles dans les ouvrages précontraints ou à haubans. Cette pathologie est difficilement détectable lors des inspections ou par des moyens CND (Contrôle Non Destructif) classiques. Pourtant, connaître l'état de dégradation en corrosion de certains composants d'ouvrage est un point capital en termes de gestion patrimoniale, le risque de ruine partielle ou totale existe comme l'a montré l'actualité récente.

Afin de surveiller l'état de corrosion dans les unités de précontrainte et les ancrages de haubans, des capteurs basés sur la technologie RFID passive ont été développés dans le cadre du projet. Grâce à leur autonomie et leur faible coût, l'inspection de ces parties d'ouvrages sera rendue plus facile par une interrogation à distance (localisation et état des capteurs), avec un résultat plus fiable, favorisant ainsi une approche de maintenance préventive et prédictive plutôt qu'une approche curative.

Après une phase de développement / optimisation technologique puis de tests sur corps d'épreuve représentatifs des parties d'ouvrages étudiées, ces capteurs ont été déployés in situ sur différents ouvrages du réseau APRR.

L'articulation du projet s'est faite autour de 3 axes majeurs (Figure 29) :

Axe A : Suivi de la corrosion à l'intérieur des gaines de précontrainte extérieure

Axe B : Suivi de la corrosion au niveau des ancrages de précontrainte extérieure et de hauban

Axe C : Suivi de la déformation de la section des gaines de précontrainte extérieure



Figure 29. Axes d'investigations du projet CAHPREEX. Crédits photos CAHPREEX.

Les avancées techniques

Axe A : détection de corrosion sous gaine de précontrainte extérieure

Les capteurs de l'axe A sont actuellement les capteurs les plus avancés du projet avec une volonté de développement axé sur l'adaptabilité et la précision de ces capteurs. En place sur le viaduc de Sylans sur A40 depuis août 2023 et en enceinte de vieillissement accéléré, ils ont démontré leur performance de durabilité et d'efficacité. Les possibilités d'interversion de feuillet métallique en fonction de l'agent de corrosion du site, les possibilités d'adaptation d'épaisseur des capteurs en fonction du seuil souhaité et les possibilités de mise en ambiance sous coulis de ciment, cire pétrolière ou graisse permettent d'envisager une diversité d'application tant sur des ouvrages neufs que sur des ouvrages existants en garantissant des performances optimales.

Actuellement, les capteurs en place sur le viaduc de Sylans sont toujours opérationnels. Ne nécessitant pas d'énergie pour communiquer leurs données, il n'y a pas de risque de perte de signal ou de données et l'acquisition est réalisée avec une antenne portable que tout inspecteur peut manipuler aisément lors de ses visites d'inspections détaillées périodiques. Ces capteurs étant positionnés sous les gaines de réparation des manchons ou des anciennes prises en charge, leur durée de vie couvrira la durée de vie restante de l'ouvrage soit un peu plus de 70 ans.

Ces capteurs constituent des indicateurs témoins pour les inspecteurs qui pourront vérifier l'état de corrosion des torons, sans avoir besoin d'ouvrir la gaine PEHD. Cette technologie est adaptée tant pour des ouvrages existants pour contrôler dans le temps l'efficacité des réparations de gaine PEHD effectuées que sur des ouvrages neufs pour insérer dès la conception de câbles de précontrainte ou de hauban des indicateurs de vieillissement permettant de compléter l'état IQOA de l'ouvrage.

Axe B : Capteurs de corrosion intégrés aux ancrages

Les capteurs de l'axe B restent à finaliser et à tester in situ mais la solution est prometteuse. Les premiers essais en laboratoire ont permis de valider le principe de détection de l'eau dans un ancrage mais la poursuite d'un développement d'un presse-étoupe adapté est cruciale pour assurer l'étanchéité et la protection des capteurs dans des environnements exigeants.

Ce type de capteurs économique de détection d'eau peut être envisagé pour d'autres applications en ouvrages d'art et plus largement dans le milieu du génie civil. Sa robustesse est garantie par sa conception.

Axe C : Capteurs de déformation sur gaines

Les capteurs de l'axe C sont les capteurs les plus prometteurs en termes d'indicateurs de déformation à faible coût. Leur technologie reposant sur une valeur de signal de réception en fonction d'une déformation limite souhaitée, leur champ d'application en ouvrages d'art est vaste.

Pour les câbles de précontrainte injectés au coulis de ciment, la mise en place de tels capteurs au droit de chaque discontinuité de gaine PEHD, de chaque déviateur de câbles ou de chaque blessure de gaine permet de suivre de manière fiable la déformation de la gaine dans le temps.

Ainsi, tout inspecteur équipé d'une antenne RFID pourrait interroger à chaque inspection détaillée ces indicateurs témoin pour vérifier si une ouverture de gaine est nécessaire du fait d'un gonflement limite de la gaine (gonflement susceptible de cacher une rupture de fil de toron ou une corrosion importante de toron).

Les essais en laboratoire sur ce type de capteurs permettent de confirmer leur fonctionnement. Leur design à améliorer dans les futurs développements garantit une bonne tenue dans le temps même vis-à-vis de conditions d'ambiances sévères.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Axe A : détection de corrosion sous gaine de précontrainte extérieure

Les améliorations possibles pour ce type de capteur résident dans sa dimension fonction de la production standard disponible des puces RFID. Afin d'adapter ces capteurs pour des réparations plus petites de gaines PEHD (pastilles de réparation ou manchons électrosoudables) ou pour des applications dans des endroits exiguës (moins de 25 cm²), le développement nécessaire est aisément réalisable car les puces RFID peuvent être produites pour des dimensions plus petites. Néanmoins, il faudrait un besoin conséquent de ces puces miniaturisées pour retrouver un prix bas à l'instar des puces standard. Cette étude de marché sur la miniaturisation de ces capteurs reste à réaliser après ce projet.

L'autre piste d'amélioration repose sur la détection longue distance de ces capteurs sous gaine. Cette piste d'amélioration est délicate pour ces capteurs car la position du capteur sous gaine en dépend mais également sa dimension (plus on arrivera à miniaturiser ces capteurs moins il y aura de détection à distance). La recherche ou le développement d'une antenne de réception plus performante est une piste pour permettre une captation des capteurs au moins depuis le centre d'un caisson d'ouvrage.

Il reste donc des efforts de miniaturisation et de détection longue distance sur cet axe A tout en maintenant la robustesse et l'efficacité du capteur.

Axe B : Capteurs de corrosion intégrés aux ancrages

Les perspectives de développement sur cet axe B résident principalement sur sa transition potentielle vers un dispositif capable de réaliser des mesures automatiquement et d'envoyer les données sur de longues distances (protocole LoRa par exemple). Cette transition renforcerait l'efficacité et l'accessibilité du système pour des applications plus vastes sur ouvrages d'art.

L'autre point à finaliser est son adaptabilité aux différents capots d'ancrage de différentes longueurs injectés par différents procédés.

Axe C : Capteurs de déformation sur gaines

Pour achever le développement des capteurs de l'axe C, une recherche sur le gonflement des gaines PEHD de câbles injectés au coulis de ciment doit être menée. Cette recherche pourrait reposer sur des essais sur banc d'essai de rupture de fil pour appréhender l'évolution du périmètre de la gaine le long du câble et tester différents capteurs pour différents seuils de déclenchement. Cela permettra de concevoir des capteurs plus robustes et adaptés à des environnements variés.

L'amélioration de la portée d'interrogation est un objectif transversal à plusieurs axes. Une meilleure portée permettra d'atteindre de nouvelles applications et de répondre à des besoins plus vastes. La recherche ou le développement d'une antenne de réception plus performante est une piste pour permettre une captation des capteurs au moins depuis le centre d'un caisson d'ouvrage.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

La gestion des câbles de précontrainte extérieure en gaines PEHD injectées au coulis de ciment ou la gestion des haubans avec gaine PEHD collectrice est une réelle problématique de surveillance pour les gestionnaires par manque de signes visibles de vieillissement. Cette problématique est encore renforcée quand ces câbles sont directement exposés à l'air libre soumis à des ambiances corrosives. Les désordres sur ces câbles sont souvent très minimes voire imperceptibles vu de l'extérieur mais les agents corrosifs une fois pénétrés à l'intérieur peuvent engendrer de gros dégâts.

Le projet CAHPREEX répond ainsi entièrement à un besoin des gestionnaires pour leur donner de nouveaux indicateurs de surveillance sur ces câbles pour pouvoir suivre de manière plus précise des pathologies souvent invisibles sur les premiers stades de développement.

Néanmoins, ce projet doit être poursuivi pour aboutir à un outil d'aide à la décision fiable et clair pour un gestionnaire. L'une des pistes de travail pour finaliser ce projet est la création d'une interface simple d'acquisition des données de capteurs permettant à minima sur un plan 2D de repérer les capteurs et la valeur obtenue (par exemple OK ou NOK). Cette restitution de résultats permettra à tous gestionnaires de pouvoir consulter cette interface lors des restitutions de visites pour prévoir les éventuels diagnostics nécessaires sur les câbles.

III. GEOPONT - Auscultation d'ouvrages par propagation d'ondes

Le consortium

Partenaires :

- UBY : Entreprise spécialisée dans le monitoring structurel automatisé
- Spotlight : Entreprise spécialisée dans le traitement de données sismique
- CentraleSupélec : Grande école disposant notamment d'un laboratoire d'étude en mécanique des matériaux



Ouvrages instrumentés : Ponts de la communauté d'agglomération de Saint-Quentin-en-Yveline : EL02, MB31, MB32

Le projet

Le grand nombre de ponts dégradés en France ou dans le monde met en évidence l'importance de la mise en œuvre au bon moment de stratégies d'entretien et de maintenance efficaces et adaptées. En raison de la pyramide des âges des ouvrages d'art concernés et des volumes de trafic en augmentation constante, une détérioration croissante de l'état général des ponts a pu être observée au cours de la dernière décennie. La mission d'information sur la sécurité des ponts du Sénat de 2019 proposait de « définir des procédures de surveillance et d'entretien adaptées aux petits ponts ».

Surveiller l'état d'un ouvrage, c'est se concentrer sur la détermination de l'aptitude au service d'un ouvrage, tout autant que sur son intégrité structurale. Le groupement mené par UBY a visé à proposer des méthodes géophysiques matures et innovantes pour répondre à ce besoin tout en respectant une contrainte d'opération et de budget.

Le projet s'est focalisé essentiellement sur les ouvrages en béton, qui constituent la grande majorité des ponts routiers. Récemment, plusieurs méthodes géophysiques modernes ont été adaptées à l'étude de l'aptitude au service et à l'intégrité structurale d'ouvrages. Elles contribuent à produire une réalité augmentée de l'intérieur de ces ouvrages et ainsi détecter diverses modifications mécaniques. L'un des objectifs du projet est d'étudier leur applicabilité en condition réelle.

Deux méthodes géophysiques ont été visées par le projet : de maturités techniques différentes, elles ont pour but de constituer une base d'analyse globale des ouvrages. Il s'agit des méthodes géophysiques de géoradar et de sismique active. Les développements réalisés dans le cadre de ce projet sont destinés à démontrer les briques technologiques et opérationnelles indispensables pour faire de ces méthodes géophysiques des outils opérationnels, fiables, pertinents et peu coûteux de la surveillance des ouvrages.

Ce programme a été mené avec l'aide de nos partenaires :

- Bridgology pour l'acquisition, le traitement et l'analyse des données géoradar ;
- La communauté d'agglomération de Saint-Quentin en Yveline pour la mise à disposition du matériel d'étude.

Les avancées techniques

Le Géoradar

L'inspection d'un tablier de pont à l'aide d'un géoradar permet de cartographier sa structure interne (épaisseurs des différents composants, homogénéité, présence de vide, desquamation, design anormal des armatures ...). L'étude a poussé plus loin les capacités du géoradar en cartographiant également le risque de corrosion dans l'ouvrage et en identifiant ainsi de nouveau désordres potentiels (Figure 30). Le traitement numérique des données géoradar a été en partie automatisé pour réduire le temps entre la campagne de sondage et la publication des résultats. Un protocole de mesure a été établi et permet de mettre en place cette technique en ne fermant la voie de circulation que pour une durée restreinte : 1 heure pour l'installation + 1h pour 300m² de tablier. Des mesures par carottage restent recommandées mais limitées à 2 prélèvements pour caller finement les cartes de risque de corrosion.

Enfin, l'archivage des données géoradar a été intégré dans une application de gestion de parc d'ouvrage pour permettre de suivre dans le temps l'évolution du tablier en comparant les cartographie d'année en année.

