

APPEL A PROJETS PONTS CONNECTES 2021-2023



Les avancées les plus récentes en instrumentation, télécommunication, traitement de données et intelligence artificielle, 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. L'objectif du présent appel à projet est d'évaluer, à travers des expérimentations en vraie grandeur, les capacités de ces méthodes, communément regroupées sous le vocable de « ponts connectés » ou *smart bridges*, à assurer le maintien des capacités opérationnelles des ouvrages d'art et la sécurité des personnes et des biens qui les empruntent.

0- 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. Un récent rapport du Sénat (rapport n°609 du 26 juin 2019) souligne 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.

Des pathologies peuvent être spécifiques à des familles d'ouvrages d'art et à leurs dispositions constructives, voire à des actions appliquées (climatiques ou d'exploitation). Ces pathologies se manifestent par des modifications de comportement structurel ou des propriétés mécaniques ou chimiques des matériaux constitutifs. La mise en place d'instrumentations adaptées et les traitements de données afférents, liés à une typologie d'ouvrage, doivent permettre l'identification et la quantification de pathologies présentes, et si possible leur origine. Plus précisément, ces 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 ex. surcharges, affouillements, mouvements du sol et vents extrêmes). Les méthodologies proposées doivent être techniquement pertinentes et rationnelles économiquement pour permettre leur déploiement par un gestionnaire sur un parc d'ouvrages.

1- Objectifs de l'appel à projets 2021-2022

Le développement de nouveaux capteurs, de moyens de transmission non filaires et de méthodes d'analyse de données plus performantes, basées notamment sur l'intelligence artificielle, le *big data* et *data mining*, permet d'envisager une utilisation étendue de l'instrumentation pour la gestion courante des ouvrages. Une démarche expérimentale décrite dans une feuille de route détaillée, incluant la mise en œuvre d'instrumentations sur des ouvrages représentatifs des différents stades de vieillissement d'une population technologiquement proche pouvant présenter certaines des pathologies décrites en annexe 2 et représentatifs d'une population d'ouvrages en service, permettrait de quantifier le coût et l'apport de ces méthodes. Ceci permettrait de confronter l'offre des entreprises aux besoins des maîtres d'ouvrage, et d'engager une réflexion approfondie sur les points forts et les axes à renforcer dans l'organisation et les méthodes de gestion actuelles.

Dans ce contexte, l'Etat lance un appel à projets (AAP) qui vise plus particulièrement les actions de recherche, travaux exploratoires, incubateur d'idées et études d'opportunités. Pour des projets plus matures, il peut contribuer à accélérer le développement de prototypes.

Le présent appel à projet vise 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 économes en énergie,**
- ✓ **des systèmes ou méthodes qui contribuent à la gestion des ouvrages selon les méthodes classiques, comme celles portées par l'ITSEOA (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.**

Les propositions de projet s'attacheront 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 détailleront également la maintenance à réaliser pour le maintien en état de fonctionnement du système proposé (coût, fréquence, moyens mis en œuvre...). Le coût global de la surveillance par ouvrage devra être estimé et optimisé (instrumentation initiale, maintenance, surveillance, utilisation éventuelle d'un réseau de communication, traitement des données, surveillance par un ou plusieurs opérateurs).

L'objectif final est d'offrir aux collectivités des moyens pratiques, performants et peu onéreux, contribuant à une bonne gestion de leur patrimoine. Les projets comporteront l'instrumentation d'un ou plusieurs ouvrages, réalisée spécialement pour le projet et qui servira de démonstrateur. Le ou les ouvrages instrumentés seront situés en France métropolitaine. Les propositions pourront suggérer le ou les ouvrages à instrumenter, ou à défaut le type d'ouvrage, et la nature de l'instrumentation.

2- Éligibilité des partenaires

Toute entité signataire de l'accord de consortium est partenaire du projet. Les conditions d'éligibilité des projets sont :

- Le coordinateur du projet, ou le porteur dans le cas d'un projet mono-partenaire, doit être une entreprise, et être bénéficiaire de financement dans le cadre du projet,
- Les partenaires du projet sollicitant un financement public doivent être domiciliés sur le territoire national (déclarés au registre du commerce ou détenteur d'un numéro SIRET),
- Les laboratoires de recherche publique, instituts de recherche, universités et structures de valorisation de la recherche implantés sur le territoire national peuvent être partenaires d'un consortium, mais pas coordinateur ou porteur,
- Les Collectivités Territoriales peuvent être partenaires d'un consortium, mais pas coordinateur ou porteur.
- Chaque partenaire d'un consortium sollicitant un financement public doit assumer un budget représentant au moins de 10% du budget total du projet,

- Les partenaires bénéficiaires d'un financement doivent présenter une situation financière saine, être à jour de leurs obligations fiscales et sociales, ne pas être considérés comme entreprises en difficulté au sens de la réglementation européenne
- Pour chaque entreprise partenaire, le montant total de l'aide ne peut excéder le montant des fonds propres à la date du versement. Les comptes certifiés de moins de quinze mois à la date de versement ou, à défaut, un arrêté comptable de moins de trois mois certifié par un commissaire aux comptes ou, à défaut, par un expert-comptable, seront demandés préalablement à ce versement qui pourra être effectué sous réserve d'une analyse complémentaire réalisée par le Cerema,
- Les porteurs de projet doivent présenter un plan de financement équilibré sur la durée du projet, des capitaux propres en cohérence avec l'importance des travaux et expliciter la nature et l'origine publique ou privée des financements prévus.

En outre, il est demandé qu'un consortium n'excède pas quatre partenaires formulant une demande d'aide à cet AAP.

En cas de partenariat, celui-ci sera formalisé par le biais d'un accord de consortium. Le coordonnateur assure le suivi de l'exécution opérationnelle et financière du projet. Un projet d'accord de consortium portant sur les principes liés à la réalisation du projet, et notamment sur les règles applicables en matière de propriété intellectuelle et d'exploitation des résultats, est fourni lors du dépôt du projet. En cas de partenariat, l'accord de consortium signé conditionne le premier versement des aides.

Une même organisation ou entité juridique ne pourra participer à plus de deux projets.

3- Domaines thématiques couverts par l'appel à projets

Les sujets devront s'inscrire dans un ou plusieurs des thèmes suivants (possibilité de sujets croisés) :

3.1-Sujet A.1. Ponts connectés en continu

3.11- Contexte

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-calcul avec un modèle simple et/ou partiel jusqu'à un modèle complet, analyse des risques d'évolution et évaluation de leurs conséquences). 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.

