

Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants

Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST)

Ouvrages
d'Art
35

L'optimisation de la gestion des patrimoines d'ouvrages d'art représente une forte attente pour les maîtres d'ouvrage confrontés à un parc vieillissant et à un trafic routier de plus en plus agressif. Dans ce cadre, l'évaluation de la performance d'un ouvrage peut s'avérer nécessaire au cours de sa vie pour diverses raisons.

Cependant, il n'existe pas de textes réglementaires sur le sujet. Les travaux d'un nouvel Eurocode « Evaluation et rénovation des structures existantes » viennent de démarrer et celui-ci ne sera pas disponible avant plusieurs années.

La stricte application des règlements destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant n'est en général pas pertinente et peut conduire à des renforcements ou réparations injustifiés, voire à des erreurs d'appréciation. C'est pourquoi, le Sétra a lancé une action afin de développer des recommandations proposant plusieurs niveaux de sophistication pour la requalification de la performance des ouvrages existants.

La présente note résume un rapport interne rédigé par un groupe de travail du Réseau Scientifique et Technique (RST) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) et expose les pratiques en vigueur dans le RST en matière d'évaluation structurale des ouvrages existants et en particulier en matière de recalcul.

Sommaire

Le contexte	2
Définitions	3
La démarche des calculs	4
Quels règlements utiliser pour les évaluations structurales ?	5
Prise en compte de l'ELS et de l'ELU	6
Quels aménagements prendre en compte ?	7
Quelles caractéristiques mécaniques retenir pour les matériaux en bon état ?	8
Quelles caractéristiques mécaniques retenir pour les matériaux présentant des désordres ?	8
Comment trouver des réserves de capacité portante ?	9
Évaluation sans recalcul	10
Les transports exceptionnels	10
Documents anciens	12
Bibliographie	13

Avertissement

La présente note résume un rapport interne rédigé par un groupe de travail du Réseau Scientifique et Technique (RST) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) et expose les pratiques en vigueur dans le RST en matière d'évaluation structurale des ouvrages existants et en particulier en matière de recalcul.

Il ne concerne que les méthodes d'évaluation dites « courantes » par opposition aux méthodes dites « avancées » qui font l'objet d'autres réflexions.

La présente note expose des spécifications techniques non obligatoires résultant des connaissances scientifiques et techniques acquises à la date de sa rédaction.

Compte tenu de la diversité des situations concernées, le présent document se borne à exposer des principes généraux, au premier rang desquels la sécurité des personnes. Il est destiné, avant tout, à des projeteurs expérimentés qui pourront s'inspirer de ce document dans le cadre d'une évaluation structurale particulière d'ouvrage en l'adaptant au cas considéré.

Le contexte

L'optimisation de la gestion des patrimoines d'ouvrages d'art représente une forte attente pour les maîtres d'ouvrage confrontés à un parc vieillissant et à un trafic routier de plus en plus agressif.

Dans ce cadre, l'évaluation de la performance d'un ouvrage peut s'avérer nécessaire au cours de sa vie pour diverses raisons, par exemple pour :

- prendre en compte une évolution de ses conditions d'exploitation ;
- juger de son aptitude à supporter sans dommage le passage d'un convoi exceptionnel ;
- apprécier sa capacité portante résiduelle en cas de désordres constatés et conclure sur la nécessité ou non d'une intervention (réparation, démolition, limitation de tonnage, etc.).

Les évaluations de la performance ne concernent donc pas que les ouvrages pathologiques, et une proportion importante de celles-ci portent sur des ouvrages en bon état devant supporter le passage de convois exceptionnels.

Quelques pays ont déjà rédigé des textes sur ce sujet, les États-Unis (AASHTO - Manual for Bridge Evaluation [1]), la Grande-Bretagne (Highways Agency requirements [2]), l'Allemagne ([3]), la Suisse (code SIA 269 [4]), le Canada (CAN-CSA 2000 [5]), etc.

Le corpus technique français en la matière est encore très peu développé. Parmi les quelques documents sur lesquels peut s'appuyer un projeteur chargé de l'évaluation de la performance d'un ouvrage existant, on peut citer :

- la norme ISO 13822:2010 : « Bases du calcul des constructions - Évaluation des constructions existantes » [6] ;
- le rapport final du projet Européen BRIME (BRidge Management in Europe) [7] ;
- le document « Gestion des ponts - rapport conjoint franco-britannique » [8] ;
- le livre « Maintenance et réparation des ponts » [9].

Rappelons à ce propos que la quasi-totalité des Eurocodes excluent les ouvrages existants de leur champ d'application. Il convient cependant de mentionner les deux exceptions suivantes :

- l'Eurocode 0 – « Bases de calcul des structures » qui indique en son paragraphe 1.1 « Domaine d'application » [10]
- *L'EN1990 est applicable pour l'évaluation structurale de constructions existantes, en vue de projeter des réparations et des modifications ou d'étudier des changements d'utilisation.*
- *NOTE : des dispositions additionnelles ou modifiées pourront se révéler nécessaires selon le cas.*
- l'Eurocode 8 – « Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 3 : Évaluation et renforcement des bâtiments » [11] ;

Les travaux d'un nouvel Eurocode « Evaluation et rénovation des structures existantes » viennent de démarrer et celui-ci ne sera pas disponible avant plusieurs années.

La stricte application des règlements destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant n'est pas toujours

pertinente.

En effet, les règlements de conception des ouvrages neufs présentent des marges de sécurité qui peuvent s'avérer excessives pour l'évaluation d'un ouvrage existant dans la mesure où les caractéristiques de l'ouvrage existant et ses conditions de trafic réelles peuvent être connues avec précision. En particulier, il est possible de lever des incertitudes liées à sa construction.

D'autre part, il convient de prendre en compte l'état réel de l'ouvrage.

Il n'est pas non plus possible de s'en remettre entièrement aux règlements anciens qui n'intègrent pas les évolutions des connaissances scientifiques récentes, notamment quant au comportement des matériaux.

Les projeteurs sont alors amenés lors des recalculs d'ouvrages à prendre des initiatives, à faire des adaptations et dérogations par rapport aux règlements utilisés pour la conception des ouvrages neufs, en se basant sur des textes ou articles n'ayant pas de caractère officiel ou sur leur expérience.

En l'absence de doctrine officielle sur le sujet, la question de la responsabilité se pose et il peut être tentant d'évaluer un ouvrage existant en appliquant strictement les règles relatives aux ouvrages neufs, ce qui peut conduire à des renforcements ou réparations injustifiés, voire à des erreurs d'appréciation.

C'est pourquoi, le Sétra a lancé une action afin de développer des recommandations proposant plusieurs niveaux de sophistication pour la requalification de la performance des ouvrages existants.

Cette action conduite par des groupes de travail du Ministère pilotés par le Sétra a comporté deux chantiers :

- le premier travail a consisté à clarifier, unifier et formaliser les pratiques des différents services du Ministère en matière d'évaluation de la performance et a fait l'objet d'un rapport interne. Ce document concerne les tabliers d'ouvrages, mais peut être également utilisé pour l'évaluation des appuis (piles et culées). Il ne traite pas le cas des évaluations des fondations et des soutènements. Les principes généraux de cet état de l'art, qualifiés de « **méthodes courantes** » d'évaluation, sont résumés dans la présente note.
- en parallèle, une étude a été engagée sur l'application de la théorie de la fiabilité à l'évaluation des ouvrages existants. L'état d'avancement de ces réflexions, qualifiées de « méthodes avancées » d'évaluation, fait l'objet de l'article du bulletin Ouvrages d'Art du Sétra « Evaluation structurale des ouvrages existants par approche fiabiliste » [12].

Définitions

Il convient dans un premier temps de préciser quelques termes utilisés dans la présente note.

Évaluation de la performance :

Le document « aptitude au service d'un ouvrage » [13] définit cette notion.

Évaluation : appréciation de la performance d'un ouvrage vis-à-vis de 3 aspects :

- la sécurité structurale (ou capacité portante) y compris la fatigue (États-limites ultimes - ELU),
- l'aptitude au service (États-limites de service - ELS),
- la durabilité (matériau).

Par la suite nous utiliserons le terme « **évaluation structurale** » pour désigner l'appréciation de la sécurité structurale (ELU) et de l'aptitude au service (ELS).

Il convient de ne pas confondre « **l'évaluation de l'état** » qui consiste à apprécier de façon quantifiée l'état apparent de l'ouvrage, par exemple par la méthode IQOA, et qui ne fait pas appel à des calculs de structure et « **l'évaluation structurale** » qui nécessite en général des calculs structuraux.

Par ailleurs, l'Eurocode 0 définit les notions d'États-limites ultimes et d'États-limites de service :

États-limites de service : états correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées pour une structure ou un élément structural ne sont plus satisfaites.

Doivent être classés comme états-limites de service ceux qui concernent :

- le fonctionnement de la structure ou des éléments structuraux en utilisation normale,
- le confort des personnes,
- l'aspect de la construction.

 tats-limites ultimes :  tats associés à un effondrement ou à d'autres formes similaires de défaillance structurale.

NOTE : Cette notion correspond généralement à la capacité portante maximale d'une structure ou d'un élément structural.

Doivent être classés comme  tats-limites ultimes ceux qui concernent :

- la sécurité des personnes,
- et/ou la sécurité de la structure.

La démarche des calculs

Les étapes du calcul

Même si une stricte application des réglementations de conception pour ouvrages neufs n'est en général pas pertinente, il n'en demeure pas moins vrai que l'évaluation structurale d'un ouvrage peut passer par différentes étapes de complexités croissantes. L'approche selon les réglementations de conception des ouvrages neufs, la plus simple car la plus familière aux ingénieurs et ne nécessitant pas ou peu d'informations supplémentaires, constitue généralement une première étape.

L'évaluation structurale étant en général men e en plusieurs étapes, il convient de commencer par la plus simple, puis de ne passer à des niveaux de complexités supérieures que si cela s'avère nécessaire.

Le projet européen BRIME [7] propose six niveaux d'évaluation avec des niveaux de recalculs de complexités croissantes s'écartant de plus en plus de l'application stricte des réglementations pour ouvrages neufs.

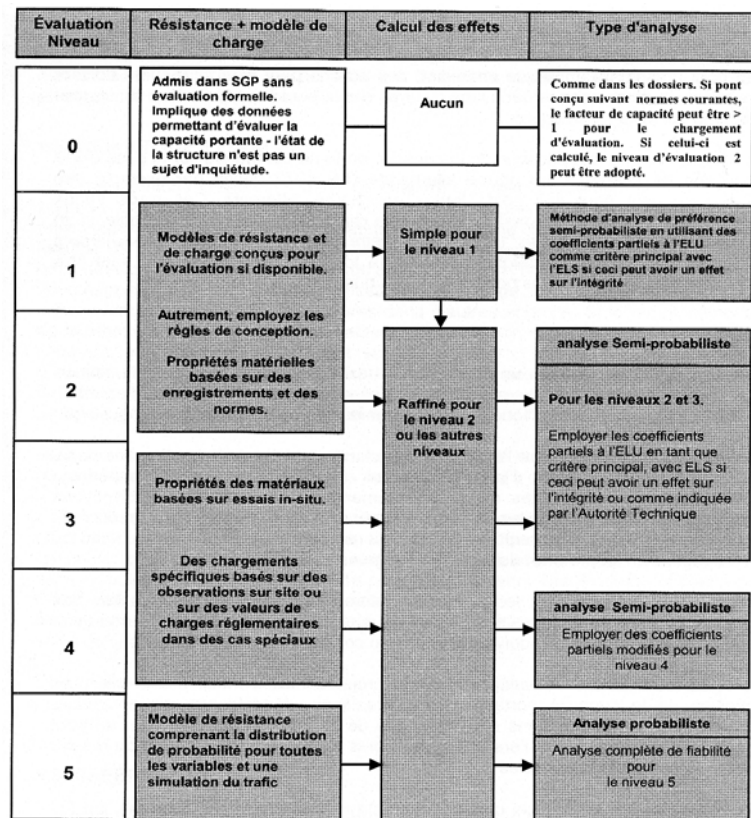


Figure 1 : extrait du document [7]
(SGP = S ysteme de Gestion des Ponts).

Les principes présentés dans cet organigramme sont cohérents avec les pratiques du Ministère pour la démarche des calculs d'évaluation structurale. Très schématiquement, cette démarche peut également être r sum e en quelques étapes, comme suit :

 tape 0 :  valuation sans recalcul

Cette étape correspond au niveau 0 de l'organigramme de la figure 1.

 tape 1 :  valuation avec recalcul, le fait que l'ouvrage est déjà construit n'étant pas ou peu pris en compte

- utilisation des réglementations pour ouvrages neufs,
- ou dans le cas des convois exceptionnels comparaison de l'effet du convoi avec celui des charges d'exploitation utilis es lors de la conception (sauf pour les ouvrages les trop anciens).

Cette étape correspond aux niveaux 1 et 2 de l'organigramme de la figure 1.

La méthode ne s'applique pas dans le cas d'ouvrages présentant des désordres structuraux.

Si l'étape 1 ne permet pas de conclure favorablement, éventuellement passage à l'étape 2, sauf si les insuffisances mises en évidence sont telles qu'il est déjà possible de conclure négativement.

Étape 2 : évaluation avec recalcul, le fait que l'ouvrage est déjà construit étant pris en compte

- utilisation des règlements pour ouvrages neufs avec adaptations sur les sollicitations et les résistances
- recherche de réserves de capacité portante,
- prise en compte de résultats d'auscultation et d'instrumentation.

Cette étape correspond aux niveaux 3 et 4 de l'organigramme de la figure 1.

Si l'étape 2 ne permet pas de conclure favorablement, éventuellement passage à l'étape 3.

Étape 3 : approche fiabiliste

Cette étape correspond au niveau 5 de l'organigramme de la figure 1.

Les « méthodes courantes » d'évaluation structurale, objet de la présente note concernent les étapes 1 et 2 décrites ci-dessus. Les « méthodes avancées » d'évaluation concernent l'étape 3.

Quels règlements utiliser pour les évaluations structurales ?

Le principe selon lequel un ouvrage existant ne doit pas être forcément évalué en appliquant strictement les règlements relatifs aux ouvrages neufs est un principe généralement admis.

Cependant, même si le règlement pour ouvrages neufs n'est pas appliqué strictement, il reste nécessaire de s'appuyer sur des règlements pour mener les calculs. La question du choix de règlements se pose alors en ces termes : faut-il utiliser les règlements pour ouvrage neuf qui étaient en vigueur lors de la conception initiale de l'ouvrage ou doit-on utiliser les règlements actuels ?

Quel règlement de calculs ?

Le principe retenu consiste à utiliser les règlements actuels, les Eurocodes avec éventuellement des aménagements pertinents. En effet, ces règlements sont considérés comme les plus évolués, donc reflétant au mieux les connaissances scientifiques actuelles.

Cependant, dans le cas d'évaluations structurales d'ouvrages sous passage de convois exceptionnels, il est courant de se borner à comparer l'effet du convoi à l'effet des charges routières théoriques de dimensionnement retenues lors de la conception, et de considérer le passage acceptable si le convoi s'avère moins agressif que ces charges théoriques réglementaires. Cette approche simplifiée suppose implicitement que l'on accepte d'utiliser le règlement de calcul de l'époque de conception, ce qui limite son utilisation aux cas des ouvrages dimensionnés avec des règlements dits « modernes » qui conduisent à des niveaux de sécurité voisins de ceux de l'Eurocode, c'est-à-dire pour simplifier au cas des ouvrages postérieurs à 1965 (hors buses métalliques antérieures à 1982).

Quel règlement de charges ?

Le principe retenu consiste à utiliser le règlement actuel, l'Eurocode 1-2 [14], censé être le plus représentatif du trafic actuel.

Il convient cependant de noter que ce règlement a été calibré sur la base de trafics mesurés sur des autoroutes supportant un fort trafic poids lourds. En conséquence :

- pour les ouvrages autoroutiers ou supportant un fort trafic poids lourds ce règlement est le seul à considérer ;
- pour les autres ouvrages lorsque la vérification n'est pas satisfaite avec l'Eurocode 1-2, il est envisageable d'effectuer une vérification selon le règlement de charges français précédent (le titre II fascicule 61 du CPC). La conclusion doit alors être appréciée en fonction du résultat de ces deux approches et du niveau de trafic réellement supporté par l'ouvrage.

Globalement, la classe 2 de l'Eurocode 1-2 et les précédents règlements de charge français, le titre II fascicule 61 [15] de 1960 et celui de 1971 (1^{ère} classe), sont relativement homogènes et conduisent à des niveaux de sécurité voisins. Il convient de mentionner cependant une exception notable à cette règle. En effet, du fait de l'excentrement nettement plus important des charges de l'Eurocode 1-2, celui-ci peut s'avérer sensiblement plus agressif pour certaines familles d'ouvrages et notamment les ponts à poutres.

Des charges moins sévères peuvent également être parfois retenues, par exemple les charges fréquentes pour des phases de chantier de courte durée, compte tenu des observations faites sur le trafic réel à l'époque de l'année (ou aux heures) considérée(s).

Il peut être également envisageable de retenir des charges issues de mesures de trafic réalisées in-situ et exploitées avec un logiciel (par exemple, Pollux développé par l'IFSTTAR [16]), en prenant en compte des valeurs caractéristiques convenablement extrapolées des résultats des mesures. Cette approche peut permettre de réduire les charges routières de calcul pour un ouvrage donné. Une telle approche nécessite cependant une validation par un comité d'experts compte tenu des risques qu'il y aurait à sous-estimer fortement le niveau de charge sur un ouvrage. Elle est en pratique réservée à des cas exceptionnels.

De même, des études en cours au Sétra sur la base de mesures de trafic de très longue durée (1 an d'enregistrement en continu) visent à affiner, pour différents types de structure, les coefficients d'ajustement α qui s'appliquent aux charges UDL ou TS de l'Eurocode 1-2. En effet, ces coefficients α censés couvrir l'ensemble des ouvrages peuvent s'avérer excessifs pour certaines structures. Une telle approche a été réalisée en Suisse et a conduit à proposer des réductions significatives pour le réseau et le trafic suisses [17].

Prise en compte de l'ELS et de l'ELU

Le niveau d'aptitude au service (ELS) d'un ouvrage évalué doit-il être le même que celui requis pour un ouvrage neuf ?

Il est rappelé que conformément à l'Eurocode 0, doivent être classés comme États-limites de service ceux qui concernent :

- le fonctionnement de la structure ou des éléments structuraux en utilisation normale,
- le confort des personnes,
- l'aspect de la construction.

Le principe selon lequel un ouvrage existant peut avoir un niveau théorique d'aptitude au service (ELS) inférieur à celui requis pour un ouvrage neuf est appliqué dans le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

Pour autant le niveau d'aptitude au service doit être jugé satisfaisant. Le choix final découle, après études, de considérations technico-économiques.

Ce principe n'est cependant pas applicable au cas des évaluations structurales pour passage de convois exceptionnels. Dans ce cas, les exigences de l'ELS doivent être vérifiées.

Le niveau de sécurité structurale (ELU) d'un ouvrage évalué doit-il être le même que celui requis pour un ouvrage neuf ?

Il est rappelé que conformément à l'Eurocode 0, doivent être classés comme états-limites ultimes ceux qui concernent :

- la sécurité des personnes,
- et/ou la sécurité de la structure.

S'agissant de la sécurité des personnes, le principe selon lequel un ouvrage existant doit avoir un niveau de sécurité structurale (ELU) comparable à celui requis pour un ouvrage neuf est appliqué dans le Ministère.

Ce principe est cohérent avec l'exigence essentielle de « résistance mécanique et stabilité » à laquelle doivent répondre les ouvrages de construction.

Un niveau de sécurité moindre ne pourrait être envisagé que sur la base de critères socio-économiques et d'une analyse de risque et pour des durées d'usage réduites. Elle est compensée en général par une mise de l'ouvrage sous surveillance renforcée. En tout état de cause, la décision de dégrader le niveau de sécurité structurale (ELU) est du ressort exclusif du maître d'ouvrage.

Le cas des ouvrages dit « fragiles » ou « peu redondants » doit faire l'objet d'une attention toute particulière d'autant que les critères réglementaires ne sont pas toujours suffisants pour apprécier le niveau de fragilité ou de redondance.

L'ouvrage doit donc être justifié à l'ELU moyennant éventuellement des aménagements justifiés par la meilleure connaissance que l'on a de l'ouvrage, en ne remettant pas en cause le niveau de sécurité structurale.

Ceci est cohérent avec l'esprit de l'Eurocode 0 [10] qui indique que pour les ouvrages existants « *des dispositions additionnelles ou modifiées pourront se révéler nécessaires selon le cas* ».

Quels aménagements prendre en compte ?

La meilleure connaissance que l'on a de l'ouvrage ou du trafic supporté peut autoriser des aménagements des règlements pour ouvrages neufs sans remettre pour autant en cause l'ordre de grandeur du niveau de sécurité structurale.

Parmi les aménagements envisageables on peut citer :

- la modification de coefficients partiels à l'ELU,
- la prise en compte de valeurs mesurées sur l'ouvrage (masse volumique, épaisseur de béton, épaisseur d'enrobé, caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier, trafic réel, etc.).

Quels coefficients partiels de sécurité retenir à l'ELU ?

Le document [6] indique au paragraphe 7.3 que les coefficients partiels des règlements pour ouvrages neufs peuvent être modifiés pour prendre en compte les résultats des inspections et des essais. La réduction de l'incertitude sur certaines données justifie une réduction des coefficients partiels de sécurité pondérant les actions et les résistances, sans réduire le niveau de sécurité structurale.

Ces modifications ne doivent donc pas être systématiques. Ce n'est pas parce que l'ouvrage existe que l'on peut automatiquement modifier un coefficient partiel, mais parce que l'on dispose d'informations complémentaires sur son état.

Aujourd'hui, l'on applique des réductions basées sur une appréciation « à dire d'expert », prenant en compte les informations complémentaires disponibles.

Demain, on peut espérer disposer de grilles quantitatives par famille d'ouvrages pour re-calibrer les coefficients partiels en fonction des données issues de relevés in-situ ; le document [12] présente une démarche pour développer ces grilles.

Les modifications sont donc propres à chaque ouvrage et doivent être justifiées au moins qualitativement.

Les coefficients partiels relatifs aux charges permanentes

Le coefficient partiel sur les charges permanentes γ_G est de 1,35. Il est le produit de deux coefficients γ_{sd} et γ_g :

- γ_{sd} correspond aux incertitudes de modélisation. Cette valeur n'est en général pas modifiée.
- γ_g correspond à l'incertitude sur la valeur de G. Cette valeur peut être légèrement réduite, mais uniquement si des investigations sur l'ouvrage réel ont amené un complément d'information.

Au total, il convient de ne pas descendre au-dessous de $\gamma_G = 1,20$.

Parmi les investigations permettant de mieux connaître les charges permanentes, on peut citer par exemple :

- les mesures de l'épaisseur d'enrobé et des superstructures,
- les relevés géométriques (mesures d'épaisseur réelle des âmes et des hourdis, relevés des équipements, etc.),
- les mesures de la masse volumique du béton à partir de carottages,
- les pesées des réactions d'appui.

Il convient cependant de conserver pour les grandeurs issues de ces investigations une incertitude en lien avec l'incertitude des mesures.

Les coefficients partiels relatifs aux charges routières

Les coefficients partiels ne doivent pas être modifiés.

Comme indiqué précédemment, c'est la charge de trafic que l'on peut éventuellement modifier par adaptation des coefficients α d'ajustement ou par prise en compte des résultats de mesures de trafic réel.

Les coefficients partiels relatifs aux matériaux

En fonction des résultats des mesures effectuées sur l'ouvrage et notamment de leur dispersion, il est envisageable d'affiner les valeurs des coefficients partiels relatifs aux matériaux.

Par exemple, l'Eurocode relatif aux ouvrages en béton (EN 1992-1-1) [18] propose une annexe A informative appelée « Modification des coefficients relatifs aux matériaux » qui peut être appliquée au cas d'un ouvrage existant et peut conduire à des réductions significatives des coefficients partiels.

Quelles caractéristiques mécaniques retenir pour les matériaux en bon état ?

Les ouvrages postérieurs à 1960

Pour ces ouvrages, il est en général possible de baser le recalcul sur les résistances des matériaux (béton et acier) visées dans les documents d'exécution sous réserve de vérifier dans le dossier de l'ouvrage l'absence d'incidents de chantier. Ces résistances ne doivent pas être utilisées telles quelles, mais doivent être adaptées.

Par exemple, pour l'évaluation d'un ouvrage ancien en béton, postérieur à 1960 :

- les résistances théoriques de l'époque de construction doivent être actualisées en valeurs caractéristiques sur éprouvettes cylindriques avant d'être utilisées ;
- il est loisible de retenir f_{c90} au lieu de f_{c28} , soit un gain de 10% à 20% sur la résistance à la compression.

Le document [9] récapitule divers coefficients de corrélation pour transformer :

- une résistance nominale ou moyenne en résistance caractéristique,
- une résistance sur éprouvette cubique en résistance sur éprouvette cylindrique,
- une résistance à 28 jours en résistance à 90 jours.

Une autre solution plus précise consiste à procéder à des mesures de résistance in-situ, comme il est recommandé pour les ouvrages antérieurs à 1960.

En pratique, l'avis d'un laboratoire spécialisé est nécessaire car les corrections à apporter dépendent du nombre et de la nature des informations disponibles et de la nature du liant employé.

Les ouvrages antérieurs aux années 60

Pour ces ouvrages, et en particulier pour ceux construits juste après la seconde guerre mondiale avec des matériaux de récupération, il convient en général de procéder à des mesures des caractéristiques des matériaux de l'ouvrage. L'interprétation de ces mesures est délicate dans la mesure où de nombreux paramètres doivent être pris en compte. Par exemple, une carotte prélevée horizontalement dans une âme peut voir sa résistance diminuer sensiblement par rapport à une carotte qui aurait été prélevée verticalement.

Pour l'évaluation de la résistance du béton ancien, il convient de se reporter à la norme NF EN 13791 [19] et notamment à ses chapitres 7 « Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par l'essai sur carottes » et 8 « Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par des méthodes indirectes ».

Quelles caractéristiques mécaniques retenir pour les matériaux présentant des désordres ?

Les principes précédents ne sont plus applicables aux cas des matériaux présentant des désordres.

Pour ceux-ci la plus grande prudence s'impose, et l'on peut difficilement énoncer des règles générales chaque cas étant particulier.

Cependant en ce qui concerne les aciers de béton armé et plus encore les armatures de précontrainte, la corrosion des armatures a non seulement pour effet de réduire leur section résistante, mais également de réduire le palier plastique avant

rupture ainsi que l'adhérence et la résistance à la fatigue. Dès lors, on peut craindre la rupture en chaîne des armatures travaillant simultanément. Les armatures les plus corrodées atteignent leur palier plastique puis se rompent avant que les armatures voisines n'aient atteint leur limite de résistance. Il est recommandé de vérifier les sections à l'état limite ultime en retenant la section résiduelle non corrodée d'armatures et selon une hypothèse de comportement élastique, pour ne pas surestimer les possibilités de plastification des aciers tendus, lorsque les armatures sont partiellement corrodées.

Dans tous les cas, il convient de tenir compte des conditions d'adhérence et d'ancrage des armatures.

Pour les armatures actives, il est également nécessaire de vérifier leur susceptibilité à la corrosion fissurante sous tension, laquelle peut conduire à une rupture brutale par propagation d'une fissure.

Comment prendre en compte la connaissance de l'existant et notamment les désordres et le résultat des auscultations ?

Selon le niveau de calcul retenu, il convient de prendre en compte dans la modélisation les informations obtenues sur l'ouvrage réalisé.

Il existe de nombreuses techniques d'auscultation qui permettent d'améliorer sensiblement la connaissance des matériaux de l'ouvrage et de son fonctionnement.

Ces techniques ne sont ni décrites, ni listées de façon exhaustive ici. Pour plus de précisions le lecteur est invité à se reporter notamment au chapitre 2 du document [9] qui détaille les principales techniques d'auscultation disponibles en deux sous-chapitres, le premier consacré aux matériaux et le second consacré au fonctionnement, et au document [20].

Certains désordres peuvent avoir une influence sur le fonctionnement ou la résistance de la structure et doivent donc être pris en compte dans les calculs structuraux d'évaluation.

Il est cependant difficile d'énoncer des règles générales sur ce sujet qui doit être apprécié au cas par cas en fonction notamment de l'intensité des désordres observés.

Il convient de distinguer le cas des désordres des matériaux et des désordres structurels, dus à un sous-dimensionnement d'origine ou à la sous-estimation de certaines actions (tassements d'appui, effets thermiques, fluage, coupleurs, etc.).

En cas de désordres structurels, il est indispensable de recalculer le modèle de calcul afin qu'il soit cohérent avec les résultats des investigations et explique les pathologies observées.

Comment trouver des réserves de capacité portante ?

L'évaluation doit s'attacher, lorsque cela est nécessaire, à rechercher des réserves de capacité portante non prises en compte lors de la conception, par exemple :

- **en retenant des taux de travail pour les matériaux plus importants que lors de la conception.**

En effet, les valeurs des contraintes limites des anciennes règles de calcul étaient en général plus faibles qu'aujourd'hui. Par exemple, pour le règlement de béton armé de 1934 le taux de travail des aciers doux était limité à 13 ou 14 kg/mm², et le taux de travail du béton comprimé était limité à 0,28 N₉₀ avec N₉₀ la résistance sur cube à 90 jours.

Il convient préalablement d'avoir évalué la résistance du matériau par des mesures.

Les taux de travail ainsi obtenus sont en général inférieurs à ceux des matériaux modernes mais sont plus élevés que ceux résultant des règles retenues lors de la conception.

- **en faisant des modélisations plus fines faisant mieux participer la matière**, par exemple par des modèles à grille de poutres ou aux éléments finis.

Il est à noter que cette approche qui conduit à une diminution des variations de contrainte sous passages de camions, est également bénéfique vis-à-vis des calculs de fatigue.

- **en retenant des méthodes de justification plus évoluées**, par exemple :

- le contrôle du déversement des poutres de ponts mixtes sur pile avec les Eurocodes est plus sévère que celle résultant de l'application des règlements français antérieurs. Ainsi la contrainte admissible au déversement est environ 25 % inférieure à celle autorisée avec l'ancienne réglementation. Le recours à une méthode de premier ordre basée sur un

calcul simplifié de la contrainte critique de déversement (théorie d'Engesser) qui était usuellement appliquée jusqu'à maintenant ne permet pas de justifier le respect des nouvelles exigences. L'utilisation d'une méthode plus précise pour le calcul de la contrainte critique de déversement ou la réalisation d'un calcul au second ordre devient nécessaire pour mieux apprécier la stabilité au déversement et pour justifier le respect des limites des Eurocodes ;

- la méthode des lignes de rupture ou la prise en compte des redistributions possibles après plastification (sous réserve de vérifier les capacités de déformations plastiques) peuvent permettre de justifier à l'ELU des hourdis qui ne pourraient être justifiés par des méthodes traditionnelles.
- **en faisant participer des éléments généralement négligés**, par exemple :
 - en prenant en compte la diffusion dans l'épaisseur de l'enrobé qui permet une meilleure répartition des efforts concentrés pour les dalles orthotropes, etc. ;
 - en prenant en compte la longrine de la barrière de sécurité qui rigidifie la structure. L'article [21] montre comment la prise en compte de l'effet répartiteur de la longrine support de BN4 permet d'intéresser une plus grande quantité d'aciers transversaux, ce qui peut permettre d'éviter un renforcement délicat à réaliser lors de la mise en œuvre d'une barrière BN4 avec ancrage P sur un ouvrage existant.

Évaluation sans recalcul

Le document [6] en son article 8 intitulé « Assessment based on satisfactory past performance » (« Évaluation basée sur une performance passée satisfaisante ») définit les conditions requises pour apprécier la sécurité structurale (ELU) et l'aptitude au service (ELS) d'une structure sans qu'il soit nécessaire de procéder à un recalcul.

Par exemple, pour la sécurité structurale ce document indique :

Les ouvrages d'art conçus et construits à partir de règlements anciens, ou conçus et construits conformément aux bonnes pratiques de construction lorsque aucun règlement n'a été appliqué, peuvent être considérés comme sûrs pour résister à des actions autres que les actions accidentelles (y compris les tremblements de terre) à condition que :

- *une inspection minutieuse ne révèle aucun signe de dommage, péril ou détérioration significatif,*
- *le système structural est passé en revue, y compris des investigations sur les détails critiques et leur vérification pour les transferts d'efforts,*
- *la structure a fait preuve d'une performance satisfaisante pendant une période de temps suffisamment longue pour que les actions extrêmes dues à l'utilisation et les effets environnementaux aient eu lieu,*
- *la détérioration prévisible tenant compte de la situation actuelle et la maintenance planifiée assure une durabilité suffisante,*
- *il n'y a pas eu de changement sur une durée suffisamment longue qui pourrait augmenter de manière significative les actions sur la structure ou nuire à sa durabilité, et aucun changement de cette sorte n'est prévu.*

Cet article est cohérent avec la pratique selon laquelle les ouvrages ne sont pas systématiquement réévalués à l'occasion d'un changement de réglementation, s'ils donnent satisfaction et ne présentent pas de détails critiques.

Les transports exceptionnels

Dans les faits, les études des conditions de passage de convois exceptionnels constituent une grande proportion des évaluations d'ouvrages. Ce cas particulier est donc développé ci-après.

Il s'agit le plus souvent d'ouvrages non pathologiques.

Les textes

Pour les ouvrages d'art, le corpus relatif aux convois exceptionnels est principalement composé de 3 documents qui sont complémentaires et forment un ensemble cohérent :

- l'arrêté du 4 mai 2006 (modifié par l'arrêté du 4 septembre 2007) [22] qui définit les catégories des convois exceptionnels et donne des limites dues à la résistance des chaussées et/ou à la performance des ouvrages d'art ;

- l'annexe nationale de l'Eurocode 1-2 [14], et en particulier le guide qui lui est annexé intitulé « Guide pour la prise en compte des véhicules spéciaux sur les ponts routiers » qui propose des règles de calculs en fonction des conditions de circulation retenues pour les ouvrages neufs (trafic routier concomitant, vitesse, etc.) ;
- Le document « Transports exceptionnels - définition des convois-types et règles pour la vérification des ouvrages » [23] joint à la lettre-circulaire R/EG.3 du 20 juillet 1983, qui définit des convois types et donne des indications pour l'évaluation structurale des ouvrages existants. Ce document, passablement dépassé du fait de l'évolution du contexte est en cours de refonte.

Principes de calculs

Pour l'étude des conditions de passage de convois exceptionnels, la première étape de l'évaluation d'un ouvrage existant est couramment effectuée en comparant les sollicitations engendrées par le trafic considéré à celles engendrées par les charges d'exploitation utilisées à l'époque du dimensionnement.

Plusieurs configurations peuvent être envisagées pour définir quelles sont les conditions de passage acceptables :

- le convoi roulant sur la voie lente à vitesse normale et mêlé au trafic, configuration la moins contraignante ;
- le convoi roulant seul au pas sur une position transversale précise déterminée par les calculs (dans la majorité des cas il s'agit de l'axe de l'ouvrage), configuration la plus contraignante ;
- ou toute autre configuration intermédiaire.

Comme il a déjà été indiqué, cette approche revient implicitement à utiliser le règlement de calculs de l'époque de la conception initiale. La méthode doit donc être utilisée avec beaucoup de précautions pour les règlements de calculs « non modernes » c'est-à-dire antérieurs à 1965. Dans ce dernier cas en particulier, il convient de vérifier la résistance à l'ELU qui n'était en général pas contrôlée à l'époque et à s'assurer de l'absence de fragilité.

La méthode ne s'applique pas directement au cas des ouvrages pathologiques ou appartenant à des familles présentant des insuffisances structurelles connues.

Enfin, de nombreux ouvrages ont fait l'objet de dérogations de calculs diverses pour le passage des convois exceptionnels. La pertinence de ces dérogations doit être appréciée dans le cadre de cette approche.

Les calculs doivent également être menés selon le document « Guide pour la prise en compte des véhicules spéciaux sur les ponts routiers (annexé à l'annexe nationale de l'Eurocode 1-2) ».

S'il n'est pas possible de conclure favorablement à l'issue de cette approche simplifiée, il convient de passer à des approches plus fines.

Particularités des convois exceptionnels

La circulation des convois exceptionnels présente trois principales particularités :

1) dans certains cas la charge est connue avec une très grande précision.

Dans le cas d'un véhicule particulier unique dont le poids est déjà connu avec une très grande précision lors de calculs d'évaluation, une réduction du coefficient donnant la valeur caractéristique (coefficient valant 1,1 en général) est envisageable. Ce cas est réservé aux véhicules très lourds, dont la circulation fait l'objet de réflexions préalables approfondies. Le guide annexé à l'annexe nationale de l'EC1-2 propose 1,05 comme valeur plancher.

Dans les autres cas, notamment pour l'étude de familles de convois (grues automotrices par exemple) et en particulier pour l'étude de convois types, il convient de conserver la valeur de 1,1.

2) l'ouvrage va être réellement sollicité par le convoi.

Les intensités des sollicitations dues aux charges civiles théoriques réglementaires ne sont en général pas approchées par le trafic réel pour la plupart des ouvrages. Au contraire, l'ouvrage va réellement supporter le passage du convoi et son agressivité peut être très proche de celle des charges civiles théoriques.

Compte tenu :

- du fait que les charges de calculs sont réellement atteintes,
- du fait que le passage du convoi ne doit pas créer d'endommagement,

L'ouvrage doit être justifié à l'ELS avec un niveau équivalent à celui requis pour un ouvrage neuf.

3) les nombres de passages d'un convoi particulier sont en général limités.

a) la fatigue

Vis-à-vis de la fatigue, la question du nombre de passages à considérer est délicate. Les études pour un convoi particulier sont faites au cas par cas, pour un ou quelques passages. Mais en théorie c'est l'ensemble des passages de convois particuliers, passés et futurs, et des poids lourds, qui devraient être pris en compte vis-à-vis de cet aspect, ce qui est dans les faits impossible à réaliser.

Pour l'étude des convois types, la fréquence de leurs passages doit être considérée, et il convient de les considérer comme des charges fréquentes.

b) la fissuration des ouvrages en béton

Si l'on se réfère à l'esprit de l'Eurocode, pour lequel les justifications à l'ELS relèvent des combinaisons fréquentes, on peut accepter des critères à l'ELS moins sévères sous le passage très peu fréquent de convois exceptionnels. Dans ce cas une ouverture des fissures plus importante est envisageable, mais il convient de s'assurer de leur réversibilité, par exemple en limitant à $0,8 f_{yk}$ le taux de travail des aciers.

Documents anciens

Une bonne connaissance des règles et technologies anciennes en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage est nécessaire pour mener à bien une évaluation structurale.

Dans le cadre de cette étude, le Sétra a effectué un important travail de compilation et de numérisation de nombreux documents anciens.

Ces documents sont téléchargeables gratuitement sur le site « Piles » du Sétra.

<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

Sont notamment disponibles :

- la plupart des règlements de calcul et de charge publiés en France depuis 1852 ;
- la plupart des agréments et autorisations de distribution des armatures et procédés de précontrainte ;
- la plupart des agréments et homologations des armatures de béton armé ;
- la plupart des textes sur les convois exceptionnels ;
- des documents de synthèse sur ces différents textes.

Bibliographie

- [1] Manual for Bridge Evaluation (2011), 2^{ me} Edition, AAHSTO, USA.
- [2] Design Manual for Roads and Bridges: Volume 3, Highway Structures: Inspection and Maintenance, (2001), Highways Agency, UK.
- [3] Richtlinie für die Nachrechnung von Stra enbr ucken im Bestand (05/2011), BASt  dition, Allemagne
- [4] SIA 269-1   SIA 269-7 (2011), Bases pour la maintenance des structures porteuses, Suisse.
- [5] CAN/CSA-S6-00 (2000), Canadian highway bridge design code, Canada.
- [6] ISO 13822 (2010), Bases for design of structures – Assessment of existing structures, ISO.
- [7] BRIME (2005), Gestion des ponts en Europe - Projet européen BRIME, Collection études et recherches des LPC - série Ouvrages d'art - n  49, IFSTTAR, France.
- [8] Management of Bridges / Gestion des Ponts (2005), Thomas Telford, UK.
- [9] Maintenance et réparation des ponts (1997), Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, France.
- [10] NF EN 1990 (2003), Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures, 2^{eme} tirage, AFNOR, France.
- [11] NF EN 1998 (2005), Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 3 :  valuation et renforcement des bâtiments, AFNOR, France.
- [12] Colas A.S, Michel J. (2012), Evaluation structurale des ouvrages existants par approche fiabiliste, Bulletin Ouvrages d'Art n 67.
- [13] Aptitude au service des ouvrages (2004), rapport de synthèse de l'opération de recherche, Collection études et recherches des LPC - série Ouvrages d'art - n  48, - IFSTTAR, France
- [14] NF EN 1991 (2004), Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic, AFNOR, France.
- [15] Fascicule 61, Titre II (1971), Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art - Programme de charges et épreuves des ponts routes, Ministère de l'Equipeement, France.
- [16] POLLUX-LCPC (2007), Calcul des effets du trafic sur les ponts routiers, IFSTTAR, France.
- [17] OFROU (2006), Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualis e, OFROU, Suisse.
- [18] NF EN 1992 (2005), Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, AFNOR, France
- [19] NF EN 13791 (2007), évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments pr efabriqu es en béton, AFNOR, France.
- [20] Abdunur C., Godard B. (1998), Méthodes d'auscultation pour l'évaluation des ponts, Annales du bâtiment et des travaux publics, 6, 35-50, France
- [21] Chasco E. Lacombe J.M, Le Faucheur D. (2004), étude de la résistance des hourdis de pont sous l'effet d'un choc de poids lourd sur une barrière BN4, Bulletin Ouvrages d'Art n  46, Sétra, France.
- [22] Arrête du 4 mai 2006 (modifi e par l'arrête du 4 septembre 2007) « relatif aux transports exceptionnels de marchandises, d'engins ou de véhicules et ensembles de véhicules comportant plus d'une remorque » JORF n 110 du 12 mai 2006 page 6919
- [23] Transports exceptionnels (1982), Définition des convois-types et règles pour la vérification des ouvrages d'art, guide technique, Sétra, France

Rédacteur

Jean-Michel Lacombe
téléphone : 33 (0)1 60 52 32 67 - télécopie : 33 (0)1 60 52 31 44
mél. : jean-michel.lacombe@developpement-durable.gouv.fr

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Sétra est destinée à fournir une information rapide. La contre-partie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni de l'administration.

Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

110, rue de Paris – Sourdun – BP 214 – 77487 Provins Cedex – France
téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 – télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.i2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.
Référence : 1211w – ISSN : 1250-8675

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEDDTL