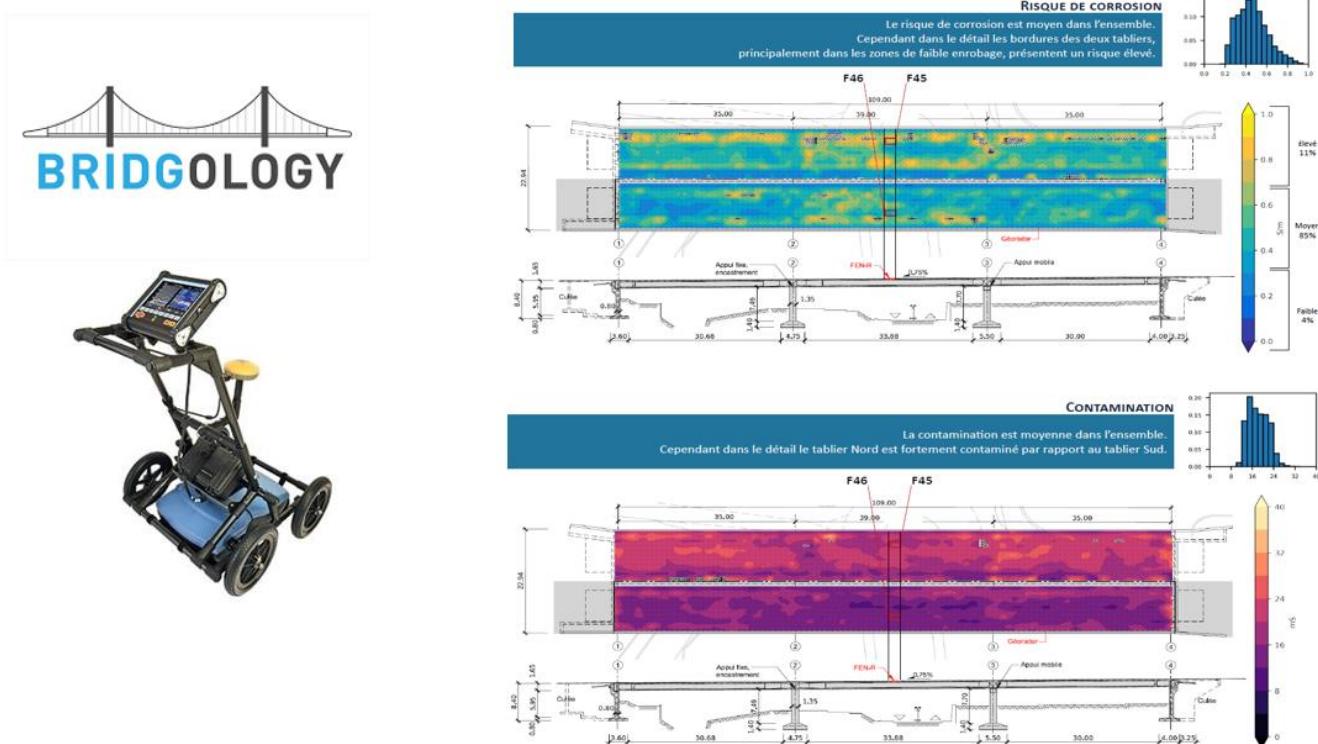


Figure 30. Techniques d'auscultation par géoradar.

Sismique active

Pour l'analyse sismique (Figure 31), certaines mesures se sont montrées cohérentes avec les mesures géoradar. Ainsi, il a pu être retrouvé des zones de désordre identifiées au géoradar grâce à la méthode sismique en analysant par exemple la variation de la vitesse de propagation des ondes et la densité spectrale de puissance (PSD). En utilisant la méthode PSD notamment, il a été possible dans certains cas de détecter des vides, l'énergie étant amplifiée de manière significative quand l'impact est réalisé dans la zone où le taux de corrosion est élevé.

Les cartes PSD générées à partir des simulations numériques sont modifiées avec un vide peu profond. Ces modifications de la distribution de la densité de puissance peuvent être expliquées par les réflexions des ondes qui se produisent à l'intérieur du vide.

Chaque ouvrage dispose de sa propre signature sismique. Les principaux critères de différences sont : la présence de certaines ondes spécifiques à certains ouvrages, l'absence de certaines fréquences (parfois les fréquences supérieures à 1000 Hz étaient filtrées alors que sur d'autres ouvrages il a été mesuré des signaux jusqu'à 4000 Hz), des notches fréquentiels, des amplitudes différentes pour certaines ondes. Tous ces attributs sont sensibles aux variations des matériaux du pont et peuvent donc être pertinents pour leur suivi.

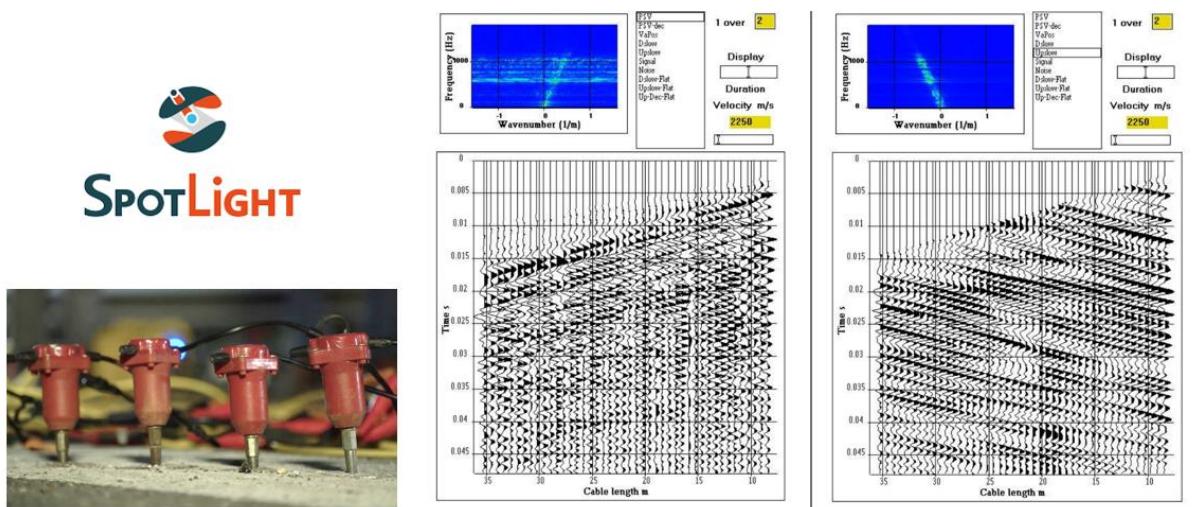


Figure 31. Techniques d'auscultation par sismique active. Crédits photo GEOPONT.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Le projet a montré que la méthode de sismique active pourrait mettre en évidence la présence de désordres dans un ouvrage d'art en béton armé. Il faut maintenant simplifier le protocole opérationnel. Il a été mis en place des chaînes de 48 géophones mais l'objectif final est d'analyser un ouvrage avec un protocole utilisant 2 ou 3 géophones seulement. L'objectif est également de permettre l'intégration définitive des géophones à l'ouvrage pour supprimer les fermetures de voies. Une analyse temporelle sur plusieurs années permettra également de valider la sensibilité de la sismique active aux variations de matériaux.

Opérationnellement les porteurs du projet sont confiants sur le fait qu'une installation permanente de capteurs serait abordable économiquement et limiterait grandement les temps de fermeture de route.

Concernant le géoradar, c'est principalement du côté du matériel que viendra certainement la prochaine avancée. Il a par exemple été testé au cours de projet un géoradar tracté par un véhicule à 40km/h. Malheureusement cette version ne permet pas d'atteindre le niveau de précision nécessaire mais à l'avenir ce type de matériel pourrait être utilisé pour supprimer les temps de fermeture de route et réduire les coûts associés.

Bénéfices pour la gestion de patrimoine

A terme, si la mesure sismique avec un faible nombre de géophones est définie, elle permettrait de rendre compte très rapidement, et à faible coût, de l'état globale d'un ouvrage. Comme un système d'alarme, cet outil pourrait être utilisé lors des campagnes d'inspections détaillées. Il permettrait de lever des alertes sans donner la localisation exacte des désordres. Ensuite des relevés plus poussés, notamment à l'aide d'un géoradar, pourraient être utilisés pour localiser précisément les désordres et définir leur nature.

Le Géoradar est une méthode non intrusive qui permet d'analyser la structure interne des ouvrages tout en réduisant les interruptions de trafic.

La première étape du traitement géoradar fournit déjà des données intéressantes pour les responsables des parcs d'ouvrages d'art puisqu'elle permet de modéliser les interfaces entre les différentes couches constituants le tablier. Classiquement l'épaisseur d'enrobé bitumineux, son homogénéité, l'épaisseur du béton d'enrobage, la profondeur des armatures (y compris les câbles de précontrainte), et l'espacement entre les armatures sont estimés dès le premier traitement. Les analyses plus poussées permettent de cibler les zones avec des risques de corrosion pour les armatures.

L'automatisation du traitement des données a permis de réduire le temps d'analyse et donc les coûts de la méthode. Une gestion de données efficace et sécurisée sera absolument nécessaire pour un projet industriel.

Pour conclure, la préservation des ouvrages en condition d'exploitation devrait être facilitée grâce à ces deux méthodes complémentaires dont le but est de rendre compte de manière fiable et objective de l'état de vétusté des ouvrages. Les outils à disposition permettent d'optimiser les coûts de maintenance d'un parc en levant les alertes au bon moment, sur les bons ouvrages et en ciblant précisément les zones problématiques.

IV. MAJ - Détection d'endommagement des joints de chaussée par capteurs acoustiques et intelligence artificielle

Le consortium

Partenaires : Freyssinet International & Cie (FIC), Freyssinet France (FF), Synpas'Up (Vinci Construction France - VCF)

FIC et FF

VCF



Ouvrages instrumentés : 84 lignes de joints de chaussée ont été instrumentées.

Le projet

Le projet a proposé d'apporter un saut technologique dans l'instrumentation des joints de chaussée, en développant une oreille experte numérique, entraînée par intelligence artificielle, qui reconnaisse l'endommagement d'un joint de chaussée en fonction du bruit produit au passage de véhicules. Le livrable de ce projet est un démonstrateur de la faisabilité d'une maintenance prédictive des joints de chaussée.

Les avancées techniques

Le premier travail a consisté à tester différents microphones et réglages d'enregistrements, ainsi que la place relative du microphone par rapport au joint de chaussée, pour avoir un son exploitable. Il a alors été réalisé quatre valises d'enregistrement utilisées sur divers sites en France.

84 enregistrements ont été effectués pour plus de 680 heures de données sonores. Chaque prise de son a donné lieu au remplissage d'un formulaire, dans lequel différentes informations ont été consignées. Notamment : le type de joint, le lieu, la date, l'état du joint, le type éventuel de dégradation, le matériel d'enregistrement, la position d'enregistrement par rapport au joint. Le projet s'est concentré sur l'analyse d'un joint du type « WRB », dont les données ont été les plus nombreuses.

L'analyse des fichiers a été conduite au travers de plusieurs étapes (Figure 32) :

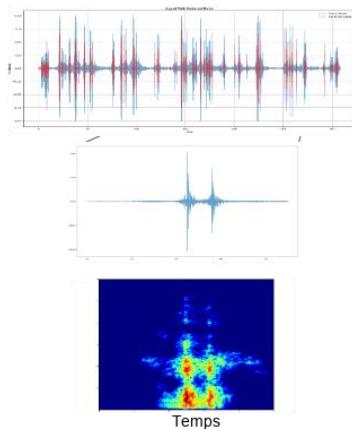
- découpe des fichiers audio en segments de 10 minutes, exploitables par un ordinateur standard ;
- filtration du signal audio pour mettre en évidence les bruits de passage de véhicules sur le joint ;
- identification de passages, segmentation du signal audio en fenêtres centrées sur les passages ;
- représentation temps-fréquence du signal audio : transformation du son en image ;

- réalisation d'un modèle de machine learning sur ces images :
 - choix d'une métrique pour évaluer les performances du modèle. Un indicateur a été défini dont l'objectif est de maximiser la détection d'une défaillance et qui limite les faux positifs ;
 - entraînement sur une partie des données ;
 - test sur une autre partie des données ;
 - le modèle est entraîné et testé sur des jeux de données de plus en plus grandes. Dans la dernière phase, tous les enregistrements des WRB sont utilisés. Le nombre d'enregistrements a progressivement été augmenté pour l'entraînement et la performance du modèle en test a été suivie sur les N+1^e données.

Enregistrement du bruit de passage de véhicules sur des joints de chaussées



Traitement du signal audio (découpage, filtrage, extraction, représentation temps-fréquence)



Machine learning: entraîner un modèle à associer un bruit à un état du joint.

Résultat = prototype de modèle IA



Bon état



Mauvais état

Figure 32. Illustration du principe de fonctionnement du projet MAJ. Crédits photo MAJ.

Chaque étape fait intervenir un certain nombre de paramètres, qui ont été optimisés pour obtenir le modèle ayant la meilleure détection de l'état du joint de chaussée.

A l'issue de ce travail, le modèle produit permet, pour le WRB, de détecter 100% des cas de défaillances et ne produit que 50% de faux positifs. Lorsque le joint est endommagé, l'analyse a permis d'identifier la signature sonore de deux types de défaillances (l'une révélatrice d'un début d'endommagement, l'autre symptomatique d'un endommagement sévère).

Enfin, un prototype d'infrastructure informatique a été développé (une plateforme MLOps), qui permet de traiter des données acquises en continu.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

Le démonstrateur mis en œuvre dans le cadre du projet MAJ est un objet de R&D qui n'est pas déployable en l'état : autonomie de 24 h, transfert et exploitation manuels des données, modèle IA dédié à quelques cas. Un développement est nécessaire pour aboutir à une solution exploitable par les gestionnaires.