A l'exception de grands ouvrages ou une instrumentation de suivi est mise en place dès la construction, les premières mesures sont effectuées lors de l'apparition des désordres, il est alors impossible de connaître l'historique de l'évolution des phénomènes.

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.

Un sujet particulier concerne la détection de comportement discontinu et/ou de ruptures brutales qui rend l'efficacité d'une surveillance continue incertaine pour la gestion de la sécurité.

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.

3.12- Attendus des propositions

Il est 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 est 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. Cette approche pourra être étendue à une ou plusieurs familles d'ouvrages (fondation, buses métalliques, dalle BA, ponts métalliques, pont en maçonnerie...).

On pourra par exemple faire dialoguer un modèle inductif utilisé classiquement pour le dimensionnement en bureaux d'études et un modèle déductif issu de l'instrumentation. Il sera précisé la famille d'ouvrages ou les parties d'ouvrages concernées.

3.2- Sujet A.2. Apprentissage par l'instrumentation de familles d'ouvrages ou de familles de pathologies

3.21- Contexte

Ce sujet concerne l'instrumentation de familles ou parcs d'ouvrages, dont la conception initiale, le mode de construction et les facteurs de vieillissement sont proches. Il s'agit de tirer parti de l'instrumentation de plusieurs ouvrages pour optimiser l'apprentissage lié à l'instrumentation sur la famille concernée. Bien que le comportement d'ouvrages identiques ou très proches ne soit jamais rigoureusement le même, en raison notamment des conditions géotechniques, des matériaux (par exemple formules de béton), de la qualité de l'exécution, et des conditions d'exploitation, ou des événements qui peuvent survenir au cours de la vie des ouvrages, l'instrumentation d'un ensemble d'ouvrages similaires et le traitement comparatif des données est intuitivement susceptible de permettre de déceler des pathologies de même type. Une approche globale de l'instrumentation d'une famille d'ouvrages peut donc être très utile pour le maître d'ouvrage.

3.22- Attendus du projet

L'instrumentation d'une famille d'ouvrages d'art à détailler dans la proposition, devra concerner l'un des cas suivants :

- ouvrages d'une même famille (avec des modes de construction identiques, des matériaux et une géométrie proches), d'âge similaire,
- ouvrages d'une même famille mais d'âges et stades de vieillissement différents, avec développement de pathologies,
- ouvrages de conception différentes, mais qui présentent des modes de dégradation ou des pathologies similaires.

Dans chacun des 3 cas, des capteurs identiques seront installés dans des parties d'ouvrages semblables et les mêmes méthodes de mesure et d'analyse seront appliquées. Les familles d'ouvrages étudiées devront permettre d'identifier facilement les pathologies déclarées ou potentielles.

La mise en place d'une instrumentation et d'un traitement des données similaires devra permettre de comparer le comportement des ouvrages ou parties d'ouvrages étudiés, et de déceler ainsi les évolutions anormales et leurs causes probables. L'instrumentation proposée devra permettre un suivi à long (voire très long) terme des ouvrages avec la technologie de mesure. Le projet s'attachera également à optimiser l'instrumentation pour limiter les coûts d'installation, assurer la durabilité des capteurs et du système d'acquisition/transmission des données dans les conditions d'environnement. Il détaillera également la maintenance nécessaire pour maintenir le système en fonctionnement (coûts complets intégrant matériel, personnel, moyens d'accès, fréquence des interventions, ...). Le coût global de la surveillance par ouvrage (instrumentation initiale, maintenance, surveillance, raccordement éventuel à un réseau de communication, traitement des données, surveillance par un ou plusieurs opérateurs) devra être estimé et optimisé.

3.3- Sujet A.3. Apprentissage automatique basé sur l'intelligence artificielle appliquée à l'instrumentation des ouvrages

3.31- Contexte

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. L'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (IA) semble pertinente pour traiter et exploiter des grandes masses de données et réaliser un apprentissage automatique sur la base des données d'instrumentation.

3.32- Attendus du projet

Les projets devront aborder tout ou partie des thématiques suivantes :

- utilisation de l'IA pour trier et structurer l'ensemble des informations disponibles,
- application de différentes formes d'apprentissage (supervisé, non supervisé, par renforcement...) pour exploiter de façon automatique les données d'instrumentation,
- détection automatisée de comportements anormaux ou de défaillances par IA,
- utilisation de l'IA pour relier des paramètres mesurés et des indicateurs de performance des ouvrages,
- utilisation de l'IA pour mieux connaître les mécanismes de dégradations, leur localisation et les lois d'évolution sur la base des données d'instrumentation, et orienter le diagnostic et les actions de réparations ou de renforcement, sur la base de nouveaux indicateurs de suivi.

NB : Le sujet de l'intelligence artificielle appliquée à l'imagerie sera traité dans le sujet B

3.4- Sujet B.1. Surveillance des ouvrages d'art par télédétection

3.41- Contexte

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. Par exemple, en interférométrie satellitaire, les images Sentinel-1, gratuites, peuvent s'avérer suffisantes pour des ouvrages de taille conséquente, mais pour des analyses plus fines, des images radar à très haute résolution spatiale (THRS) issues de satellites commerciaux seront plus adaptées. Les méthodes de télédétection peuvent s'appliquer à diverses échelles, pour la surveillance d'ouvrages à l'échelle d'un territoire, ou d'ouvrages de grandes dimensions.

NB : On distingue la télédétection où les capteurs ne sont pas sur l'ouvrage, de la télésurveillance où les capteurs sont implantés sur l'ouvrage.

3.42- Attendus du projet

Parmi les enjeux à traiter :

- Détection et localisation des ouvrages sur un territoire, recensement de leurs caractéristiques géométriques et structurelles,

- 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,
- Développement d'une méthodologie de suivi d'ouvrages d'art par interférométrie radar utilisant des images Sentinel-1 et/ou des images à très haute résolution spatiale (TerraSAR-X ou Cosmo-SkyMed).
 - Qualification des données produites par interférométrie radar utilisant des images Sentinel-1 et celles utilisant des images à THRS.
 - Comparaison et complémentarité avec des données issues de l'instrumentation classique des ponts.

Sur tous ces sujets, on s'emploiera à estimer la précision accessible et à identifier les limites d'utilisation des techniques employées en fonction des caractéristiques des ouvrages à surveiller

3.5- Sujet B.2. Inspection par imagerie des ouvrages d'art

3.51- Contexte

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 pourra 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 de la reconnaissance des formes, permettrait de reconnaître, quantifier et classer les désordres sur les ouvrages et leurs équipements.

3.52- Attendus du projet

Les projets devront traiter 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'intelligence artificielle et les techniques d'acquisition de données numériques pour accompagner utilement un opérateur dans le cadre d'inspections détaillées (au sens de l'ITSEOA).

3.6- Sujet C. Capteurs innovants ou usage innovant de capteurs pour la surveillance des ouvrages d'art

3.61- Contexte

L'objectif de ce sujet est de favoriser l'implantation sur ouvrages d'art de capteurs innovants en cours de développement (TRL 5 à 7), qui permettrait de répondre à des besoins de surveillance aujourd'hui non satisfaits.

Il est question 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.

3.62- Attendus du projet

Les projets répondront à tout ou partie des fonctionnalités suivantes :

- localisation des désordres cachés dans les câbles de précontrainte (ancrages, défauts d'injection,...),
- détection des fissures de fatigue dans les ouvrages métalliques,
- détection préventive et automatisée de processus de dégradation du béton armé, notamment pour les murs de soutènement,
- détection préventive et automatisée de processus de dégradation des ancrages des dispositifs de retenue,
- détection préventive et automatisée des dégradations de joints de chaussée,
- prévention des surcharges sur des itinéraires routiers, notamment à l'abord des ouvrages d'art sensibles,
- détection des affouillements de fondations d'appuis en site aquatique,
- mise en place de capteurs autonomes en énergie ou alimentés par onde électromagnétique à la demande.

4- Déroulement de l'appel à projets

L'ensemble des documents relatifs à l'appel à projets 2020 sont disponibles et téléchargeables sur le site du Cerema : www.cerema.fr/pontsconnectes

4.1- Éligibilité du projet

Un jury évaluera et sélectionnera les projets sur la base d'un dossier dont le contenu est défini dans le dossier de candidature¹¹. Pour être éligible, le projet déposé à cet AAP doit satisfaire aux critères suivants :

- Le projet vise le marché de l'instrumentation, de la surveillance et de la gestion des ouvrages d'art tel que décrit ci-avant, et est clairement rattaché à l'une ou plusieurs de ces actions (A1 à C)
- Les travaux antécédents sur lesquels se fonde le projet déposé à cet AAP est d'un niveau de maturité compris entre un Technological Readiness Level (Indice de maturité)- de niveau 3 et 6 (cf. échelle de niveau de maturité TRL ci-dessous),
- Les dépenses du projet déposé à cet AAP incluent des activités d'un TRL de niveau 6 au moins,
- L'un des objectifs finaux du projet est de démontrer la capacité du porteur à aller vers la commercialisation des solutions ainsi développées (soit directement à des consommateurs finaux, soit à d'autres entreprises),
- Les projets de déploiement de ces solutions ne sont pas éligibles à cet AAP,
- La durée du projet ne devra pas excéder 32 mois.

4.2- Financement

L'enveloppe allouée à cet appel à projet est de 4 000 000 € TTC. L'aide maximale allouée à un projet ne pourra pas dépasser 400 000 € TTC. Le coût total d'un projet doit être d'au moins 200 000 € TTC. -

A.4.21- Coûts éligibles et retenus

Les dépenses ne peuvent être prises en compte qu'à compter de la date de notification de la convention. Les dépenses engagées avant la notification des conventions d'aide par le Cerema restent à la charge des bénéficiaires.

Les coûts éligibles peuvent couvrir :

- ✓ des achats, des amortissements et développement de matériels strictement liés au projet,
- ✓ des essais en laboratoire ou sur sites,
- ✓ les dépenses de personnels (à l'exclusion des personnels permanents pour les organismes publics et les collectivités territoriales),
- ✓ les déplacements ou missions directement liés à l'exécution du projet,
- ✓ autres,
- ✓ frais annexes).

L'ensemble des coûts relatifs au projet doit être détaillé dans le dossier de demande d'aide. Dans le cadre de l'instruction du projet, le Cerema vérifie les coûts et la classification des dépenses selon leur nature Recherche industrielle (RI) ou Développement expérimental (DE), d'après les coûts et classifications proposés par le consortium.

Les frais annexes sont les dépenses qui concourent à la réalisation du projet sans toutefois pouvoir être directement attribuées à celui-ci. Le montant forfaitaire de ces dépenses est plafonné à 20% des coûts de personnel permanent pour les organismes privés, et des coûts totaux éligibles pour les organismes publics.

Les dépenses déjà soutenues par un autre financement public ne sont pas éligibles à l'assiette des travaux dans le cadre de cet appel.

4.22Taux d'aide

4.221 – cas des bénéficiaires privés du secteur concurrentiel

Le financement apporté par l'Etat aux organismes privés se fait par des subventions. La somme des financements publics doit respecter le taux d'aide maximal fixé ci-après.

Sur la base de la classification des dépenses éligibles selon leur nature Recherche industrielle (RI) ou Développement expérimental (DE), l'aide maximum doit rester dans la limite des taux de financement au sens de la réglementation européenne.

Pour cet appel à projets, les taux maximums de financement sont les suivants selon la Catégorie d'entreprise au sens communautaire pour les activités de Recherche Industrielle (RI) et de Développement Expérimental (DE) :

Taux de subvention	RI	DE
Grandes entreprises	40,00 %	30,00 %
Moyennes entreprises	50,00 %	40,00 %
Petites entreprises	60,00 %	50,00 %

4.222 – cas des bénéficiaires du secteur public

Le financement apporté par l'État aux organismes du secteur public a la forme de subvention. Le taux d'aide est égal à 100% des dépenses éligibles.

4.3- Calendrier de l'appel à projet

- ✓ 16 décembre 2020 : Diffusion de l'appel à projets,
- ✓ 15 février 2021 à 12 heures : clôture de l'appel à projets,
- ✓ 15-16 mars 2021 : Audition des porteurs de dossiers pré-sélectionnés,
- ✓ 15 avril 2021 : Notification et publication des projets retenus,
- ✓ A la fin du projet et au plus tard le 30 novembre 2023 : Clôture du projet, réception de l'ensemble des livrables.

NB : Le dépôt des dossiers se fera uniquement par mail à l'adresse suivante : depot-pontsconnectes@cerema.fr

Un accusé de réception confirmant le dépôt sera adressé par e-mail aux déposants.

4.4- Composition du dossier de candidature

1 Le Dossier de candidature du projet, selon la trame détaillée fournie dans le fichier « Dossier-de-candidature-nom projet », d'une longueur maximale de 5000 mots (environ 12 pages A4 en Arial 11 pts), rédigé uniquement en français, et remis au format PDF. Les principales informations attendues sont :

- ✓ coordonnées du porteur et des partenaires du projet,

- ✓ nom ou titre, acronyme et durée du projet,
- ✓ budget détaillé par nature de coût et partenaires et demande de financement,
- ✓ diagramme de Gantt ou planning de réalisation du projet (tâches avec dates de début et fin, enchaînement des tâches, contribution de chaque partenaire à ces tâches),
- ✓ la description du projet, qui présentera notamment :
 - le contexte,
 - la description du projet, son rattachement aux sujets (A1, A2, A3, B1, B2 ,C), le ou les types d'ouvrages concernés,
 - la méthode de validation de la méthodologie proposée,
 - son applicabilité dans le secteur des infrastructures, y compris les cas d'usages et modalités d'exploitation,
 - les potentialités de développement,
 - les livrables attendus (preuve de concept, rapports d'essais, publications, etc.),
 - le protocole de validation de la méthode (instrumentation et traitement des données), en précisant notamment le nombre et le type d'ouvrages devant être instrumentés ; ces ouvrages peuvent être proposés par le consortium.
- ✓ Le plan d'exploitation et de diffusion des résultats du projet,
- ✓ une description de chaque organisme partenaire expliquant notamment ses apports et compétences pour le projet et ses références,
- ✓ les contributeurs de chaque partenaire, avec noms, prénoms, titres, fonctions et 8 lignes de biographie,
- ✓ la bibliographie et les références.

Seront en outre joints en annexe (en sus de la limite de longueur du dossier) :

- ✓ **la fiche de synthèse technique** « Fiche de synthèse ponts connectés-nom projet » dûment remplie au format excel, conforme aux exigences de l'annexe 1 du présent document,
- ✓ **les conditions administratives générales lues et approuvées par le mandataire et remises au format PDF,**
- ✓ **le fichier des coûts du projet « Coûts projet-nom projet » dûment rempli au format excel,**
- ✓ **Pour chaque partenaire du consortium, les éléments administratifs suivants :**
 - la déclaration sur l'honneur relative aux exclusions (interdictions de soumissionner),
 - les documents et renseignements permettant de vérifier l'aptitude de l'entreprise à exercer l'activité professionnelle, sa capacité économique et financière ainsi que ses capacités techniques et professionnelles. L'entreprise peut s'appuyer sur des sous-traitants ou autres formes juridiques,
 - une déclaration du chiffre d'affaires de l'entreprise pour les trois derniers exercices (intégrée dans le formulaire DC2 de déclaration du candidat individuel ou du membre du consortium),

- une déclaration appropriée de banques ou preuve d'une assurance pour les risques professionnels,
- l'effectif moyen annuel pendant les trois dernières années.

NB : Les fichiers seront nommés en remplaçant la partie « nom projet » du nom du fichier téléchargé par le vrai nom du projet présenté.

Seuls les dossiers complets pourront être retenus.

4.5- Déroulement de la sélection

Les dossiers pré-sélectionnés par le jury feront l'objet d'une audition les 15-16 mars 2021.

Le porteur du projet sera convoqué pour une audition d'une durée de 20 minutes.

Le jury sera composé de représentants du Cerema et de ses Ministères de tutelle.

Le jury se réserve le droit de faire appel à l'avis d'experts externes. Les décisions du jury seront sans appel.

Le jury retiendra au maximum une vingtaine de projets, couvrant si possible les différents sujets évoqués.

Les projets seront sélectionnés selon les critères suivants :

1) Pertinence au regard des orientations de l'appel à projets.

- adéquation de la proposition aux objectifs ;
- qualité de la proposition en termes de créativité scientifique, d'innovation, de développement économique ;
- pathologie(s) détectable(s) et niveau de précision attendue sur le degré de développement de la pathologie ;
- démarche de validation proposée ;
- maturité du projet (indice TRL), incrément de l'indice TRL (Technology Readiness Level) dans le cadre du projet.

2) Qualité du partenariat et de l'organisation du projet

- apports, compétences, savoir-faire et qualification des partenaires. ;
- ambitions et engagement des partenaires, implication de leurs personnels ;
- qualité des matériels disponibles ;
- équilibre et complémentarités au sein du consortium ;
- management et coordination, qualité de la gouvernance ;
- pertinence de l'organisation des tâches et du calendrier.

3) Bénéfice collectif

- maturité du projet à l'issue des développements financés.
- méthodes et résultats permettant une amélioration des politiques de gestion.
- gains économiques et sociétaux en matière de gestion de patrimoine.
- coût prévisionnel de la mise en œuvre opérationnelle sur un ouvrage du dispositif ou de la méthode développée (intégrant la mise en œuvre initiale et la maintenance, le matériel, le personnel, les moyens d'accès, l'alimentation, ...) ;

4.6- Publication des informations de projets retenus

Durant la phase de dépôt et d'analyse des dossiers, les échanges avec le jury et les délibérations resteront confidentiels. Après notification, les éléments des dossiers retenus deviendront publics. Le porteur du projet autorise le Cerema à publier sur son site internet ou sur tout autre support :

- ✓ le nom complet du projet et son acronyme,
- ✓ le résumé du projet et les résultats attendus,
- ✓ les dates de début et fin du projet,
- ✓ le budget du projet ainsi que la contribution de l'Etat.

4.7 – Focus sur l'accord de consortium et la propriété industrielle

L'accord de consortium doit préciser :

- ✓ les apports des partenaires, connaissances antérieures et résultats du projet,
- ✓ les responsabilités de chaque partenaire,
- ✓ le partage de la propriété industrielle des résultats du projet.

Avec l'accord du maître d'ouvrage, l'instrumentation financée par ce projet pourra rester en place à l'issue du projet pour poursuivre la collecte de données. Dans le cas contraire, elle devra être démontée.

Le projet d'accord de consortium sera remis avec le dossier de candidature. Il devra être signé au plus tard quinze jours après notification de l'acceptation du projet. Il comprend l'approbation des conditions administratives générales.

L'entreprise partage les méthodes et les résultats avec les autorités publiques représentées par le Cerema pour l'élaboration des règles de l'art en matière de gestion de patrimoine.

4.8- Protection des données personnelles – RGPD

Conformément à la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978, le porteur du projet pourra à tout moment bénéficier d'un droit d'accès, de rectification, et d'opposition à l'ensemble de ses données personnelles en contactant le Cerema. Les dispositions du RGPD seront respectées.

5- Mise en place et suivi du projet

5.1- mise en place d'une convention

Une convention sera mise en place sur la base de la réponse du consortium (volet technique et financier, planning) et des clauses administratives générales

5.2- suivi technique

Un suivi technique sera assuré par le Cerema conformément aux conditions administratives générales

5.3- suivi financier

Le financement sera versé de la manière suivante au coordonnateur du projet :

- ✓ une avance de 30% à la notification du projet et après signature de l'accord de consortium,
- ✓ deux acomptes intermédiaires de 25% chacun après remise et acceptation de rapports d'étape et des relevés de dépense. Ces documents devront être remis au plus tard à la fin du 10^e et du 22^e mois après la date de notification et seront validés au plus tard le 12^e et le 24^e mois,
- ✓ le solde de 20% sera versé après la validation du rapport final et du relevé final de dépenses.

Les vérifications (rapport commissaires aux comptes, etc,...) nécessaires sont définies dans les conditions administratives générales.

5.4- Composition du rapport final de clôture

Il est attendu un rapport conclusif qui établira à partir des éléments du dossier de projet présenté à l'appel à candidature les résultats et avancées obtenues.

Le rapport sera d'une longueur minimale de 5000 mots (environ 12 pages A4 en Arial 11 pts), rédigé uniquement en français, remis au format PDF et d'une longueur maximale de 10 000 mots. Il comprendra :

- ≠ la description succincte du projet initial avec ses principales ambitions
- ≠ les livrables (preuve de concept, rapports d'essais, publications, etc.) produits qui seront joints en annexe,
- ≠ les principaux résultats et avancées obtenues, leur validation, l'écart aux prétentions initiales, les raisons de ces écarts
- ≠ Les développements à poursuivre, les verrous technologiques à lever,
- ≠ les potentialités de développement actualisés, l'échelle de temps pour leur industrialisation
- ≠ le retour d'expérience du projet qui répondra aux questions suivantes:

1- Forme du rendu de l'instrumentation

- Sous quelle forme les mesures enregistrées ont-elles été restituées au maître d'ouvrage gestionnaire. Quelles améliorations sont à prévoir ?

2- Disponibilité et durée de vie du dispositif

- Quelle a été la durée pendant laquelle le dispositif est resté en place sur l'ouvrage ?
- Quelle a été la durée de mise en place du dispositif sur site ? Le nombre d'interventions sur site pour maintenance ?
- L'installation a-t-elle fait l'objet de dégradations volontaires ou involontaires ?
- Quelle a été la durée cumulée des interruptions d'acquisition des données ? de transmission des données ?

- A la clôture du projet, à quelle durée de vie résiduelle estimez-vous l'installation mise en place ? (à détailler par composants : capteurs, centrale d'acquisition, moyens de communication, outils d'analyse)

3- Coût de l'installation effectivement mise en place

- Coût initial hors recherche et développement (y compris moyens d'accès)
- Coût de maintenance constaté (sur site et au siège)
- Coûts de fonctionnement constatés (transmission, stockage des données, exploitation des mesures)

4- Place de l'instrumentation dans la gestion des ouvrages

- Pour le (ou les) ouvrages instrumentés, quelle place donnez-vous à l'instrumentation réalisée dans les processus de gestion actuels de ces ouvrages ?
- Quelles modifications des méthodes de gestion des ouvrages vous paraissent souhaitables pour tirer pleinement parti de cette instrumentation en analysant le rapport coût/bénéfice de l'instrumentation ?

5- Bénéfice collectif

- Quelles méthodes et résultats sont suffisamment généralisables (non liés au savoir-faire exclusif d'une entreprise) pour justifier une modification de la réglementation ou des règles de l'art en matière de gestion de patrimoines d'ouvrages d'art (pour quel type d'ouvrage, quelle pathologie,...).

Nota Bene n°1: en fonction des sujets traités certains points ou certaines questions pourront s'avérer être sans objet.

Nota Bene n°2 : un rapport intermédiaire sera exigé au bout d'un an pour établir l'avancement et le phasage des travaux à venir. Son sommaire s'inspirera du sommaire attendu par le rapport final avec une longueur réduite de moitié.

Annexe N°1 : Fiche de synthèse technique à remettre en format excel

Explications

Fiche de synthèse

Nom du projet :

Objectif principal visé :

Sécurité des usagers/ sécurité des structures/ gestion d'un patrimoine d'ouvrages / instrumentation de familles de pathologie

1- Types d'instrumentation

I1 - de type « haute surveillance » disponible à 100%, capable d'alertes en temps réel (défaillance du système de mesure et de transmission non tolérée)

I2 - standard (pas d'alerte temps réel, transmission ou non des informations en temps réel)

Ix – à préciser

2- Sensibilité à un arrêt momentané de l'instrumentation

S1 - pas de sensibilité (basé sur la mesure d'un état de la structure)

S2 - sensible (basé sur la détection d'un événement – ex : rupture de fils, chocs)

Sx – à préciser

3- Principe de la méthode de détection des événements ou pathologies

M1 - Comparaison du comportement de la structure avec un modèle théorique

M2 - Comparaison des sollicitations à des sollicitations admissibles (surcharges, vent, T°, crues)

M3 - Identification d'une modification de comportement par apprentissage faisant appel ou non à de l'IA

M3.1 - apprentissage dont la validité est limitée à un ouvrage

M3.2 - apprentissage dont la validité est étendue à une famille d'ouvrages

Mx – à préciser

4- Type de pathologie visées ou exclues

T1 - perte de résistance globale (flexion longitudinale, effort tranchant, appuis, suspensions)

T2 - perte de résistance locale (flexion transversale)

T3 - défaut locaux (épaufrures, corrosion armatures, appareils d'appui, joints de chaussée)

Tx – à préciser

5- Types d'acquisitions

A1 - Mesures par capteurs installés sur la structure

A2 - Mesures par capteurs installés en dehors de la structure (Météo, câbles piézo dans la chaussée)

A2 - Mesure par moyens déportés (caméras, images satellite)

Ax – à préciser

6- Types de traitements

T1 - par algorithmes non confidentiels (explicitables par logigramme) potentiellement certifiables

T2 – par algorithmes confidentiels (non explicitables par logigramme) potentiellement certifiables

T3 – faisant intervenir une méthode de type « intelligence artificielle »

Tx – à préciser

7- Familles d'ouvrages ou zones d'influence

F1- Fondations

F2- Détection d'affouillement

F3 - Buses métalliques remblayées

F4 - Cadres et portiques en béton armé

F5 - Dalles en béton armé

F6 - Dalles en béton précontraint

F7 - VIPP

F8 - PRAD

F9 - Caissons BP (encorbellement successifs et par poutre de lancement)

F10 - Ponts métalliques anciens

F11 - Bi-poutres et multipoutres mixtes

F12 - Ponts suspendus

F13 - Ponts haubanés modernes (après 1975)

F14 - Ponts en maçonnerie

F15 - Murs BA

F16 - Murs en maçonnerie

F17 - Remblais renforcés (type terre armée)

F18 - Zones d'influence de murs de soutènement

Fx – à préciser

8- Niveau de durabilité estimé des composants de l'instrumentation (MTBF, mean time between failure / temps moyen entre panne)

D1 - inférieure à 5 ans

D2 - entre 5 et 10 ans

D3 - supérieur à 10 ans

Le coût de maintenance annuel associé doit être inférieur à 10% du coût global de l'instrumentation.

9- Niveau de maturité technologique du dispositif

M1 – indice de maturité technologique TRL (Technology Readiness Level) initial (à la date de l'appel à projet)

M2 - indice de maturité technologique TRL visé (à la clôture du projet)

Annexe N°2 : désordres par familles d'ouvrages ou parties d'ouvrages

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, qu'il convient de suivre ou détecter par mesures directes ou indirectes :

- Les actions climatiques : vents extrêmes, (variation de) gradients thermiques, courant (affouillements), avalanches (en montagne),
- 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, disjointoiement),
- 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.

Les affouillements ont ici une place à part car ils ne sont généralement repérables que par une inspection subaquatique ou une bathymétrie. De même les fissures de fatigue dans les structures métalliques sont souvent difficiles à détecter avant d'avoir une ampleur critique, sauf par des moyens sophistiqués .

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'aciers 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.

Ces pathologies sont actuellement identifiées lors des inspections périodiques par la détection de défauts d'alignement, de déplacements, de fissures et, pour les parties métalliques de déformations plastiques, de cloquages et de voilements.

L'instrumentation liée à ces pathologies et utilisée dans le cadre de la haute surveillance ou de la surveillance renforcée, 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 spécifiques. Cette famille comprend notamment :

- les ruptures de fils ou de torons (précontrainte extérieure, suspentes, haubans),
- la perte de tension ou la surtension de câbles (suspentes, haubans),
- 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.

1.1 Fondations

1.1.1 Généralités

Les désordres concernant les fondations ont un impact direct sur la structure. Cet impact va de la mise en butée du tablier à un effondrement de l'ouvrage (très peu de structures survivent à la défaillance d'un appui). Les questions sont alors les suivantes :

- Les mouvements constatés peuvent-ils induire des problèmes structurels et lesquels ?
- Les mouvements constatés peuvent-ils évoluer vers une défaillance brutale ?
- Les mouvements constatés peuvent-ils conduire à une rupture de la fondation elle-même (fondations profondes) ?

1.1.2 Fondations superficielles

Pour ce type de fondation, il y a un risque de mouvement parfois non évalué lors de la conception (poussée des terres derrière une culée, etc., ce qui renvoie à la note de calculs). Une défaillance peut également survenir suite à une instabilité de pente ou à un grand glissement autour de la fondation (besoins de vérification par calculs, de mesures de déplacement, suivi par inclinométrie).

1.1.3 Fondations sur pieux

Les désordres peuvent être liés à des défauts de dimensionnement (mauvaise prise en compte de la souplesse de la fondation, frottements négatifs et fluages horizontaux sous-évalués ou apparus suite à des chargements ou terrassements ultérieurs à la construction). Il y a alors des besoins de vérification par calculs, associées à des mesures de déplacement et un suivi par inclinométrie autour des pieux.

Pour les fondations sur pieux bois mis à sec par l'évolution des niveaux d'étiage ou des nappes phréatiques, il y a un besoin de calculs et de mesures de déplacement.

1.1.4 Affouillements

Les affouillements sont des phénomènes dangereux pouvant conduire à un effondrement brutal de fondations superficielles mais aussi de fondations sur pieux (quand l'ancrage et/ou le maintien latéral deviennent insuffisants).

Il y a un risque de colmatage des affouillements par des matériaux lâches lors de la décrue : la fondation est fragilisée sans signe apparent.

Ces phénomènes donnent lieu à des diagnostics et la mise en place de protections avant l'événement de crue et éventuellement à des réparations après. Il est éventuellement possible d'effectuer des mesures de niveaux d'eau et de vitesses de courant lors de la crue (afin de coupler ces mesures à une interdiction de la circulation sur l'ouvrage).

1.2 Buses métalliques remblayées

Ces ouvrages parfois de grandes dimensions ont été utilisés en grande quantité il y a quelques dizaines d'années, leur fonctionnement réel faisant fortement intervenir un

comportement sol/structure. Le choix et le dimensionnement des buses a fait l'objet de méthodes diverses. On trouve une littérature sur le sujet (Guide SETRA de Septembre 1981 ; Guide d'entretien et réparation de Décembre 1992).

Les aspects suivants sont à considérer en particulier :

- sensibilité à la corrosion (en particulier les zones d'assemblages boulonnées),
- forte interaction sol/structure (importance du comportement des remblais techniques),
- méthodes de dimensionnement variées,
- sensibilité aux affouillements.

En termes de recalcul, il est possible d'appliquer les méthodes traditionnelles afin de déterminer une épaisseur résiduelle minimale. Des méthodes plus élaborées aux éléments finis faisant intervenir le comportement sol/structure avec des éléments contact et des lois de comportement avancées doivent pouvoir permettre d'explorer et de préciser le comportement de l'ouvrage endommagé.

Les principes actuels de surveillance sont les suivants :

- mesure des épaisseurs d'acier (par ultrasons ou perçage), mesure de galvanisation résiduelle,
- surveillance de la géométrie générale (ovalisation et profil en long), sur la base de Lidar ou distance-mètre laser fixes.

1.3 Cadres et portiques en béton armé (PIPO et PICF dans la typologie du SETRA)

Ces ouvrages sont généralement très robustes, la robustesse peut être modérée dans le cas d'utilisation de préfabrication modulaire.

Ces ouvrages sont cependant sensibles aux problèmes de matériaux (vieillessement du béton et oxydation des aciers) et aux déformations imposées (mouvements d'appuis et de remblai).

Les principes courants d'instrumentation sont les suivants :

- suivi d'ouvertures de fissures,
- instrumentation d'armatures,
- suivi de la géométrie globale de la structure. Dalles en béton armé (PSIDA dans la typologie du Setra).

1.4 Dalles en béton armé (PSIDA dans la typologie du Setra)

La problématique pour cette famille d'ouvrages est proche de celle des cadres et portiques avec une sensibilité aux tassements d'appuis et aux mouvements horizontaux de culées.

1.5 Dalles en béton précontraint (PSIDP dans la typologie du Setra)

La problématique est assez proche de celle pour les dalles en béton armé. Il s'agit d'ouvrages robustes quand ils ont été conçus et dimensionnés suivant les us et coutumes et quand la précontrainte est bien injectée.

Ces ouvrages sont sensibles aux tassements d'appuis. Il peut y avoir des problèmes de matériaux en cas d'aciers de précontrainte sensibles à la corrosion fissurante et/ou en cas de mauvaise injection.

Les principes d'une instrumentation dans le cas de pathologies du béton précontraint sont les suivants :

- suivi d'ouverture de fissures,
- surveillance acoustique de la précontrainte,
- suivi de la géométrie globale de la structure.

1.6 Viaduc à travées indépendantes à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension (VIPP dans la typologie du Setra)

La sensibilité et la robustesse de ces ouvrages peuvent être très variables suivant leur génération, leur conception, les règlements de calculs employés pour leur dimensionnement ainsi que la précontrainte utilisée et la qualité de son injection. Il existe une littérature détaillée concernant la pathologie de ces ouvrages. Suivant les cas, il est possible de rencontrer :

- une diminution progressive de la précontrainte par corrosion,
- un risque de rupture fragile en flexion et ou à l'effort tranchant.

Les ouvrages présentant des pathologies de ce type doivent faire l'objet de diagnostics détaillés incluant des expertises concernant les matériaux et un recalcul précis.

Une instrumentation de surveillance peut être mise en place (en lien avec une analyse des risques de comportements fragiles) :

- surveillance acoustique de la précontrainte,
- instrumentation de fissures,
- surveillance de la géométrie des poutres.

Cette instrumentation peut être utilisée lors de chargements progressifs afin d'affiner les modèles numériques en faisant apparaître le début de comportements non linéaires.

1.7 Pont à poutres précontraintes par adhérence (PRAD dans la typologie du SETRA)

Ces ponts sont proches des VIPP mais réalisés avec des poutres préfabriquées en usines et précontraintes par pré tension. Ces ouvrages présentent peu ou pas de pathologie actuellement. Les poutres sont sensibles aux chocs de poids lourds lorsque le tirant d'air est faible.

1.7.1 PRAD isostatiques

Ces ouvrages sont insensibles aux tassements d'appuis mais présentent régulièrement des désordres au niveau des appareils d'appuis (distorsions et migrations).

1.7.2 PRAD Hyperstatiques

Ces ouvrages rendus hyperstatiques par réalisation d'un noyau de continuité en béton armé sont robustes mais deviennent, de par leur hyperstaticité, sensibles aux tassements d'appuis.

1.8 Caisson BP construits par encorbellements successifs à partir des piles

Comme pour les VIPP, la sensibilité et la robustesse de ces ouvrages peuvent être très variables suivant, leur génération, leur conception, les règlements de calculs employés ainsi que la précontrainte utilisée et la qualité de son injection. Il existe une littérature détaillée concernant la pathologie de ces ouvrages. Les ouvrages coulés en place apparaissent plus robustes que ceux réalisés à partir de voussoirs préfabriqués. Les cantilever et appuis inversés peuvent introduire des points sensibles dans la structure (risque éventuel de ruptures et/ou échappements d'appuis).

Ils peuvent suivant les cas être susceptibles de :

- diminution progressive de la précontrainte par corrosion,
- risque de rupture fragile en flexion et ou à l'effort tranchant (risque plus faible que dans le cas des VIPP d'ancienne génération).

Les ouvrages présentant des pathologies de ce type doivent faire l'objet de diagnostics détaillés incluant des expertises concernant les matériaux et un recalcul précis prenant en compte le phasage d'exécution (influence du comportement viscoélastique du béton).

Une instrumentation de surveillance peut être mise en place (dépend de l'analyse des risques de comportements fragiles) :

- Surveillance acoustique de la précontrainte,
- Instrumentation de fissures,
- Surveillance de la géométrie globale,
- Suivi du comportement dynamique.

Cette instrumentation associée à des mesures de température et plus particulièrement aux gradients thermiques peut être utilisée lors de chargements progressifs jusqu'à obtenir la décompression du béton et/ou des comportements non linéaires, ceci afin d'affiner les modèles numériques.

1.9 Ponts métalliques anciens

Les ponts métalliques anciens peuvent faire appel à des schémas mécaniques, des matériaux et des modes d'assemblage très variés, ils ne constituent donc pas une famille homogène.

Suivant les cas, ces ouvrages peuvent être sensibles à :

- la corrosion des matériaux,
- la rupture d'assemblages,
- des instabilités élastiques,
- des ruptures fragiles (dans le cas d'utilisation de matériaux fragiles ou rendus fragiles par soudage),
- des propagations de fissure de fatigue (aboutissant éventuellement à une rupture fragile),
- des tassements d'appuis (dans le cas de schémas mécaniques hyperstatiques),
- des ruptures et ou échappements d'appuis (une attention particulière doit être apportée aux cantilevers et appuis inversés).

Chaque cas peut être particulier mais l'apparition de pathologie conduit régulièrement à la mise en place d'une instrumentation et à la réalisation d'un recalcul dans lequel les risques d'instabilité et la résistance des assemblages ne doit pas être négligée. Des prélèvements de matériaux peuvent être effectués et les éléments suivants caractérisés : caractéristiques mécaniques : limite élastique et à la rupture, allongement à rupture, ténacité, ductilité ; composition chimique et soudabilité.

Les principes d'une instrumentation sont les suivants :

- surveillance de la géométrie globale (topographie classique, lidar, capteurs de déplacements dans des points singuliers),
- mesures d'épaisseur d'acier (ultrasons),
- installation de jauges de déformation (pour le suivi de l'effet des charges statiques mais aussi des cycles de fatigue).

Comme dans d'autres cas, des essais de chargements peuvent être effectués pour calibrer un modèle numérique.

1.10 Bipoutres acier-béton

Ces structures assez récentes et très répandues actuellement présentent peu de pathologie pour l'instant ; on peut cependant envisager à l'avenir, outre les problèmes de corrosion des parties métalliques, les problèmes suivants :

- des pathologies du hourdis en béton relativement mince,

- l'apparition de fissures de fatigue dans les poutres des ouvrages les plus anciens sur les itinéraires à fort trafic.

1.11 Ponts suspendus

Ces ouvrages présentent les spécificités des ouvrages métalliques auxquelles il convient d'ajouter celles du matériau câble et de ses attaches ainsi que la redistribution des efforts par grands déplacements caractérisant le fonctionnement de ce type de structure.

Les modèles numériques doivent donc être particuliers (prise en compte des grands déplacements, des phasages et des spécificités de comportement du matériau « câble »). Les modèles doivent prendre en compte le réglage initial de l'ouvrage (avoir la bonne géométrie sous charges permanentes à la température de réglage,).

La surveillance géométrique fait apparaître des déplacements plus significatifs ce qui permet aux techniques GPS d'apporter des solutions intéressantes. Les mesures de géométrie doivent toujours être associées à des mesures de température pour pouvoir être exploitées.

Une surveillance acoustique peut être mise en place afin de suivre l'évolution d'un endommagement des câbles.

1.12 Ponts haubanés modernes (après 1975)

Ces ponts peuvent être en acier mais aussi en ossatures mixtes et le tablier peut aussi être réalisé en béton armé ou précontraint.

Les ponts haubanés (structures triangulées) sont plus rigides que les ponts suspendus mais plus souples que les ponts classiques. Les méthodes GPS peuvent ainsi être utilisées pour surveiller la géométrie des plus grands.

Différentes technologies et matériaux sont utilisés pour les câbles et leurs ancrages (torons multicouches et culots d'ancrages issus de la technologie traditionnelle en France pour les ponts suspendus ou haubans multi torons parallèles et leurs ancrages à clavettes issus des technologies de la précontrainte). Dans les deux cas, une surveillance acoustique peut être mise en place afin de suivre l'endommagement des haubans.

1.13 Ponts en maçonnerie

Les ponts en maçonnerie ont un comportement fortement non linéaire (comportement du « matériau maçonnerie » et fonctionnement de la voûte) ; ils sont robustes quand les appuis sont fiables. La plupart des accidents sur les ponts en maçonnerie sont liés à des défaillances de fondations.

Cette robustesse diminue avec le surbaissement de la voûte et l'augmentation de la poussée (risque de glissement de joint et de divergence par changement de signe de la courbure en cas de léger écartement d'appuis).

Les calculs sont assez complexes, une voûte est hyperstatique de degré trois et la position initiale de la ligne de pression est inconnue. On a donc deux méthodes principales de calcul :

- une méthode basée sur la mécanique de la rupture basée sur la recherche de lignes de pression pouvant équilibrer le chargement. Cette méthode permet de rechercher les lignes de pression caractéristiques et ne doit pas être négligée dans la mesure où elle permet de caractériser la sensibilité aux chargements, le risque de glissement au niveau des joints et les zones faibles ou la ligne de pression s'approche du bord de la voûte (décompression et formation de rotules),
- des méthodes plus élaborées (éléments finis massifs avec éléments de contact) peuvent être utilisées, elles permettent de modéliser les tympans et le troisième dimension, de prendre en compte les mouvements d'appuis et d'explorer le comportement après création de rotules dans la voûte.

L'instrumentation peut être basée sur les principes suivants :

- suivi de la géométrie générale (position et niveau des appuis et mesure de trois points de niveau par voûte,
- instrumentation de fissures dans la voûte (rotules) et dans les tympans,
- suivi dynamique (modification du contenu fréquentiel des enregistrements avec l'apparition de zones décomprimées).

1.14 Murs de soutènement

Les ouvrages de soutènement peuvent faire appel à de nombreux types de fonctionnements mécaniques et employer différents matériaux :

- Les murs poids (maçonnerie de pierres sèches, maçonnerie jointoyée, béton, gabions et éléments préfabriqués remblayés),
- Les murs en L (voile encastres sur semelle) en béton armé,
- Rideaux de palplanches métalliques (éventuellement ancrés par des clous ou tirants),
- Parois moulées, préfabriquées ou composites (éventuellement ancrés par des clous ou tirants),
- Soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques ou géosynthétiques,
- Parois clouées (armatures passives),
- Voiles et poutres ancrés (armatures actives),
- Etc.

Les modes de fondation sont divers :

- Fondations superficielles (avec ou sans renforcement de sol),
- Fondations profondes,
- Fiche de parois ou rideau dans le sol.

La grande variété de ces ouvrages conduits à des pathologies très variées :

- Problèmes de stabilité externe d'ensemble (rupture circulaire du sol autour de l'ouvrage),
- Problèmes stabilité externe locale (poinçonnement, glissement, renversement),
- Problèmes de stabilité ou résistance interne (rupture de béton armé de clous de tirants...

Les principes d'instrumentation sont donc eux aussi très variés et dépendent du type de mur, des matériaux et de la pathologie. Toutefois, les principes les plus souvent utilisés sont les suivants :

- Surveillance géométrique de l'ouvrage (lidar, inclinomètres...),
- Surveillance des actions dues au sol (piézomètres dans le remblai, inclinométrie dans le sol...,
- Surveillance spécifique aux matériaux constituant l'ouvrage. (une importance particulière doit être accordée aux armatures et tirants de différents types (réduction de section due à la corrosion, perte de tension, etc.).

1.15 Sujets transversaux

Trois sujets transversaux méritent d'être rappelés ici compte tenu de leur grande importance :

- la prévention des surcharges sur des ouvrages routiers, notamment ceux limités en tonnage : une instrumentation de l'ouvrage peut être utile pour informer le gestionnaire et lui permettre de cibler les contrôles routiers nécessaires au respect de la réglementation,
- la prévention des chocs violents (détection de véhicules hors gabarits, protections des appuis, signalisation) : parmi ces dispositifs, la seule signalisation se révèle souvent insuffisante si elle n'est pas accompagnée de restrictions physiques. Une instrumentation en amont peut être utile pour informer le gestionnaire afin de déclencher des restrictions physiques,
- la détection des affouillements au niveau des fondations des appuis en site aquatique.