

*Note d'information
Ouvrages d'art*

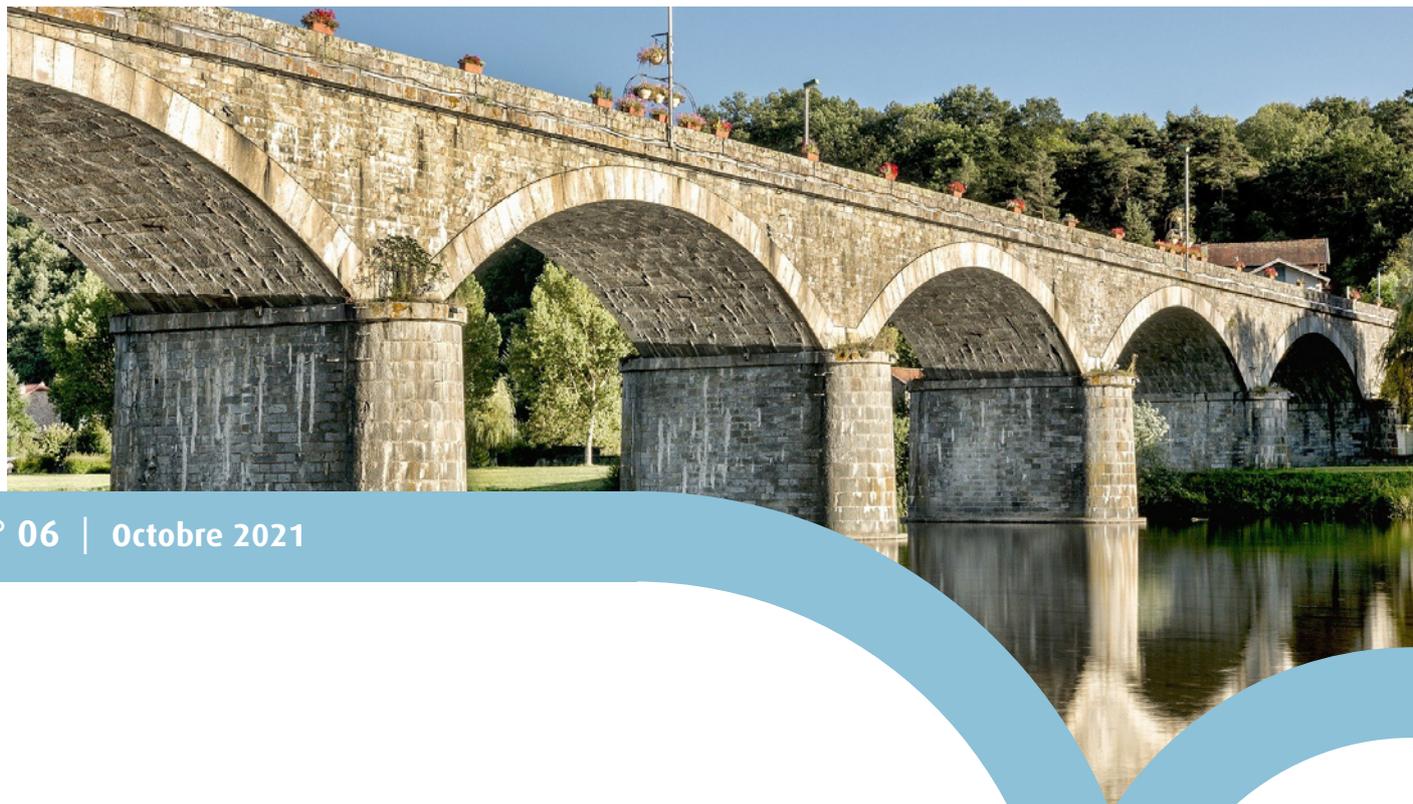
Politique de gestion des patrimoines d'ouvrages d'art - Apports récents sur les volets technique et financier

La bonne gestion des patrimoines d'ouvrages d'art est un enjeu majeur pour garantir la libre circulation des personnes et des biens en toute sécurité.

Des indisponibilités récurrentes d'ouvrages d'art routiers et de graves effondrements récents en Europe et en France (pont de Gênes, pont de Mirepoix) nous invitent à interroger nos pratiques en matière de surveillance et d'entretien. Par ailleurs, le rapport du Sénat sur la sécurité des ponts publié en 2019 a particulièrement mis en lumière les difficultés auxquelles sont confrontées nombre de communes : « Un certain nombre de communes et d'intercommunalités ont des ponts en mauvais ou très mauvais état et sont dans l'incapacité de réaliser les travaux de réparation, dont les coûts sont prohibitifs ».

La présente note fait état de l'étude réalisée par le Cerema sur le patrimoine des ponts du réseau des routes nationales non concédées de l'État afin d'analyser sa nature, son exposition, son vieillissement et l'efficacité de son entretien.

Ce travail permet de dégager des enseignements utiles aux gestionnaires pour leur permettre de mieux appréhender l'état et l'évolution de leur parc d'ouvrages et de faciliter l'optimisation des moyens à consacrer à la gestion des ouvrages d'art. Les conclusions qui en résultent peuvent être utiles à tous les gestionnaires de ponts.



Note n° 06 | Octobre 2021

1. Introduction

Les ouvrages d'art routiers constituent un patrimoine important, tant en matière d'utilité sociale que d'actif financier. Ils présentent une grande variété de conceptions, de matériaux et de périodes de construction, ce qui rend leur gestion très complexe. De plus, la grande diversité géographique, climatique et démographique de notre pays conduit à des conditions d'exposition et d'exploitation des ouvrages très contrastées et à des charges de trafic parfois très intenses, ce qui peut engendrer le vieillissement prématuré des structures. Enfin, la complexité de la gestion des ouvrages d'art est renforcée par la forte technicité et la pluridisciplinarité des compétences qu'il est nécessaire de mobiliser pour poser le bon diagnostic, concevoir les réparations adaptées et réaliser des travaux de qualité.

Les enjeux d'une bonne gestion sont forts, à savoir maîtriser les risques inhérents à ces objets techniques et optimiser le budget de maintenance en visant un pilotage sur le long terme de l'état du patrimoine.

Même si les normes NF ISO 55000, 55001 et 55002 de 2014 sur la gestion d'actifs donnent les principes de base et des indications utiles applicables à la gestion des ouvrages d'art, il est difficile d'énoncer *a priori* des règles universelles de bonne gestion applicables aux ponts. Ainsi, si le corpus technique établi par l'État (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art) a été régulièrement mis à jour depuis sa parution en 1979 pour tenir compte de l'état des connaissances scientifiques, il n'a jamais eu pour objectif de proposer des politiques de gestion clés en main.

De fait, les pratiques de gestion actuelles sont encore trop peu différentes de celles des années 1970-2000. Depuis cette époque, la nature et la composition du patrimoine ont considérablement évolué et surtout, beaucoup moins d'ouvrages sont construits depuis les années 2010. Aujourd'hui, les patrimoines sont majoritairement vieillissants et les pratiques de gestion sont très diverses suivant les maîtres d'ouvrages. La gestion de patrimoine doit être au cœur des préoccupations des gestionnaires.

Cette note d'information offre des apports, tant sur les plans technique que financier, issus de l'expérience acquise dans la gestion du patrimoine du réseau routier national non concédé. Ces apports peuvent être utiles à tous les maîtres d'ouvrages concernés par un patrimoine de ponts, même si toute politique de gestion doit être adaptée au patrimoine considéré.

2. Les pathologies et leur impact sur l'état du patrimoine

Les actions pouvant initier des désordres ou pathologies sont nombreuses, on peut citer :

- les actions climatiques : vents extrêmes, gradients thermiques ou fortes variations de températures, gel-dégel, crues (affouillements), avalanches, glissements de terrain et chutes de blocs (en montagne) ;
- les actions chimiques : corrosion en milieu humide, chlorures, sulfates ou autres agents chimiques, embruns marins ;
- 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, salage des routes.

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 décrits ci-dessous, qui peuvent être localisées ou globaux.

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 à terme pour la durabilité des ouvrages. Cette famille comprend notamment :

- l'initiation de la corrosion d'armatures de béton armé ou d'aciers de charpente métallique ;
- l'éclatement du béton d'enrobage des armatures passives ;
- les dégradations de surface du béton ;
- 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, altération de pierres) ;
- l'initiation de fissures de fatigue dans les structures métalliques ;
- l'initiation d'affouillements ;
- l'envahissement par la végétation parasite, notamment pour les ouvrages maçonnés.

Si la plupart de ces pathologies sont souvent repérables par les inspections visuelles voire des moyens déportés (longues-vues, jumelles, drones, etc.), certaines exigent des moyens spécifiques pour être repérées (affouillement, fissures de fatigue dans les structures métalliques, etc.).

Une deuxième famille de désordres liés à des dégradations de résistance des structures ou de leurs appuis est susceptible d'entraîner des modifications du comportement mécanique global ou d'éléments de structures et de réduire la capacité portante des ouvrages. Cette famille comprend notamment :

- les insuffisances d'aciers passifs ou actifs, y compris les haubanages ;
- les insuffisances de résistance de structures métalliques ;
- les détériorations des appareils d'appui (blocages, flambement) ;
- les détériorations importantes de maçonneries ;
- les réactions de gonflement interne des bétons ;
- les interactions « sol-structure » mal appréhendées conduisant à des déplacements ou des déformations de fondations ;
- les affouillements ;
- les fissures ou fractures de toutes origines.

Ces pathologies ou ces insuffisances sont actuellement généralement identifiées lors des visites d'évaluation par la détection de défauts d'alignement, de déplacements, de fissures et, pour les parties métalliques de déformations plastiques, de cloquages et de voilements.

Une troisième famille de pathologies comprend les désordres non directement accessibles lors des visites d'évaluation qui nécessitent généralement des moyens d'auscultation spécifiques ou une instrumentation pour être détectés. Cette famille comprend notamment :

- la corrosion et/ou les ruptures de fils ou de torons (précontrainte extérieure ou intérieure, suspentes, haubans) ;
- la perte de tension ou la surtension de câbles (précontrainte, 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 ;
- l'initiation de fissures de fatigue au cœur des cordons de soudure.

Après analyse des processus de dégradation qui affectent les différents ouvrages, il s'avère que les ouvrages, suivant leur typologie, ne sont pas « égaux » face au vieillissement. Nous proposons ainsi une classification du patrimoine en sept méta-familles qui rassemblent des ouvrages « cousins » en termes de processus de dégradation et qui doivent bénéficier de processus de surveillance, d'entretien et de réparation assez similaires :

- Buses en Béton (BB) ;
- Buses Métalliques (BM) ;
- Grands Ouvrages Précontraints (GOP), y compris les Viaducs à travées Indépendantes en Poutres Précontraintes (VIPP) ;
- Ouvrages Classiques en Béton (OCB) : dalles en béton armé, ponts à poutres en béton armé, dalles en béton précontraint, portiques, cadres, ponts à poutrelles enrobées, etc. ;
- Ponts à Structure Métallique Porteuse (PSMP) : ponts à poutres métalliques et mixtes ;
- Ponts en Maçonnerie (MA) ;
- divers (non étudiés).

3. Prise en compte et analyse des risques

La surveillance systématique telle que développée par l'ITSEOA a pour objectif de prévenir le vieillissement prématuré des ouvrages et la survenue de désordres importants et, par suite, l'indisponibilité des ouvrages qui peut en découler.

Cette surveillance n'est toutefois pas toujours suffisante et des ruines d'ouvrage peuvent se produire ; par exemple, en France, les épisodes de crue violente sont responsables chaque année de quelques effondrements. Sans aller jusqu'à la ruine avec les conséquences humaines qui peuvent en résulter, les cas de fermeture inopinée d'ouvrages sont encore fréquents avec parfois des conséquences économiques importantes.

Les ruines ou les désordres majeurs interviennent en général dans les situations suivantes :

- (a) un dimensionnement initial insuffisant du fait de connaissances scientifiques incomplètes à l'époque de la conception des ouvrages ;
- (b) la progression insidieuse de désordres, en particulier ceux non directement détectables lors des visites d'évaluation ;
- (c) une exposition particulière à un évènement « déclenchant » (accident, crue, choc, surcharge, incendie, séisme, etc.).

Aussi, suivant leur typologie et leur environnement, certains types d'ouvrages se sont révélés particulièrement concernés par des effondrements brutaux ou bien par des désordres si importants que les ouvrages ont dû être fermés inopinément :

- les buses métalliques du fait de la corrosion ou suite à des crues ;
- les massifs en terre armée du fait de la corrosion d'armatures ;
- les ouvrages dont la capacité portante est affectée du fait d'affouillements des fondations ;
- les murs de soutènement du fait notamment d'une insuffisance de drainage ;
- les ouvrages exposés et soumis à des chocs violents ;
- certains ouvrages précontraints de première génération, notamment les VIPP ;
- les ouvrages à câbles, y compris les ouvrages à précontrainte extérieure, du fait de dégradations ou de ruptures brutales de torons.

Dans ce cadre, de nombreuses méthodologies d'analyses de risques ont été développées par le Cerema pour aider le gestionnaire à appréhender l'évaluation d'ouvrages sensibles tels que les VIPP, les murs en terre armée, les buses métalliques, les murs en maçonnerie, ou pour l'évaluation des ouvrages exposés à des aléas naturels (crue, séisme, incendie, etc.). Des notes d'informations sont également périodiquement publiées par le Cerema, pour alerter les gestionnaires sur des risques particuliers.

En fonction de l'expérience acquise sur ces ouvrages, il est possible de formuler certains constats ou recommandations :

- les buses métalliques sont très sensibles à l'environnement favorisant la corrosion (cours d'eau). Les zones de marnage doivent faire l'objet d'une attention particulière ;
- les murs en terre armée de première génération (armatures lisses de 3 mm d'épaisseur) doivent être systématiquement examinés et généralement renforcés ;
- l'affouillement est la principale cause de ruine des ouvrages. Les régions soumises à des épisodes de crues violentes ou torrentielles, typiquement sur le pourtour méditerranéen ou dans les Départements d'Outre-Mer, sont les plus concernées, des inspections subaquatiques sont à prévoir après chaque épisode majeur ;
- les murs de soutènement non liés aux ouvrages sont encore insuffisamment recensés et un effort particulier doit être consenti ;
- les effondrements dus à des chocs violents concernent les piles et les ponts à poutres servant de passage supérieur ;
- dans les départements situés en zones de sismicité 4 à 5, une analyse des risques est conseillée en s'appuyant sur le document *Diagnostic et renforcement sismiques des ponts* publié en juillet 2017 par le Cerema (ISBN : 978-2-37180-197-4) ;
- les ponts suspendus et les ouvrages à précontrainte extérieure nécessitent une vigilance particulière et bénéficient d'une note d'info spécifique (n° 3 et 4).

4. Recommandations de gestion par famille d'ouvrages

L'analyse conduite sur les principales causes de dégradation des ouvrages permet de proposer différentes orientations de la politique technique de gestion et de surveillance de nature à ralentir les phénomènes physiques en cause ou les risques d'évolution défavorable des ouvrages.

Ces orientations sont établies par méta-famille d'ouvrages, notion introduite au paragraphe « Les pathologies et leur impact sur l'état du patrimoine » et portent sur les structures des ouvrages (suivant leur typologie, leur environnement), leurs équipements et sur les priorités à considérer dans un contexte budgétaire contraint.

La grande diversité des patrimoines oblige à avoir une politique différenciée et les différentes actions de gestion adaptées à chaque méta-famille d'ouvrage sont synthétisées ci-après.

On rappelle l'impact très bénéfique sur la santé des structures d'un entretien courant ciblé, bien réalisé, programmé et régulier (assainissement, joints de chaussée, enlèvement de la végétation, etc.).



Principales orientations proposées

Tout ouvrage doit bénéficier d'une politique d'entretien et de surveillance comme le prévoit l'ITSEOA. Cependant, des différenciations et des priorités sont à apporter en fonction de la nature de l'ouvrage et de son environnement :

- prioriser les interventions sur les ouvrages notés 2E au sens de l'IQOA et situés dans les environnements les plus agressifs (zone de salage sévère et bord de mer) ;
Classe 2E : ouvrage présentant des défauts sur les équipements ou les éléments de protection, ou des défauts mineurs de structure, qui nécessite un entretien spécialisé afin de prévenir des évolutions pouvant à court terme affecter la structure ;
- surveiller et agir en priorité sur les VIPP de première génération et les grands ouvrages précontraints à précontrainte extérieure. En cas de corrosion découverte sur les câbles extérieurs au béton, il faut intervenir très rapidement ;
- assurer la pérennité des ouvrages métalliques tant vis-à-vis des problèmes de corrosion que des phénomènes de fatigue ;
- pour les structures en béton armé, il convient de concentrer les interventions sur les ouvrages situés sur les itinéraires avec salage intense (H4-nombre de jours de salage par an > 30, gel sévère) et en bord de mer, notamment les faces extérieures des poutres et les pieds de pile, sur les ouvrages construits avant les années 50 et sur les ouvrages en béton armé avec cantilever ;
- surveiller et protéger ou renforcer les appuis des ponts sur rivières soumises à des crues torrentielles (en priorité) ou à des fortes crues ;
- réparer les ponts en maçonnerie fortement dégradés ;
- traiter progressivement les buses métalliques en les transformant (reconstruction ou substitution) dès lors que l'environnement favorise la corrosion, principalement du fait d'un cours d'eau ;
- gérer les ouvrages de soutènement :
 - évaluer les facteurs de risques selon les guides de recommandations du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC. *Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic* - ISBN : 2-7208-3119-X),
 - cibler les ouvrages présentant des éléments enterrés sensibles aux phénomènes de corrosion (tirants précontraints, clous, armatures de renforcement métalliques) ou des risques de rupture fragile,
 - cibler les ouvrages où les matériaux sont les plus exposés (environnement agressif),
 - appliquer les analyses de risques dédiées.

Entretien les équipements, éléments de protection et appareils d'appui à bon escient

On rappelle l'existence d'avis techniques concernant les étanchéités et les joints de chaussée. La formule des avis techniques a été créée pour permettre aux maîtres d'œuvre d'être convenablement informés sur l'aptitude à l'emploi de produits, de procédés ou de matériels innovants ou non normalisés.

Nota : les valeurs de périodicité proposées s'appuient sur les constats et retours d'expérience conduits depuis de nombreuses années par le Cerema.

- Étanchéité :
 - il convient de prioriser les ouvrages où les problèmes liés à l'eau sont récurrents ou ont un impact important sur l'état de l'ensemble de la structure, notamment les ponts en maçonnerie et les grands ouvrages précontraints,
 - en particulier, on pourra procéder à la réfection de l'étanchéité à l'occasion de réparation lorsqu'elle présente une durée d'utilisation proche de la périodicité indiquée ci-après.

Structures	Périodicité moyenne conseillée de changement des chapes d'étanchéité ^(**)
Support béton* : OCB, PSMP, MA, Divers	50 ans
Support béton : GOP	25 ans
Support métal : Dalles orthotropes	10 ans

^(*) rappel des abréviations : Ouvrages Classiques en Béton (OCB), Ponts à Structure Métallique Porteuse (PSMP), Ponts en Maçonnerie (MA), Grands Ouvrages Précontraints (GOP).

^(**) : périodicité variable selon la qualité de la mise en œuvre des chapes.

- Protection anticorrosion pour les Ponts à Structure Métallique Porteuse :
 - cibler les ouvrages (2E) situés en environnement agressif (bord de mer) et de manière générale les abouts de tablier.

Structures	Périodicité moyenne conseillée de remise en peinture ^(*)	Modulation
Ponts à poutres latérales / Dalles orthotropes / Ponts métalliques	25 ans	-5 ans en bord de mer
Ponts mixtes	30 ans (abouts) / 50 ans pour le reste	-5 ans / -10 ans en bord de mer
Pont à Poutrelles Enrobées	50 ans	-10 ans en bord de mer

^(*) : périodicité variable suivant la qualité de la protection anticorrosion.

- Joints de chaussée :
 - cibler les ouvrages avec une note « joint de chaussée » de 2E et situés sur des itinéraires stratégiques : fortement circulés, en envisageant la suppression des joints de chaussée (ponts semi-intégraux et intégraux),
 - présentant une vulnérabilité particulière vis-à-vis des venues d'eau aux abouts (poutres métalliques, présence d'ancrages de précontrainte en about de tablier, etc.),
 - situés sur des appuis cantilever, pour lesquels l'étanchéité est indispensable.
- Dispositifs de retenue :
 - à apprécier par le gestionnaire, le cas échéant en filtrant selon la valeur de l'indice de danger. (cf. le guide du Cerema « Choix des performances d'un dispositif de retenue sur ouvrage d'art par la méthode de calcul de l'indice de danger »)
- Corniches :
 - cibler les ouvrages dont les corniches sont évaluées avec une note de 2 (IQA) et franchissant des itinéraires stratégiques et dans les environnements agressifs.

- Appareils d'appui :
 - cibler en priorité les blocages et les cheminements qui sont les deux défauts impactant le plus la structure. Les détériorations d'appareils d'appui n'impliquent pas, le plus souvent, de dysfonctionnements graves de la structure, en particulier dans le cas des appareils d'appuis en élastomère fretté.

Appareils d'appuis	Périodicité moyenne conseillée de changement des appareils d'appuis ^(*)
Élastomères frettés pour Dalles BA + Ponts à Poutrelles enrobées	50 ans pour les anciens / 80 pour les nouveaux (après 1990)
Appareils d'appuis métalliques	30 ans puis changement par des néoprènes

() périodicité variable selon la qualité de pose et d'entretien des appareils d'appui.*

- Dispositifs d'évacuation des eaux (en général) :
 - descentes d'eau : souvent cassées mais rarement réparées ;
 - présence d'une contre-pente sur le sommier, présence de ravinement prononcé sur le perré, absence de parement du perré, etc.

Mieux gérer les priorités

Pour un ouvrage donné, il ne faut pas faire de relation directe entre les cotations IQOA (2E, 3, 3U) et les travaux (entretien courant, entretien spécialisé, réparation) :

- il s'avère que dans certains cas, une cotation IQOA de 2E ou de 3 n'implique pas nécessairement le recours à des travaux immédiats :
 - soit parce que les désordres n'ont pas significativement évolué ou n'ont pas évolué rapidement ;
 - soit parce qu'il est plus optimal de combiner plusieurs travaux entre eux ;
 - soit parce que ces désordres peuvent « attendre » le remplacement de l'ouvrage lorsqu'il est inéluctable.

De façon analogue, on peut citer les cas suivants où les travaux ne sont pas immédiatement nécessaires, s'il n'y a pas de risque d'évolution rapide (pathologie à évolution lente) :

- les buses métalliques : déformations peu importantes ou modérées ;
- les buses en béton : déformations peu importantes ou modérées, décalages entre éléments ;
- les réactions de gonflement interne des bétons (RAG et RSI, sauf en cas de conséquence structurale majeure), une fois le phénomène stabilisé ;
- les appareils d'appui en caoutchouc fretté : déformations, altérations ;
- la fissuration des structures en béton armé (suivant l'origine et l'étendue des fissures) ;
- les murs de culées et murs associés : mouvements (2E) ;
- les structures métalliques : corrosion suivant son étendue (2E).

Hiérarchiser les interventions grâce aux analyses de risques, qui sont à systématiser ^(*)

- Mise en œuvre systématique des analyses de risques sur les ouvrages pour lesquels cette méthodologie a été développée :
 - VIPP ;
 - murs en terre armée ;
 - buses métalliques ;
 - le cas échéant, risque sismique et affouillements ;
 - murs en béton armé encastrés sur semelle.

^(*) *Nota* : Les analyses de risques s'appliquent à un ensemble d'ouvrages sur la base d'hypothèses communes pour hiérarchiser les interventions. Ce ne sont pas des expertises propres à chaque ouvrage et un ouvrage donné peut être mal jugé par l'analyse de risques principalement du fait de données manquantes ou mal connues.

Hiérarchiser les interventions grâce aux analyses sur l'évolution de l'état du patrimoine des ponts

- Ces études ont permis de mettre en évidence des lois de dégradation très différenciées entre les grandes familles. De ce fait, une attention particulière est à apporter aux familles dont la santé apparaît globalement plus fragile : les buses métalliques, les grands ouvrages précontraints, les ponts à structure métallique porteuse.

Inspection des piles du viaduc du Lignon



Crédit photo : © Arnaud BOUJSSOU - Terra

Actions particulières à entreprendre				
Méta-famille	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Buses Béton	Pas d'action particulière	Pas d'action particulière	Pas d'action particulière	Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction
Buses Métalliques	Réfection des zones de marnage	Réparation / Transformation/ Remplacement	Analyse de l'état structurel	Sans objet
Précontrainte extérieure : • inspection spécifique à prévoir <i>Nota</i> : les travaux de remplacement de la précontrainte sont complexes et onéreux	Analyse de l'étanchéité des conduits, recherche de corrosion en section courante et près des ancrages	Analyse de l'étanchéité des conduits, recherche de corrosion en section courante et près des ancrages	Analyse de l'étanchéité des conduits, recherche de corrosion en section courante et près des ancrages	Analyse de l'étanchéité des conduits, recherche de corrosion en section courante et près des ancrages
Précontrainte intérieure des Grands Ouvrages Précontraints de 1^{re} génération : • VIPP de la première génération • ponts construits avant 1975	/	Analyse de la précontrainte pour les ouvrages en bord de mer et en zone H4 VIPP de la première génération : analyse de l'état de la précontrainte pour tous, et renforcement si corrosion Ponts construits avant 1975 : renforcement par précontrainte si déficit de précontrainte (joints ouverts)	Analyse de l'état de la précontrainte pour tous les sites Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction	Analyse de l'état de la précontrainte pour tous les sites Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction
Ouvrages Classiques en Béton et Grands Ouvrages Précontraints : • actions concernant le béton	Analyse de la vitesse de pénétration des agents agressifs par échantillonnage de la méta-famille si le parc comprend suffisamment d'ouvrages En fonction des résultats, en priorité pour les GOP : mise en œuvre de protection pour le béton pour les ambiances agressives (H4, gel sévère, et bord de mer) Protection systématique si nécessaire des faces extérieures des poutres de rive	Mise en œuvre de protection pour le béton (tablier/piles/culées) pour les ambiances agressives (H4, gel sévère, et bord de mer) Protection systématique des faces extérieures des poutres de rive À adapter en fonction des résultats sur les vitesses de pénétration des agents agressifs	Mise en œuvre de protection pour les parties de béton pour les ambiances agressives (zone d'about/culée/tête de pile) Protection systématique des faces extérieures des poutres de rive	Protection systématique des faces extérieures des poutres de rive Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction
Ponts à Structure Métallique Porteuse : • actions concernant la peinture, les assemblages, et la fatigue	Remise en peinture des abouts d'OA en bord de mer si nécessaire Analyse de l'état des peintures, établissement d'un plan de gestion de la peinture Repérage des assemblages mal conçus	Remise en peinture des ouvrages Examen approfondi et diagnostic des assemblages Analyse vis-à-vis de la fatigue	Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction	Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction
Ponts en Maçonnerie : • actions concernant la maçonnerie	/	Rejointoiement si besoin dans les zones dégradées Traitement des affouillements	Campagne de rejointoiement si besoin dans les zones dégradées Traitement des affouillements	Si travaux lourds : • comparaison réparation/reconstruction

5. Éléments pour l'élaboration d'une politique budgétaire

Coûts de remise en état

L'évaluation des coûts nécessaires à la remise à niveau de son patrimoine est une question majeure pour le gestionnaire.

Sur la base d'éléments de coûts recueillis auprès des Directions Interdépartementales des Routes, et en tenant compte forfaitairement des coûts d'exploitation (de l'ordre de 5 à 30 % selon le type de voie), il est possible de proposer une estimation statistique des coûts (valeur 2019) pour des structures les plus courantes.

Ces ratios de coûts globalisés (tous travaux confondus) s'entendent par surface utile de tablier et pour un retour à la classe 2 des ouvrages de classe 3 et 3U. Ces ratios de coûts prennent toute leur pertinence pour un patrimoine important mais ont un moindre intérêt à l'échelle d'un ouvrage unique.

Prix en € / m ² (valeur 2019) pour ramener l'ouvrage à la classe 2	Classe d'origine		Dont coûts équipements
	3	3U	
Ponts à poutrelles enrobées	981	1540	769
Ponts bipoutres mixtes	459	916	351
Ponts cadres en béton armé	345	674	192
Ponts dalles en béton armé	769	1101	620
Ponts à poutres sous chaussée en béton armé	798	1816	645
Ponts dalles et nervurés en béton précontraint	686	1194	499
VIPP	615	1035	362
PRAD	763	1167	504
Pont caisson BP	527	793	370
Ponts en maçonnerie	612	1201	364
Buses métalliques	415	726	0
Buses béton	273	480	0
Ouvrages d'autres typologies	800	1800	0

Tableau 1 : Coût de retour en classe 2 des ouvrages en fonction de leur typologie IQOA (mercuriale des prix de réparation)

Établissement d'une trajectoire budgétaire sur plusieurs années

Un sujet d'importance est d'estimer une trajectoire budgétaire sur plusieurs années de manière à déterminer les montants annuels à mobiliser pour assurer une bonne gestion du patrimoine. Il existe plusieurs façons de faire pour parvenir à cet objectif :

- une estimation globale qui s'appuie, par exemple, sur la mercuriale de coûts proposée ci-dessus et appliquée aux ouvrages sélectionnés suivant la stratégie du gestionnaire. Cette façon de faire est accessible sans développement complexe grâce aux coûts globalisés proposés. Elle convient bien aux grosses réparations mais sans doute moins bien à l'entretien spécialisé. Il est alors possible de la compléter à l'aide de développements ouvrage par ouvrage en s'appuyant cette fois sur les périodicités et priorités des actions proposées ci-avant. Bien entendu, la stratégie du gestionnaire, suivant son réseau et ses objectifs en termes d'exploitation doivent orienter les choix ;
- une estimation des volumes financiers à consacrer suivant des objectifs fixés quant à l'état global du patrimoine à une date donnée et à son évolution sur plusieurs années. Les méthodes applicables sont très utiles aux gestionnaires de grands patrimoines. Nous évoquons ci-après deux méthodes d'évaluation utiles aux grands patrimoines dont une méthode basée sur l'espérance de vie récemment mise au point dans le cadre de l'étude du Cerema du réseau routier national.

Application de modèles prédictifs se basant sur des chaînes de Markov (pour mémoire)

Une des méthodes assez souvent présentée dans la littérature consiste à appliquer une projection de l'état du patrimoine basée sur l'« évolution instantanée par chaînes de Markov » : on part de la distribution matricielle des changements de classe d'état des ponts entre l'année $n-1$ et l'année n , on suppose qu'elle sera la même entre l'année n et l'année $n+1$, indépendamment du vieillissement, et on itère l'opération sur la période de projection voulue.

La projection financière à dix ans peut alors être calée sur la connaissance de l'évolution du patrimoine dix ans avant. Cette approche intègre, *de facto*, la politique de gestion au moment de son application ; elle s'affranchit de la connaissance fine de chaque ouvrage depuis sa construction mais suppose ou impose une continuité entre les actions de maintenance passées et futures. Elle aboutit à des matrices de changement d'état qui peuvent alors être calculées pour les différentes méta-familles. Le gestionnaire établit alors sa matrice d'évolution de son patrimoine.

À titre d'information, ci-dessous, la matrice d'évolution obtenue pour les ouvrages courants en béton armé du Réseau Routier National Non Concédé (RRNC).

Passer		À la classe				
		1	2	2E	3	3U
De la classe	1	78,11	19,08	2,45	0,35	0
	2	1,96	92,62	4,98	0,44	0
	2E	0,41	11,44	85,80	2,33	0,01
	3	0,14	5,76	5,52	88,55	0,04
	3U	0,26	6,42	12,42	5,03	75,87

Tableau 2 : Matrice de changement d'état des Ouvrages Classiques en Béton (en % annuel)

Commentaire : un ouvrage a ainsi une probabilité de 4,98 % de passer de la classe 2 à la classe 2E.

Établissement d'une trajectoire budgétaire sur plusieurs années par la méthode de l'espérance de vie

Pour les maîtres d'ouvrages dotés d'un patrimoine important, il peut être utile de procéder à une analyse statistique du vieillissement des ouvrages, ce qui permet d'avoir une vision prospective de l'évolution de leur patrimoine. Pour cette approche, le gestionnaire doit disposer d'une base de données de ses ouvrages avec leur état et leur âge.

Le Cerema a conduit une telle étude de nature « épidémiologique » sur les ponts du RRNC pour étudier les « problèmes de santé » des ouvrages, à savoir principalement la fréquence à laquelle ils tombent « malades » en fonction de leur âge et des facteurs liés à leur environnement.

En effet, la connaissance de l'évolution de l'état de santé des ouvrages est un moyen d'apprécier la fréquence statistique des « interventions curatives » nécessaires et d'évaluer, par famille, la nature de ces « interventions curatives ».

Cette façon de faire revient à transposer les principes appliqués en démographie sur la mortalité ou en médecine sur la morbidité, à l'étude des ouvrages, à savoir : le taux d'individus atteints par une maladie par tranche d'âge dans une population donnée.

Deux seuils de gravité de « maladie » ont été étudiés :

- seuil de gravité 2E : passage de la cotation 1 ou 2 à la cotation 2E (seuil correspondant à une espérance de vie sans nécessité d'entretien spécialisé) ;
- seuil de gravité 3-3U : le passage de la cotation 1, 2 ou 2E à la cotation 3 ou 3U (seuil correspondant à une espérance de vie en bonne santé structurelle).

Pour ces deux niveaux et pour chaque méta-famille, il est calculé, par année et par classe d'âge la probabilité statistique par âge de « tomber malade ». Par exemple, pour les ouvrages en béton armé dits « OCB », la figure ci-dessous présente le taux de défaillance moyen pour le seuil de gravité 3 ou 3U des ouvrages du RRNC :

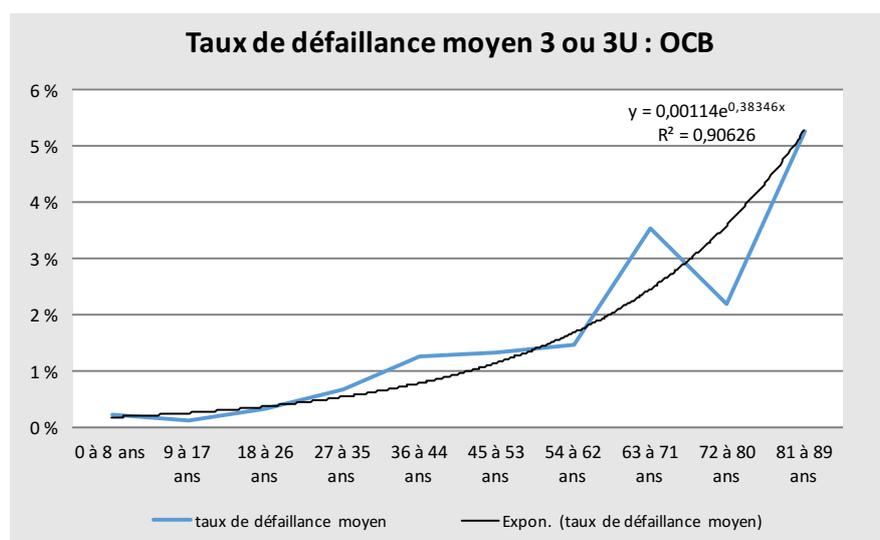


Figure 1 : Impact de l'âge des ouvrages sur leur taux de défaillance

Commentaires : dans ce graphique, on a en abscisse des tranches d'âge et en ordonnée le taux de dégradation vers la classe 3 ou 3U, appelée « taux de défaillance ».

L'équation retenue pour le taux de défaillance est $y(x) = 0,00114 e^{0,38346 x}$ qui offre une bonne corrélation ($R^2 = 0,90626$).

Une corrélation avec une équation polynomiale du second degré est aussi acceptable ($R^2 = 0,85365$) : $y(x) = 0,00439 - 0,00236x + 0,00065x^2$

x est la variable, $x = 1$ correspond à la tranche d'âge [0 à 8 ans], $x = 2$ correspond à la tranche d'âge [9 à 17 ans] et ainsi de suite. Pour $x = 11$, on extrapole pour la classe [90 à 98 ans].

$y(x)$ est le taux de défaillance des ouvrages OCB appartenant à la tranche d'âge x .

Un rapport d'études à paraître détaillera par méta-famille les principaux résultats obtenus à partir de l'analyse de l'espérance de vie des ouvrages du réseau routier national non concédé. Pour les ouvrages de la méta-famille OCB, l'analyse de la défaillance vers le seuil 2E met en évidence une plage de temps assez large durant laquelle le taux de défaillance annuel est assez constant, indépendant de l'âge de l'ouvrage et voisin de 4 %, ce qui permet d'établir un budget prévisionnel global pour l'entretien spécialisé.

La durabilité des ouvrages peut être aussi caractérisée, pour chaque méta-famille, par l'espérance de vie mathématique, calculée de manière similaire à l'espérance de vie des humains. Cette valeur reflète l'intensité des aléas subis, la sensibilité des méta-familles à ces aléas, mais aussi la qualité des « soins » dont a bénéficié l'ouvrage durant sa vie. Pour chaque méta-famille, il en résulte les espérances de vie suivantes établies pour les ouvrages du RRNC :

Méta-famille	Espérance de vie « sans intervention spécialisée majeure » (seuil 2E)	Espérance de vie « en bonne santé structurelle » (seuil 3-3U)	Espérance de vie « avant remplacement »
Buses en Béton (BB)	37 ans	119 ans	170 ans
Buses Métalliques (en environnement agressif) (BM)	non évaluable	41 ans	non évaluable
Grands Ouvrages Précontraints (GOP)	22 ans	43 ans	80 ans
Ouvrages Classiques en Béton (OCB)	33 ans	72 ans	100 ans
Ponts à Structure Métallique Porteuse (PSMP)	19 ans	56 ans	80 ans
Ponts en Maçonnerie (MA)	non évaluable	122 ans	170 ans

Les deux premières colonnes sont obtenues par traitement statistique, au sens de l'espérance de vie et la dernière colonne est établie « à dire d'expert » à partir de l'espérance de vie en bonne santé et en calant l'espérance de vie avant remplacement à 100 ans pour les ouvrages classiques en béton.

Remarque : en ce qui concerne les buses métalliques en environnement agressif, la réparation des ouvrages (passage d'une classe 3 ou 3U à 2) se fait par démolition/reconstruction ou par transformation (mise en place d'une autre structure porteuse).

L'étude quantifie aussi l'impact important de l'environnement (salage) et du climat (gel) sur la santé des ouvrages, pour les Ouvrages Classiques en Béton :

	Espérance de vie pour le seuil 2E
Zone de gel faible	35 ans
Zone de gel modéré à sévère	30 ans
Zone de gel sévère	28 ans
Zone H1 - Hiver clément, salage peu fréquent	36 ans
Zone H2 - Hiver peu rigoureux salage fréquent	29 ans
Zone H3 - Hiver assez rigoureux, salage très fréquent	29 ans
Zone H4 - Hiver rigoureux, salage très fréquent	25 ans

6. Perspectives d'évolution des pratiques

Cette note d'information s'appuie sur un riche retour d'expérience sur l'application de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art et de la méthode IQOA sur le réseau des routes nationales non concédées.

En s'inspirant des éléments de cette note et en parfaite compatibilité avec les principes de l'ITSEOA, les gestionnaires peuvent envisager de faire évoluer leurs pratiques en ce qui concerne :

- la surveillance et la gestion des ouvrages par « méta-familles » qui rassemblent des problématiques ou des risques connexes ;
- une meilleure prise en compte de l'environnement dans les modalités de gestion des ouvrages. De toute évidence, l'environnement a un impact sur la surveillance, la gestion, les actions correspondantes et les priorisations d'intervention ;
- une meilleure prévision des opérations d'entretien à conduire suivant les objets et les typologies d'ouvrages ;
- l'estimation de trajectoires budgétaires suivant la stratégie retenue.

Références

Cerema. *Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP)*. Bron : Cerema, 2011. ISBN 978-2-11-099172-0.

Cerema. *Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée® »*. Bron : Cerema, 2014. ISBN 978-2-37180-022-9.

Cerema. *Analyse des risques appliquée aux buses métalliques*. Bron : Cerema, 2015. ISBN : 978-2-37180-113-4.

Cerema. *Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle*. Bron : Cerema, 2018. ISBN 978-2-37180-225-1

Cerema. *Résistance à l'incendie des ponts routiers*. Bron : Cerema, 2018. ISBN 978-2-37180-281-0.

Cerema. *Analyse de risque des ponts en site affouillable*. Bron : Cerema, 2019. ISBN 978-2-37180-350-3.

Cerema. *Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie*. Bron : Cerema, 2021. ISBN 978-2-37180-454-8.

Note d'information - *Ouvrages d'art n° 03 - Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure*.

Note d'information - *Ouvrages d'art n° 04 - Sensibilisation des gestionnaires de ponts suspendus*.

Note d'information - *Ouvrages d'art n° 05 - Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France : conseils aux gestionnaires et concepteurs*.

Orcesi, A.D. & Cremona, C.F. (2011). *Optimization of maintenance strategies for the management of the national bridge stock in France*, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 16(1), 44-52.

Orcesi, A.D. & Cremona, C.F. (2010). *A bridge network maintenance framework for Pareto optimization of stakeholders/users costs*. Reliability Engineering & System Safety, Elsevier, 96(1), 1230-1243

Résumé

La présente note d'information fait état des réflexions engagées sur le patrimoine des ouvrages d'art du réseau national non concédé afin d'optimiser les dépenses et les actes de gestion, en veillant à proportionner les interventions à la nature de l'ouvrage et aux aléas qu'il subit.

Ces réflexions s'appuient sur des retours d'expérience et des études statistiques. Menées par famille d'ouvrages, elles peuvent être utiles à tous les gestionnaires de patrimoines de ponts afin d'élaborer une politique de gestion technique et financière adaptée.

Contributeurs :

Jean-Christophe CARLES (Cerema) - jean-christophe.carles@cerema.fr

Nathalie CORDIER (Cerema) - nathalie.cordier@cerema.fr

Pierre CORFDIR (Cerema) - pierre.corfdir@cerema.fr

Eric DELAHAYE (Cerema) - eric.delahaye@cerema.fr

Bruno GODART (Université Gustave Eiffel) - bruno.godart@univ-eiffel.fr

Laurent LABOURIE (Cerema) - laurent.labourie@cerema.fr

Jean-Michel LACOMBE (Cerema) - Jean-Michel.Lacombe@cerema.fr

Céline LENGLET (Cerema) - celine.lenglet@cerema.fr

Sébastien NEIERS (Cerema) - sebastien.neiers@cerema.fr

André ORCESI (Cerema) - andre.orcesi@cerema.fr

Pierre PEYRAC (Direction des infrastructures de transport - Mission d'appui au réseau routier national) - pierre.peyrac@developpement-durable.gouv.fr

Chloe PLUT (Cerema) - chloe.plut@cerema.fr

Constantin RUELLET (Cerema) - constantin.ruellet@cerema.fr

Crédit photo de
la 1^{re} page : Pixabay

Collection
Connaissances
ISSN 2417-9701

© 2021 - Cerema
La reproduction totale ou
partielle du document doit
être soumise à l'accord
préalable du Cerema.

La collection Connaissances du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

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