S'il était mis en œuvre directement, le modèle IA développé aujourd'hui permettrait, pour les joints WRB déjà étudiés, de déclencher d'une part une maintenance dans tous les cas où il y en a besoin et d'autre part de réaliser une inspection inutile dans 50% des cas. Dans le cadre d'un développement complémentaire, l'objectif serait d'entraîner le système sur d'autres joints de chaussées, sur de plus longues durées et de soustraire l'effet de biais (température ambiante, vitesse des véhicules, etc.) afin de pouvoir généraliser le modèle IA à d'autres types de joints de chaussées et améliorer la prévision du système notamment concernant les faux positifs.

Différentes solutions techniques sont envisagées. Il est maintenant crucial d'établir le cahier des charges d'un système industriel, et de vérifier la pertinence de poursuivre le développement. A cette fin, des exploitants d'infrastructures routières sont rencontrés pour discuter du concept technique et réfléchir à un modèle économique viable.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Plusieurs bénéfices du système sont attendus :

- système d'alertes précoces pour anticiper les désordres et diminuer le risque d'accident des usagers ;
- diminution de la gêne occasionnée aux usagers par une meilleure anticipation des fermetures de voies ;
- lissage des dépenses des gestionnaires d'ouvrages en phase avec leurs budgets annuels de maintenance ;
- réduction du nombre d'inspections inutiles et des coûts associés ;
- compétitivité accrue d'entreprises françaises dans le domaine des joints de chaussées et utilisation de l'intelligence artificielle au service du génie civil ;
- optimiser la conception, la procédure d'installation et de maintenance des joints de chaussée pour assurer un meilleur niveau de service.

V. AINSPECTA – Aide au diagnostic d'ouvrages par intelligence artificielle et imagerie (réalité augmentée)

Le consortium

Partenaires :

Corrosia : Société spécialisée dans la corrosion, elle propose ses services d'inspection, d'expertise et d'assistance sur le sujet des ouvrages d'art et structures métalliques.

Weaverize : spécialisée dans la recherche et le développement d'applications web, mobile, embarquée ou Cloud (SaaS / API), ainsi que dans l'innovation. Weaverize a une forte expérience dans les projets de recherche mettant en oeuvre du traitement et de l'analyse d'image ainsi que dans l'IA.



Le projet

Le projet AINSPECTA porte sur la détection automatique de corrosion sur les ouvrages d'art métalliques. Il comprend les étapes suivantes :

- Corpus d'entraînement :

Le but de cette étape est de créer un corpus de vidéos permettant de valider les étapes suivantes du développement. Ce corpus est constitué d'images provenant de la collection de CORROSLIA et de nouvelles acquisitions réalisées sur le terrain sur la prise de vue en drone (Figure 33).

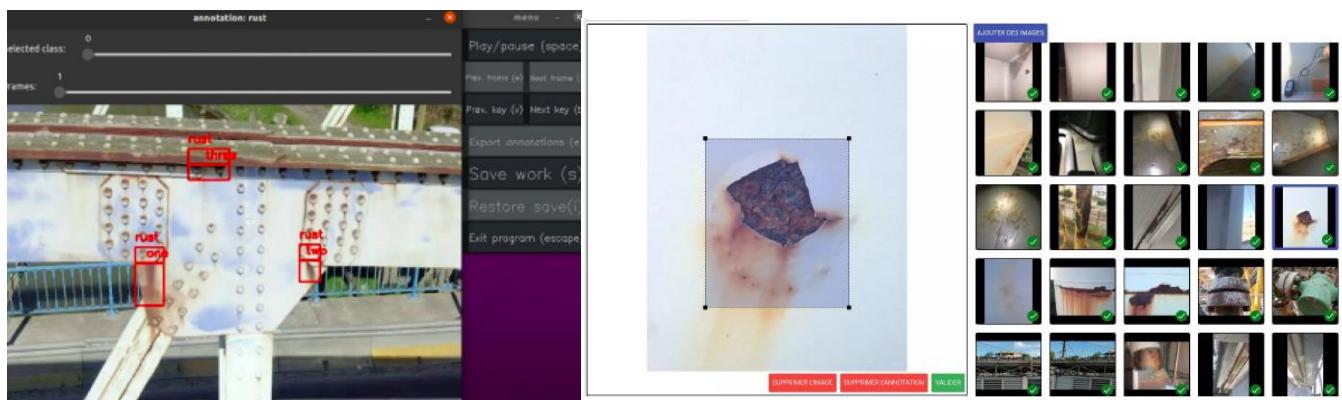


Figure 33. Construction d'un corpus d'entraînement : agrégation de données issues de la collection de Corrosia, acquisition de banques d'images sur le terrain et homogénéisation de la base. Crédits photos AINSPECTA.

- Annotation du corpus vidéo :

Le corpus ainsi constitué a été annoté pour permettre l'entraînement des réseaux de neurones et leur évaluation. Ce travail a été réalisé conjointement par CORROSION et WEAVERIZE. Pour cette tâche, un logiciel d'annotation a été créé pour faciliter l'annotation de la corrosion sur les vidéos d'inspections. Ce développement n'était pas prévu initialement pour le projet mais a été nécessaire pour permettre l'annotation efficace et assister les annotateurs dans cette tâche fastidieuse. Il est intéressant de noter que le temps pris pour la réalisation de l'outil d'annotation a permis une annotation plus rapide des vidéos. Ce développement n'a ainsi pas eu d'impact négatif sur le planning initial du projet.

- Développement de réseaux de neurones :

La partie principale de ce projet est celle de la création de réseaux de neurones. Cette partie comprend l'architecture de réseau de neurones, les hyper-paramètres et l'entraînement sur le corpus de vidéos (Figure 34). Les différentes approches et configurations ont ainsi été évaluées et comparées sur la base du corpus annotés.

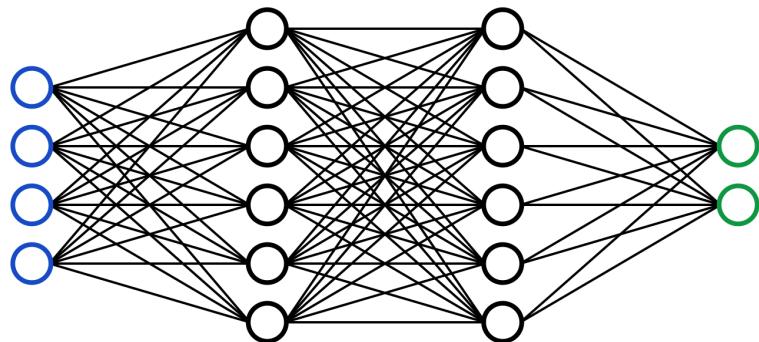


Figure 34. Crédit d'un réseau de neurones: architecture du réseau de neurones, identification des hyper-paramètres et entraînement sur le corpus de vidéos

- Création de prototypes :

Le premier prototype sera composé de l'ordinateur d'entraînement sur lequel sera connecté la console du drone pour permettre la captation vidéo et la restitution des défauts (Figure 35). Dans ce prototype, le drone est connecté avec un module embarqué permettant soit la détection des défauts sur site, soit la transmission de la vidéo dans le cloud pour traitement. Dans ces deux cas, les défauts sont détectés et restitués en temps réel. Les détections et la vidéo seront enregistrés pour permettre une consultation a posteriori.



Figure 35. Association d'un drone + caméra avec un cloud, traitement temps réel des images et indications de corrosion, variantes avec API / Mobile. Crédits photos AINSPECTA.

Les avancées techniques

Une fois le réseau entraîné à reconnaître des défauts grâce aux annotations générées par l'application d'apprentissage, il était nécessaire de pouvoir afficher les prédictions. Pour cela, il a été développé un outil permettant de générer une vidéo affichant les différents défauts repérés à partir d'un modèle entraîné. Cette mise en place se base sur l'algorithme Yolov5.

Le premier réseau de neurones a été entraîné sur un corpus de photos assez restreint (environ 100 images de corrosion).

Cette approche obtient ainsi une moyenne des précisions moyennes (mAP) de 0.65. Il s'agit d'une métrique classique de la littérature, utilisée fréquemment dans la détection d'objet, qui permet de comparer facilement différentes approches. Le rappel de cette approche est de 0.2.

En fixant un seuil basé sur le score de confiance, il est tout à fait possible d'améliorer les résultats de la prédiction. Au fil des entraînements, la composition du dataset a été améliorée. L'accent est mis sur la qualité et la quantité des annotations fournies afin d'améliorer au mieux les résultats des prédictions. Pour cela, la quantité d'images représentatives de corrosion est augmentée, tout en garantissant que ces dernières contiennent bien le type de défaut recherché. Il est également ajouté au dataset des images ne contenant aucun défaut, afin d'apprendre au réseau à distinguer ce qui n'est pas de la corrosion. L'approche a aujourd'hui une précision élevée pour la détection, néanmoins, le rappel est relativement faible (de l'ordre de 0.4). En d'autres termes, le nombre de faux négatifs (FN) est élevé et le détecteur « manque » des défauts. Ce résultat n'est pas problématique car il répond bien au choix initial qui a été fait de minimiser le nombre de faux positifs (FP). La corrosion ayant de nombreuses occurrences visuelles au sein d'une image donnée, le faible rappel est ainsi compensé par ce grand nombre d'occurrences.

Actuellement, il est obtenu une moyenne des précisions moyennes (mAP) de 0.9. Cette valeur confirme que l'approche est capable de détecter correctement la corrosion dans les vidéos.

Perspectives pour la gestion patrimoniale

En l'état, les résultats du projet sont positifs et permettent d'envisager une commercialisation rapide des solutions développées.

La solution actuelle est améliorée en continu à partir des données qui seront collectées au fur et à mesure. L'approche créée dans ce projet a été conçue pour avoir un caractère relativement générique vis à vis du défaut à détecter. Elle peut ainsi être étendue à différents types de défauts. Il est ainsi prévu d'étendre éventuellement ces travaux au craquelage et au cloquage de la peinture. Pour cela, un même modèle sera entraîné pour détecter plusieurs classes de défauts.

L'avantage de cette approche est que l'apprentissage de chaque classe de défaut donne des contre-exemples pour les autres classes et est susceptible de fait d'améliorer la qualité des détections.

De même, l'approche n'est pas non plus spécifique aux ouvrages d'arts métalliques et peut être étendue à différents milieux. Notamment, dans un premier temps à des milieux très similaires à ceux des ouvrages d'arts (pylône électrique, coque de bateau, . . .). Il est aussi prévu de tester, dans des développements futurs, l'approche sur des éoliennes offshore.

Le fait d'étendre la détection de défauts à de nouveaux défauts et à de nouveaux milieux va néanmoins nécessiter la création d'une collection de données annotées dédiées, ce qui représente un travail significatif. La recherche dans le domaine de la détection d'objets, sur laquelle se base l'approche proposée, est très dynamique et de nouvelles approches basées sur des annotations au pixel près semblent très prometteuses. Il y a donc pour projet de tester ces approches et de les évaluer par rapport à la solution actuelle. Ces développements se feront en parallèle de ceux visant à une commercialisation de la solution actuelle.

Bénéfices du projet pour la gestion de patrimoine

Corrosia est déjà un acteur stratégique de l'inspection des ouvrages d'art métalliques, et pourra bénéficier d'un levier technologique fort en termes de fiabilisation et de productivité. Face à une main d'oeuvre pénurique, Alnspecta apportera un outil d'aide à la décision en constante amélioration, enrichi par des data sets de plus en plus conséquents.

Aussi, les acteurs de la filière pourront bénéficier rapidement des retombées de ce développement, moyennant quelques développements complémentaires, principalement liés à l'industrialisation des codes.

VI. Perspectives générales pour l'aide à l'auscultation

Dans de nombreux cas, les désordres des ouvrages d'art sont cachés ou ne sont visibles qu'à un stade où les actions préventives, voire curatives, ne sont plus envisageables. De même, certaines caractéristiques « matériaux » ou « structures » sont impossibles à obtenir dans l'état actuel des techniques d'auscultation.

Pour optimiser les budgets d'entretien et de réparation des ouvrages d'art, aider à prioriser les ouvrages nécessitant des travaux, et identifier les méthodes et techniques de protection ou de réparation les plus adaptées, il est indispensable d'améliorer les moyens d'auscultation en développant le recours à des méthodes d'évaluation non destructive (END) fiables et validées.

Plusieurs grandes familles de besoins en END peuvent être identifiées pour une meilleure gestion d'un parc d'ouvrages :

- la reconnaissance de « géométries » cachées ou internes pour pallier l'absence ou l'insuffisance du dossier d'ouvrage ;
- la détection de défauts et désordres cachés, d'anomalies internes, de défauts de construction ;
- la détection d'affouillements au niveau des fondations des appuis en site aquatique ;
- la connaissance des caractéristiques et de la qualité des matériaux en place voire de leur durée de vie résiduelle ;
- l'évaluation de la durabilité du béton : besoin de connaissances sur les propriétés des matériaux cimentaires, leurs pathologies, l'état de fissuration du béton ;
- la connaissance de la situation des ouvrages vis-à-vis de processus de dégradation, notamment pour favoriser des travaux préventifs et être capable d'agir avant la défaillance d'un élément voire de l'ouvrage, de la vitesse d'évolution des processus et de la durée de vie résiduelle des ouvrages.

Des besoins transversaux relatifs sont également identifiés :

- disposer d'auscultation non destructive à grand rendement, de mises en œuvre rapides et exhaustives (notamment en raison des contraintes d'exploitation des voiries concernées) ;
- résoudre les problèmes d'accessibilité aux zones à ausculter, l'utilisation de moyens déportés comme les drones dans le cadre d'auscultations devant être définie ;
- augmenter la profondeur des investigations (les moyens de détection des objets internes de type armatures - radar, gammagraphie - sont par exemple actuellement limités à environ 60 cm de profondeur), être capable d'ausculter des zones géométriquement singulières (exemple des goussets), d'accès difficile (exemple des ancrages de câbles),

voire non accessibles (exemple des parements en béton des tunnels ou tranchées couvertes revêtus - revêtement architectural, de protection contre l'incendie...) ;

- connaître la fiabilité des évaluations non destructives (probabilités de non détection et de détection de faux positifs) ;
- améliorer les méthodes de calibration des auscultations, à partir d'un nombre d'échantillons à prélever dans l'ouvrage le plus faible possible ;
- pouvoir disposer de corps d'épreuve étalons ;
- faciliter le traitement d'un grand nombre de données ;
- assurer la formation, qualification voire certification des opérateurs.

La gestion du patrimoine demeure aujourd'hui un marché de niche et si la profession bénéficie heureusement des retombées technologiques issues des recherches conduites dans les autres secteurs d'activité, il existe encore peu d'actions d'innovations dédiées spécifiquement aux besoins des ouvrages d'art. Il serait pertinent d'associer la COFREND à cette démarche, qui a pour mission de former et certifier les opérateurs d'END, ce qui nécessite des centres d'examen avec des corps d'épreuve. Il serait pertinent de considérer :

- la « construction » d'un site test de validation de différentes techniques innovantes dédiées aux ouvrages de génie civil, dont le principe serait d'offrir des corps d'épreuve avec des défauts parfaitement étalonnés qui permettraient de qualifier la performance des solutions d'auscultation ;
- l'accompagnement de la professionnalisation de l'ingénierie du diagnostic, qui demeure encore en l'attente de référentiels opposables alors que les conséquences de mauvais diagnostics par excès de prudence ou par excès d'optimisme sont désastreuses en termes de sécurité et/ou de finances publiques.

L'appel à projets « Ponts connectés » a permis d'expérimenter de nouvelles actions de recherche et d'innovations sur certains besoins d'auscultation des ouvrages d'art aujourd'hui non ou mal satisfaits. Il conviendra de poursuivre ces développements pour faire progresser la précision des informations obtenues et permettre des arbitrages objectifs en matière de gestion du patrimoine.

Synthèse des quatre tables rondes de la journée de restitution du 17 septembre 2024

Quelle surveillance pour quel patrimoine ?

Quel apport de la gestion prédictive ?

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Cet article propose une restitution synthétique et structurée des échanges de la première table ronde qui s'est tenue lors de la journée du 17 septembre 2024. Cette table ronde intitulée « Quelle surveillance pour quel patrimoine ? Quel apport de la gestion prédictive ? » a rassemblé Hélène Klich, Cheffe du bureau du patrimoine routier national non concédé au ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (au sein de la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités), Nicolas Bardou, Directeur technique de Cofiroute, membre de l'Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes (ASFA), et Michel Kahan, Président de Syntec-Ingénierie.

Les échanges ont porté sur l'apport de la gestion prédictive pour la surveillance des patrimoines d'ouvrages d'art, sur ce que ce type de gestion peut apporter en termes technologiques. Comment l'utiliser ? pour quels types de surveillance et d'ouvrages ? Quels sont ses impacts dans les modes de travail ?

II. Expérimentation d'un outil de gestion prédictive sur le réseau routier national non concédé (RRNNC)

La Direction Générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités (DGITM) a expérimenté pendant cinq mois un outil de gestion prédictive sur le RRNNC. Le choix a été fait de travailler sur un échantillon d'une centaine de ponts (au sein de quatre Directions Interdépartementales des Routes - DIR) parmi les 12000 ponts du RRNNC. Au sein de cette expérimentation, la gestion prédictive consiste à utiliser l'analyse des données existantes du passé pour prédire l'avenir et, si possible, pour anticiper et optimiser les actions d'entretien.

La première étape de cette expérimentation a été de collecter des données et de les préparer pour entraîner les modèles de gestion prédictive. Une deuxième étape a porté sur la définition de scénarios d'entretien, sous contrainte ou non, avec ou sans actions préventives, pour réaliser des simulations. L'apport de la gestion prédictive par rapport aux simulations antérieures sur le RRNNC est de pouvoir descendre ici à l'échelle des éléments d'un ouvrage. Chaque élément d'un ouvrage est associé à une loi de dégradation, en fonction de son matériau et de son âge, afin de prédire la dégradation potentielle de ce composant d'ouvrage. La gestion prédictive permet d'atteindre un niveau plus fin en termes de simulation de politiques d'entretien. Elle permet également d'obtenir une programmation des travaux théoriques, une évolution des risques et des éléments budgétaires, ce qui permet d'anticiper les travaux à réaliser et de produire des éléments communicants vis-à-vis des décideurs.

Au travers de cette expérimentation, la gestion prédictive apparaît pour l'instant plus adaptée à un parc d'ouvrages et moins à un ouvrage considéré de façon individuelle. Les lois de dégradation représentent une évolution moyenne et non le comportement de chaque ouvrage, du fait de la disparité liée à l'environnement, aux matériaux constitutifs de l'ouvrage, et aux sollicitations sur chaque ouvrage. Il y a néanmoins un potentiel réel d'aide à la programmation pour le gestionnaire qui doit pouvoir massifier des types de réparations, en anticipation des désordres. Un des défis pour ce type d'outil est d'arriver à gérer les volumes d'information pour les grands patrimoines de ponts (par exemple pour une DIR gérant plusieurs milliers d'ouvrages). Plus particulièrement, le challenge réside dans la construction des lois de dégradation, qui agrègent de nombreuses données issues de politiques d'entretien passées sur un patrimoine donné. La question est de savoir jusqu'à quel point des lois de dégradation obtenues sur la base d'un patrimoine particulier d'ouvrages d'art peuvent être généralisées et transposées à d'autres patrimoines.

Si l'expérimentation par la DGITM montre qu'il est possible de faire une simulation avec les données de l'outil testé, un raffinement par familles d'ouvrages, par générations d'ouvrages et par matériaux semble encore nécessaire et une appropriation par étapes apparaît importante. La donnée est cruciale pour entraîner les modèles. Cela nécessite un investissement conséquent en temps pour renseigner les données, ouvrage par ouvrage, ce qui au final représente un des freins majeurs pour le déploiement de ce type d'outil. En ce qui concerne la DGITM, le déploiement est normalement prévu en 2026, sous réserve d'avoir progressé sur la collecte des données et d'en assurer leur fiabilité.

III. Connaissance et suivi de l'état des ouvrages du réseau routier national concédé (RRNC)

Le réseau autoroutier français représente environ 1% du réseau routier français et présente quelques 10000 ponts, parmi les plus fréquentés, les plus sollicités, et ceux qui représentent un intérêt socio-économique majeur. L'enjeu est triple pour les sociétés d'autoroute : assurer la sécurité des biens et des personnes, assurer la finalité socio-économique des ponts, et répondre à un certain nombre d'indicateurs, en tant que délégataire de service public ayant un contrat avec l'État. Les ponts du RRNC sont aujourd'hui suivis en accord avec l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEO). Dans ce contexte, l'approche prédictive et l'expérimentation de l'intelligence artificielle (IA) sont des outils qui sont en cours d'implémentation mais qui ne sont pas encore pratiqués d'une manière massive. Même si ce type de patrimoine est observé et suivi depuis plusieurs décennies, le grand volume de données n'est pas simple à exploiter. En effet, les données les plus anciennes, qui sont très intéressantes pour caractériser un état initial, sont souvent des données au format papier qui sont difficilement comparables aux mesures plus récentes. Une approche par familles d'ouvrages peut certes apporter des solutions, en supposant des fonctionnements similaires pour des ouvrages de conception proche. Néanmoins, l'environnement des ouvrages a un poids considérable dans leur comportement, primordial dans certains cas, ce qui restreint la portée de telles analyses par familles d'ouvrages pour caractériser l'évolution de l'état d'un ouvrage de manière systématique.

Sur la question de bouleversements apportées par la gestion prédictive sur la gestion des grands parcs d'ouvrages, ce sont plus des évolutions positives qui sont constatées à ce jour, comme en témoignent les expérimentations réalisées dans le cadre de l'AAP Ponts connectés. L'enjeu, pour les sociétés d'autoroute, est de pouvoir améliorer l'efficacité du suivi, de la surveillance et de la maintenance des ouvrages. Trois grands axes se dessinent :

1. L'acquisition de données sur le terrain : si celle-ci continuera d'être réalisée majoritairement au travers d'inspections de routine et d'inspections détaillées qui caractérisent l'état des ouvrages, les innovations testées montrent que cette caractérisation pourra être complétée par l'acquisition de données souvent non visible et pouvant pourtant compléter significativement la connaissance des ouvrages.
2. L'analyse et le traitement des données collectées, pour donner un éclairage complémentaire sur l'état et le comportement des ouvrages : cette analyse est faite essentiellement aujourd'hui par l'analyse des rapports d'inspection. Un objectif important est de pouvoir le faire d'une manière plus systématique, avec une fiabilité plus élevée, et en utilisant des données encore trop peu exploitées et souvent déployées au cas par cas (exemple des mesures dynamiques sur un ouvrage).
3. L'augmentation de la capacité à classifier ce traitement de données, nouvelles et existantes et la montée en compétence des modèles prédictifs : ce type de modèles commencent à exister, à être testés, pour aider à gérer des parcs d'ouvrages (via des approches budgétaires à l'échelle du patrimoine d'ouvrages). Le souhait des gestionnaires est cependant bien d'avoir des informations précises sur des ouvrages particuliers pour aider à planifier et optimiser leur maintenance.

IV. Perspectives d'évolution sur les modes de gestion pour les petites collectivités

Si l'expertise technique existe depuis longtemps pour le RRNNC et le RRNC, avec une pratique de l'entretien des ouvrages, qu'ils soient petits ou grands, la situation est plus préoccupante pour les petites collectivités, lorsque la compétence pour l'entretien des ouvrages n'existe pas. Compte tenu de la disparition de l'ATESAT (Assistance Technique fournie par les Services de l'État pour des raisons de Solidarité et d'Aménagement du Territoire) en 2014, ce service anciennement fourni par l'État aux collectivités serait à remplacer. Faut-il alors envisager des services conjoints entre collectivités ? Un service du département qui aurait la compétence pour aider les collectivités n'ayant plus cette compétence ? Quelques pistes apparaissent mais il s'agit d'un sujet économique et politique complexe qui pose une difficulté importante.

Par ailleurs, la question se pose pour les petites collectivités d'avoir accès aux nouveaux outils de gestion prédictive et de pouvoir bâtir leurs propres lois de dégradation des ouvrages d'art. L'enjeu pour les petites collectivités est d'accéder à une assistance leur permettant de définir la durée de vie résiduelle de leurs ouvrages. Si le manque de moyens ne rend pas possible la collecte et le traitement des données afin de réaliser l'apprentissage des modèles prédictifs, une option pour une petite collectivité pourrait être d'utiliser des lois de dégradation déjà existantes, en complément de la connaissance et des diagnostics réalisés sur ses ouvrages. Cela nécessitera pour l'ingénierie qui propose les modèles prédictifs de prendre suffisamment de recul et de bien identifier comment les modèles de gestion prédictive peuvent être appliqués sur différents patrimoines d'ouvrages d'art. Une autre alternative pourrait être de bâtir une offre de service se basant sur une analyse très simple donnant un signal d'alerte quand un problème survient sur un ouvrage d'art. Il pourrait par exemple s'agir de collecter des images sur des petits ouvrages et d'avoir un signal d'alerte issu de l'analyse d'images, permettant ensuite de faire appel à des moyens d'expertise plus conséquents. L'analyse d'images serait alors une piste intéressante pour apporter cette aide au diagnostic à destination des collectivités.

V. Gestion des acteurs publics et privés et perspectives de collaboration

Les compétences des acteurs publics et privés sont variées et complémentaires dans le domaine de la gestion des patrimoines d'ouvrages d'art. Certaines forces peuvent être soulignées dans les rôles de chacun. Un acteur comme le Cerema joue un rôle de premier plan pour fédérer les savoir-faire, capitaliser et diffuser les connaissances au travers des guides techniques. Il permet de rassembler les différents acteurs pour l'élaboration d'une documentation technique de référence à destination de l'ensemble de la profession. L'association « Ingénierie de la Maintenance du Génie-Civil » permet de rassembler les acteurs privés et publics de l'ingénierie de la maintenance pour promouvoir des formations spécifiques et participer à la rédaction de guides pratiques à destination des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre.

Une force des acteurs privés est la capacité à réaliser divers projets de construction d'ouvrages d'art (moins nombreux en France mais encore présents à l'étranger). Cette capacité est un atout pour avoir la connaissance opérationnelle du comportement des ouvrages d'art lors de l'élaboration des stratégies de surveillance. L'ingénierie privée n'est pourtant pas présente de manière homogène dans les différents territoires, en raison de critères économiques, et cela pose la question de l'assistance aux collectivités et du rôle des acteurs publics pour permettre le déploiement des compétences dans les territoires. Ces différents aspects ont un impact dans la répartition des tâches entre les acteurs publics et privés en ce qui concerne l'assistance (voire la pré-assistance) à maîtrise d'ouvrage (AMO) et la maîtrise d'œuvre dans les territoires.

VI. L'acculturation aux outils de gestion prédictive

L'expérimentation de la DGITM sur le réseau de quatre DIR apporte plusieurs enseignements sur l'accompagnement nécessaire au déploiement de la gestion prédictive. Pour un gestionnaire, il est important de procéder par étapes en commençant l'expérimentation sur une portion raisonnable de son patrimoine (avec quatre DIR dans le cas de la DGITM sur les quatorze services). Procéder ainsi permet une première phase d'acculturation. Des actions de communication ont été réalisées dans la communauté ouvrages d'art du ministère et certaines DIR ont également participé à des présentations de la gestion prédictive par d'autres gestionnaires, notamment avec les sociétés d'autoroute, comme APRR. Dans le cas de la DGITM, un accompagnement très fort auprès des services est d'ores et déjà envisagé pendant plusieurs années pour monter en compétences et utiliser à bon escient ces nouveaux outils.

Cette démarche d'acculturation doit également identifier de façon claire ce que les nouveaux outils de gestion prédictive peuvent apporter vis-à-vis d'une gestion classique des patrimoines d'ouvrages d'art ; et comment trouver le bon équilibre entre gestion prédictive, innovation et gestion traditionnelle. Ce sujet est en fait une préoccupation largement partagée à l'international. La communauté « ponts » de l'association mondiale de la route (AIPCR) a par exemple un thème dédié à la digitalisation des processus de surveillance et de gestion de patrimoines de ponts et dans lequel la gestion prédictive et l'intelligence artificielle occupent une place importante.

La terminologie même de la « gestion prédictive » mérite une certaine réflexion. Les sciences de l'ingénieur s'appuient fortement sur les sciences développées depuis le dix-huitième siècle jusqu'au vingt-et-unième siècle avec ensuite l'essor de l'informatique. Ces sciences de

l'ingénieur couplées avec les sciences des matériaux permettent de concevoir des ponts satisfaisant des critères d'aptitude au service et de sécurité pour une durée théorique de vie en service, ce qui correspond d'une certaine manière à la prédiction d'une durée de vie pour l'ouvrage. Néanmoins, les sciences de l'ingénieur ne permettent pas d'apporter une connaissance suffisante sur le vieillissement des ouvrages, qui se modélise difficilement et qui dépend fortement de la politique d'entretien. Cette lacune semble pouvoir être comblée aujourd'hui par l'accès aux données permis par le déploiement des capteurs sur ouvrage. L'élaboration de lois de vieillissement qui en découlent va très certainement représenter un sujet d'intérêt croissant dans les années à venir.

Comment améliorer la gestion des ouvrages dans les petites collectivités ?

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Cet article propose une restitution synthétique et structurée des échanges de la deuxième table ronde qui s'est tenue lors de la journée du 17 septembre 2024 sur le sujet crucial de la gestion des ouvrages dans les petites collectivités. Ces échanges ont rassemblé Hervé Maurey, sénateur de l'Eure, Sylvain Laval, coprésident de la commission transports, mobilité et voirie de l'association des maires de France (AMF), Eric Ollinger, chef du département de la transition écologique, de la doctrine et de l'expertise technique (TEDET) au ministère de la transition écologique, de la biodiversité, de la forêt, de la mer et de la pêche et Pascal Berteaud, directeur général du Cerema. Les échanges ont porté sur la gestion des ouvrages au sein des petites collectivités, sur leurs besoins spécifiques et sur l'apport du Programme national Ponts.

II. Une prise de conscience sur l'état des ponts

La mission d'information sur la sécurité des ponts a été créée en 2018, à la suite de l'effondrement du pont Morandi à Gênes, au sein de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable du Sénat. Elle a été l'occasion d'identifier certaines lacunes dans la gestion des ponts dans les territoires, à commencer par l'inventaire même des ponts, parfois largement méconnu par certaines collectivités ; et la prise de conscience de « ponts orphelins » pour lesquels il y avait des difficultés à déterminer la domanialité et la responsabilité de l'entretien. Le rapport du Sénat « Sécurité des Ponts : éviter un drame » rendu en juin 2019 a permis une prise de conscience par les collectivités locales de la nécessité d'une gestion adaptée de leurs patrimoines de ponts. Jusqu'alors, beaucoup d'élus locaux ne voyaient pas le pont comme un ouvrage en tant que tel mais plutôt comme un élément de la route et avaient tendance à oublier que c'est un élément spécifique de l'infrastructure routière nécessitant une surveillance adaptée. Cette surveillance est bien souvent plus difficile à mettre en place dans les petites communes où il n'y a pas d'ingénierie par rapport à des communes de plus grande taille, voire une intercommunalité, d'où une certaine forme d'inégalité inhérente aux spécificités de chaque territoire.

III. Des dépenses conséquentes au regard des budgets disponibles

Une difficulté majeure est d'ordre financière et porte sur la capacité à identifier des financements pour l'entretien des ponts. Le sujet concerne tout gestionnaire. Les difficultés sont évidemment très renforcées pour les petites communes, mais le problème se pose également pour les moyennes et grandes communes comme pour le réseau routier national. Des

circonstances aggravantes se posent comme lorsqu'il s'agit de ponts qui enjambent des voies autoroutières ou ferroviaires du fait de travaux rendus plus complexes et donc plus coûteux. Le déficit de budget se pose également pour les grosses communes, les intercommunalités, ou encore les métropoles, financièrement plus solides, dès lors qu'il y a un patrimoine conséquent d'ouvrages d'art à entretenir. Certaines métropoles ont hérité d'un seul coup des ouvrages d'art de toutes petites communes sur leur territoire avec in fine parfois plusieurs centaines voire des milliers d'ouvrages d'art concernés (ponts et murs de soutènement). Il s'agit alors de rattraper le déficit d'entretien de plusieurs décennies par manque soit de connaissance du patrimoine, soit de capacité financière. Cette situation est problématique au regard des recettes actuellement affectées pour les collectivités et du budget d'entretien conséquent qui est désormais à mobiliser.

Il y a par ailleurs des nouveaux usages qui apparaissent et qui complexifient la seule question de l'entretien des ponts, avec des demandes d'aller au-delà de la simple réparation (ajout d'un trottoir, d'une sécurisation pour le passage des vélos...). Si ces nouveaux usages sont vertueux pour la mobilité, ils représentent des coûts supplémentaires et parfois des problématiques techniques. Il ne s'agit plus simplement de rénover l'existant mais de le transformer, le reconstruire, voire de construire à côté, ce qui accentue la problématique.

IV. Un accès inégal aux ressources d'ingénierie

Les plus petites communes ont peu de marge de manœuvre pour agir du fait d'un manque de compétences en interne qui s'ajoute au défaut de budget et du manque de connaissance sur les dispositifs disponibles. Les élus locaux encourrent pourtant un risque pénal du fait des enjeux de sécurité pour les habitants et les usagers. Il y a également les enjeux de desserte locale du territoire. Il y a parfois des tout petits ouvrages de conception spécifique, hors des standards, peu larges et peu circulés, mais qui permettent de desservir un hameau, quelques maisons et pour lesquels une fermeture signifie isoler totalement une partie de la population. La question se pose alors d'une taille critique pour une collectivité territoriale pour permettre une bonne gestion des ouvrages. La jurisprudence de la voie portée stipule que les ouvrages d'art, quel que soit le maître d'ouvrage qui les a construits, appartiennent à la voie qui les porte. Le pont appartient à qui il sert. Les gestionnaires concernés ont donc la propriété de l'ouvrage et doivent assurer son entretien, ce qui représente une charge très lourde pour les plus petites collectivités, un fonctionnement difficile dans la pratique et le besoin de soutien technique. Plus qu'une taille critique des collectivités, il s'agit d'une taille critique de patrimoine justifiant une organisation et des moyens. L'enjeu est d'avoir des services techniques capables de gérer cette surveillance de façon pérenne. Il ne s'agit pas nécessairement pour ces collectivités d'assurer elles-mêmes la surveillance de tout le patrimoine, mais au moins de pouvoir passer les marchés qui vont permettre aux acteurs de l'ingénierie de la faire.

Pour faire face à ces difficultés, une bonne stratégie est de s'allier pour mutualiser la gestion des ouvrages. Même si la contrainte budgétaire reste lourde, les cas où la voirie a été transférée à l'intercommunalité sont en général plus simple à gérer car il y a plus de moyens qui sont mutualisés à l'échelle d'un territoire. A ce jour, à peu près trois quarts des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) ont la compétence voirie. C'est une compétence obligatoire pour les métropoles et les communautés urbaines, mais qui ne s'applique pas toujours sur l'ensemble du réseau. Il s'agit souvent des voiries d'intérêt communautaire, qui sont les routes principales les plus circulées. Cela ne résout donc pas le problème du petit ouvrage qui dessert quelques hameaux. Quand il s'agit de renégocier ce périmètre avec l'ensemble des communes de l'EPCI, il faut avoir le consensus avec l'ensemble des communes, ce qui n'est pas évident. Il est par ailleurs constaté que certaines communes ne

souhaitent pas transférer la compétence voirie, quand celle-ci est portée par la commune en direct.

Un appui peut également être apporté par les agences techniques départementales (ATD) dans une logique de solidarité à l'échelle départementale. En ce qui concerne les départements, ces derniers ont la gestion en propre des routes départementales, ce qui représente entre 100 000 et 120 000 ponts (soit à peu près la moitié des ponts en France). Dans le rapport annuel de l'Observatoire National de la Route (ONR), publié par l'Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM), les statistiques au niveau des ponts départementaux montrent que les départements ont doublé les crédits en €/km entre 2017 (avant la publication du rapport du Sénat) et 2022. Les départements peuvent intervenir en appui aux petites collectivités via les ATD. C'est un vecteur important et efficace pour soutenir les petites collectivités sous forme d'ingénierie, également dans d'autres domaines que les ponts. Néanmoins, tous les départements n'en ont pas, même si la plupart en sont dotés.

V. Le Programme national Ponts

Le rapport du Sénat a été le point de départ du Programme national Ponts, initié par le plan de relance en décembre 2020 et piloté par le Cerema. Ce programme a visé à accompagner les collectivités afin d'avoir une meilleure connaissance et un meilleur entretien de leurs ouvrages d'art, et répondre ainsi à la recommandation du rapport du Sénat de sortir d'une culture de l'urgence au profit d'une gestion patrimoniale des ponts.

Une première phase de déploiement (Programme national Ponts 1 entre 2021 et 2023) a été centrée sur le recensement et l'évaluation de l'état des ponts des communes de petites tailles, suivie du Programme national Ponts 2, de 2023 à 2025. Au total, environ 15000 communes ont été concernées, avec un objectif de 63000 ponts traités courant 2025. Les collectivités, même parmi les plus petites d'entre elles, ont ainsi pu faire le nécessaire travail d'inventaire. La base constituée permet à ce jour d'identifier la répartition suivante sur l'échantillon des ponts visités : 25% des ouvrages sont en très bon état, 50% dans un état correct, 25% nécessitent des travaux dont 10% des travaux vraiment lourds. Dans cette dernière catégorie, 4% nécessitent des mesures immédiates de type réduction de tonnage ou fermeture des ouvrages.

La partie travaux du Programme national Ponts est désormais en action. Il y a en septembre 2024 environ dix millions de subventions qui ont été affectées sur la cinquantaine de millions disponibles. Ce programme est en phase de montée en puissance, pour voir comment combiner les financements avec les autres possibilités de financement local : la dotation de soutien à l'investissement local (DSIL), la dotation d'équipement des territoires ruraux (DETR), le Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire (FNADT), etc., et voir comment assurer des réparations adaptées et réalisées suivant les règles de l'art.

En ce qui concerne les autres sources de financement, il est noté que la DETR ne permet pas de financer les ponts dans tous les départements. En effet, il y a dans chaque département un règlement départemental de DETR fixé par les élus. La DETR ne peut ainsi bénéficier à la réhabilitation de ponts que dans la moitié environ des départements. Les arbitrages ne sont pas simples du fait des enveloppes limitées au regard des dépenses dans différents secteurs. Se pose alors la question de la priorité des travaux sur les ponts par rapport à d'autres travaux d'une commune et celle de l'inégalité d'un département à un autre entre les différents fonds dont peuvent bénéficier les communes.

Par ailleurs, là où le rapport du Sénat avait demandé à ce qu'un fond dédié soit créé pour les ponts et qu'il soit abondé à hauteur de 130 millions d'euros par an pendant dix ans pour l'entretien des ponts, c'est un peu plus d'une centaine de millions qui ont été dégagés depuis 2020 pour l'aide aux collectivités (hors crédits de l'État pour les ponts du réseau routier national non concédé). Il est pourtant important d'aider les petites collectivités à financer les travaux sur leurs ouvrages d'art. Comme mentionné précédemment, les sommes associées sont lourdes et disproportionnées pour les petites communes lorsque le pont est une compétence communale, ce qui est le cas dans les départements où il n'y a pas eu de transfert de compétences à l'intercommunalité.

Dans ce contexte, l'objectif du Programme national Ponts a été de permettre une prise de conscience, de mettre en évidence les difficultés pour ensuite arriver à trouver des solutions, avec des financements dédiés, que ce soit la DSIL, la DETR, le FNADT, etc. L'objectif est de consommer l'intégralité de cette enveloppe d'ici la fin du programme. Il y a cet acquis, à la fois pour les petites communes et « par ricochet » pour les communes un peu plus grosses, de la prise de conscience que les ouvrages d'art représentent un patrimoine précieux dont il faut s'occuper. Le programme travaux pour les petites communes représente ainsi une machine technique qui se met en marche. L'enjeu désormais est de voir comment innover tous les territoires avec un réseau d'acteurs techniques à structurer qui soient capables d'aider les collectivités locales : les ATD, les bureaux d'étude privés, le Cerema, etc. et comment pérenniser un système d'appui vertueux et responsabilisant à l'entretien du patrimoine.

VI. Une stabilisation des dispositifs à mettre en place

Comme évoqué précédemment, il existe plusieurs dispositifs pour aider les plus petites communes en ingénierie et en financement, ce qui est indispensable. Néanmoins, ces dispositifs fonctionnent par seuil et une collectivité les dépassant, par exemple une métropole, une communauté urbaine voire une commune moyenne, peut se retrouver sans aucune aide. Cette situation conduit à des situations diverses avec des collectivités de grande taille, qui ont de l'ingénierie mais parfois un budget insuffisant et les petites collectivités qui se sentent délaissées et qui ont besoin d'être fortement accompagnées. Par ailleurs, les enveloppes de type DSIL, DETR, fonds vert, restent limitées et servent pour divers programmes, notamment pour la transition énergétique (exemple de l'enveloppe thermique des bâtiments). S'il est maintenant possible de candidater pour les ponts dans certains cas, les crédits disponibles restent limités et différents programmes d'entretien ou de modernisation sont en concurrence les uns avec les autres. Avoir des fonds dédiés est donc important pour le domaine des ponts, étant donnés les enjeux majeurs par rapport à la sécurité et aux besoins de déplacement. Il y a un sujet de fonds à développer et à stabiliser pour l'entretien de la voirie, à penser aux différentes échelles de patrimoine et de gestionnaire.

Le Programme national Ponts a permis de conduire un inventaire pour les petites communes. Le carnet de santé permet de vérifier un certain nombre de points de contrôle. Il vise à combler les lacunes sur des informations souvent manquantes. Il est nécessaire de s'astreindre à des contrôles réguliers, et le carnet de santé est un outil intéressant pensé et développé pour les petites collectivités. Un pont est un ouvrage qui vieillit, qui a une espérance de vie limitée et qu'il faut surveiller. L'idée est d'avoir un document souple d'utilisation qui permette aux élus d'assurer le suivi des visites et de l'entretien. Le programme actuel est une phase où un certain nombre de contrôles et de diagnostics sont effectués ou s'enclenchent. Ce n'est pas pour autant que ce suivi doit s'arrêter ensuite. Avoir un suivi dans le temps permet de garder la maîtrise de ce qui a été fait et des actions nécessaires à entreprendre dans le temps. Même s'il ne règle pas toutes les difficultés, il s'avère à ce titre être un outil utile. Il sera important de

stabiliser le déploiement de ce carnet de santé pour le rendre pérenne, et transformer cette expérimentation en véritable outil de gestion sur le long terme.

VII. Un équilibre à trouver entre procédures de gestion et simplification administrative

En parallèle du soutien financier et d'ingénierie, la mise en place d'un carnet de santé des ponts représente un outil de contrôle simple et souple d'utilisation. Il ne s'agit pour autant pas de mettre en place un contrôle technique de type obligatoire, et ce pour plusieurs raisons. Les ponts ne sont pas des produits standardisés comme des produits de l'industrie, telles les voitures ou les ascenseurs et il est assez difficile de définir une méthode de contrôle universelle. Chaque ouvrage demeure, témoin de sa période de construction, de son environnement et de son entretien. Sa gestion s'inscrit dans un temps long sans service de dépannage d'urgence. Il existe des méthodes de visites, des grilles par type d'ouvrages qui répondent à la spécificité des différents ponts. Le document technique de référence est l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO), qui a un statut de guide, sauf pour le réseau routier national où son application s'impose. C'est un document structurant qui donne des bonnes pratiques sur les types de visites et les fréquences associées, mais qui n'est pas obligatoire. La responsabilité des gestionnaires d'ouvrages reste cependant présente et peut être très lourde pour un maire, si un pont s'effondre. C'est une responsabilité pour faute avec faute présumée, et c'est à la collectivité de démontrer qu'elle a assuré l'entretien normal du pont. Faut-il pour autant aller encore plus loin dans le prescriptif et imposer une fréquence de visite ? Si une obligation ne semble pas réaliste à ce jour, il faut par contre s'assurer qu'un certain cadre de gestion est respecté, avec une surveillance et un entretien régulier et que les visites sont faites par des agents qualifiés. Il existe déjà une qualification des bureaux d'étude pour les visites, qui est assurée par l'Organisme de Qualification de l'Ingénierie (OPQIBI). Un travail est en cours, notamment avec le Cerema et l'IMGC, pour mettre en place une qualification individuelle des inspecteurs d'ouvrages d'art. C'est l'alliance des compétences individuelles et collectives qui est le garant de la qualité. L'objectif est de s'assurer que la personne qui effectue la visite du pont connaît particulièrement bien ce type de pont et les pathologies associées.

Néanmoins, qui dit notation, labellisation, dit une certaine contrainte et complexité. Pour les collectivités, il peut y avoir le sentiment de recommencer à chaque fois des procédures administratives, de remplir à nouveau des dossiers qui n'aboutissent pas. Cependant les procédures de qualification et/ou de certification relèvent de la profession. Le ressenti pour certains maires est de voir venir s'ajouter des demandes supplémentaires, liées à des évolutions de normes des dossiers, et nécessitant de refaire les démarches. Suivre ces évolutions pour des petites collectivités est alors très complexe. Cette « fatigue administrative » est d'autant plus ressentie que les petites collectivités sont souvent mises en concurrence lorsqu'il s'agit de candidater sur les différents dispositifs. Constituer un dossier peut être difficile du fait du manque d'ingénierie, mais il s'en suit une mise en concurrence difficile à gérer et le risque de ne rien obtenir, étant donné que les enveloppes sont limitées à l'échelle d'un territoire. Dans ce contexte, gagner en simplicité et en efficacité est un levier important pour rendre accessible ce type de procédures aux différents territoires.

VIII. L'innovation, un levier au service des petites collectivités

Un enjeu essentiel est d'être capable de bâtir quelque chose de pérenne, en matière de surveillance des ouvrages d'art, pour pouvoir intervenir de façon préventive au moment où les choses se dégradent et non lorsque l'endommagement arrive à un stade avancé. Ce passage à l'échelle, en termes de massification de la surveillance dans les territoires, est complexe car les phénomènes physico-chimiques de dégradation sont souvent cachés et se développent dans les matériaux à l'intérieur des ouvrages. Des investigations très lourdes peuvent certes être envisagées mais elles ne pourront pas être déployées à grande échelle. L'innovation peut alors être un levier pour trouver des façons plus simples et plus efficaces de surveiller les ponts, à travers des capteurs et dispositifs adaptés, afin de pouvoir agir efficacement. Même si tous les ouvrages d'art ne seront pas équipés de capteurs, il va falloir travailler sur des doctrines d'usage, et voir comment faire pour déployer l'utilisation de solutions innovantes, afin de permettre de faire une surveillance en masse des ponts, ce qui devrait apporter un certain nombre de solutions aux petites collectivités. Il peut aussi s'agir d'améliorer les lois de vieillissement utiles à tous en équipant des ouvrages référents de chaque famille.

Quelles étapes à franchir pour industrialiser de nouveaux outils de gestion ?

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Cet article propose une restitution synthétique et structurée des échanges de la troisième table ronde qui s'est tenue lors de la journée du 17 septembre 2024 sur le sujet des étapes à franchir pour industrialiser de nouveaux outils de gestion. Ces échanges ont rassemblé Pascale Dumez, directrice de Sixense Engineering, présidente de l'IMGC, Christophe Biernacki, directeur scientifique adjoint à Inria, en charge des mathématiques appliquées, professeur au laboratoire de mathématique de l'Université de Lille 1 et Séverine Belly, directrice du département prototypes et projets numériques (D2PN) au Cerema, responsable de l'activité « technologies et services numériques innovants » du Cerema. Les échanges ont porté sur les façons de déployer les différentes innovations, les différents nouveaux outils avec la question du rôle de la recherche, du passage à l'échelle et de l'industrialisation.

II. Une demande pour des nouveaux outils dans un contexte de transition

Le parc de ponts, pour lequel la dernière grande vague de construction est la période 1950-1980, est vieillissant. Cela a été mis en évidence avec le Programme national Ponts, en particulier pour les ponts gérés par les petites collectivités. Les dégradations liées au vieillissement des matériaux peuvent être aggravées en cas de surcharges, avec des ouvrages d'art parfois sollicités par des charges supérieures à celles pour lesquelles ils ont été conçus. Ces dégradations peuvent être également exacerbées par les conséquences des effets du changement climatique sur les fondations (crues, sécheresse) qui peuvent accroître la détérioration des infrastructures de transport.

Dans ce contexte, un défi majeur est d'identifier des sources de financement pour maîtriser le vieillissement et la détérioration du patrimoine, ce qui rend nécessaire d'augmenter les efforts pour inspecter et surveiller les ouvrages d'art et être capable de diagnostiquer des pathologies le plus tôt possible. Il y a une grande attente vis-à-vis des nouveaux outils pour gagner en efficacité et basculer de l'entretien curatif à l'entretien préventif, afin d'optimiser les stratégies de maintenance.

Il est cependant observé une pénurie de main-d'œuvre spécialisée, avec un manque d'ingénieurs et plus généralement de scientifiques en France (dans différents secteurs, au-delà de celui du BTP) pour répondre aux besoins de transition énergétique, numérique et environnementale. La profession est consciente de la transformation numérique en cours et a un bon accueil des nouvelles technologies qui vont transformer en profondeur les métiers et être une source d'amélioration de la productivité et de la qualité. Les jeunes sont en outre

demandeurs de l'utilisation de ces technologies comme l'IA qui sont un facteur d'attractivité pour les métiers du BTP. Dans un contexte de pénurie de main d'œuvre, les nouvelles technologies peuvent donner une autre image de l'ingénierie du BTP. Il y a néanmoins plusieurs étapes à ne pas sous-estimer pour faire en sorte que ces outils se déplient efficacement. Pour de nombreux collaborateurs, cette transition numérique et technologique représente en effet un changement conséquent, voire une menace, qui doit être accompagné, comme toute transformation profonde.

Les maîtres d'ouvrage perçoivent aussi assez positivement ces nouvelles technologies, en termes de sécurité, de fiabilité, et d'efficacité, mais ont besoin d'être rassurés sur leur fiabilité. La qualification de ces outils innovants est nécessaire pour s'assurer de leur coût, de leur fiabilité et de leur intérêt. Les données issues de ces nouvelles technologies doivent aussi s'intégrer dans les systèmes de gestion existants. En effet, les différences de précision entre technologies peuvent fortement changer la capacité de détection ou de suivi des pathologies, ce qui peut remettre en question les actuelles stratégies de surveillance. Il est pourtant nécessaire de faire converger les systèmes avec des technologies différentes et la profession est demandeuse de l'expertise d'organismes scientifiques comme le Cerema pour éprouver et certifier, voire valider ces innovations, cerner leurs limites d'utilisation et enfin faire évoluer les doctrines, in fine pour que les prescripteurs puissent faire appel à ces nouveaux outils et les déployer. La confiance entre les acteurs est un levier fondamental pour le succès de ces nouvelles technologies avec des processus de certification qui demeurent à mettre sur pied.

III. La recherche, un catalyseur de l'innovation

Penser la mutualisation des problématiques

La recherche de mutualisation part du principe que les verrous scientifiques et techniques ne sont en général pas spécifiques à un domaine (ce cas est possible, mais en réalité assez rare). Si tout n'est pas identique, il y a en effet des groupes de problématiques qui eux sont identiques et qui peuvent être identifiés. Les points durs sont souvent similaires quels que soient les domaines et c'est le « dernier kilomètre » qui est spécifique. Il y a donc tout intérêt à partager le bénéfice des avancées dans différents domaines et à mutualiser les efforts avec d'autres partenaires. Le « dernier kilomètre » est ensuite financé par l'utilisateur de la partie finale. Le domaine des ponts a dans le passé largement bénéficié des innovations portées par des industries plus puissantes. On peut illustrer ce principe avec l'exemple de la détection d'anomalies dans les tunnels. Il s'agit de détection d'images, mais avec un nombre d'images beaucoup plus faible que dans le cas de détection d'images sur internet, là où il peut y en avoir des millions. Une stratégie peut alors être, au lieu de faire apprendre les défauts à une machine, de lui faire au contraire apprendre ce qui est normal, car il y aura beaucoup d'images pour l'apprentissage dans ce cas-là. C'est alors une sortie de la normalité qui est détectée et qui permet d'arriver à des méthodes de haut rendement. Une telle approche peut s'avérer très efficace, et n'est pourtant pas spécifique aux tunnels ou aux ponts.

Il est aussi possible de s'inspirer du domaine médical qui présente de réelles similitudes avec les pathologies des ouvrages d'art. Déetecter une maladie ou un problème sur un pont peut présenter des similarités, même s'il s'agit de domaines très différents. Il y a certainement beaucoup à apprendre d'évolutions qui ont été très rapides dans le domaine de la médecine ces derniers temps (la téléconsultation, le monitoring, etc.) et un fort intérêt à les utiliser dans le domaine du génie civil.

En particulier, les systèmes dits automatiques ou pseudo-automatiques peuvent servir dès qu'il s'agit de gros ensembles d'ouvrages, mais aussi lorsqu'il s'agit de petits patrimoines dans des collectivités, disséminés dans tout le territoire car au final ils peuvent se ressembler dans une certaine mesure. De tels systèmes permettent de ne pas laisser une petite collectivité seule face à la problématique de gestion de ses ouvrages, mais de l'aiguiller en répondant à des questionnements de démarrage sans avoir à mobiliser un expert humain (quel type de « produit » pour tel type de pont). Il s'agit alors d'avoir quelques premières réponses, mais sans saturer la « bande passante » des experts humains. Cette idée renvoie à la question du passage à l'échelle et à la capacité à répondre de manière massive à une problématique donnée, avec des réponses de premier niveau automatisées pour différents groupes de ponts.

Le TRL bas, un catalyseur pour des TRL plus hauts

La recherche sur des TRL (Technology readiness level) bas est considérée à Inria pour des problématiques de recherche en amont. Il s'agit de regarder les points durs et de blocages, et d'aller au-delà des habitudes. Cette étape est dure à passer et nécessite de la recherche. C'est tout l'enjeu de trouver le verrou recherche qui pourra ensuite faire « catalyse » et conduire à l'industrialisation (cette étape n'étant alors plus liée à un développement de recherche). Il y a donc un véritable effet levier entre des TRL bas qui peuvent s'appliquer, à terme, sur des TRL haut.

On peut prendre l'exemple des ponts qui de par leur nombre important nécessitent des inspections en très grande quantité. Le verrou « recherche » peut être dans ce cas-là d'arriver à déployer « massivement » une surveillance des ouvrages sans avoir un temps humain important sur place pour chaque inspection ou instrumentation (passage à l'échelle de la solution à des coûts réduits). Il y a souvent une tendance à utiliser des systèmes « sur étagères » et déjà industrialisés. Ce type de situation est problématique si les systèmes en question sont coûteux, ou s'ils consomment des grandes ressources énergétiques, des ressources humaines importantes, etc. En ce qui concerne le traitement des données, les méthodes d'intelligence artificielle peuvent par exemple être « gourmandes » en ressources. L'installation de capteurs en grand nombre pose également question. Il n'est pas forcément utile, ni même possible d'envisager l'instrumentation de l'ensemble des ponts, étant données les ressources pour installer les capteurs puis pour les alimenter ensuite d'un point de vue énergétique.

Il est alors intéressant de rechercher des solutions alternatives, en faisant appel à des actions de recherche amont. Le TRL de l'action de recherche va être relativement bas dans ce cas-là, tout en pouvant atteindre des TRL 5 ou 6, étant donnée l'application à des ouvrages réels. Des solutions existent, mais leur déploiement est encore à un stade de recherche. Il y a par exemple le cas de micro-capteurs mécaniques, qui ne nécessitent pas d'apport d'énergie pour fonctionner. Ce type de capteurs apporte une stratégie alternative au développement de solutions électroniques classiques générant des grands volumes de données. Ne nécessitant pas d'énergie, ils peuvent facilement être déployés. Néanmoins, ils fournissent des informations beaucoup plus « frugales » qu'il convient de pouvoir caractériser et exploiter, ce qui est cependant aussi parfois une vertu par rapport à une submersion d'informations coûteuses et difficiles à traiter.

IV. Vers la démarche d'industrialisation

Une fois la phase de recherche amont passée, une nouvelle étape s'ouvre qui vise à conduire au développement de prototypes de matériels, de logiciels et de services innovants. Cette étape rassemble différents profils, notamment des experts en prototypes industriels. Il est important de se poser chaque fois la question du besoin final de l'innovation, avant d'aborder les spécifications techniques. En effet, vouloir un produit allant au-delà des attentes peut au final conduire à des solutions trop chères ou énergivores. Se poser la question du besoin lié à l'innovation doit permettre de maîtriser les coûts et les plannings, tout en évitant les écueils classiques des projets.

De la preuve de concept au prototype par l'exemple du D2PN au Cerema

Dans le cas du département Prototypes et Projets Numériques (D2PN) du Cerema, l'organisation des équipes est structurée avec des chefs de projets, des informaticiens, des électroniciens, des concepteurs mécaniques pour concevoir « de A à Z » des prototypes selon les spécifications du métier. Ce département intervient de diverses manières en appui aux équipes de recherche, et notamment en ce qui concerne l'auscultation à grand rendement dans le cas des ponts. Il peut apporter du conseil dans l'accompagnement du choix d'un outil, mais peut aussi réaliser la preuve de concept et passer à l'étape de démonstrateur. L'organisation est pensée pour permettre de passer à un mode plus industriel avec des contraintes de sécurité et de manœuvrabilité adéquates, en s'appuyant sur des équipes opérationnelles et l'expertise métier.

A l'époque du laboratoire des ponts et chaussées, les services de l'État étaient pratiquement les seuls à développer des outils d'auscultation à grand rendement. La situation a beaucoup évolué ces dernières années et le positionnement actuel du D2PN est de ne pas se positionner là où un outil fonctionne déjà et correspond au besoin. L'appui de ce service est plutôt d'être présent sur des activités de niche et de satisfaire des besoins très particuliers qu'un outil du marché ne permet pas encore. Il y a une forte attente pour des outils légers, avec des capteurs pouvant ne pas être les plus performants mais étant facilement déployables, notamment pour des petites collectivités qui ont peu de moyens. Une pratique en forte progression est d'accompagner d'autres équipes, soit pour le choix du produit et des spécifications du fait de la connaissance industrielle, soit pour acheter un produit du commerce et le faire évoluer pour qu'il réponde parfaitement aux besoins du client. Il peut s'agir de vendre en petite série des outils utilisés par les experts métier, ou encore d'être sur des activités de niche en se rapprochant des équipes recherche et en réalisant une preuve de concept (POC).

Une difficulté souvent rencontrée est le passage du démonstrateur au prototype car il faut alors changer les habitudes de métier et libérer de la disponibilité. Cette phase peut parfois être critique, au regard des délais pour être rapidement opérationnel et du nombre d'ingénieurs dans certains domaines. Les délais doivent en effet être ajustés pour permettre de confirmer les améliorations souhaitées tout en vérifiant les bonnes caractéristiques du produit et la bonne adéquation avec les systèmes précédents de mesure. Une fois cette phase passée et le matériel vérifié d'un point de vue métrologique, il est alors possible de réaliser des petites séries, soit pour un usage interne, soit pour des prestations externes.

L'industrialisation et le passage à l'échelle

Pour enclencher une démarche d'industrialisation, il est important pour une entreprise de considérer les trois questions suivantes :

Quelles sont les limites d'utilisation ?

Dans le cas des ponts, les projets d'innovation sont testés sur plusieurs familles d'ouvrages, mais souvent sur un nombre assez limité de ponts. Il est nécessaire de tester une plus grande variété de structures ou de matériaux afin d'apprécier la robustesse du projet et voir si la solution peut être utilisée à grande échelle et en conditions réelles, ou si son usage doit être limité.

Est-ce qu'on rencontre un marché ?

Les preuves de concept (POC) sont présentées aux clients, qui vont pouvoir réagir, demander à faire évoluer certaines fonctionnalités, et surtout indiquer le prix qu'ils sont prêts à mettre pour avoir cet outil.

Quel est le coût d'industrialisation des outils d'innovation ?

Ce coût est en général sous-estimé, car les outils déployés doivent être plus robustes in situ que lors des tests en laboratoire. Ils doivent également être plus faciles d'utilisation : il est important de pouvoir gérer le transfert du développement par des experts référents dans leur domaine à une utilisation par le grand public. Le coût d'industrialisation ne doit pas non plus sous-estimer le coût de commercialisation. S'agissant de solutions disruptives, il est important de pouvoir arriver à les déployer.

Une fois des réponses apportées à ces trois questions, la démarche d'industrialisation peut être enclenchée. Dans le cas où la démarche est engagée trop tôt, il y a un risque que les outils développés ne rencontrent pas de marché, ou bien que les projets soient bloqués du fait de coûts d'industrialisation dépassant les budgets disponibles.

Un point clé à considérer également porte sur les contrôles qualité. Du fait de déploiements précipités, il peut être en effet très dommageable d'avoir des défaillances de contrôle qualité pour un outil, en termes de coûts et d'impact réputationnel. Il est donc crucial d'être vigilant aux différentes phases de test et de contrôle qualité.

L'appui de la puissance publique, État et collectivités territoriales, est aussi fondamental pour accompagner dans les marchés publics la montée en puissance opérationnelle de ces nouveaux outils et méthodes.

Comment évaluer et certifier le traitement et le diagnostic par l'IA ?

CORDIER N.¹, CORFDIR P.¹, ORCESI A.¹.

¹ Cerema ITM, nathalie.cordier@cerema.fr, andre.orcesi@cerema.fr

I. Résumé

Cet article propose une restitution synthétique et structurée des échanges de la quatrième table ronde qui s'est tenue lors de la journée du 17 septembre 2024 sur le sujet de l'évaluation et de la certification du traitement et du diagnostic par l'intelligence artificielle (IA). Ces échanges ont rassemblé Quoc-Cuong Pham, directeur de recherche au CEA-LIST, responsable du service d'intelligence artificielle langage et vision, Christophe Raulet, vice-président de l'IMGC, directeur de SETEC Diadès et Cyrille Fauchard, directeur de recherche, chef de l'équipe de recherche « Évaluation Non Destructive des StrUctures et des Matériaux » (ENDSUM) au Cerema. Les échanges ont porté sur les bases de données d'apprentissage, leur accès en open source, la certification de l'IA, la massification de son usage et comment développer une IA de confiance pour le traitement et le diagnostic des ponts.

II. L'IA et la surveillance des ponts

L'appel à projets Ponts connectés, au travers de plusieurs projets lauréats, a permis la mise en commun des technologies d'IA avec l'expertise métier du génie civil. L'IA a connu un développement significatif dans d'autre secteurs, notamment celui du web et des applications grand public. Néanmoins, lorsque ces technologies sont appliquées à la construction et la surveillance des ouvrages d'art, des spécificités apparaissent et doivent être prises en compte, comprises et analysées. Les modèles d'IA doivent aussi être pertinents et utiles pour les utilisateurs. Diverses technologies se basent sur des données de différentes natures et origines : des séries temporelles issues de capteurs, des images, etc. Comment développer des modèles complémentaires disposant de ces différents types de données ? Comment les combiner au sein d'une vision intégrée de la surveillance des ouvrages ? Comment les évaluer ? Pour quels usages ? Comment constituer des corpus suffisamment représentatifs de la réalité ?

III. L'importance des bases de données

S'assurer de la qualité des données

Avoir une base de données de qualité nécessite de bien identifier l'objectif visé dès le début du projet. A titre d'exemple, une analyse d'images est pertinente si l'objectif est de détecter un ensemble de fissures sur des parements de parois en béton. Si l'enjeu est d'évaluer la gravité de ces fissures vis-à-vis du risque de corrosion, d'autres paramètres peuvent être nécessaires,

comme la localisation géographique des parements en béton, les conditions d'exposition aux sels de chlorure, etc.

La donnée peut aussi avoir différentes formes. Il peut s'agir d'images, de courbes, de températures, etc. On parle alors de données multiformes. Ces données vont constituer des bases de données, souvent de grande taille. Un point clé est alors de savoir comment gérer ces bases de données volumineuses.

Une donnée de qualité est également une donnée bien gérée dans le temps et qui peut être interrogée avec des outils mathématiques adéquats, par exemple pour détecter des biais dans les données via des analyses statistiques ou avec des outils d'intelligence artificielle (classification, segmentation, etc.).

Dans tous les cas, le jugement sur la qualité de la donnée ne peut être apporté que par l'expert de la donnée, d'une part, et par l'expert des ouvrages d'art d'autre part, qui pourront dire si la donnée est de bonne qualité en tant que base d'apprentissage.

L'accès à la donnée, enjeu de l'open source ?

L'accès en open source représente un enjeu majeur pour gagner en efficacité et éviter des développements indépendants et redondants. Il y a plusieurs sujets de réflexion concernés par l'accès en open source :

- l'acquisition de la donnée, pour capter le phénomène physique, via un ensemble de capteurs très large dans différents domaines ;
- la taille de la donnée, son stockage, l'utilisation de salles de données virtuelles (« data room »), la question de l'impact environnemental, notamment de la phase d'apprentissage des modèles IA puis de la phase d'utilisation de ces modèles ;
- la qualification et la valorisation de la donnée, sachant les différents volumes de données et les différents niveaux d'apprentissage et de qualité des algorithmes ;
- la capacité d'accès aux supercalculateurs pour exploiter la donnée et entraîner les algorithmes.

Ces différents aspects constituent une chaîne de complexité en ce qui concerne la possibilité d'un accès en open source à laquelle s'ajoute la question de la propriété intellectuelle. L'image, par exemple, est une copropriété entre le gestionnaire, le propriétaire de la structure et la personne qui a acquis l'image. Les droits d'auteur s'appliquent à partir du moment où il y a certaine forme de qualification de la donnée, c'est à dire une « valorisation substantielle » de la donnée suivant la jurisprudence des droits d'auteur. Ce point est directement lié à la capacité d'avoir des modèles en open source. Le Lab de Ressources et d'Accompagnement aux Données de la Recherche (LabRADoR) de Sorbonne Université a travaillé sur le sujet des ressources d'accompagnement aux données de la recherche. Cette structure gagnera à être associée à la réflexion sur l'open source des modèles IA pour la gestion des ouvrages d'art. D'autres services publics comme le Cerema ou la direction des affaires juridiques du ministère de l'aménagement du territoire et de la transition écologique gagneront à être mobilisés dans la réflexion sur la propriété intellectuelle. Une piste de réflexion pourrait être pour les maîtres d'ouvrage, à un certain niveau, d'accepter de céder certains droits pour basculer en open

source. La question se poserait alors de sanctuariser les données en open source, de les classer, et notamment avec quelle typologie, nature, etc. ?

Dans ce contexte, la coopétition est identifiée comme une piste d'avenir intéressante. Ce terme est utilisé dans la recherche médicale où des avancées contre le cancer ont par exemple été permises grâce à des laboratoires qui se sont unis pour la partie recherche fondamentale, de l'échelle TRL 1 à 4-5 voire 6, pour reprendre ensuite un fonctionnement indépendant durant la phase de commercialisation. Un système de coopétition entre les différents acteurs pourrait permettre de mutualiser les forces de recherche comme dans le domaine de la médecine, ou encore dans les domaines de l'aéronautique ou de l'automobile. Il ne s'agirait ni de cooptation, ni de compétition, mais d'une certaine forme de collaboration entre des acteurs économiques qui, par ailleurs, sont des concurrents. La structuration de l'appel à projets « Ponts connectés » et le rassemblement des thématiques est révélateur de ce potentiel de collaboration. Un acteur public comme le Cerema pourrait par exemple avoir un rôle de facilitateur dans cette coopétition, pour avancer sur le sujet et piloter la problématique de l'open source pour faciliter l'accès aux données.

IV. La problématique de la validation des outils d'IA

Les critères d'évaluation

Comme mentionné précédemment, l'expert métier est le seul acteur qui puisse véritablement valider l'outil d'IA, pour juger de sa pertinence et de son utilité. Des critères mathématiques d'évaluation et de validation des outils d'IA peuvent être utilisés (faux positifs, faux négatifs, etc.). Ils vont dépendre d'objectifs préalablement fixés par l'expert dans sa démarche d'expertise. A cet effet, l'IA ne doit pas être perçue comme ayant le potentiel de faire le diagnostic à la place de l'expert, mais comme un outil l'aïdant à diminuer les coûts et permettant une gestion plus préventive que curative.

La place des travaux de certification

L'IMGC est un exemple d'association menant actuellement une réflexion sur le domaine de l'IA avec l'objectif de publier des recommandations et des guides pratiques. A l'international, la communauté « ponts » de l'association mondiale de la route (AIPCR) a par ailleurs un thème dédié à la digitalisation des processus de surveillance et de gestion de patrimoines de ponts et dans lequel la gestion prédictive et l'intelligence artificielle occupent une place importante.

L'IMGC travaille également avec le ministère et le Cerema sur la certification des inspecteurs d'ouvrages. Les réflexions en cours au sein du comité sectoriel Génie-Civil de la Cofrend pour qualifier les opérateurs d'essais non destructifs (END) sont un autre exemple de démarche de certification pouvant servir d'inspiration pour les travaux de certification sur l'IA.

Une question majeure est néanmoins de savoir ce que signifie « certifier une IA ». L'IA n'est pas un véritable procédé déterministe et on parle d'algorithme heuristique. Ce sont des calculs complexes, qui ne sont pas véritablement des méthodes aléatoires, mais qui sont des calculs complexes de probabilité. Cela pose un problème de fiabilité, par rapport à l'objectif de certification étant donné qu'on n'est pas dans la certitude absolue in fine. Dans le domaine scientifique touchant aux lois régissant les matériaux ou le calcul des structures, l'utilisation de l'IA pourrait être adossée à des lois physico-chimiques vraies, les lois de fluage par exemple.

Certifier l'IA signifierait pouvoir établir des bornes, des limites de fonctionnement. Or l'IA est une science basée sur les données pour laquelle il n'y a pas de modèle mathématique maîtrisé. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les données sont utilisées, afin de former des modèles. Il est donc extrêmement difficile d'établir des limites de fonctionnement dans ce contexte. L'IA est d'ailleurs parfois qualifiée de « boite noire », pour référer à l'opacité des algorithmes d'apprentissage automatique, dans lesquels les processus internes et les décisions prises par l'algorithme ne sont pas transparents ou compréhensibles pour les utilisateurs, ni même pour les développeurs.

Le concept d'IA explicable est apparu récemment, avec des organismes de recherche qui essayent de mettre moins d'opacité dans les algorithmes utilisés. L'intelligence artificielle explicable (ou XAI) est un ensemble de processus et de méthodes qui permettent aux utilisateurs humains de comprendre et de faire confiance aux résultats créés par les algorithmes de machine learning. L'objectif de l'IA explicable dans le domaine de la recherche revient à vulgariser et permettre aux utilisateurs et aux développeurs d'interagir sur les IA avec un peu de transparence.

Une autre façon d'aborder la certification de l'IA pourrait être de s'intéresser au résultat du modèle d'IA, et de chercher à certifier le post-traitement des algorithmes. Dans le domaine du génie civil, certifier l'IA pourrait être considéré via des modèles de référence (par exemple sur des cartographies ou des fissurographies) qui soient eux qualifiés par les experts. C'est alors durant le post-traitement que seraient étalonnés et calibrés les résultats de l'IA vis-à-vis des modèles de référence. Cette démarche est par exemple considérée à la Cofrend pour les opérateurs des essais non destructifs, via l'utilisation d'éléments test avec des défauts. Il s'agirait en pratique de créer des corpus de données suffisamment représentatifs, que ce soit en apprentissage ou en évaluation, et de caractériser le pourcentage de bon fonctionnement (via le taux de faux positifs par exemple).

Comment créer l'adhésion et la confiance ?

Un premier travail, complexe, est d'assurer la représentativité des données. En effet, travailler sur une famille d'ouvrage avec un certain type de matériel (caméras, capteurs, etc.) peut biaiser les données et ne pas être représentatif de la réalité sur le terrain.

Une problématique similaire se pose sur l'évaluation qui reste encore une science très expérimentale. En effet, les fondements théoriques ne sont pas encore suffisamment solides pour pouvoir certifier un modèle d'IA avec un modèle mathématique.

La question de la confiance renvoie à la confiance des personnes qui vont exploiter l'IA. Il faut donc que l'IA soit suffisamment performante et fiable pour pouvoir être utilisée. Il y a différents niveaux suivant les attentes vis-à-vis de l'IA : pour un outil d'assistance, une performance plus ou moins élevée est admissible, à partir du moment où elle permet un gain de temps. La situation est en revanche plus compliquée si l'IA est utilisée dans des systèmes critiques qui touchent à l'aide à la décision. Cela questionne la place de l'humain, avec des questions de certification qui deviennent critiques à ce moment-là. Avancer sur la caractérisation de l'IA, à la fois sur les plans théorique et pratique, permettra d'amener de la confiance dans l'utilisation de l'IA pour des usages bien déterminés.

V. La massification de l'utilisation de l'IA

Est-ce réaliste ? Souhaitable ?

Dans le domaine des routes et des ponts, les outils d'IA auront certainement un rôle important à jouer pour traiter des quantités de plus en plus importantes de données. La massification des outils de traitement représente un réel progrès scientifique pour aider à la gestion des ponts en France, d'où l'intérêt de la recherche sur l'application des outils d'IA à la surveillance des ouvrages d'art.

Un point clé est de pouvoir gérer les données au cours du temps, et donc d'avoir des capacités de stockage, de classement, d'interrogation, pour pouvoir conserver et exploiter les données sur le long terme, au regard de la durée de vie en service des ouvrages.

Si les capacités de calcul de plus en plus grandes rendent possible le développement de l'IA, il sera néanmoins toujours nécessaire de préserver une place centrale aux experts (les bureaux d'étude, les ingénieurs et techniciens, etc.) qui sont les seuls à pouvoir valider la pertinence des outils développés.

Il serait également bénéfique d'associer plus de compréhension des phénomènes physiques au développement de l'IA, en particulier pour les problèmes d'ingénierie. Cela pourrait être d'introduire le problème physique dans les phases d'apprentissage, pour orienter l'exploitation des bases de données. Le domaine scientifique de l'inversion pourrait également être considéré. Dans la modélisation inverse on suppose qu'un système physique est modélisé par un système d'équations dont les conditions aux limites ou les paramètres sont inconnus. Dans ce cas, la modélisation inverse permet de retrouver les conditions aux limites ou les paramètres des équations à partir de données mesurées. La place centrale des données dans la modélisation inverse pourrait ainsi être exploitée pour comparer les résultats de cette approche avec ceux des modèles d'IA.

Quelle temporalité pour le déploiement de l'IA ?

La question de la temporalité peut être considérée sous différents angles. Les temporalités sont multiples et les défis concernent tout autant les progrès technologiques que l'acceptation des technologies, avec un chemin pouvant être encore assez long pour certains usages de l'IA.

L'accès aux données, dans le domaine de la gestion du patrimoine, peut notamment prendre beaucoup de temps (relativement à d'autres domaines tels que la collecte des données sur internet par exemple).

Le développement des technologies représente aussi du temps long de recherche qui est indispensable. Les fondements théoriques pour la certification ne se comptent pas à l'échelle de quelques mois, mais plutôt à l'échelle de quelques années. Certaines technologies sont déjà néanmoins suffisamment matures pour envisager un déploiement pour des solutions d'assistance, ce qui peut être intéressant à envisager à court terme.

Il y a enfin des questions d'acceptation, de mise en place des mesures concrètes et des moyens pour pouvoir expérimenter à plus grande échelle, et enfin faire adopter les modèles d'IA en tant que solutions opérationnelles au quotidien.

La place de l'humain : enjeux de formation, d'appropriation

L'essor de la donnée représente un véritable changement de paradigme. Il n'est pas question de l'ingénierie des bâtisseurs, de la construction, de la réhabilitation, ou de la maintenance, mais de l'ingénierie du numérique. C'est une façon différente d'aborder la gestion des ouvrages d'art qui commence déjà par l'acculturation. Il y a une nécessaire acculturation des décideurs, des managers, des financeurs et des instances. Ce ne sont pas les mêmes échelles de temps, d'investissements, de rentabilité, d'amortissement, etc. L'ingénierie du numérique représente une véritable dimension scientifique spécifique qui nécessite une acculturation d'une manière générale.

Du point de vue de la chaîne de formation, une première compétence à développer est celle des « data engineers », pour intervenir dans le traitement de la donnée de base. Il y a ensuite un besoin majeur de « data scientists », qui traitent la donnée. Il y a enfin les « machine learning engineers », qui interviennent dans les étapes de mise à disposition des IA de manière générale. Ces différentes compétences représentent une strate à structurer et une sensibilité à acquérir dans les différents cursus de formation. La France est bien dotée de ce point de vue mais il y a quand même une forte concurrence à l'international. La prise de conscience est récente et il y a encore du chemin pour structurer la filière de formation de l'IA.

Sur un sujet à un impact direct à la fois sur la dépense publique et la sécurité des usagers, un rôle structurant du ministère de l'aménagement du territoire et de la transition écologique serait tout à fait bénéfique au travers d'une feuille de route numérique déclinée aux enjeux de la gestion des ouvrages des routes du réseau routier national concédé ou non.

Bulletin Ouvrages d'Art du Cerema

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

<https://doc.cerema.fr/>

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'Etat et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Mise en page › Cerema ITM - DTOA

Crédits photos de la couverture › Cerema, illustration retouchée à l'aide de l'IA

Crédits photos › Projets AP'PONTS, CI3S, GeRICO, SURVOUT, VIGI, MIMIA, SOFIA, VIVOA, MIRAUAR, AUDACE, IA², SOS-A, VIASAGAX, CAHPREEX, GEOPONT, MAJ, AINSPECTA

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

www.cerema.fr › Rubrique « Nos éditions »



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN