



HAL
open science

Analyse des problématiques liées à l'évaluation structurale des ouvrages existants

Midula Alam, Silvia Ientile, F. Lavergne, André Orcesi, Franziska Schmidt

► **To cite this version:**

Midula Alam, Silvia Ientile, F. Lavergne, André Orcesi, Franziska Schmidt. Analyse des problématiques liées à l'évaluation structurale des ouvrages existants. JFMS 2023, 12èmes journées de fiabilité des matériaux et des structures, AUGC, Jun 2023, La Rochelle, France. pp.167-176, 10.26168/ajce.41.3.18 . hal-04381209

HAL Id: hal-04381209

<https://hal.science/hal-04381209v1>

Submitted on 20 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse des problématiques liées à l'évaluation structurale des ouvrages existants par ajustement des coefficients partiels – cas des ponts en béton armé et béton précontraint

Midula Alam¹, Silvia Ientile², Francis Lavergne³, Franziska Schmidt², André Orcesi^{2,4}

¹ Université Gustave Eiffel, Département MAST, Laboratoire EMGCU, 14-20 Boulevard Newton – Cité Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France, midula.alam@univ-eiffel.fr

² Université Gustave Eiffel, Département MAST, Laboratoire EMGCU, 14-20 Boulevard Newton – Cité Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France

³ Cerema, ITM, 8 Boulevard Newton, 77420 Champs-sur-Marne, France

⁴ Cerema, ITM, équipe de recherche ENDSUM, 8 Boulevard Newton, 77420 Champs-sur-Marne, France

RESUME Le vieillissement des ouvrages d'art, soumis à des environnements agressifs et à des conditions d'exploitation pouvant évoluer, fait de la préservation de ce patrimoine un enjeu majeur. Pour des considérations environnementales et économiques, la gestion d'un patrimoine d'ouvrages implique de connaître les structures et de pouvoir les évaluer pour déterminer le besoin de réparation et d'entretien. La connaissance de l'état du patrimoine permet de cibler des typologies d'ouvrages présentant des pathologies récurrentes. Il est alors possible de proposer une classification des ouvrages types regroupant les pathologies courantes, les particularités de calcul et les modes de défaillance associés. Dans cet article, l'analyse de ces éléments permet de mettre en avant les problématiques liées à l'évaluation structurale d'ouvrages existants en identifiant des familles de ponts en béton armé et béton précontraint concernées en se basant sur les guides d'applications et les cas d'études dans la littérature.

Mots-clés ponts existants, gestion de patrimoine, évaluation structurale, béton armé, béton précontraint

I. INTRODUCTION

Les problématiques de gestion du patrimoine routier existant expliquent le besoin d'évaluer les structures existantes. En effet, garantir la sécurité et le confort des utilisateurs tout en considérant les implications économiques et environnementales nécessite d'avoir un outil d'aide à la décision complet et fiable. Ces outils guident les gestionnaires pour les priorisations de réparations et d'entretien des ouvrages. L'évaluation passe généralement par un recensement des ouvrages, des auscultations, évaluations régulières et une analyse des risques. Chacun de ces aspects présente des problématiques variables. Dans le cadre de cette étude, l'accent est porté sur les questions d'évaluation structurale de l'ouvrage. L'objectif est d'effectuer une analyse des paramètres à

considérer pour effectuer une évaluation structurale ajustée au mieux aux caractéristiques propres d'une famille d'ouvrage, sans prétendre à fournir un état de l'art.

En Europe, le cadre normatif est fixé par les Eurocodes (Association française de normalisation, 2007) qui est prévu initialement pour le dimensionnement des structures neuves. La NF EN 1990:2002 précise toutefois qu'elle est applicable pour l'évaluation structurale de constructions existantes en prenant en compte des dispositions additionnelles ou modifiées, pouvant se révéler nécessaires. Elle est ainsi le document de référence pour mener les études. Par ailleurs, la vérification technique TS 17440 fournit désormais un cadre spécifique dédié à l'évaluation des structures existantes (TS 17440, 2020). En France, des guides proposent des recommandations pour conseiller le projeteur, en charge d'un projet d'évaluation.

L'évaluation structurale, consistant à effectuer un recalcul d'un ouvrage avec des données actualisées (Barras et al., 2016), peut se réaliser par des méthodes plus ou moins complexes (approches semi-probabilistes, réalisation d'un modèle aux éléments finis ou modèle à barre avec analyse probabiliste). Les méthodes d'évaluation semi-probabilistes, basées sur les coefficients partiels, requièrent des volumes d'information moins importants que pour l'analyse probabiliste. Par ailleurs, la vérification technique TS 17440 laisse la possibilité d'ajuster les coefficients partiels sous réserve d'avoir les informations nécessaires pour le faire. Il est alors important de déterminer le volume d'information indispensables pour pouvoir effectuer cette actualisation des coefficients partiels (TS 17440, 2020).

II. NOTIONS CLÉES POUR L'AJUSTEMENT DES COEFFICIENTS PARTIELS

Dans le cadre des approches semi-probabilistes, les coefficients partiels permettent de prendre en compte les incertitudes de mesures, de méthodes et statistiques.

Le bulletin *fib 80*, propose deux formalismes d'ajustement des coefficients partiels (Allaix et al., 2016) : la Design Value Method (DVM) et l'Adjusted Partial Factor Method (APFM). Dans le cas de l'application de la méthode DVM, pour les résistances, un exemple de formule permettant de calculer un coefficient partiel est donné par :

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_d} = \frac{\mu_X (1 - f_{0.95} V_X)}{\mu_X (1 - \alpha_R \beta_c V_X)} \quad (1)$$

avec X une variable aléatoire de résistance suivant une loi normale, $(\mu_X; V_X)$ les paramètres de la variable aléatoire (respectivement moyenne et coefficient de variation), $f_{0.95}$ le quantile à 95% de la loi normale, β_c l'indice de fiabilité cible et α_R de coefficient de sensibilité (donné par l'équation 2) (König and Hosser, 1982).

$$\alpha_R = \frac{\beta_c - \Delta\beta_c}{\beta_c} \times \frac{\min\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right) \sqrt{1 + \max\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right)^2} - \max\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right) \sqrt{1 + \min\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right)^2}}{\min\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right) - \max\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_R}\right)} \times \sqrt{i} - \sqrt{i-1} \quad (2)$$

avec S et R deux variables aléatoires représentant les sollicitations et la résistance globale (respectivement), σ_S et σ_R les écart-types associés, i l'ordre d'importance de la variable aléatoire X (1 si variable dominante et 2 sinon).

D'après les équations 1 et 2, l'ajustement d'un coefficient partiel peut se faire à partir de l'actualisation des paramètres des lois de distribution des variables aléatoires, de l'indice de fiabilité

cible ou du coefficient de sensibilité. Ce dernier dépendant des écart-types des variables aléatoires caractérisant la résistance et sollicitation globales de l'ouvrage et nécessite donc d'avoir des informations permettant de caractériser des variables aléatoires capables de décrire les grandeurs et les incertitudes associées. L'indice de fiabilité cible dépend de la période de référence des événements récurrents et également de considérations socio-économiques (Steenbergen et al., 2015). La norme XPCEN/TS 17440 laisse la possibilité de baisser l'indice de fiabilité cible mais cela implique de pouvoir montrer les conséquences d'un tel choix. Dans la pratique, une évaluation structurale ne prend pas en compte les ajustements de coefficients partiels et encore moins la possibilité de baisser l'indice de fiabilité à l'État Limite Ultime (ELU).

La collecte d'information peut se faire par des méthodes très variées qui peuvent être destructives ou non destructives. Les recherches sont en cours pour mettre en place des méthodes Structural Health Monitoring (SHM) afin de suivre l'état d'un ouvrage (Dixit and Gupta, 2022). Toutes ces méthodes peuvent largement contribuer à l'évaluation d'une structure existante. Cependant, de nombreuses méthodes étant encore expérimentales, nous ne considérons que les méthodes les plus couramment utilisées.

À partir des cas d'application dans la littérature et des guides de conception pour des ouvrages types, l'article identifie dans la suite, selon les familles d'ouvrage, les particularités en fonction des pathologies des matériaux et de la structure, des vérifications prévues par les guides de conception, des anciens règlements et des tests courants. Cette analyse permet la sélection de paramètres à considérer pour l'ajustement des coefficients partiels dans le cadre de l'évaluation structurale des ponts routiers types existants.

III. ANALYSE DES PONTS COURANTS EN BETON ARME ET BETON PRECONTRAIT

Zhang et al. (2022a) distinguent des critères de défaillance selon les périodes de la vie de l'ouvrage (en construction, en service ou en destruction), l'âge, le type de matériaux, l'usage et la durée de service. Parmi les études utilisées par Zhang et al. (2022a), les ponts routiers en béton ou en métal sont ceux ayant connu le plus de défaillances. 70% des défaillances sont liés à des défauts de dimensionnement, de construction, d'hydraulique, des collisions ou des surcharges.

Plusieurs travaux ont été menés pour déterminer des grilles ajustées de coefficients partiels (Ballière et al., 2012; Steenbergen et al., 2015). Cependant, il est assez difficile de systématiser ces grilles étant donné la multiplicité des typologies d'ouvrage, mais également des règlements de dimensionnement, ou encore des pathologies liées aux différentes familles d'ouvrage. En considérant l'époque de fabrication, l'environnement et les méthodes de fabrication, on établit une liste des pathologies communément retrouvées pour certaines familles d'ouvrage. On distingue dans l'étude, les insuffisances structurales propres aux familles d'ouvrage des insuffisances liées aux matériaux qui ensuite peuvent provoquer des insuffisances structurales à terme.

À partir des guides de conception des ouvrages courants, il est possible de déterminer les éléments clés liés au mode de fonctionnement de ces ouvrages, aux principaux éléments constituant la structure et aux pathologies les plus récurrentes. Les ouvrages courants considérés sont les suivants : Passages inférieurs en cadre fermé de béton armé (*PI.CF 67*, 1966), Passage inférieur en portique ouvert (*PI.PO 74*, 1974), Portique Ouvert Double (*POD 76*, 1976), Passages supérieurs ou

inférieurs en dalle pleine continue en béton armé (*PSI.DA 68*, 1973), Passages supérieurs ou inférieurs à dalle précontrainte (*PSI.DP 69*, 1969, *PSIDP.EL*, 1985), Passages supérieurs ou inférieurs à dalle nervurée (*PSI DN 1981*, 1981), Pont à poutres en béton armé (*PSI.BA 77*, 1977), Poutres précontraintes par adhérence (*PR.AD 73*, 1973), Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension (*VIPP 96*, 1996; Millan et al., 1996).

Les tableaux 1 et 2 reprennent l'analyse des éléments structuraux visibles en fonction de la famille d'ouvrage. On retrouve surtout 3 grands types de ponts : les ponts cadres, les ponts dalles et les ponts à poutres. Les pathologies du béton sont communes à toutes les familles (vieillessement du béton, carbonatation, perte d'enrobage), celles des aciers dépendent de la nature de ces derniers (passifs ou actifs) avec des problématiques de corrosion, mais on retrouve également des pathologies plus spécifiques à la famille. Pour les ouvrages en béton armé, on retrouve assez classiquement les tests suivants : suivi des armatures (position, section), mesure de l'ouverture des fissures, suivi de la géométrie.

Le tableau 3 regroupe les principales méthodes d'évaluation structurale des ouvrages existants. Les méthodes DVM et APFM sont des méthodes semi-probabilistes basées sur le principe de la méthode FORM (First Order Reliability Method) qui détermine la probabilité de défaillance en transformant toutes les variables aléatoires en lois normales centrées réduites, et dont l'évaluation est basée sur un quantile des variables. Elle diffère de la méthode FOSM (First Order Second Moment Method) qui considère que la fonction de défaillance évaluée en les paramètres est une gaussienne dont l'évaluation est faite en considérant la moyenne des variables. La méthode MC (Monte-Carlo) est une méthode qui permet de déterminer la probabilité de défaillance par un grand nombre de tirages de valeurs des paramètres. Enfin la méthode ECoV (Estimation of Coefficient of Variance of Resistance), méthode particulière parmi les méthodes GRF (Global Resistance Factor) telles que définies dans le MC2010 (Comité euro-international du béton, 2013) définissant la résistance globale de la structure comme une variable aléatoire, fixe la valeur du coefficient partiel global en fonction des écarts entre valeurs caractéristiques et valeur moyenne de la résistance. Les cas d'application sont néanmoins centrés très souvent sur des poutres, et non pas à une structure entière et l'étude se fait assez fréquemment sous moment fléchissant avec quelques applications à l'effort tranchant. De plus, les cas d'étude sont généralement menés à l'ELU car l'étude porte sur la défaillance d'un élément de structure. Les méthodes mises en place dans ces cas d'étude peuvent ensuite être appliquées aux différentes parties des ouvrages présentées dans les tableaux 1 et 2.

Le tableau 3 met en évidence l'importance du coefficient partiel sur l'acier, et les tableaux 1 et 2 indiquent que les aciers sont sujets à la corrosion. La prise en compte d'une variable aléatoire actualisée qui considère l'époque de fabrication de l'acier et une section théorique prenant en compte des modèles de dégradation de l'acier soumis à la corrosion, permet d'avoir un coefficient partiel ajusté plus précis. De plus, un ouvrage atteint de corrosion peut subir des conséquences variées (défaillance locale ou généralisée) selon des critères différents (localisation de la pathologie, redondance de la structure, qualité des matériaux, qualité d'exécution...) dont certains sont spécifiques à la structure et d'autres spécifiques à une famille d'ouvrage. Néanmoins, ces ajustements peuvent engendrer une augmentation des incertitudes de modèle. Intervient alors la question de la précision des modèles de dégradation.

TABLEAU 1. Caractéristiques et particularités des ouvrages en béton armé

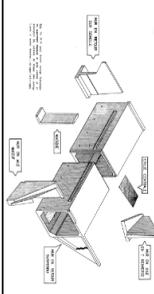
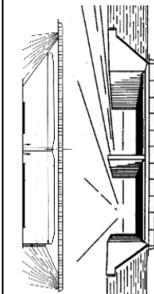
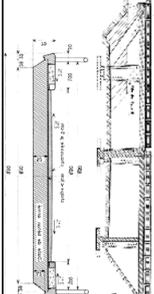
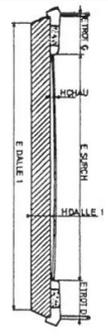
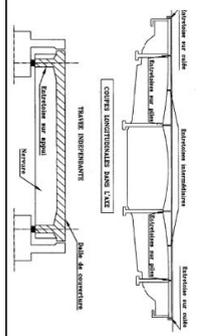
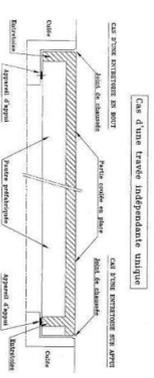
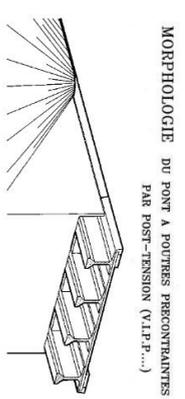
Remarque	Vérifications recommandées	Avantages / Fragilités	Fréquence	Guides	Pathologie structure	Schéma	Famille	Structure
Pont cadre construits sans marges sur les critères de vérification en cisaillement (taux de cisaillement non pondéré entre 7 et 7,5 Kg/cm ²)	<ul style="list-style-type: none"> Ferrailage extérieur du piedroit Vérification de la compression du sol sous la traverse inférieure Résistance à l'effort tranchant (cisaillement du béton, adhérence des aciers) Vérification moment fléchissant (automatique avec la feuille de calcul) 	Très robustes mais faiblesses au niveau des éléments préfabriqués (normes moins exigeantes)	Les plus fréquents	PICF 67 (1966) basé sur le fascicule 61	<ul style="list-style-type: none"> Déformations imposées par mouvement des remblais, Mouvement d'appuis 		PICF	Pont cadre et portique
				PIPPO 74			Pont cadre et portique	
Structure proche du portique ouvert simple mais franchissement de plus grande portée pour des coût faibles	<ul style="list-style-type: none"> Pas de prise en compte de la variation d'inertie dans les traverses due à la présence des goussets 	Très robustes	Fréquents car construits lorsqu'une portée plus importante que les PDCF étaient nécessaires	POD 76 (prolongement du dossier pilote PIPPO) basé sur le fascicule 61	<ul style="list-style-type: none"> Déformations imposées par mouvement des remblais, mouvement d'appuis Sensibilité aux tassements d'appuis et aux mouvements horizontaux de culées 		POD	Pont cadre et portique
				PSIDA 68			Ponts dalles	
		Robustes (grâce à son monolithisme, géométrie simple) avec une réserve de sécurité importante	Ouvrages courants	PSIDA 68	<ul style="list-style-type: none"> Déformations imposées par mouvement des remblais, mouvement d'appuis Sensibilité aux tassements d'appuis et aux mouvements horizontaux de culées 		PSIDA	Ponts dalles
		Poids plus faible que les ponts-dalle (même précontraint) donc moins de charges permanentes liées au poids propre	Ouvrage en béton armé moins courant à l'époque de l'apparition du guide	PSIBA 77 basé sur le fascicule 61			<ul style="list-style-type: none"> Fissuration de la face supérieure, autour des barres 	PSIBA
	<ul style="list-style-type: none"> Ouvrage coulé sur cintre Hypothèses des entretoises indéformables => méthode de COURBON pour la répartition transversale Encastrement partiel 	<ul style="list-style-type: none"> Vérification des armatures, bielles Vérification effectuée en moment fléchissant et efforts tranchants (poutre et dalle) Importance du choix des barres 						

TABLEAU 2. Caractéristiques et particularités des ouvrages en béton précontraint

Pathologie acier		Pathologie béton	
<p>Oxydation des aciers, corrosion fissurante, mauvaise injection</p>	<p>Oxydation des aciers, corrosion des aciers passifs et des câbles de précontraintes</p>	<p>Vieillessement du béton</p>	<p>Vieillessement du béton</p>
<p>Schema</p> 			
<p>Famille</p> <p>PSIDP</p>	<p>PSIDN</p>	<p>PRAD</p>	<p>VIPP</p>
<p>Structure</p> <p>Ponts dalles</p>	<p>Ponts dalles</p>	<p>Ponts à poutres</p>	<p>Ponts à poutres</p>
<p>Éléments de structure</p>			
<ul style="list-style-type: none"> • Tablier (traverse supérieure) • Fondation enterrée (traverse inférieure) • Culées incorporées (piédroits) • Goussets 	<ul style="list-style-type: none"> • Piédroits fondés sur des semelles superficielles ou sur des fondations • Traverse supérieure • Goussets • Une seule travée de portée maximale 22m • Radier interrompu 	<ul style="list-style-type: none"> • Dalle d'épaisseur constante en béton armé généralement de section rectangulaire (avec ou sans chanfreins latéraux) • Coulés sur cintre • De 2, 3 ou 4 travées selon les caractéristiques de la voie à franchir et le biais de franchissement : 3 travées => supprimer l'appui intermédiaire sur le terre-plein central. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tablier : poutres longitudinales généralement préfabriquées de hauteur constante solidarisées par des entretroises en travée et sur appui et supportant un hourdis en béton armé, • Travées peuvent être indépendantes ou continues, • Dalle de couverture avec épaisseur constante • Poutres à hauteur constantes, solidarisées ou non par des entretroises pleines

Pathologie structure	<ul style="list-style-type: none"> • Déformations imposées par mouvement des remblais, mouvement d'appuis • Sensibilité aux tassements d'appuis et aux mouvements horizontaux de culées 	<p>Sensibilité des poutres au choc de véhicule</p> <p>* Isostatique : désordres au niveau des appareils d'appuis (distorsions, migrations)</p> <p>* Hyperstatique : sensibles aux tassements d'appuis</p> <p>Problème de transmission des efforts d'une travée à l'autre</p> <p>Flèches différentielles (béton d'âge différent)</p> <p>Flèches importantes</p>	<p>Risque de rupture fragile en flexion et ou à l'effort tranchant (risque plus faible que dans le cas des VIPP d'ancienne génération)</p>
Guides	<p>PSIDP 69, PSIDP.EL (1985) basé sur le BPEL</p>	<p>PSIDN 81</p>	<p>PRAD 73 basé sur le fascicule 61 titre 2, fascicule 4 titre 2 et circulaire n°73-153 du 13 août 1973</p> <p>• VIPP 96</p> <p>• Évaluation structurale et réparation des Viaducs à travées indépendantes à Poutres Préfabriquées précontraintes par post-tension</p>
Robustesse / Fragilité	<p>Robuste si bien injectés</p>	<p>Fragilité : poutres préfabriquées pré-tendues (normes plus souples que pour les structures coulées en place)</p> <p>Robustesse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Très variable (époque) qualité de l'injection • Rupture d'une partie n'entraîne pas nécessairement la ruine de l'ouvrage 	
Tests	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi d'ouverture de fissures, • Essai à l'arbalète, parfois surveillance acoustique de la précontrainte • Pesée des réactions d'appuis • Suivi de la géométrie globale de la structure 	<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance de la géométrie des poutres. • Déterminer si les aciers de précontrainte sont susceptibles de subir un phénomène de corrosion fissurant sous tension ; • Instrumentation de fissures ; • Suivi de la flèche ; • Déterminer la tension résiduelle effective des câbles, (la méthode de l'arbalète, surveillance acoustique de la précontrainte) ; • Quantifier la quantité de câbles rompus, de fils rompus ou fortement corrodés dans chaque section ; • Déterminer la qualité de l'adhérence entre les câbles et le béton (qualité de l'injection) ; • Déterminer le ferrailage passif longitudinal et vertical (radar, gammagraphie) ; • Déterminer la qualité du béton, notamment sa résistance à la compression. 	
Éléments de structure	<ul style="list-style-type: none"> • Dalle précontrainte longitudinalement et armée transversalement de hauteur constante. • Coulés sur cintre ou mis en place par poussage • 2, 3 ou 4 travées selon les caractéristiques de la voie à franchir et le biais de franchissement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tabliers des ponts à dalles nervurées sont constitués : soit d'une dalle à une nervure à larges encorbellements, soit d'une dalle à plusieurs nervures larges ou étroites de formes trapézoïdales ou rectangulaires. • Tablier longitudinalement de hauteur constante ou variable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Constitué de poutres généralement préfabriquées en usine précontraintes par pré-tension • Solution classique pour la réalisation de ponts routiers et autoroutiers (passages inférieurs ou supérieurs) dans la gamme des portées de 10 à 35 mètres <p>Structure isostatique constitués de poutres précontraintes par post-tension de hauteur constante, solidarisées entre elles par des entretoises d'abouts et une dalle supérieure coulée en place en béton armé ou précontrainte transversalement.</p>

TABLEAU 3. Quelques études de cas pour l'évaluation d'un élément de pont en béton

Niveau	Méthode						Principe	Ouvrage / élément(s)	Conclusions	Source
	APFM	DVM	MC	FORM	FOSM	ECov				
Probabiliste	✓		✓	✓			Zone d'ancrage à l'extrémité d'une poutre rectangulaire en BA sous effort tranchant à l'ELU	Possibilité de déterminer des coefficients partiels pour caractériser les aciers corrodés à partir de la capacité d'ancrage	(Blomfors et al., 2019)	
			✓				Poutres rectangulaires et en T en BA à l'ELU sous le moment fléchissant	Importance du ratio entre la charge et la résistance de l'acier Faible sensibilité aux caractéristiques du béton Poutres rectangulaires sont plus économiques	(Akbari and Jafari, 2018)	
Probabiliste / Semi-		✓	✓	✓	✓		Poutre continue sur deux appuis, coulée sur place ou préfabriquée en BA en moment fléchissant à l'ELU	La résistance du béton sur le comportement en flexion n'est pas si pertinente Qualité des éléments préfabriqués principalement définie par la résistance de l'acier	(Biondini et al., 1999)	
	✓	✓		✓			Poutre et colonne en BA exposé au vent sous moment fléchissant à l'ELU	Surestimation de l'indice de fiabilité par DVM et APFM pour la colonne (surestimation plus importante par la méthode APFM) sous coefficient pour les structures neuves	(Caspeele et al., 2013)	
Semi-probabiliste	✓	✓		✓			Pont en béton précontraint construit dans les années 90 en Italie à l'ELU (moment fléchissant et effort tranchant)	Grande importance de la précontrainte, des actions thermiques et de la durée de vie résiduelle considérée	(Gino et al., 2020)	
		✓		✓		✓	Poutre en BA posé sur deux appuis à l'ELU (moment fléchissant et effort tranchant)	Sensibilité des coefficients partiels au mode de défaillance	(Novák et al., 2022)	
		✓		✓			Poutre en BA à l'ELU	Prise en compte des incertitudes du modèle, la conversion des résultats, la variabilité des propriétés des matériaux et l'effet des actions Besoin d'analyser les ouvrages au cas par cas Précautions à prendre avant d'ajuster les coefficients partiels (qualité des matériaux, réalisation des travaux, entretien de la structure, ...)	(Zhang and Toutlemonde, 2022b)	

Le tableau 3 permet également de mettre en avant l'importance d'ajuster le coefficient partiel sur l'acier sans surestimation de celui-ci pour le cas des ponts PRAD étant donné que les normes étaient plus souples pour les poutres préfabriquées. De plus, l'ajustement du coefficient partiel mérite de prendre en compte le mode de défaillance de la structure en proposant des coefficients partiels différents selon la fonction d'état limite considérée.

IV. CONCLUSION

L'évaluation structurale des ponts existants en béton armé et en béton précontraint comporte plusieurs défis transversaux : la récolte des données (difficulté d'accès au pont ou parties de la structure), intégration des anciennes règles de conception, ajustement de l'indice de fiabilité cible,

prise en compte du comportement non linéaire. Elle est effectuée par des méthodes semi-probabiliste ou probabiliste. Dans les deux cas, l'analyse nécessite d'avoir des données et de pouvoir intégrer les informations.

Dans le cas des ouvrages en béton armé et béton précontraint, chacun des éléments peut présenter diverses modes de défaillance selon la disposition des éléments et causes de défaillance. L'influence du mode de défaillance n'est pas négligeable sur le résultat de l'analyse. Une étude de l'ouvrage par élément ne fournit donc pas des résultats aussi précis qu'en prenant compte toute la structure. De plus, toutes les variables n'ont pas le même effet sur l'évaluation structurale selon le type de la structure étudiée. Certaines actualisations de coefficient partiel sont alors plus pertinentes que d'autres. On note notamment le cas du coefficient partiel sur l'acier. Enfin la non-linéarité est un élément important à prendre en compte afin de modéliser un comportement précis pour le matériau, en particulier aux ELU.

REFERENCES

- Akbari, J., Jafari, Calibration of Load and Resistance Factors for Reinforced Concrete Beam.pdf. CEIJ 217–227. <https://doi.org/10.7508/cej.2018.01.012>
- Allaix, D.L., Botte, W., Diamantidis, D., Engen, M., Faber, M., Hendriks, M., Mancini, G., Prieto, M., Tanner, P., Thöns, S., Weber, M., Holický, M., Linneberg, P., Schnell, J., Vrouwenvelder, T., 2016. fib Bulletin 80. Partial factor methods for existing concrete structures, fib Bulletins. fib. The International Federation for Structural Concrete, Lausanne. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0080>
- Association française de normalisation, 2007. Eurocode - Bases de calcul des structures - Annexe nationale à la NF EN 1990/A1:2006.
- Ballière, A., Ben Milad, Y., Colas, A.-S., Cremona, C., Davi, D., Humeau, J.-B., Le Quéré, C., Marcotte, C., Michel, J., Orcesi, A., Poulin, B., Vion, B., 2012. Théorie de la fiabilité - Application à l'évaluation structurale des ouvrages d'art. Les rapports 143.
- Barras, P., Carles, J.-C., Champenoy, D., Cordier, N., Corfdir, P., Defaux, S., Dias, F., Germain, D., Hekimian, A., Labourie, L., Lacombe, J.-M., Neiers, S., Peyrac, P., Renaudin, F., Rizard, F., 2016. Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art, Cerema. Ed, Références.
- Biondini, F., Bontempi, F., Toniolo, G., 1999. Comparison of Semi-Probabilistic vs Full-Probabilistic Safety Formats for Concrete Structures. Presented at the 3rd International Conference on Analytical Models and New Concepts in Mechanics of Concrete Structures, Wroclaw, Pologne.
- Blomfors, M., Larsson Ivanov, O., Honfí, D., Engen, M., 2019. Partial safety factors for the anchorage capacity of corroded reinforcement bars in concrete. Engineering Structures 181, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.011>
- Caspeele, R., Sykora, M., Allaix, D.L., Steenbergen, R., 2013. The Design Value Method and Adjusted Partial Factor Approach for Existing Structures. Structural Engineering International 23, 386–393. <https://doi.org/10.2749/101686613X13627347100194>
- Comité euro-international du béton (Ed.), 2013. Fib model code for concrete structures 2010, Ernest & Sohn A Wiley Brand. ed. Ernst & Sohn, Berlin.
- Dixit, M., Gupta, A.K., 2022. A Review of Different Assessment Methods of Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 46, 735–752. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00644-5>
- Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic (Norme), 2004. . Afnor.

- Évaluation structurale et réparation des Viaducs à travées Indépendantes à Poutres Préfabriquées précontraintes par post-tension (Guide méthodologique), 2021. , Collection Références. Cerema.
- FprCEN - Evaluation et rénovation des structures existantes (Spécifications techniques), 2020. . Afnor, France.
- Gino, D., Castaldo, P., Bertagnoli, G., Giordano, L., Mancini, G., 2020. Partial factor methods for existing structures according to *fib* Bulletin 80: Assessment of an existing prestressed concrete bridge. *Structural Concrete* 21, 15–31. <https://doi.org/10.1002/suco.201900231>
- Guide de conception - Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension (Guide de conception), 1996. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- König, G., Hosser, D., 1982. The simplified level II method and its application on the derivation of safety elements for level I. *CEB Bulletin* no. 147.
- Millan, A.-L., Le Khac, V., Paillusseau, P., 1996. Guide de conception - VIPP.
- Novák, L., Červenka, J., Červenka, V., Novák, D., Sýkora, M., 2022. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures. *Structural Concrete* *suco.202200179*. <https://doi.org/10.1002/suco.202200179>
- O'Brien, E.J., Schmidt, F., Hajjalizadeh, D., Zhou, X.-Y., Enright, B., Caprani, C.C., Wilson, S., Sheils, E., 2015. A review of probabilistic methods of assessment of load effects in bridges. *Structural Safety* 53, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.01.002>
- Ouvrages types - Passage Inférieur en Portique Ouvert (Guide de conception), 1974. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Passages Supérieurs ou Inférieurs à Dalle Précontrainte (Guide de conception), 1969. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Passages Supérieurs ou Inférieurs en Dalle Nervurée (Guide de conception), 1981. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Passages Supérieurs ou Inférieurs en dalle pleine continue en Béton Armé (Guide de conception), 1973. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Ponts à poutres en béton armé (Guide méthodologique), 1977. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Portique Ouvert Double (Guide méthodologique), 1976. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Ouvrages types - Poutres précontraintes par adhérence (Guide méthodologique), 1973. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagnaux, France.
- Ouvrages types pour autoroute - Passage inférieur en cadre fermé de béton armé (Guide méthodologique), 1966. . Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France.
- Steenbergen, R.D.J.M., Sýkora, M., Diamantidis, D., Holický, M., Vrouwenvelder, T., 2015. Bulletin fib 80 - Economic and human safety reliability levels for existing structures. *Structural Concrete* 16, 323–332. <https://doi.org/10.1002/suco.201500022>
- Zhang, G., Liu, Y., Liu, J., Lan, S., Yang, J., 2022a. Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9, 388–406. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003>
- Zhang, Y., Toutlemonde, F., 2022b. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 26, 3863–3879. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824820>