

Bulletin
Ouvrages d'Art

n°74



Sommaire

Sommaire

	Méthode	
	Promouvoir la qualité de vie des ouvrages d'art : Évaluer, pour évoluer et inventer	Page 4
	Renée Bacqueville	
	Retour d'expérience	
	Réfection du complexe étanchéité-roulement sur la dalle orthotrope du Viaduc Autreville	Page. 18
	Laurent LOUTTE, Fabien RENAUDIN	
	Méthode	
	Calcul des coefficients partiels selon l'objectif de fiabilité attendu pour l'ouvrage	Page. 36
	Yi ZHANG, François TOUTLEMONDE	
	Les Brèves du CTOA	
	Expertise des VIPP	Page. 60
	Le kiosque du CTOA	
	Les dernières publications Ouvrages d'Art	Page. 68

Directeur de la publication :

Pascal BERTEAUD

Directeur délégué :

Georges TEMPEZ

Comité éditorial :

Christophe AUBAGNAC (Cerema CE) - tél. : 03 85 86 67 02
Jean-François BARTHÉLÉMY (Cerema ITM) - tél. : 01 60 52 30 27
Gaël BONDONET (Cerema ITM) - tél. : 01 60 52 32 81
Jean-Christophe CARLES (Cerema Med) - tél. : 04 42 24 76 86
Pierre CORFDIR (Cerema ITM) - tél. : 01 60 52 32 56
Bruno GODART (IFSTTAR) - tél. : 01 81 66 83 32
Thierry KRETZ (IFSTTAR) - tél. : 01 81 66 81 29,
Laurent LABOURIE (Cerema NP) - tél. : 03 20 49 61 81
Jean Michel LACOMBE (Cerema ITM) - tél. : 01 60 52 32 67
Pierre PAILLUSSEAU (Cerema SO) - tél. : 05 56 70 67 03
Antony HERVY (Cerema ITM) - tél. : 01 60 52 30 31
Sylvain RIGOLE (Cerema ITM) – tél : 01 60 52 33 12

**Rédacteur en chef ,
Rédaction :**

Promouvoir la qualité de vie des ouvrages d'art :

Évaluer, pour évoluer et inventer

Renée Bacqueville¹

¹ Cerema Nord-Picardie, 44 ter rue Jean Bart 59019 Lille, renee.bacqueville@cerema.fr

Résumé

Les ouvrages d'art ont le potentiel pour être des lieux fédérateurs de territoires, pour offrir des espaces d'urbanité et de convivialité, pour promouvoir les ressources des terroirs. Par les interactions avec l'espace public, le paysage, l'environnement, ils participent aux projets d'aménagement, à l'échelle du quartier, de la ville, ou du grand site. Par l'évolution de leurs fonctions, l'adaptation aux nouveaux usages et modes de vie, les ouvrages d'art contribuent à la dynamique de projets respectueuse de l'histoire, du patrimoine, mais aussi porteuse de mutations et de nouvelles pratiques. Évaluer la qualité de vie des ouvrages d'art, c'est capitaliser les processus fertiles pour inventer demain des projets vecteurs de mieux vivre ensemble nos territoires. C'est agir aussi à l'évolution des pratiques des maîtres d'ouvrage et d'œuvre, pour imaginer des projets plus riches de qualité d'usage pour les maîtres des lieux.

I. L'ouvrage d'art, générateur de qualité de vie

Les ouvrages d'art ont le potentiel pour être des lieux fédérateurs de territoires, pour offrir des espaces d'urbanité et de convivialité, pour promouvoir les ressources des terroirs. Certains deviennent des leviers de revitalisation touristique, d'autres des vecteurs de requalification urbaine, certains des espaces d'accueil d'événements éphémères, d'autres encore des liens écologiques riches de biodiversité.

À la fois élément du cadre bâti et trait d'union entre différents territoires, l'ouvrage d'art a vocation à être un lieu générateur de qualité de vie, en particulier dans ses abords directs. Par ses interactions avec l'espace public, le paysage, l'environnement, à l'échelle du quartier, de la ville ou du grand site, il participe au projet global d'aménagement (ou de ménagement) du territoire (Figures 1 à 3).



Figure 1 : La passerelle ludique Simone de Beauvoir entre BNF et parc sur la Seine.

La passerelle Simone de Beauvoir, entre la Grande Bibliothèque et le parc de Bercy, tout à la fois légère et « épaisse », abrite des lieux couverts et ouverts sur la Seine. L'ouvrage d'art offre un parcours rapide et diversifié et devient aussi selon les niveaux du parcours et les moments de la journée un lieu propice au jeu ou au repos ; par la géométrie des lieux, il est capable d'accueillir d'autres activités : une place pour bouquinistes ou...?



Figure 2 : La promenade plantée du Viaduc des Arts entre Bastille et Bois de Vincennes

La pérennité des ouvrages d'art permet l'évolutivité des usages et l'accueil de nouvelles pratiques. Le Viaduc des Arts entre Bastille et Bois de Vincennes, devenu promenade plantée de 1,5 km en plein cœur de Paris est ainsi devenu un centre de l'artisanat avec les cafés « branchés » ouverts sur la ville... Son fort potentiel de requalification urbaine a contribué à la valorisation foncière du tissu environnant. Lieu prisé par le marcheur, le long des vitrines pour découvrir des activités artisanales, le viaduc propose, en hauteur, une balade aux séquences diversifiées, un chemin vert riche de biodiversité, prisé des habitants, des joggeurs, des touristes... mais aussi des lieux de respiration, des places protégées à l'échelle du quartier, fort agréables dans Paris. Le Viaduc des Arts montre l'importance de l'échelle pour apprécier la qualité de vie de l'ouvrage d'art.



Figure 3 : Le Pont Neuf, un belvédère pour rapprocher la ville et l'université à Compiègne

À l'initiative de l'agglomération de la région de Compiègne, le projet du Pont Neuf agit à différentes échelles comme un levier de renouvellement urbain et de requalification des espaces publics. Trait d'union entre les deux rives, il dynamise le pôle universitaire au sud, et permet l'aménagement au nord d'un pôle de vie mixte (résidences étudiants, bureaux...). S'il invite à la déambulation, le Pont Neuf, repère emblématique, est aussi un véritable mobilier urbain à l'échelle de la ville, qui permet de séjourner confortablement en profitant de larges fenêtres sur Compiègne et les berges de l'Oise aménagées. Sa robustesse, la sobriété des matériaux et la qualité de l'éclairage participent au confort d'ambiance des lieux de jour comme de nuit.

Au-delà des pratiques quotidiennes, le pont devient une fois par an, le lieu festif et de rencontres de toutes les associations de la ville.

Moteur de transformation et de valorisation des lieux traversés, l'ouvrage d'art concourt à la haute qualité durable des territoires au cours de sa très longue durée de vie.

Les exigences de niveaux de services, de pérennité sont, depuis longtemps, au cœur des préoccupations des maîtres d'ouvrages et des ingénieurs. Ces dernières années, la prise en compte de l'environnement et de l'utilisation judicieuse des ressources ont fait l'objet de développements constants. Mais l'ouvrage d'art a également tout le potentiel pour assurer la continuité urbaine, à œuvrer à la qualité de vie, à contribuer au bien-être des habitants, des passants et des touristes en les rendant plus acteurs.

Évaluer la qualité de vie des ouvrages d'art, c'est capitaliser les processus fertiles pour inventer, demain, des projets vecteurs de mieux vivre ensemble nos territoires. C'est agir aussi à l'évolution des pratiques des maîtres d'ouvrage et d'œuvre, pour imaginer des projets plus riches de qualité d'usage pour les maîtres des lieux (c'est-à-dire ceux qui pratiquent les ouvrages : usagers, habitants, passants, touristes, gestionnaires...) aujourd'hui et demain.

Au-delà du franchissement, plusieurs questions se posent : qu'apporte l'ouvrage au territoire dans lequel il est inséré ? que propose-t-il aux usagers, aux habitants, aux passants, aux touristes qui le franchissent, y déambulent ou y séjournent ? Il convient alors de comprendre sa capacité à :

- tisser des relations avec l'urbain, le paysage, le terroir, ou le grand territoire,
- prendre en compte le contexte et à exprimer l'identité et l'attractivité du lieu,
- composer avec le milieu,
- participer à la qualité de vie locale, dans les services à rendre,
- accueillir des pratiques d'aujourd'hui, de demain, permanentes ou éphémères.
- assurer le confort d'ambiance et la sécurité de jour, de nuit et au fil des saisons,
- enfin, à résister au temps court de l'entretien, comme au temps long de la gestion, de l'évolutivité des lieux ou des pratiques.

Le Cerema souhaite s'inscrire aux côtés de la maîtrise d'ouvrage, pour promouvoir des ouvrages de qualité qui relèvent le défi de concilier à la fois les aspirations des citoyens-usagers (en quête d'urbanité, de convivialité, d'accessibilité comme de nature, d'identité, de confort) et les préoccupations collectives liées à une valorisation des territoires et à une gestion pérenne du patrimoine et des ressources.

À travers un panel d'opérations sélectionnées sur l'ensemble du territoire national, la démarche ouvre à la connaissance et stimule la réflexion sur ce que peut offrir un ouvrage d'art en termes de qualité de vie sur son aire d'influence, en identifiant les processus (de programmation, de conception et de gestion) vertueux et innovants.

Dans cette finalité, elle propose, en phase préalable, un cadrage méthodologique pour agir sur les modes de lecture et d'écriture des ouvrages d'art et aider ainsi les acteurs du territoire à développer des stratégies propres à favoriser la qualité des projets. C'est ce cadrage méthodologique qui est présenté dans cet article. Il donne ainsi à voir des opérations d'ouvrages d'art dans des situations différentes (site urbain ou en lien avec la nature, site en renouvellement ou en création) pour des acteurs du projet demandeurs de références

(services des collectivités et de l'État, prestataires privés et publics de l'ingénierie et conseils aux territoires).

In fine, une fois cette démarche mise en place, les enseignements capitalisés tirés de ces projets en termes de qualité de vie invitent à partager des repères, des références et des recommandations à différentes échelles (grand territoire, commune, quartier, ouvrage et abords...) et selon différents processus de mise en œuvre.

II. Décrypter la qualité d'usage

La démarche proposée s'appuie sur un diagnostic d'usages et de pratiques *in situ*, le recueil d'observations à différents moments du jour, de l'année et sur l'entretien d'acteurs. Elle s'organise autour de 3 temps : « avant », « pendant » et « après » la visite, à partir de quelques repères méthodologiques et d'un mode d'emploi.

1. Cinq clés de lecture pour évaluer

La grille d'analyse et de questionnement permet d'évaluer la qualité de vie offerte par l'ouvrage à différentes échelles (projet de territoire, projet urbain, projet bâti). Elle invite à décrypter les différentes facettes de la qualité de vie offerte par l'ouvrages d'art (prise en compte du contexte ?, qualité d'usage ?, identité ?, confort d'ambiance ?, pérennité ?). Testée sur une opération, elle s'est précisée et enrichie au fil du processus.

Ces clés de lecture, décrites ci-après, sont illustrées sur le Tableau 1 à partir de quatre ouvrages particuliers :

- le canal de Roubaix, lieu de rencontres et levier de renouvellement urbain,
- le viaduc Le Corbusier à Lille, une structure d'accueil au service de la diversité d'usages,
- le pont neuf de Compiègne, lien d'urbanité et d'attractivité en belvédère sur les rives de l'Oise,
- la passerelle du val Joly à Eppe-Sauvage, un terrain de jeux pour tous dans le Parc Naturel Régional de l'Avesnois.

A. Prise en compte du contexte

C'est la capacité de l'ouvrage d'art à s'inscrire dans le contexte et le site existant, à les prendre en compte et à les mettre en valeur (géographie, histoire, topographie, paysage, milieu, accessibilité...).

Les mots clés qui définissent cette clé de lecture sont par exemple : géographie/histoire, composition avec les éléments du site, génie du lieu, topographie, géomorphologie du site, eau, qualités paysagère et urbaine, accessibilité, mobilité et intermodalité, structuration urbaine et hiérarchisation de la trame viaire, séquences d'un parcours, jalons d'itinéraire...

B. Image, identité

C'est la capacité de l'ouvrage d'art à mettre en valeur et enrichir le patrimoine existant (paysager, urbain, architectural / historique ou social / monumental ou banal...) voire à créer le patrimoine de demain pour transformer l'image et participer à l'identité du lieu.

Ses mots clés sont : attractivité, identité du lieu, patrimoine d'hier et de demain, urbanité, génie du lieu, image, lisibilité, visibilité, qualités urbaine/ architecturale/ paysagère, qualité de l'espace public, symbolique, signal, repère...

C. Usages / Pratiques

C'est la capacité de l'ouvrage d'art à accueillir et attirer les activités et les usages des habitants et des visiteurs, générant ainsi une richesse des pratiques et un mode d'usage des lieux dans le temps. Les mots clés caractérisant ce critère sont : franchir, circuler, se déplacer, s'arrêter, se reposer, donner rendez-vous, découvrir, se repérer, se promener, déambuler, marcher, rester debout, s'asseoir, regarder, parler, écouter, jouer, entretenir, assurer la maintenance...

D. Confort d'ambiance / Sécurité

C'est la capacité de l'ouvrage d'art à procurer aux différents utilisateurs, à la fois le confort (visuel, thermique, auditif, olfactif), la détente et le plaisir des sens, la protection, la sécurité et la sûreté.

Les mots clés sont : confort thermique (climat, soleil, pluie, intempéries, vent, courants d'air), confort olfactif (odeurs, nuisances), confort auditif (bruits, sons, silence), confort visuel (perspectives, vues), confort spatial (échelles, proportions, lumière, matériaux), gestion des nuisances, expériences sensorielles positives, gestion des risques et de l'insécurité, protection contre les accidents et la circulation...

	Canal de Roubaix	Viaduc Le Corbusier à Lille	Pont neuf de Compiègne	Passerelle du val Joly à Eppe-sauvage
Prise en compte du contexte				
Image, identité				
Usages / Pratiques				
Confort d'ambiance / Sécurité				
Pérennité				

Tableau 1 : Clés de lecture pour le décryptage des différentes facettes

E. Pérennité

C'est la capacité de l'ouvrage à résister au temps court (entretien, gestion, appropriation) et au temps long (maintenance, évolutivité). Ce critère est caractérisé par des mots clés comme : entretien, gestion, maintenance, appropriation, évolutivité (conception en anticipation sur l'évolution des besoins, accompagnement des pratiques et des cheminements), robustesse, fiabilité et facilité d'entretien des matériaux et des équipements...

2. Trois échelles de projet à emboîter

La démarche veut donner à voir des opérations d'ouvrages d'art dans des contextes et des situations à différentes échelles du projet de territoire (projet global d'aménagement) au projet urbain (projet de l'opération contextualisée) au projet bâti (projet de l'ouvrage et de ses abords). La qualité de vie de chaque ouvrage (situé dans son contexte urbain, paysager, environnemental) est alors lue à travers une approche à plusieurs échelles emboîtées (de l'interaction avec le grand territoire aux rapports avec les espaces de proximité – Figure 4).

		
Echelle de l'agglomération	Echelle de ville et du quartier	Echelle de l'ouvrage et de ses abords

Figure 4 : Echelles d'analyse de la qualité de vie d'un ouvrage d'art

3. Quatre familles d'un vivier d'ouvrages d'art à enrichir

La démarche s'appuie sur un panel structuré d'opérations diversifiées d'ouvrages d'art, identifiées au sein d'un groupe de travail national du Cerema. Elle capitalise à partir de quatre familles d'ouvrages les enseignements tirés d'évaluations dans des situations diversifiées (Figure 5).

	 pont et passerelle en ville/ lieu d'urbanité
	 pont habité/ structure d'accueil et lieu de vie
	 ouvrage territoire/ vecteur d'attractivité et de développement,
	 passerelle en lien avec la nature/ révélatrice du génie du lieu.

Figure 5 : Familles d'ouvrages et localisation sur le territoire français

Les exemples s'adressent aux collectivités de toutes tailles ; l'éventail élargi de maîtrise d'ouvrage et d'œuvre permet de balayer des cas d'échelles différentes, dans des contextes géographiques, environnementaux et urbains contrastés. Réalisé à partir d'ouvrages le plus souvent récents, le vivier s'enrichira avantageusement des contributions qu'apporteront le réseau scientifique et technique, la communauté de pratiques « ouvrages d'art » et les partenaires des territoires. Le processus pourra ainsi s'inscrire dans une stratégie d'amélioration continue de la lecture et de l'écriture de nouveaux projets.

III. Rechercher les processus fertiles

1. Fertiliser les domaines d'activités et les métiers

La démarche proposée repose sur l'évaluation, pour faire évoluer les pratiques et améliorer les projets. Elle part du souhait :

- de s'ouvrir aux partenaires acteurs du projet (maîtrise d'ouvrage/ maîtrise d'œuvre/ maîtrise d'usage),

- de croiser les compétences pour une fertilisation des domaines d'activités et des métiers (sciences de l'ingénieur « ouvrages d'art » et approches spatiale et sociale de l'urbanisme et du paysage)

A l'échelle des territoires et des équipes, elle décline des objectifs de progrès collectifs et pérennes :

- partager des repères (outils, méthodes) et des références,
- confronter des points de vue à partir de pratiques de projets,
- capitaliser les enseignements tirés de retours d'expériences innovantes.

Pour faire vivre la démarche et enrichir le vivier d'ouvrages évalués, un appel est lancé en 2014 auprès des différentes Directions territoriales du Cerema ; sur chacun des territoires, un binôme aux compétences croisées (ingénieur « ouvrages d'art » et architecte-urbaniste, paysagiste) est constitué. Ce groupe de travail collectif se retrouve alors régulièrement pour partager les enjeux de la démarche, enrichir la boîte à outils et tirer collectivement les enseignements des retours d'expérience capitalisés sur une plate-forme collaborative. Il s'ouvre à d'autres partenaires mobilisés sur le sujet ; ainsi la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions publiques s'associe régulièrement au processus.

A. Faire vivre la communauté de pratiques

A partir de la boîte à outils partagée dans le groupe de travail du Cerema (clés de lecture de la qualité de vie, familles d'ouvrages, échelles d'investigations et d'études, points forts/références et points de vigilance / pistes de progrès, mots clés, canevas d'entretiens...), des fiches d'identité et de cas capitalisent, par ouvrage, les enseignements tirés des diagnostics d'usage effectués lors de visites sur site (observations des pratiques, entretiens).

Des fiches des processus fertiles à la qualité de vie et d'usage des ouvrages d'art, à chacune des étapes du projet complètent le recueil.

Pour 2015, chaque binôme a décliné en fiche d'identité, fiche de cas et fiche processus un panel d'ouvrages illustrant les 4 familles sur son territoire et enrichi ainsi la plate-forme collaborative d'une communauté de pratiques.

B. Articuler les dynamiques d'acteurs, de projets et de territoires

A partir de ces investigations et d'entretiens menés auprès des acteurs de la maîtrise d'ouvrage et d'œuvre, le groupe de travail capitalise les conditions de réussite à réunir pour une meilleure prise en compte de la qualité de vie et d'usage :

- Quelles sont les interactions nécessaires entre les différents acteurs aux différentes étapes du projet ? (maître d'ouvrage /maître d'œuvre/ maître des travaux (entreprises)/ maître des lieux)
- Quels sont les territoires pertinents d'études et de projet, pour prendre en compte la qualité de vie et d'usage, avec quels emboîtements ? (projet de territoire / projet urbain / projet de l'ouvrage)
- Quelle itération entre les différentes phases enrichissent la qualité de vie et d'usage ? (programme-projet ? /évaluation-programme ?...)

IV. Inventer la qualité de vie des ouvrages d'art

L'analyse de la qualité de vie d'ouvrages d'art innovants dans des situations et des contextes multiples (à travers une approche à plusieurs échelles) permet de dégager les points forts (références à capitaliser) et les points de vigilance pour progresser lors de nouveaux projets. Elle nous dévoile en particulier l'intensité et la mixité des usages et des pratiques (illustrées en Figures 6-7 à partir de quelques-unes des situations d'usages repérées, sur le pont Raymond Barre à Lyon ou sur le Pont Neuf de Compiègne.)

<i>S'accouder pour se repérer,</i>			<i>Traverser en sécurité...</i>
<i>Profiter d'un salon urbain...</i>			<i>Déambuler à travers la ville,</i>
<i>S'arrêter sur le belvédère,</i>			<i>Rejoindre en tramway...</i>
<i>Assurer la maintenance...</i>			<i>Se rassembler pour une fête,</i>
<i>Faire une halte et regarder</i>			<i>Jouer sous le pont...</i>
<i>Se repérer la nuit...</i>			<i>S'asseoir confortablement,</i>
<i>Se diriger avec assurance,</i>			<i>Accéder aisément...</i>
<i>S'abriter du vent...</i>			<i>Passer d'un mode à l'autre,</i>
<i>Cohabiter en toute quiétude,</i>			<i>Se mettre à l'ombre...</i>
<i>Séjourner au soleil...</i>			<i>Se donner rendez-vous,</i>
<i>S'approprier les berges,</i>			<i>Changer l'image...</i>

Figure 6 : Exemples d'usages et de pratiques sur le pont Raymond Barre à Lyon

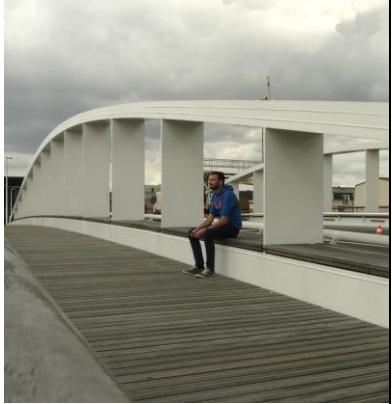
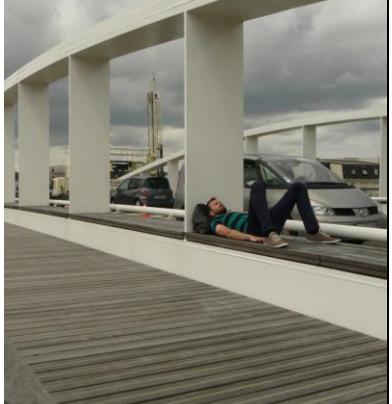
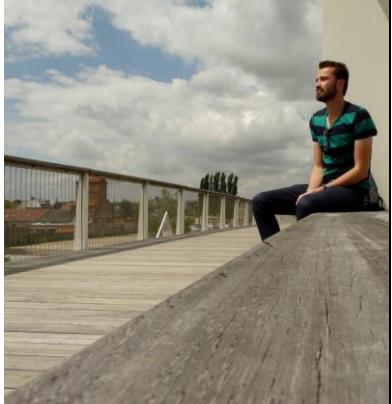
<i>S'accouder pour se repérer</i>			<i>Traverser en sécurité...</i>
<i>Profiter d'un salon urbain...</i>			<i>Déambuler à travers la ville</i>
<i>S'arrêter sur le belvédère</i>			<i>Rejoindre en tramway...</i>
<i>Assurer la maintenance</i>			<i>Se rassembler pour une fête</i>
...			<i>Jouer sous le pont...</i>
<i>Faire une halte et regarder</i>			<i>S'asseoir confortablement</i>
<i>Se repérer la nuit...</i>			<i>Accéder aisément...</i>
<i>Se diriger avec assurance</i>			<i>Passer d'un mode à l'autre</i>
<i>S'abriter du vent...</i>			<i>Se mettre à l'ombre...</i>
<i>Cohabiter en toute quiétude</i>			<i>Se donner rendez-vous</i>
<i>Séjourner au soleil...</i>			<i>Changer l'image</i>
<i>S'approprier les berges</i>			

Figure 7 : Exemples d'usages et de pratiques sur le pont neuf à Compiègne

Fin 2018, un guide de recommandations illustrera la qualité de vie en situations diversifiées et fera apparaître les pistes de progrès, issues des conclusions de l'étude et de l'analyse des retours d'expériences (Figure 8). Il s'articulera autour de trois volets précisés au fil de l'étude :

Partie 1 _ Evaluer la qualité de vie et d'usages des ouvrages d'art

1.1_Des ouvrages d'art générateurs de qualité de vie et d'usages ?

1.2_Décrypter la qualité de vie et d'usages des ouvrages :

1.3_Douze ouvrages d'art générateurs de qualité de vie

Partie 2 _ Des ouvrages d'art générateurs de qualité de vie et d'usages

2.1_Franchir, en composant avec le contexte

2.2 _Inviter au séjour au-delà du franchissement

Partie 3 _ Des processus fertiles à la qualité de vie des ouvrages d'art

3.1_La synergie d'acteurs au service du projet de la maîtrise d'ouvrage

3.2_L'emboîtement des échelles spatiales, du projet de territoire aux abords de l'ouvrage

3.3_L'articulation des étapes et l'itération programme-projet

Ouvrages territoriaux			
Ponts-habités			
Ponts et passerelles en ville			
Ponts en lien avec la nature			

Figure 8 : Faire vivre la communauté de pratiques : enrichir un vivier et une plate-forme collaborative

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du groupe de travail pour leur appui dans la mise en œuvre de la démarche présentée dans cet article : Christian Cremona, Yannick Tardivel, Marie Colin DTec ITM - Laurent Labourie et Renée Bacqueville, DTer Nord-Picardie - Hervé Ditchi et Alix Nedelec, DTer Ouest - Florian Pouget et Nadia Aubry, DTer Est - Auguste Mathey et Dominique Deleaz, DTer Centre-Est - Céline Moreau, Alain Guglielmetti, Pauline Caulet, Bastien Exbrayat DTer Méditerranée, Laure Mouhot DTer Normandie Centre - Raymond Zingraff, DTer Nord-Picardie (plate-forme collaborative), Thierry Kretz, IFSTTAR, Claire Labourie, architecte-vacataire (ENSA Versailles), François Vandewalle, architecte-vacataire (ENSAP Lille) et Carole Villain, ingénieur-stagiaire (UTC Compiègne), sans oublier l'appui de la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP),

Références bibliographiques

1. Association pour l'art urbain (2014). Séminaire Robert Auzelle, www.arturbain.fr, France.
2. MIQCP (2011). Les espaces publics urbain, http://www.archi.fr/MIQCP/article.php3?id_article=79, Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, France.
3. CERTU (2003). Mémento pour des visites, La qualité d'usage, c'est quoi ?, <http://www.certu.fr/evaluation-de-la-ville-durable-r248.html>, Lyon, France.
4. CERTU (2012). Vers une marche plaisir en ville – Boite à outils pour augmenter le bonheur de marcher, sous la coordination de Sonia Lavadinho et Yves Winkin, Lyon , France.

Réfection du complexe étanchéité-roulement sur la dalle orthotrope du Viaduc Autreville

Laurent LOUTTE¹, Fabien RENAUDIN¹

¹ Cerema Est/Division Ouvrages d'Art 1, boulevard Solidarité – BP 85230 57076 Metz Cedex 03, laurent.loutte@cerema.fr & fabien.renaudin@cerema.fr

Résumé

Le Viaduc d'Autreville est un bipoutre à dalle orthotrope permettant le franchissement de la Moselle par l'autoroute A31 sur une longueur d'environ 235 mètres. L'ouvrage construit en 1971 présente la particularité de ne comporter qu'un seul tablier pour les 2 sens de circulation, soit une largeur totale de 32 mètres, reposant sur 2 poutres longitudinales. L'article présente les travaux de réfection du complexe étanchéité-roulement (CER) réalisés en 2016.

Les dalles orthotropes présentent la caractéristique de se déformer sous la forte élévation de température connue par le platelage métallique, servant de support, lors des opérations de réfection du CER.

Pour autoriser et maîtriser ces déformations, les appareils d'appui métalliques d'origine avec blocages directionnels, endommagés par les renouvellements successifs de la chaussée, ont été remplacés par des appareils d'appui en élastomère fretté. Ces travaux se sont accompagnés de renforcements locaux de la charpente métallique et d'élargissements des fûts de pile pour permettre le vérinage de l'ouvrage sous circulation, les dispositifs d'origine étant prévus pour un vérinage à vide.

Le nouveau CER a ensuite été mis en œuvre selon un phasage comprenant 3 bandes longitudinales par sens de circulation et étudié au préalable afin de minimiser les mouvements de la structure lors de ces travaux.

Les opérations de réfection ont fait l'objet d'un suivi particulier (suivi des déplacements et de la température du tablier) et des précautions particulières ont été prises pour maîtriser les mouvements du tablier au droit des culées. Les résultats obtenus ont été confrontés aux prédictions d'une modélisation.

I. Introduction

Le présent article formalise un retour d'expérience à propos de la mise en œuvre du complexe étanchéité-roulement (CER) sur la tôle de platelage de la dalle orthotrope du viaduc de l'A31 franchissant la Moselle à Autreville dans le cadre des travaux de réparation réalisés en 2016.

Il présente la problématique de mise en œuvre du CER à la fois sur les aspects techniques de cette mise en œuvre et sur les conséquences pour l'ouvrage de la montée en température de la structure métallique. Il aborde plus succinctement les autres aspects techniques des travaux et notamment le renforcement du génie civil des appuis pour permettre le vérinage sous circulation.

II. Présentation du tablier

Le viaduc d'Autreville (Figure 1) qui permet à l'A31 de franchir la Moselle est un ouvrage métallique à 3 travées continues de 74,50 m - 92,50 m - 64,75 m de portées. L'ouvrage présente un biais de 51°30' pour une largeur droite de 32 m.

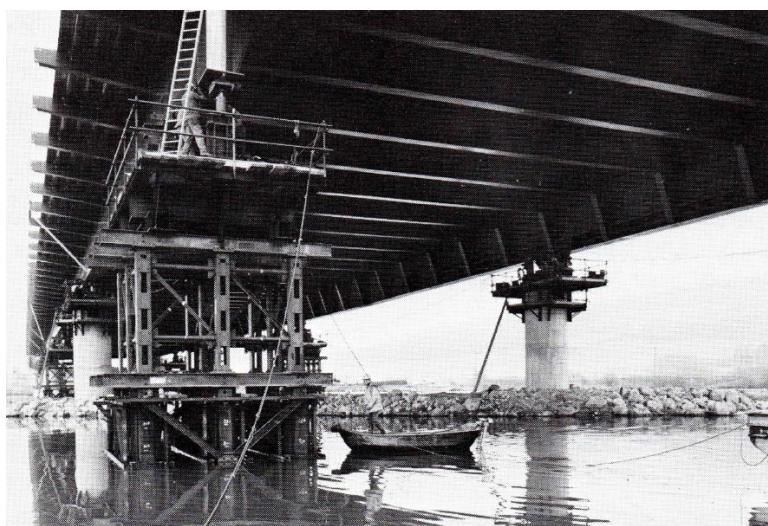


Figure 1. Intrados du tablier à la construction

A l'origine, le tablier portait deux chaussées à 3 voies de 10,50 m de largeur bordées par une bande d'arrêt d'urgence de 1,50 m et une bande dérasée de 1 m, et séparées par un terre-plein central de 3,00 m. Il est actuellement exploité avec deux voies de circulation par sens (Figure 2).

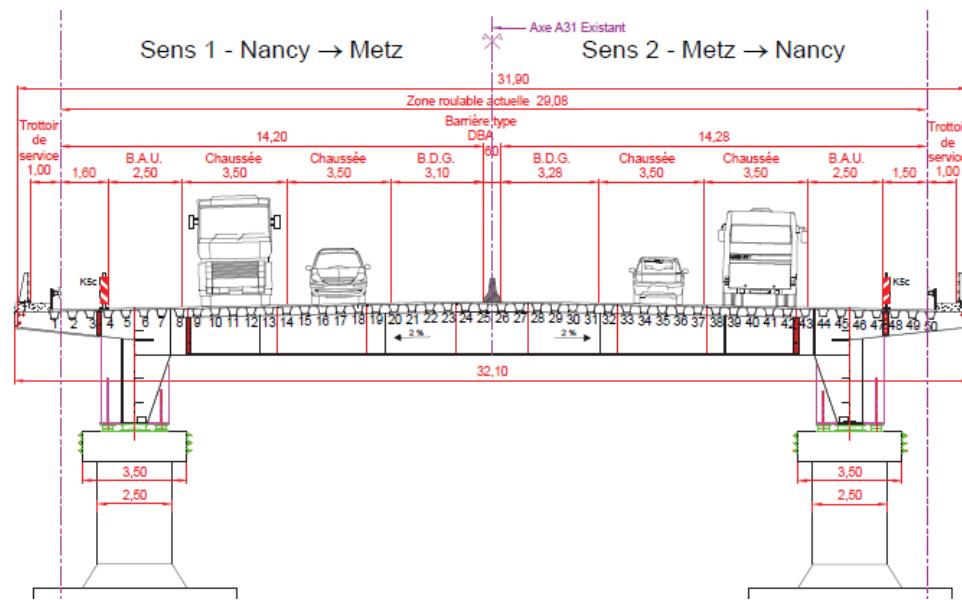


Figure 2. Coupe transversale fonctionnelle actuelle

Le tablier, entièrement métallique, comprend deux poutres sous chaussée espacées de 24,00 m et de 3,80 m de hauteur d'âme.

La dalle de couverture est de type dalle orthotrope et comprend une tôle de 12 mm raidie longitudinalement par des raidisseurs de type auget constitués par un plat de 680 x 6 mm.

Des pièces de pont d'espacements variables (de 3,82 m à 4,62 m) relient les poutres principales et servent d'appui aux raidisseurs longitudinaux.

Les pièces de pont d'about d'une trentaine de mètres de portée sont disposées suivant le biais de l'ouvrage (Figure 3). Elles présentent la particularité d'être appuyées sur les poutres principales par l'intermédiaire d'appareils d'appui en caoutchouc fretté et d'être liaisonnées à six pièces de pont de longueurs variables.

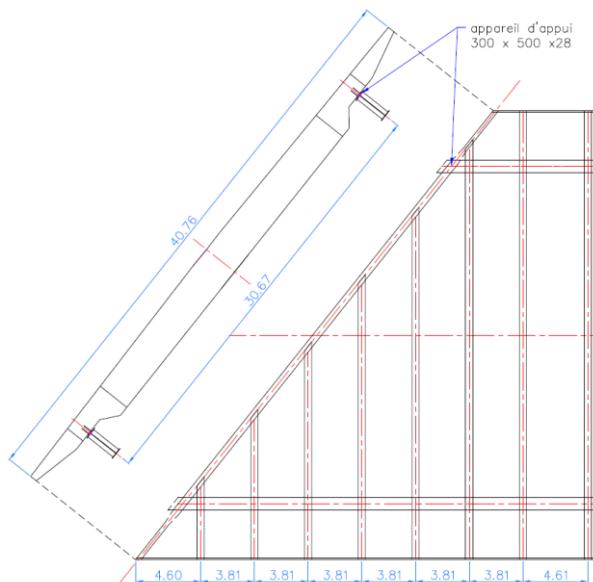


Figure 3. Géométrie de la pièce de pont d'about

Les poutres principales sont appuyées en huit points, quatre par poutre. Les appareils d'appui choisis à l'origine sont des appareils d'appui à pot (Figure 4). Ils sont remplacés en 2016 par des appareils d'appui en caoutchouc fretté.

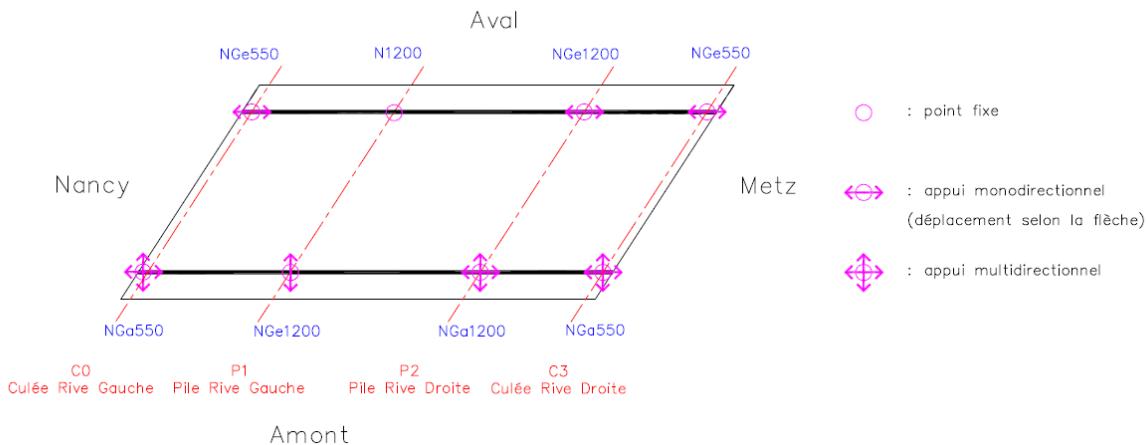


Figure 4. Schéma de fonctionnement des appareils d'appui d'origine – En bleu, désignation technologique des appareils d'appui à pot d'origine

A l'origine, le vérinage de l'ouvrage a été envisagé uniquement à vide. Les points de vérinage sont positionnés sous les poutres de part et d'autre de l'appareil d'appui pour ce qui concerne les piles.

L'ouvrage date de 1971 et a été dimensionné avec les règlements suivants :

- Charges : fascicule 61 titre II de 1960 (la charge A dimensionne le tablier et les réactions d'appui) ;
- Béton : fascicule 61 titre IV de 1968 (CCBA 68) ;
- Acier : fascicule 61 titre V de 1970.

III. Désordres constatés sur l'ouvrage

L'ouvrage présente les difficultés récurrentes de réfection du complexe étanchéité-roulement (CER) des structures à dalle orthotrope. Il fait l'objet d'une réfection complète tous les 8-10 ans environ.

Cette opération de réfection, réalisée sous basculement avec maintien de deux voies de circulation par sens, introduit un échauffement dissymétrique du tablier et une déformation transversale de la structure. Cette déformation imposée est incompatible avec les conditions d'appui retenues lors de la conception. Lors des opérations de réfection, les appareils d'appui subissent des efforts horizontaux très importants et certains présentent en 2015 des désordres ne permettant plus un fonctionnement normal du tablier sous ces efforts. Des extrusions sur caoutchouc sont par exemple visibles sur l'appareil d'appui fixe de la pile P1 côté Aval (Figure 5).



Figure 5. Appareil d'appui sur P1 côté Aval : extrusion du caoutchouc et déformation de la platine inférieure

Les dégradations importantes affectant la couche de roulement en voies lentes conduisent à envisager la réfection du CER en 2016.

IV. Présentation des travaux

Les travaux réalisés en 2016 consistent en une réfection complète du CER associée à une modification du système d'appui du tablier. Ils comprennent la mise en place d'appareils d'appui en caoutchouc fretté dans le but de limiter le bridage thermique du tablier lors des opérations de réfection du CER.

La position du point fixe de l'ouvrage étant modifiée par les travaux, une adaptation de la capacité de souffle des joints de chaussée sur la culée Rive Gauche est nécessaire. Il est également vérifié que la modification de la répartition des efforts horizontaux entre appuis due au changement de raideur des appareils d'appui est admissible.

Une contrainte importante lors du changement des appareils d'appui est d'assurer le maintien de la circulation. Pour y parvenir, un renforcement du raidissement des zones de vérinage sur le tablier et du génie civil en tête d'appui (frettage des zones d'appui et élargissement des têtes de pile) est prévu (Figures 6 et 7).



Figures 6 et 7. A gauche renforcement des poutres – A droite, renforcement des têtes de piles

Le vérinage est réalisé par phases, les appareils d'appui étant tout d'abord remplacés sous la poutre Aval avec basculement de la circulation sur le demi-tablier Amont, puis sous la poutre Amont après basculement de la circulation sur le demi-tablier Aval.

Des mouvements de la structure, notamment sur les culées, étant possibles lors de la libération des appareils d'appui en place, un système de bridage transversal est envisagé (massifs de butée à l'Amont et à l'Aval sur chaque culée) et activé avant le début des opérations de vérinage. L'interposition de vérins horizontaux entre les massifs de butée et la structure permet de maîtriser le mouvement du tablier lors de la mise sur appuis souples. Une phase de libération des efforts transversaux sous fermeture de l'autoroute avec vérinage de l'ouvrage sur culées et avec interposition d'un plan de glissement sous les vérins est prévue au marché. Ce vérinage final permet également une relaxation des appareils d'appui.

Les principaux intervenants de l'opération sont :

- Maîtrise d'ouvrage : DIR Est – SPR
- Maîtrise d'œuvre : DIR Est – SIR Lorrain et SOA
- Entreprises : Demathieu et Bard (Mandataire), SCAL (cotraitant), Berthold (cotraitant), TSV (sous-traitant)
- Contrôle extérieur : Cerema Est

V. Procédé et phasage de mise en œuvre du CER

1. Procédé mis en œuvre et problématique de l'élévation en température du tablier

Le procédé mis en œuvre sur l'ouvrage est l'Orthoplast H d'Europavia. Ce procédé est composé d'une feuille préfabriquée à base de bitume modifié par des polymères surmontée d'une couche d'enrobé d'environ 6 cm d'épaisseur à base de matériaux bitumineux modifiés par des polymères. Le support du complexe est constitué de la tôle en acier de la dalle orthotrope préalablement préparée par greffage puis recouverte d'un vernis d'accrochage.

Les matériaux constituant le procédé sont mis en œuvre à des températures de l'ordre de 180°C ce qui entraîne une importante et brutale élévation de température dans la structure (essentiellement la tôle et dans une moindre mesure les augets).

L'élévation de température d'une partie du tablier lui impose :

- Une déformation longitudinale liée à l'élévation de la température moyenne du tablier ;
- Une déformation verticale liée à un gradient de température vertical ;
- Une déformation transversale liée à un gradient de température transversal (Figure 8).

L'effet le plus préjudiciable à l'ouvrage est celui du gradient transversal ; en effet l'ouvrage est à l'origine hyperstatique sous sollicitation transversale (blocage du déplacement transversal sur la file d'appareils d'appui Aval et blocage longitudinal sur la pile Rive Gauche). Le bridage de la déformation transversale du tablier entraîne alors l'apparition d'efforts dans les appareils d'appui et la structure du tablier. La mise en œuvre des nouveaux appareils d'appui en élastomère fretté diminue significativement le bridage du tablier mais impose une maîtrise du

déplacement transversal sur les culées dans le but de ne pas endommager les joints de chaussée et d'assurer le maintien de la circulation.

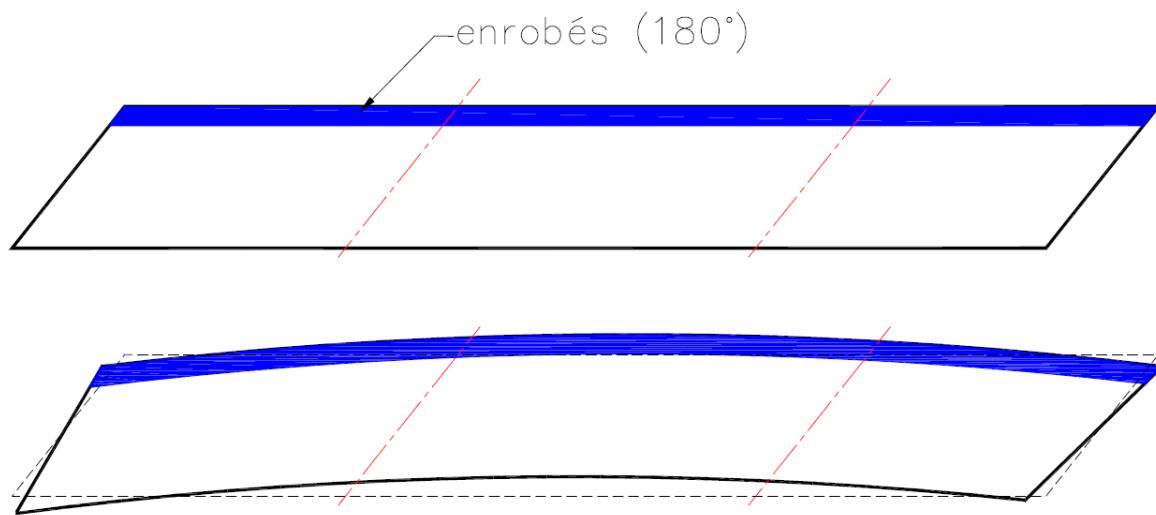


Figure 8. Déformation en plan du tablier sous gradient transversal

L'élévation de la température moyenne ne pose pas de problème vis-à-vis de la structure dans la mesure où cette élévation reste relativement modérée, comparativement aux élévations connues en service par l'ouvrage, et où l'allongement du tablier est une déformation permise par les appareils d'appui. Le principal risque est une mise en butée des joints de chaussée, particulièrement si le complexe est mis en œuvre par temps chaud.

Les effets du gradient vertical ne posent pas non plus de problème vis-à-vis de la structure dans la mesure où ce gradient reste également relativement modéré. Le principal point de vigilance est la déformée des sections transversales du tablier qui peut créer une marche aux extrémités de l'ouvrage, essentiellement au niveau de l'axe du tablier.

2. Etude d'une section soumise à un échauffement localisé

Soit une partie de section de coefficient de dilatation thermique α soumise à une élévation de température T positive (Figure 9). On note $\varepsilon_{temp} = \alpha \cdot T$ la déformation d'échauffement imposée de la partie chauffée indiquée « c ».

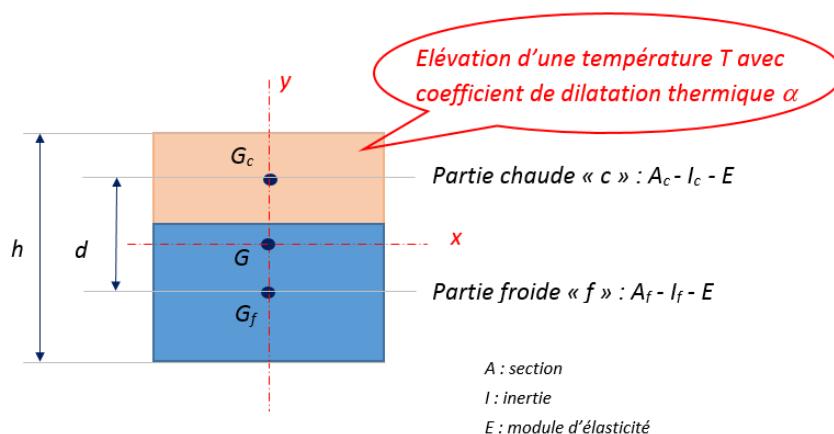


Figure 9. Notations

Si la partie « c » était libre de se déformer, la déformation thermique ε régnerait en tout point de cette partie avec $\varepsilon = \varepsilon_{temp}$ et sous cette déformation, les contraintes induites seraient nulles. Comme la déformation est bridée par la partie « f », la déformation d'équilibre au centre de gravité de la partie « c » est $\varepsilon < \varepsilon_{temp}$.

Sous l'effet de l'échauffement de la partie « c » :

- L'élément « c » développe des efforts internes : effort normal N_c et moment fléchissant M_c ;
- L'élément « f » développe des efforts internes : effort normal N_f et moment fléchissant M_f .

En l'absence d'efforts extérieurs, l'équilibre des sections de la structure permet d'écrire les conditions suivantes :

Condition 1 : La somme des forces est nulle ;

Condition 2 : La résultante des moments est nulle ;

Condition 3 : La courbure est la même pour les deux parties « c » et « f » ;

Condition 4 : L'interface des deux parties est continue (pas de glissement relatif).

On montre alors que l'effort normal (identique mais de signe opposé dans les deux parties) est donné par l'équation (1) :

$$N = N_f = -N_c = \frac{E \cdot \alpha \cdot T}{\frac{1}{A_c} + \frac{1}{A_f} + \frac{d^2}{I_c + I_f}} \quad (1)$$

Il est alors possible de déterminer l'ensemble des efforts internes à la structure.

L'équation (2) permet de déterminer le rayon de courbure R :

$$R = \frac{E \cdot I_f}{M_f} \quad (2)$$

Les déformations au centre de gravité $\varepsilon_{f,G}$ et $\varepsilon_{c,G}$ des parties « f » et « c » sont respectivement données par les équations (3) et (4) :

$$\varepsilon_{f,G} = \frac{N_f}{E \cdot A_f} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{c,G} = \alpha \cdot T + \frac{N_c}{E \cdot A_c} \quad (4)$$

La déformation au centre de gravité de la section complète ε_G est donnée par l'équation (5) :

$$\varepsilon_G = \varepsilon_{f,G} - \frac{(\varepsilon_{c,G} - \varepsilon_{f,G}) \cdot y_f}{y_c - y_f} \quad (5)$$

Avec respectivement y_c et y_f les coordonnées du centre de gravité des parties « c » et « f » par rapport au centre de gravité de la section complète.

On détermine enfin le gradient thermique équivalent ΔT (Equation (6)) et la température uniforme équivalente T_u (Equation (7)) :

$$\Delta T = \frac{h}{R \cdot \alpha} \quad (6)$$

$$T_u = \frac{\varepsilon_G}{\alpha} \quad (7)$$

3. Phasage de mise en œuvre du CER

Pour limiter les effets thermiques introduits dans le tablier, un phasage de mise en œuvre du CER a été imposé dans le marché de travaux. Il consiste à réaliser chaque sens de circulation en trois bandes longitudinales indépendantes avec au moins 12h00 d'intervalle entre chaque démarrage de bande. Lors de la mise en œuvre du CER sens Metz - Nancy, la poutre Aval repose sur ses nouveaux appareils d'appui en élastomère fretté (suppression des appuis fixes transversalement) alors que la poutre Amont repose sur les appareils d'appui d'origine (libres transversalement). Lors de la mise en œuvre du CER sens Nancy-Metz, le tablier repose intégralement sur les nouveaux appareils d'appui en caoutchouc fretté.

La durée de réalisation d'une bande de 232 m de long (longueur du tablier) dans les largeurs mises en œuvre sur l'ouvrage (entre 4 et 6 m) est de l'ordre de 2 heures.

Pour la réfection du sens Metz-Nancy, le phasage est le suivant (Figure 10) :

Phase 1 - bande de 4,35 m en rive - début le 24/06/2016 vers 08h00

Phase 2 - bande de 5,75 m centrale - début le 24/06/2016 vers 20h00

Phase 3 - bande de 4,10 m côté TPC - début le 27/06/2016 vers 23h00

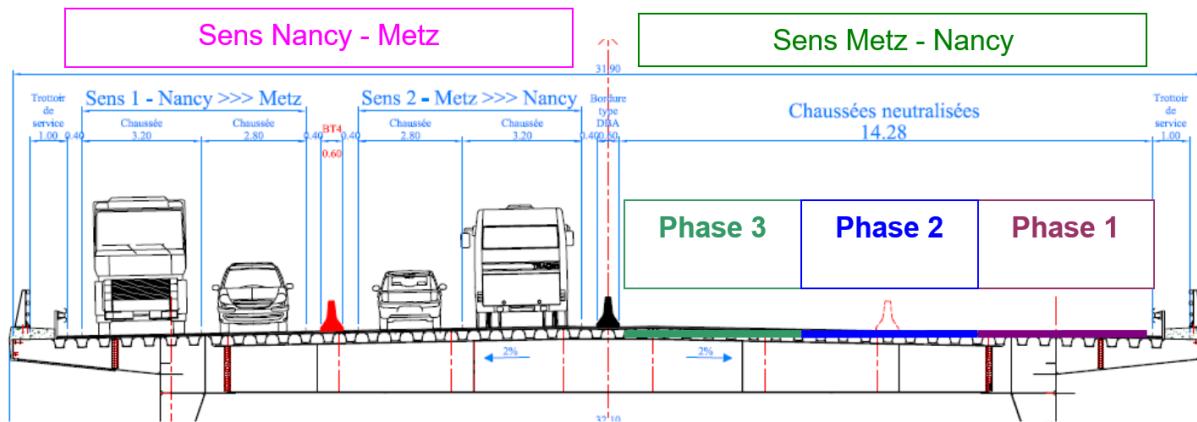


Figure 10. Illustration du phasage pour la réfection du sens Metz - Nancy

Pour la réfection du sens Nancy-Metz, le phasage est le suivant :

Phase 1 - bande de 5,75 m centrale - début le 09/08/2016 vers 01h00

Phase 2 - bande de 4,35 m en rive - début le 09/08/2016 vers 13h30

Phase 3 - bande de 4,78 m côté TPC - début le 09/08/2016 vers 23h00

4. Effet de l'élévation de température sur le tablier - Application au viaduc d'Autreville

Nous considérons la réfection d'une bande de CER de 4,35 m de large dont les bords sont situés respectivement à 10,15 m et 14,50 m de l'axe du tablier. Le modèle théorique simplifié présenté ci-avant est mis en œuvre en considérant une élévation de température de la tôle de platelage de 80°C sur la largeur chauffée¹ en référence à l'article du Bulletin Ouvrages d'Art n°54 relatif à la réfection du CER sur le viaduc de Chevillé [1]. Nous obtenons pour chaque phase un gradient linéaire équivalent et une température uniforme équivalente (Tableau 1).

Ces actions thermiques sont appliquées au tablier assimilé à une poutre de 232,75 m de portée simplement appuyée à ses extrémités. Le déplacement transversal maximal du tablier au niveau des piles intermédiaires est obtenu pour la réfection de la bande de rive, il atteint 44 mm (Tableau 1).

Réfection du CER	Bande 1 (de rive)	Bande 2 (centrale)	Bande 3 (côté TPC)
Largeur de bande (m)	4,35	5,75	4,40
Température uniforme équivalente (°C)	5,1	6,8	5,2
Gradient thermique transversal équivalent (°C)	21,2	16,6	3,8
Déplacement transversal du tablier sur pile (mm)	44	35	8

Tableau 1 : Effets thermiques équivalents et déplacement au droit des piles pour chaque bande de CER

5. Principe de bridage du tablier sur culées

Le principe de bridage du tablier sur culées est illustré par la Figure 11. En pratique, un jeu de 5 mm environ est laissé entre la semelle du tablier et la butée pour laisser l'ouvrage venir se caler et éviter l'encastrement du tablier aux abouts sous rotation d'axe vertical.

¹ Il est précisé qu'aucune diffusion transversale de la température n'est constatée sur la dalle orthotrope lors des instrumentations réalisées.



Figure 11. Dispositif de mise en butée latérale du tablier sur culée – Ici avec interposition d'un vérin hydraulique

6. Technique de mise en œuvre du CER par phase

Pour permettre la mise en œuvre puis le compactage du CER par phases, l'entreprise a conçu un système constitué de bastaings solidarisés à des panneaux en bois posés sur le tablier et lestés par des « big-bag » (Figure 12) ; il n'était en effet pas envisageable de souder des butées sur la dalle orthotrope. Le système a globalement donné satisfaction. Avec le recul, un suivi en déplacement des bastaings aurait été intéressant pour s'assurer de leur stabilité lors du compactage.



Figure 12. Dispositif de calage en rive des bandes du CER

VI. Contrôle des travaux de réfection du CER

1. Contrôle de la préparation du support

La dépose du CER existant a été effectuée par un rabotage de 3-4 cm de béton bitumineux superficiel suivi d'un enlèvement au godet du complexe résiduel.

Certaines difficultés sont apparues lors de l'enlèvement des résidus de bitume présents, celui-ci formant des boulettes lors du traitement par grenailage ne permettant pas d'obtenir un

niveau de préparation de type Sa 2 ½. Il a donc fallu procéder localement à un surfaçage en début de matinée en présence d'eau de manière à prévenir l'échauffement du bitume résiduel et à faciliter ainsi son enlèvement. La préparation du support s'est ensuite poursuivie par grenaiillage pour obtenir le niveau Sa 2 ½ pour une rugosité de type moyen G à grossier (Figures 13 et 14).



Figures 13 et 14 : Vue du décapage du tablier et du contrôle de la rugosité

VII. Contrôle de la mise en œuvre de la feuille

La mise en œuvre de la feuille préfabriquée a été assurée au moyen de la machine Mini-Jet Ponts® (Siplast) par la société SCAL de Nancy. Les extrémités des rouleaux ont fait l'objet d'une application manuelle à la lance thermique.

Le contrôle de la mise en œuvre de l'étanchéité a été effectué par une série d'essais d'adhérence par traction. Ces essais ont été complétés par un contrôle exhaustif de l'ensemble de la surface étanchée par thermographie infrarouge

Les principaux défauts d'application relevés ont concerné les zones étanchées sur les joints de platelage longitudinaux lors de l'étanchement du sens Metz-Nancy. En effet la surépaisseur de l'ordre de 5mm rencontrée sur les soudures de l'acier à ce niveau a généré une difficulté de marouflage de la feuille préfabriquée qui s'est traduite par l'apparition de poches d'air sous l'étanchéité. Ces poches d'air ont fait l'objet de reprises par incision, réchauffage ou application d'une pièce de remplacement et mise en place de rustines.

Lors du traitement du sens Nancy - Metz, un marouflage manuel des zones de joints longitudinaux de platelage, réalisé en complément de l'application mécanisée, a permis de limiter l'apparition de défauts d'adhérence.

VIII. Suivi en température par caméra thermique de la mise en œuvre des enrobés

Lors de la mise en œuvre de la couche finale du complexe d'étanchéité Orthoplast H, un suivi de la température du platelage par thermographie infrarouge a été effectué depuis l'intrados.

Ce suivi a été réalisé au moyen d'une caméra thermique de type FLIR SC640 d'une sensibilité de 30 mK (0.03°C) réglée sur une gamme de température -40 / +120°C pilotée par l'application Research IR®.

L'intérêt de cette technique réside principalement dans sa rapidité de déploiement, la possibilité d'effectuer un contrôle à distance et la disposition d'outils d'exploitation en direct à partir d'une matrice de 640x480 éléments de mesure et d'un objectif de 19 mm de focale (Figure 15).

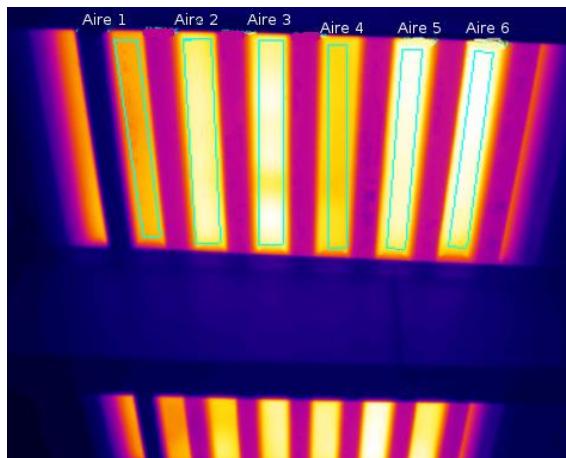


Figure 15 : Image infrarouge de la zone suivie par thermographie, en zones plus foncées, la position des auges

IX. Instrumentation du tablier et analyse des déplacements du tablier au droit de piles

1. Principe de l'instrumentation

L'instrumentation de l'ouvrage consiste à suivre, lors des opérations de réfection du CER :

- Le déplacement transversal et longitudinal par capteurs de déplacement des poutres au droit des piles (Figure 16) ;



Figure 16 : Capteur de déplacement pour le suivi transversal du tablier sur pile

- La température en sous face du platelage entre augets sous les bandes d'enrobés mises en œuvre, à l'aide de thermocouples.

2. Caractérisation des effets thermiques

La Figure 17 rassemble les températures données par les sondes sous platelage lors de la réfection des différentes bandes suivies en recalant l'origine des temps à zéro.

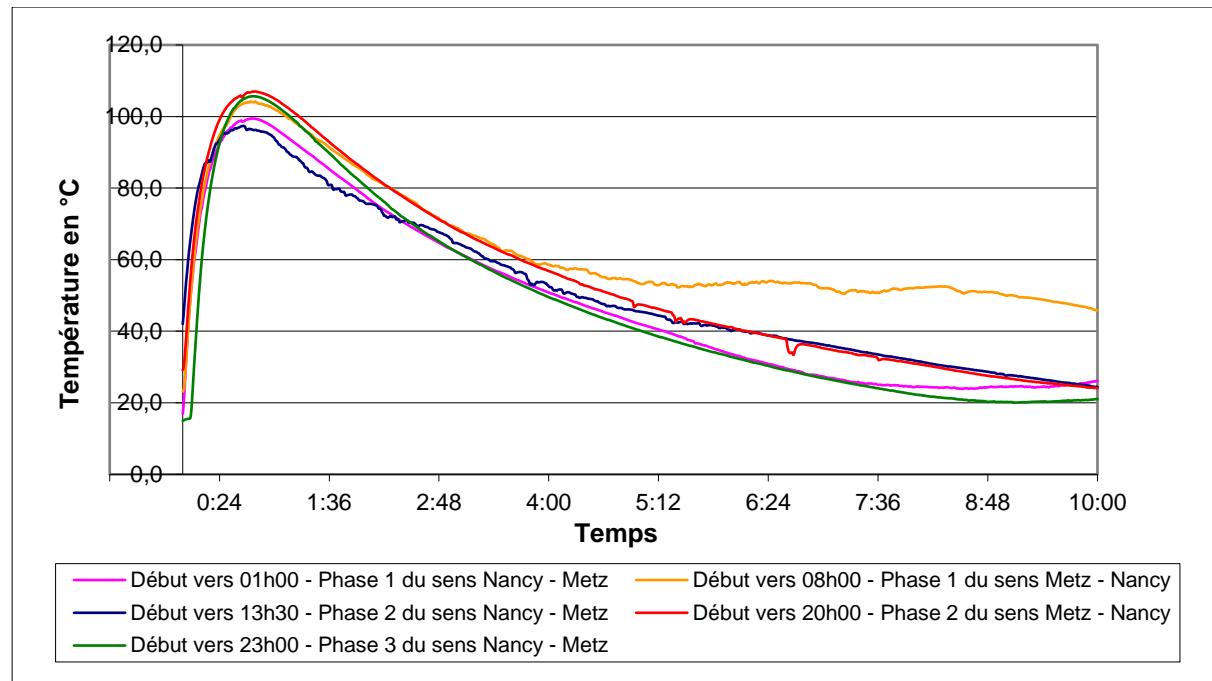


Figure 17 : Evolution des températures sous platelage lors de la réfection des différentes bandes de CER

L'analyse des courbes permet de dresser le Tableau 2 :

Heure de début	01h00	08h00	13h00	20h00	23h00
Température initiale du platelage (°C)	17	23	42	29	15
Température maximale du platelage (°C)	99	104	97	107	106
Temps d'atteinte de la température maximale (minutes)	45	47	44	47	46

Tableau 2 : Caractérisation des effets thermiques

Le suivi en température par caméra thermique permet de faire sensiblement les mêmes analyses que celles tirées des sondes de températures collées sous le platelage. Les températures maximales enregistrées sont situées entre 92 et 113 °C. La valeur maximale apparaît environ 45 minutes après le début de mise en œuvre des enrobés.

3. Déplacements mesurés au droit des piles

Les mesures réalisées confirment les déformations attendues du tablier lors de la réfection des bandes de CER (Figure 18). Les déplacements transversaux mesurés sur piles sont relativement importants, de l'ordre de 20 mm.

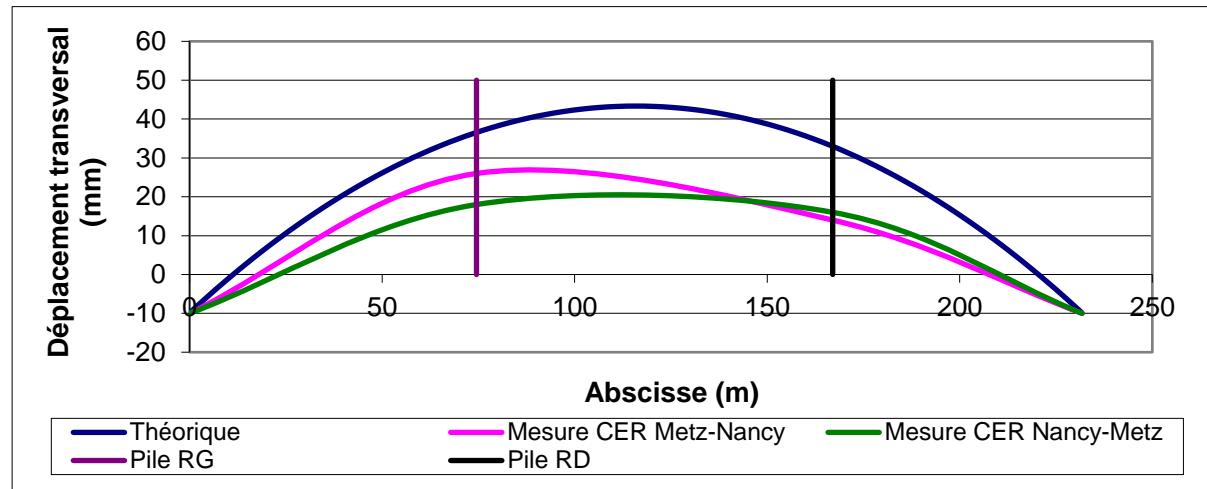


Figure 18 : Comparaison des déplacements réels aux déplacements théoriques pour le cas de la réfection d'une bande de rive en supposant un déplacement sur culées de 10 mm

Les déplacements réels du tablier mesurés au droit des piles sont environ moitié moins que ceux estimés. Ceci est lié :

- Au caractère sécuritaire du modèle qui ne tient pas compte des déformations des sections du tablier et de l'inertie apportée par les équipements et notamment les couches d'enrobés présentes ;
- Au fait qu'une partie des déplacements se fait sur les culées en raison des jeux ménagés (de l'ordre de 5 à 10 mm) ;
- Aux incertitudes sur les effets thermiques.

X. Suivi des déplacements du tablier au droit des culées

1. Mouvement dans le plan du tablier

Lors de la réfection des bandes d'enrobés, les observations visuelles ont permis de confirmer l'allongement et le déplacement transversal du tablier au droit des culées.

Pour éviter d'endommager les joints les dispositions suivantes ont été prises lors de la réfection du CER :

- Sciage des dents côté mur garde-grève des peignes du joint de chaussée sur la culée Rive Gauche, ce joint devant être changé du fait de la modification du point fixe lié au changement des appareils d'appui ;
- Desserrage des éléments de joints côté mur garde-grève sur le joint de la culée Rive Droite (Figure 19).



Figure 19 : Joints de chaussée sur culée Rive Droite lors de la réfection de la bande de rive sens Metz- Nancy - Mise en contact des dents, les éléments de joint côté mur garde-grève sont desserrés

2. Mouvement vertical du tablier

Lors de la réfection de la seconde bande du CER sens Metz – Nancy, des décalages verticaux ont été constatés aux extrémités du tablier entre les éléments de joints en vis-à-vis à proximité du terre-plein-central. Le décalage vertical mesuré a atteint 3,5 cm sur la ligne côté Metz et 1,7 cm sur la ligne côté Nancy.

Cette différence est en partie due au fait que le joint de chaussée côté Metz présente, indépendamment de toute sollicitation thermique liée aux opérations de réfection des enrobés, un décalage des éléments en vis-à-vis à proximité de l'axe longitudinal de l'ordre 1 cm pour une température ambiante de 20 °C (le nivellation des joints étant par ailleurs correct au droit des poutres). Ce décalage "initial" est sans doute lié au réglage du joint à la pose.

L'importance de ce mouvement vertical du tablier n'avait pas été anticipé lors des études de réparation et comme il était excessivement difficile de l'évaluer compte tenu des incertitudes sur les sollicitations thermiques et de la géométrie complexe des abouts du tablier (pièce de pont sur appareils d'appui en élastomère fretté, biais du tablier...), un suivi par tachéomètre des mouvements de la pièce de pont a été mis en place lors de la réfection de la bande suivante.

Ce suivi a montré une déformation maximale vers le haut de la pièce de pont d'about de l'ordre de 15 mm. La déformée maximum est obtenue une heure après le début de mise en œuvre des enrobés, elle met ensuite environ 2h30 pour diminuer de moitié.

XI. Opération de débridage du tablier

Compte-tenu des désordres observés sur les appareils d'appui d'origine et du phasage des réparations comprenant des phases de réfection des enrobés sur les appareils d'appui d'origine et des bridages de déplacements sur les culées, il était possible de craindre l'existence d'efforts horizontaux emprisonnés dans les butées latérales après la mise en place du tablier sur ses nouveaux appuis en élastomère fretté.

Pour éviter le transfert de ces efforts horizontaux dans les nouveaux appareils d'appui, une phase de débridage du tablier a été prévue au marché.

L'opération a consisté d'une part à mettre en œuvre des vérins au niveau des butées latérales des culées pour contrôler le mouvement transversal éventuel du tablier et d'autre part à reprendre les descentes de charge verticales sur culées par des vérins équipés en tête de plaques en IPALEN (coefficient de frottement faible estimé à environ à 2,5%) pour libérer les efforts. Afin de limiter la réaction d'appui verticale sur culée et donc l'intensité des efforts potentiellement piégés par frottement, un chargement de la travée centrale a été prévu (le gain en terme de frottement est toutefois faible de l'ordre de la tonne compte tenu du très faible coefficient de frottement théorique de l'IPALEN).

L'opération de débridage a été réalisée dans la nuit du 10 au 11 août 2016 sous coupure complète de l'A31.

En pratique, l'ouvrage n'était plus en butée sur les calages des culées à l'issue des opérations de réfection du CER et du transfert de la structure sur ses nouveaux appareils d'appui (existence de jeux entre l'ouvrage et les butées). L'opération de débridage n'a alors logiquement pas fait apparaître de mouvement transversal significatif (mouvement inférieur au millimètre).

XII. Enseignements tirés

Le suivi thermique du tablier permet d'établir les constats suivants (hors influence de la température de mise en œuvre des enrobés qui fluctue autour de 180 °C) :

- La température maximale atteinte par le platelage semble peu dépendante de la température initiale, cette valeur se situe autour de 100 °C ;
- La température maximale est atteinte environ 45 minutes après le début d'application ;
- Au bout de 4 heures, la température est environ égale à la moitié de la température maximale ;
- L'allure de la courbe de refroidissement est influencée par les conditions thermiques extérieures et notamment par l'ensoleillement ;
- Au bout de 8 heures, les effets de l'élévation de température liés à la mise en œuvre des enrobés ont disparu et la tôle de platelage a retrouvé un équilibre lié aux conditions météorologiques extérieures.

Il apparaît que l'heure de début d'application la plus pertinente se situe autour de minuit (température stable et relativement basse favorisant le refroidissement du tablier et présence d'un plus faible trafic sur l'ouvrage).

Du suivi des déplacements du tablier, nous pouvons tirer les enseignements suivants :

- Les déplacements transversaux mesurés sur piles sont relativement importants (de l'ordre de 20 mm) et imposent une souplesse des appareils d'appui ce que le système d'origine ne permettait pas. La mise en œuvre d'appareils d'appui souples en élastomère fretté associée au contrôle des déplacements du tablier sur les culées permet à l'ouvrage de se déformer librement sans blocage anormal d'efforts sous déformations imposées.
- La prise en compte d'une élévation de température de la partie chauffée de tablier de 80°C préconisée par le retour d'expérience du pont de Cheviré [1] est pertinente pour l'ouvrage. Cette température prise en compte dans un modèle simplifié place en sécurité pour estimer les déplacements transversaux du tablier ;

- Les largeurs de bandes retenues ne peuvent guère être augmentées. Le délai entre les phases de réalisation des bandes doit être d'au moins 8 heures. Pour mémoire, la durée de réalisation d'une bande est de l'ordre de 2 heures ;
- Le mouvement vertical du joint à proximité de l'axe de l'ouvrage sous l'effet de la réfection des bandes du CER peut être estimé à environ 15 mm. Suite aux observations faites sur site et dans le but de maîtriser les risques liés à ce mouvement, un protocole a été défini, basé sur une surveillance accompagnée, si besoin, de mesures d'exploitation consistant à limiter la circulation à une voie dans le sens situé du côté où la réfection du CER est en cours (fermeture de la voie la plus proche de l'axe longitudinal de l'ouvrage, là où le mouvement vertical est le plus important). Cette restriction est limitée à quelques heures (3 à 4 heures maximum), le temps que le tablier refroidisse.

Références bibliographiques

- [1] Imbert F. (2007). « Effets thermiques lors de la pose de revêtements sur dalles orthotropes ». Bulletin Ouvrages d'Art, N°54, 2-9

Calcul des coefficients partiels selon l'objectif de fiabilité attendu pour l'ouvrage

Yi ZHANG¹, François TOUTLEMONDE²

¹ Léon Grosse Agence TP Grands Travaux, 31 Boulevard des Bouvets, 92000 Nanterre (Ancien : Spie Batignolles Génie Civil, 11 rue Lazare Hoche, 92774 Boulogne-Billancourt), y.zhang@leongrosse.fr

² Université Paris-Est / IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2, francois.toutlemonde@ifsttar.fr

Résumé

Dans les Eurocodes, la notion de fiabilité est introduite et s'exprime en termes de probabilité cible de défaillance. Les trois classes de fiabilité (RC1, RC2 et RC3) sont fondées sur les conséquences supposées de défaillance et l'exposition des constructions aux dangers potentiels. Le dimensionnement habituel à l'Etat Limite Ultime (ELU) est associé à la classe de fiabilité RC2, qui conduit à des coefficients partiels associés à une probabilité de défaillance de 5×10^{-5} (indice de fiabilité $\beta = 3.89$) sur une durée de référence de 50 ans.

Certains ouvrages exceptionnels à construire présentent des enjeux très importants, ils peuvent avoir une probabilité cible de défaillance plus faible (de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-12} / 50 ans) sur leur durée d'utilisation de projet. Pour ces situations plus contraignantes (classe de fiabilité supérieure à RC3), le présent article présente une méthode simplifiée de calibration des coefficients partiels sur les matériaux et les actions, ainsi que les incertitudes de modèle, qui est fonction de la fiabilité de l'ouvrage (probabilité de défaillance) selon la méthodologie présentée dans les Eurocodes. Une discussion à la fin de l'article envisage l'emploi combiné de cette procédure et les autres mesures permettant d'assurer la fiabilité cible de l'ouvrage.

I. Introduction

Les règles de conception dans les Eurocodes se basent essentiellement sur l'approche semi-probabiliste qui utilise la notion de coefficients partiels. Les trois classes de fiabilité (RC1, RC2 et RC3) sont fondées sur les conséquences supposées de défaillance et l'exposition des constructions aux dangers potentiels. Dans l'Eurocode 0, les coefficients partiels à l'Etat Limite Ultime (ELU) ont été définis pour la classe de fiabilité RC2, associée à une probabilité de défaillance de 5×10^{-5} (indice de fiabilité $\beta = 3.89$) sur une durée de référence de 50 ans, ou une probabilité de défaillance de 10^{-6} (indice de fiabilité $\beta = 4.75$) sur une durée de référence de 1 an [1] [2]. De même, la classe de fiabilité RC1 est associée à une probabilité de défaillance de 5×10^{-4} (indice de fiabilité $\beta = 3.29$) sur une durée de référence de 50 ans, ou une probabilité de défaillance de 10^{-5} (indice de fiabilité $\beta = 4.26$) sur une durée de référence de 1 an, et la classe de fiabilité RC3 est associée à une probabilité de défaillance de 5×10^{-6} (indice de fiabilité $\beta = 4.42$) sur une durée de référence de 50 ans, ou une probabilité de défaillance de 10^{-7} (indice de fiabilité $\beta = 5.20$) sur une durée de référence de 1 an [1] [2].

Pour certains projets comme des ouvrages exceptionnels, des installations industrielles conséquentes, des projets militaires, etc., qui présentent des enjeux économiques, sociaux et environnementaux très importants, leur probabilité de défaillance souhaitée peut être plus faible (de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-12} / 50 ans) pendant leur durée d'utilisation. Les situations à analyser sont donc plus contraignantes que celles considérées normalement dans les Eurocodes, leur classe de fiabilité concernée peut être supérieure à la classe RC3 [1] [3]. En conséquence, les éléments de génie civil doivent être justifiés à la rupture avec des coefficients partiels adaptés sur les matériaux et les actions, voire les incertitudes de modèle, de façon à ne pas dépasser la probabilité de défaillance demandée.

L'Eurocode 0 a déjà proposé d'appliquer un coefficient multiplicateur K_{FI} (de 0.9 à 1.1) pour les actions afin d'obtenir une différenciation de la fiabilité entre RC1 et RC3 [1]. De plus, certaines études ont été également menées sur l'évaluation des ouvrages existants en utilisant les coefficients partiels ajustés [4] [5]. Par contre, peu de documents ou références existent pour les ouvrages neufs à construire avec une classe de fiabilité supérieure à la classe RC3.

L'objet du présent article est de présenter une méthode simplifiée en évaluant la valeur des coefficients partiels à appliquer à l'ELU pour atteindre le niveau de fiabilité exigé (supérieur à RC3), selon la méthodologie présentée dans les Eurocodes. Cette méthode a effectivement été mise en œuvre dans la situation particulière de conception d'un ouvrage neuf relevant d'une exigence de fiabilité exceptionnelle.

II. METHODOLOGIE PRESENTEE DANS LES EUROCODES

1. Principes généraux assurant la fiabilité

La fiabilité est la capacité d'une structure ou d'un élément structural à satisfaire aux exigences spécifiées, au cours de la durée d'utilisation de projet. Elle s'exprime habituellement en termes de probabilité de défaillance.

D'après le chapitre 2.2 de l'Eurocode 0 [1], la fiabilité requise pour une structure doit être obtenue par :

- a) un dimensionnement conforme aux Eurocodes (EN1990 à EN1999), notamment pour l'estimation de valeurs représentatives de la résistance des matériaux et le choix des coefficients partiels ;
- b) un dimensionnement conforme aux Eurocodes (EN1990 à EN1999), notamment pour l'estimation de valeurs représentatives des effets des actions et le choix des coefficients partiels ;
- c) des mesures appropriées en matière d'exécution et des mesures d'inspection et de maintenance ;
- d) des mesures appropriées en matière de gestion de la qualité. Ces mesures sont destinées à réduire les erreurs dans le projet et l'exécution de la structure, et les erreurs humaines grossières.

Des méthodes déclinant l'application des principes (c) et (d) sont détaillées dans l'annexe B de l'Eurocode 0. Il est préconisé :

- un contrôle de l'exécution des travaux ou des procédés de fabrication des composants structurels, dans le cadre d'une démarche de qualité appropriée ;
- la réalisation d'inspections et d'essais réguliers pour évaluer l'état de santé de la structure, notamment la résistance des matériaux, tout au long de la durée d'utilisation ;
- la mise en œuvre de mesures de protection et de prévention afin d'assurer que les propriétés des matériaux prises en considération dans les calculs ne changent pas au cours de la vie de la structure ;
- un contrôle des niveaux réels des actions tout au long de la vie de la structure afin d'assurer la bonne prise en considération des actions dans le dimensionnement.

Dans le présent article, nous supposons ces méthodes appliquées, et concentrons notre intérêt sur les méthodes permettant de satisfaire les principes (a) et (b).

2. Méthodes probabilistes déterminant les valeurs des coefficients partiels

D'après l'annexe C de l'Eurocode 0 [1], il existe en principe deux façons de déterminer les valeurs numériques des coefficients partiels :

1. la première consiste à calibrer les coefficients par rapport à une longue expérience acquise dans la construction traditionnelle ;
2. la deuxième est fondée sur l'évaluation statistique de données recueillies en laboratoire ou sur le terrain, il convient d'opérer dans le cadre d'une théorie probabiliste de la fiabilité.

La première procédure ne peut pas être utilisée pour la problématique des ouvrages exceptionnels présentée ici, car cette méthode, qui est celle utilisée pour déterminer les coefficients partiels usuels des Eurocodes, correspond à une probabilité de défaillance plus grande. Il faut donc appliquer la deuxième procédure.

Les procédures probabilistes peuvent être divisées en deux catégories principales :

- méthodes intégralement probabilistes (Niveau III) ;
- méthodes fiabilistes du premier ordre (Niveau II).

Les méthodes de Niveau III consistent à calculer directement la probabilité de défaillance par simulation numérique ou calcul analytique, mais elles sont rarement utilisées dans la calibration de codes de projet, en raison du manque fréquent de données statistiques. En revanche, les méthodes de niveau II donnent une approximation de la probabilité de défaillance basée sur un point de fonctionnement et de la courbure de l'état limite autour de ce point dans un espace normalisé. Elles utilisent certaines approximations bien définies et conduisent à des résultats qui peuvent être considérés comme suffisamment précis pour la plupart des applications structurales.

Il est donc retenu, dans le présent article, l'utilisation de la méthode FORM (First Order Reliability Method) de niveau II.

III. DEFINITION DES COEFFICIENTS PARTIELS

La vérification d'un état limite ultime pour une structure ou un élément structurel est fondée sur l'inégalité suivante selon l'Eurocode 0 [1] :

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

- E_d est la valeur de calcul de l'effet des actions ;
- R_d est la valeur de calcul de la résistance de l'ouvrage en fonction des propriétés des matériaux le constituant.

Les valeurs de calcul dépendent des valeurs caractéristiques de la quantité correspondante et des coefficients partiels liés au niveau de fiabilité choisi.

1. Définition des coefficients partiels sur les matériaux

En ce qui concerne la résistance R d'une structure ou d'un élément de structure en béton armé, nous avons :

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R \left\{ \eta_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c^*}, \eta_s \frac{f_{yk}}{\gamma_s^*}, a_d \right\} \quad (2)$$

- f_{ck} et f_{yk} sont les valeurs caractéristiques des propriétés des matériaux (béton et acier) ;
- a_d représente les valeurs de calcul des quantités géométriques qui permettent de définir l'effort résistant ;
- R représente toutes les opérations qui permettent de calculer l'effort résistant une fois que les propriétés des matériaux et les géométries sont connues ;
- η_C et η_S sont les valeurs moyennes de coefficient de conversion (béton et acier) ;
- γ_C^* et γ_S^* sont les coefficients pour tenir compte de la possibilité d'écart défavorable de la propriété des matériaux (béton et acier) par rapport à leur valeur caractéristique ;
- γ_{Rd} est un coefficient qui couvre l'incertitude du modèle de calcul de la résistance. Ce coefficient prend en compte également les incertitudes géométriques, lorsqu'elles ne sont pas intégrées explicitement dans les quantités a_d .

Une simplification de l'équation (2) peut être écrite comme suit :

$$R_d = R\{f_{cd}, f_{yd}, a_d\} \quad (3)$$

- $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C}$ avec $\gamma_C = \gamma_{Rd} \times 1/\eta_C \times \gamma_C^*$;
- $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$ avec $\gamma_S = \gamma_{Rd} \times 1/\eta_S \times \gamma_S^*$;
- f_{cd} et f_{yd} sont les valeurs de calcul des propriétés des matériaux (béton et acier).

Pour la résistance basée sur les propriétés des matériaux, les coefficients partiels (γ_C et γ_S) peuvent être considérés comme le produit de trois facteurs :

- le facteur γ^* qui tient compte de la variabilité de la résistance ;
- le facteur η qui tient compte des différences entre résistance conventionnelle et résistance effective dans l'ouvrage (coefficient de conversion). Selon les guides CEB n°127 et 128 [6] [7], nous retiendrons : $1/\eta_c = 1.10$ pour le béton et $1/\eta_c = 1.05$ pour l'acier ;
- le facteur γ_{Rd} qui tient compte des incertitudes de modèle de résistance et de la géométrie. Selon les guides CEB n°127 et 128 [6] [7], nous retiendrons : $\gamma_{Rd} = 1.10$ pour le béton et $\gamma_{Rd} = 1.05$ pour l'acier.

2. Définition des coefficients partiels sur l'effet des actions

En ce qui concerne l'effet des actions E, il y a des combinaisons différentes pour différentes situations de projet.

Pour des situations durables ou transitoires, avec seulement une action permanente G et une action variable Q, nous avons :

$$E_d = \Upsilon_{Sd} E\{\Upsilon_g G_k, \Upsilon_q Q_k, a_d\} \quad (4)$$

- G_k et Q_k sont les valeurs caractéristiques des actions (permanente et variable) ;
- a_d représente les valeurs de calcul des quantités géométriques qui permettent de définir l'action ;
- E représente toutes les opérations qui permettent de calculer l'effet des actions ;
- Υ_g et Υ_q sont les coefficients permettant de tenir compte de la possibilité d'un écart défavorable des valeurs de l'action par rapport à leur valeur caractéristique ;
- Υ_{Sd} est un coefficient qui prend en compte les incertitudes dans la modélisation des actions.

Une simplification de l'équation (4) peut être écrite comme suit :

$$E_d = E\{\Upsilon_G G_k, \Upsilon_Q Q_k, a_d\} \quad (5)$$

- $\Upsilon_G = \Upsilon_{Sd} \times \Upsilon_g$;
- $\Upsilon_Q = \Upsilon_{Sd} \times \Upsilon_q$.

Pour les effets des actions, les coefficients partiels (Υ_G et Υ_Q) peuvent être considérés comme le produit de deux facteurs :

- le facteur γ qui tient compte de la variabilité de l'action ;
- le facteur Υ_{Sd} qui tient compte des incertitudes de modèle de calcul de l'action. Selon les bulletins CEB-FIB n°65 et 66 [8] [9], nous retiendrons : $\Upsilon_{Sd} = 1.05$ pour les actions permanentes. Selon CALGARO [3], la valeur de Υ_{Sd} peut être prise égale à 1.125 pour les actions variables.

IV. CALIBRATION DES COEFFICIENTS PARTIELS SELON LA METHODE FORM – HYPOTHESES ET FORMULES

1. Relation entre probabilité de défaillance et indice de fiabilité

Dans le cadre d'une procédure probabiliste de Niveau II, la probabilité de défaillance P_f est liée par une relation biunivoque à l'indice de fiabilité β (figure 1) :

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

- Φ est la fonction de distribution cumulée de la distribution Normale standard.

Cette relation est exacte si la différence entre la résistance et l'effet de l'action ($g = R - E$) est une variable avec distribution statistique Normale (Gaussienne). Pour d'autres distributions de g , l'équation (6) devient une approximation de la probabilité de défaillance. Par exemple, dans les cas de lois non normales et d'états limites non linéaires, le problème est ramené dans un espace normalisé grâce à une interprétation géométrique, on peut définir un indice de fiabilité de Hasofer et Lind (β_{HL}) [10]. En pratique on se ramène le plus souvent à cette hypothèse qui correspond à la situation d'un calcul de conception bien ajusté (sans biais).

Dans ce qui suit, nous présentons la calibration des coefficients partiels sur une durée de référence de 50 ans.

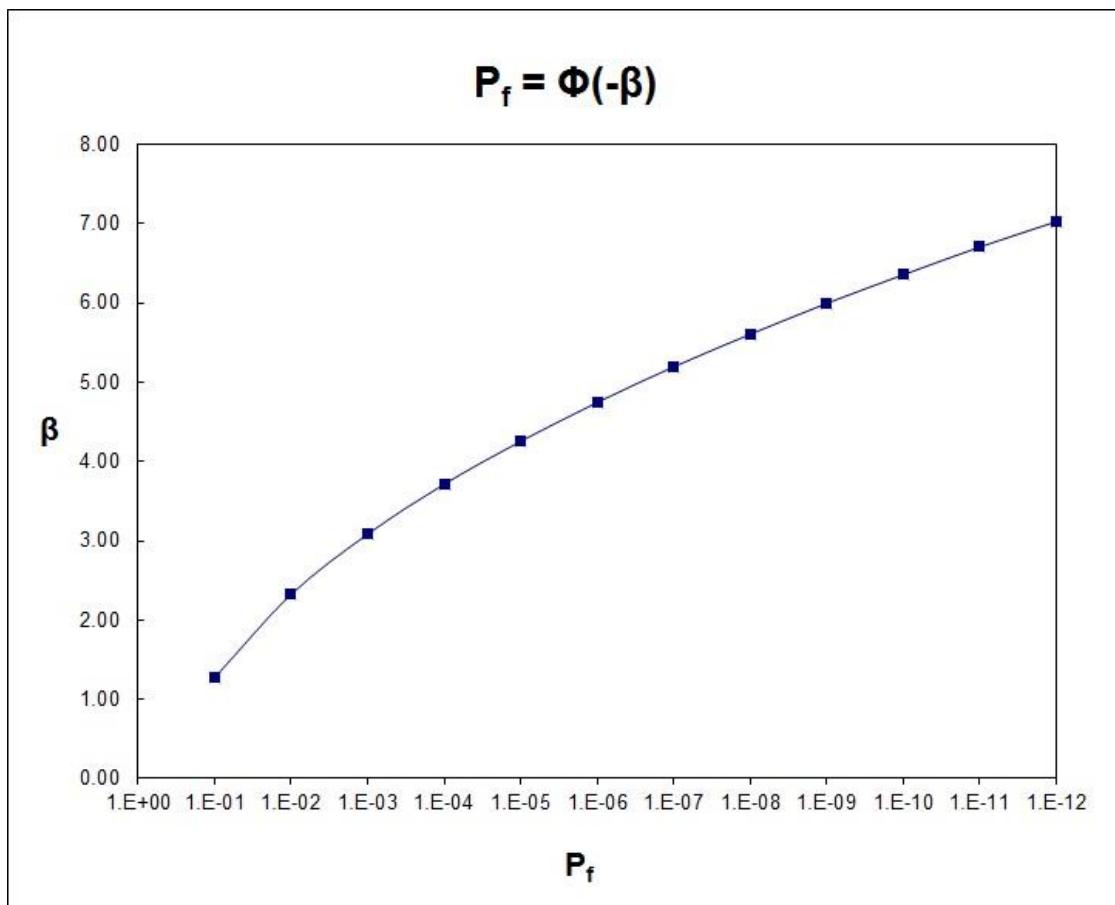


Figure 1. Relation entre la probabilité de défaillance P_f (durée de 50 ans) et l'indice de fiabilité β

On récapitule les valeurs numériques de P_f et β dans le tableau 1.

P_f (/50 ans)	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
β	1.28	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75	5.20	5.61	6.00	6.36	6.71	7.03

Tableau 1 : Valeurs de la probabilité de défaillance P_f (par 50 ans) et de l'indice de fiabilité β

2. Formules de base

Une fois que la probabilité de défaillance P_f est choisie, on peut calculer l'indice de fiabilité β , et il est possible de déterminer les valeurs de calcul d'effet des actions E_d et de la résistance R_d . Les formules de calcul à appliquer sont les suivantes :

$$Prob(E > E_d) = \Phi(+\alpha_E \beta) \quad (7a)$$

$$Prob(R > R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta) \quad (7b)$$

- α_E et α_R sont les coefficients de sensibilité FORM.

Dans la figure 2, la droite (S) définit la frontière du domaine de défaillance $g = R - E = 0$, les coefficients de sensibilité α_E, α_R et l'indice de fiabilité β définissent le point de calcul FORM, il s'agit du point P. L'indice de fiabilité β est égal à la longueur du segment compris entre le point P et le point au centre des cercles, qui représentent des lignes de niveau de la distribution de probabilité des variables Gaussiennes bidimensionnelles $(R/\sigma_R, E/\sigma_E)$ et non corrélées. On peut montrer que :

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} > 0 \quad (8)$$

- μ_E et μ_R sont les valeurs moyennes de l'effet de l'action et de la résistance.

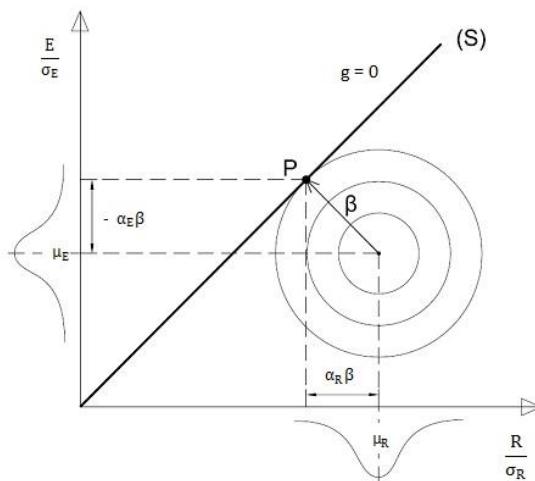


Figure 2. Point de calcul P et indice de fiabilité β selon la méthode de fiabilité du premier ordre (FORM) pour des variables ayant des distributions Normales et non corrélées

Les coefficients de sensibilité FORM (α_E de l'effet des actions et α_R de la résistance) sont les composantes d'un vecteur normal. Pour une structure donnée, la somme des carrés de ces coefficients est égale à 1.

Leurs valeurs dépendent du rapport entre les écarts type σ_E et σ_R . Trois situations peuvent être distinguées (tableau 2) selon les documents de référence [1] [2] [3] [4] [5] [11].

Situations		α_E	α_R
(1)	$0.16 < \sigma_E / \sigma_R < 7.6$ (écart type de l'effet des actions et de la résistance du même ordre de grandeur)	-0.7	0.8
(2)	$\sigma_E / \sigma_R \geq 7.6$ (écart type de l'effet des actions plus grand que celui de la résistance)	-1.0	0.4
(3)	$\sigma_E / \sigma_R \leq 0.16$ (écart type de l'effet des actions plus petit que celui de la résistance)	-0.4	1.0

Tableau 2 : Valeurs des coefficients de sensibilité α_E et α_R en fonction de σ_E/σ_R

La comparaison entre les écarts type σ_E et σ_R doit se faire sur les variables E et R, qui ont la même dimension physique. Pour les applications numériques dans le chapitre 5, nous ne considérerons que la situation (1), qui permet de couvrir une plage de σ_E/σ_R assez large, ce qui permet de représenter la plupart des cas usuels [1] [2] [3] [5] [11]. En dehors de cette plage, il convient d'utiliser les valeurs dans les situations (2) et (3).

Par contre, nous devons noter que les valeurs de ces coefficients de sensibilité retenues ($\alpha_E = -0.7$ et $\alpha_R = 0.8$) sont conservatives car la somme des carrés de ces valeurs est égale à $(-0.7)^2 + 0.8^2 = 1.13$, supérieure à 1. De plus, elles sont pour une approche à deux variables aléatoires normales gaussiennes. D'une manière simplifiée et pragmatique, ces valeurs sont appliquées aux variables aléatoires composant la résistance ou l'action.

V. CALIBRATION DES COEFFICIENTS PARTIELS SELON LA METHODE FORM – APPLICATIONS NUMÉRIQUES

1. Calcul des coefficients partiels sur les matériaux

Le calcul des coefficients partiels sur les matériaux se base sur une évaluation de la qualité des matériaux. Les paramètres concernés sont :

- μ : valeur moyenne des propriétés des matériaux ;
- f_k : valeur caractéristique des propriétés des matériaux ;
- σ : écart-type de distribution des propriétés ;
- V : coefficient de variation des propriétés ($V = \sigma/\mu$).

D'après la définition des coefficients partiels dans le chapitre 3, la détermination de la valeur des coefficients partiels des matériaux est étroitement liée au facteur γ^* , qui tient compte de la variabilité des propriétés des matériaux. Selon une étude bibliographique réalisée par Ostlund [12] sur l'analyse d'un très grand nombre d'essais et les informations dans le code modèle du JCSS [13], les coefficients de variation relatifs à la résistance (béton et acier) s'inscrivent dans un intervalle de : $V_c = 0.08$ à 0.14 (béton) et $V_s = 0.05$ à 0.09 (acier). Nous allons donc présenter ci-après les études paramétriques de l'évaluation des coefficients partiels en considérant les coefficients de variation de la résistance des matériaux compris dans les domaines englobant les valeurs citées précédemment, à savoir :

- Béton (en compression) $V_C = 0.08 \text{ à } 0.20$
- Acier (en traction) $V_S = 0.02 \text{ à } 0.09$

La distribution statistique des propriétés des matériaux (béton et acier) est supposée Lognormale, nous pouvons estimer la résistance de calcul f_d en utilisant la formule suivante ($V < 0.2$) :

$$f_d = X_d = \mu e^{-\alpha\beta V} \quad (9)$$

le facteur γ^* sur les matériaux peut s'écrire :

$$\gamma^* = \frac{f_k}{f_d} = \frac{\mu e^{-KV}}{\mu e^{-\alpha\beta V}} = e^{-kV + \alpha\beta V} \quad (10)$$

Où K est une constante associée au fractile 5%.

A. Evaluation du coefficient partiel (γ_c) lié à la résistance du béton

Le coefficient partiel lié à la résistance du béton pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 3 et la figure 3.

Les valeurs des constantes sont : $\gamma_{RD} = 1.10$; $1/\eta_c = 1.10$; $K_c = 1.645$; $\alpha_c = 0.8$.

$\gamma_c = \gamma_{Rd} \times 1/\eta_c \times \gamma_c^*$									
P_f (/50 ans)	β	V_c							
		0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20
1.0E-03	3.09	1.29	1.31	1.34	1.36	1.37	1.38	1.40	1.43
1.0E-04	3.72	1.35	1.38	1.42	1.46	1.48	1.50	1.54	1.58
1.0E-05	4.27	1.39	1.44	1.50	1.55	1.58	1.61	1.66	1.72
1.0E-06	4.75	1.44	1.50	1.57	1.64	1.67	1.71	1.78	1.86
1.0E-07	5.20	1.48	1.56	1.64	1.72	1.76	1.81	1.90	2.00
1.0E-08	5.61	1.52	1.61	1.70	1.80	1.85	1.91	2.02	2.14
1.0E-09	6.00	1.56	1.66	1.77	1.88	1.94	2.00	2.13	2.27
1.0E-10	6.36	1.59	1.71	1.83	1.96	2.03	2.10	2.25	2.41
1.0E-11	6.71	1.63	1.76	1.89	2.04	2.11	2.19	2.36	2.55
1.0E-12	7.03	1.66	1.80	1.95	2.11	2.20	2.29	2.48	2.68

Tableau 3 : Valeurs du coefficient partiel γ_c

Méthode

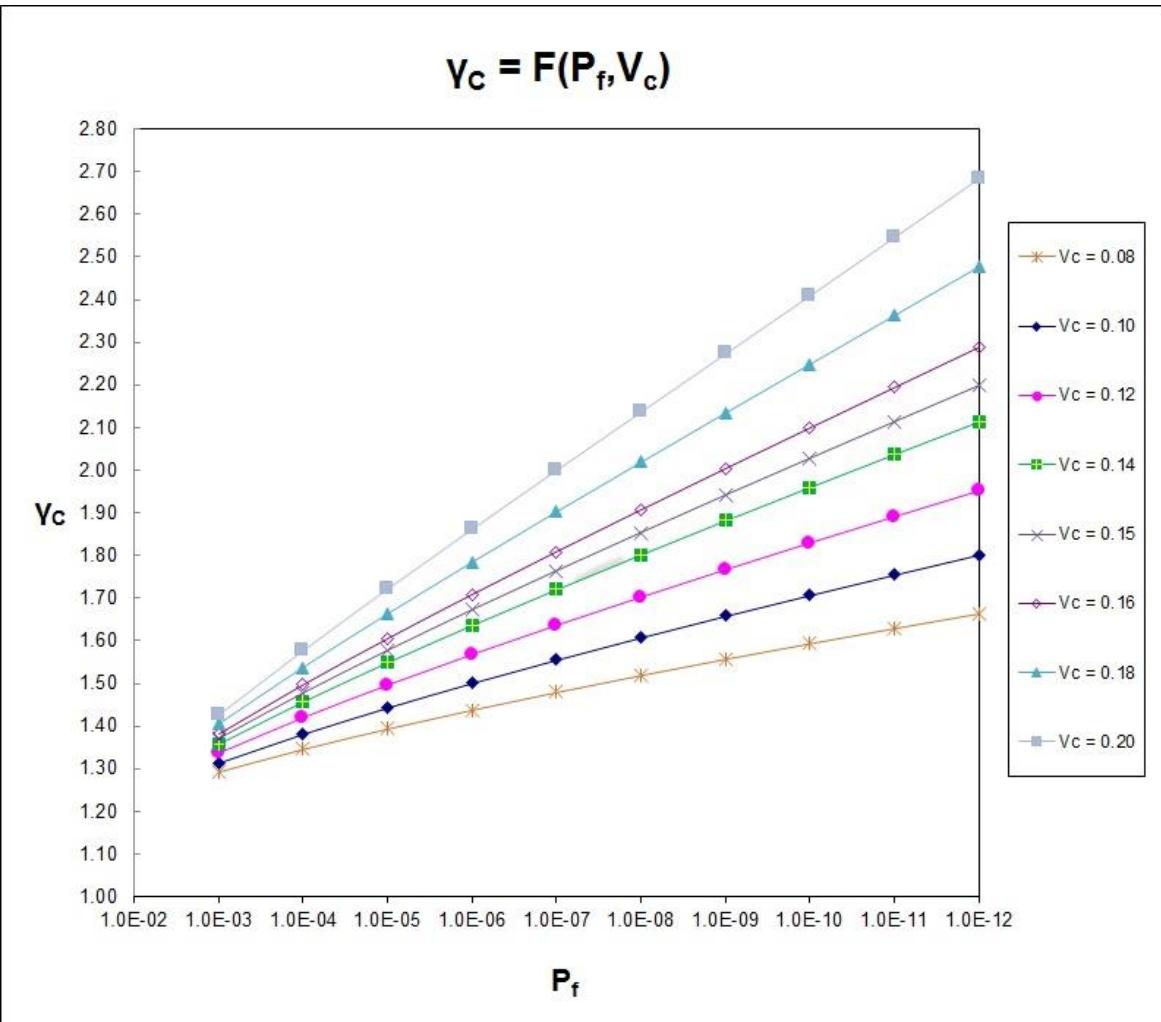


Figure 3. Evolution du coefficient partiel γ_c

On constate que la valeur usuelle de $\gamma_c = 1.5$ est retrouvée pour une probabilité de défaillance $P_f = 10^{-4}$ à 10^{-5} sur une durée de 50 ans et une variabilité de la résistance en compression du béton $V_c = 0.12$ à 0.16 .

Pour des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , il convient d'adapter en fonction de P_f la valeur du coefficient partiel du béton γ_c qui, comme le montre ce calcul, peut varier entre 1.5 et 2.68.

B. Evaluation du coefficient partiel (γ_s) lié à la résistance de l'acier

Le coefficient partiel lié à la résistance de l'acier pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 4 et la figure 4.

Les valeurs des constantes sont : $\gamma_{RD} = 1.05$; $1/\eta_S = 1.05$; $K_s = 1.645$; $\alpha_s = 0.8$.

$\gamma_s = \gamma_{Rd} \times 1/\eta_s \times \gamma_s^*$									
P_f (/50 ans)	β	V_s							
		0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.0E-03	3.09	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19
1.0E-04	3.72	1.13	1.15	1.16	1.18	1.19	1.21	1.23	1.24
1.0E-05	4.27	1.14	1.16	1.18	1.20	1.23	1.25	1.27	1.29
1.0E-06	4.75	1.15	1.18	1.20	1.23	1.25	1.28	1.31	1.34
1.0E-07	5.20	1.16	1.19	1.22	1.25	1.28	1.31	1.35	1.38
1.0E-08	5.61	1.17	1.20	1.24	1.27	1.31	1.35	1.38	1.42
1.0E-09	6.00	1.17	1.21	1.25	1.29	1.33	1.37	1.42	1.46
1.0E-10	6.36	1.18	1.22	1.27	1.31	1.36	1.40	1.45	1.50
1.0E-11	6.71	1.19	1.23	1.28	1.33	1.38	1.43	1.48	1.54
1.0E-12	7.03	1.19	1.24	1.29	1.35	1.40	1.46	1.52	1.58

Tableau 4 : Valeurs du coefficient partiel γ_s

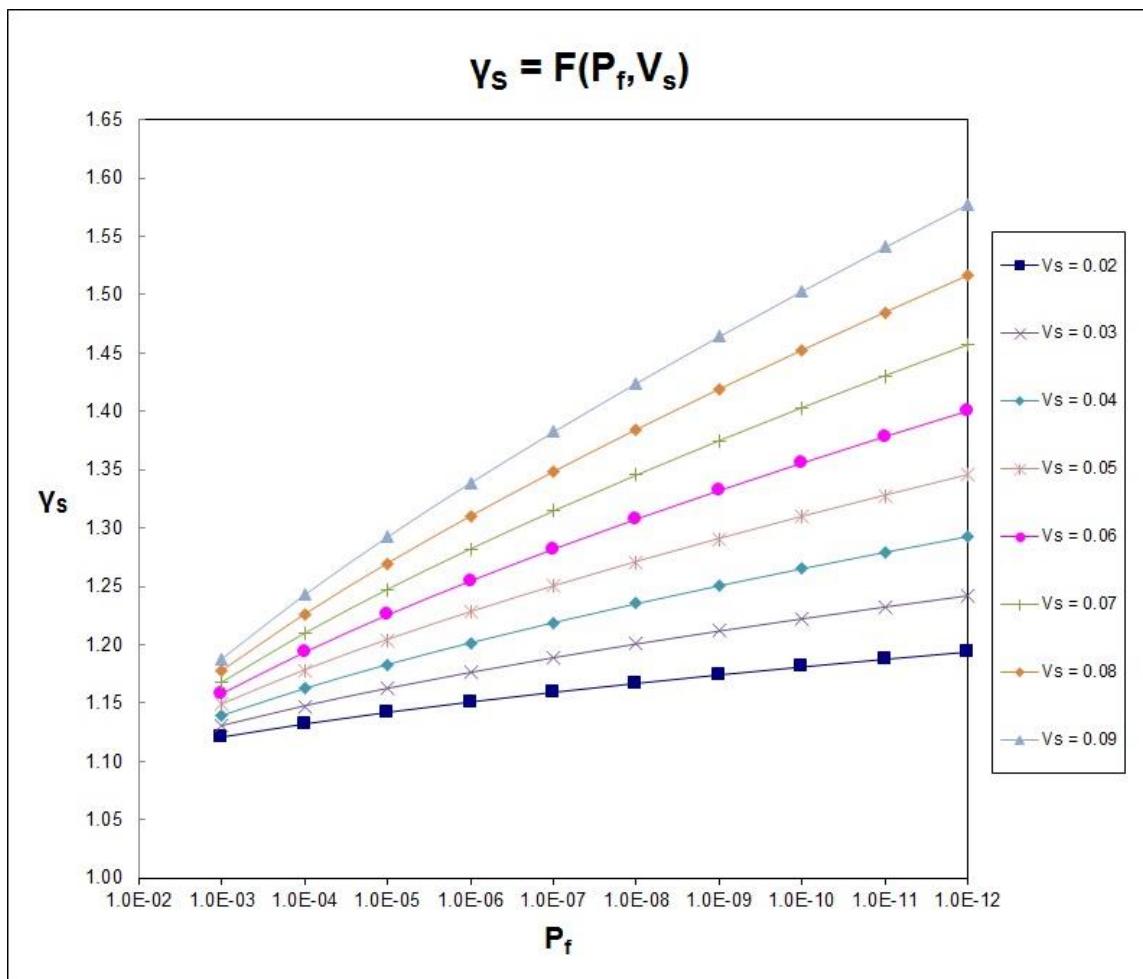


Figure 4. Evolution du coefficient partiel γ_s

On constate que la valeur usuelle de $\gamma_s = 1.15$ est retrouvée pour une probabilité de défaillance $P_f = 10^{-4}$ à 10^{-5} sur une durée de 50 ans et une variabilité de la résistance en traction de l'acier $V_s = 0.02$ à 0.03.

Pour des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (sur une durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , il convient d'adapter en fonction de P_f la valeur du coefficient partiel de l'acier γ_s qui, comme le montre ce calcul, peut varier entre 1.15 et 1.58.

2. Calcul des coefficients partiels sur les actions

Les coefficients partiels à appliquer aux actions peuvent être également évalués par des études paramétriques. Après la définition des coefficients partiels dans le chapitre 3, la détermination de leur valeur est étroitement liée au facteur γ , qui tient compte de la variabilité de l'action.

Les actions étudiées ici sont essentiellement les charges permanentes (G) et les charges variables (Q). Les paramètres concernés sont :

- μ : valeur moyenne de l'action ;
- F_k : valeur caractéristique de l'action ;
- σ : écart-type de distribution de l'action ;
- V : coefficient de variation de l'action ($V = \sigma/\mu$).

A. Evaluation du coefficient partiel (γ_G) : Charges permanentes

La distribution statistique des charges permanentes est supposée Normale, nous pouvons estimer la valeur de calcul G_d en utilisant la formule suivante (α a une valeur négative, voir le tableau 2) :

$$G_d = X_d = \mu - \alpha\beta\sigma \quad (11)$$

Selon l'Eurocode 0 [1], nous pouvons prendre pour la valeur caractéristique G_k la valeur moyenne. Le facteur γ sur les charges permanentes peut s'écrire :

$$\gamma_g = \frac{G_d}{G_k} = \frac{\mu_g - \alpha\beta\sigma_g}{\mu_g} = (1 - \alpha\beta V_g) \quad (12)$$

La variabilité des charges permanentes est en général relativement faible selon les informations explicitées dans le code modèle JCSS [13]. Dans les études paramétriques suivantes, nous considérons une fourchette de $V_g = 0.05$ à 0.10.

Le coefficient partiel des charges permanentes pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 5 et la figure 5.

Les valeurs des constantes sont : $\gamma_{sd} = 1.05$; $\alpha_g = -0.7$.

$\gamma_G = \gamma_{Sd} \times \gamma_g$						
P_f (/50 ans)	β	γ_g				
		0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.0E-03	3.09	1.16	1.19	1.21	1.23	1.25
1.0E-04	3.72	1.19	1.21	1.24	1.27	1.30
1.0E-05	4.27	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33
1.0E-06	4.75	1.22	1.26	1.29	1.33	1.36
1.0E-07	5.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.39
1.0E-08	5.61	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42
1.0E-09	6.00	1.27	1.31	1.36	1.40	1.45
1.0E-10	6.36	1.28	1.33	1.38	1.42	1.47
1.0E-11	6.71	1.30	1.35	1.40	1.44	1.49
1.0E-12	7.03	1.31	1.36	1.41	1.46	1.52

Tableau 5 : Valeurs du coefficient partiel γ_G

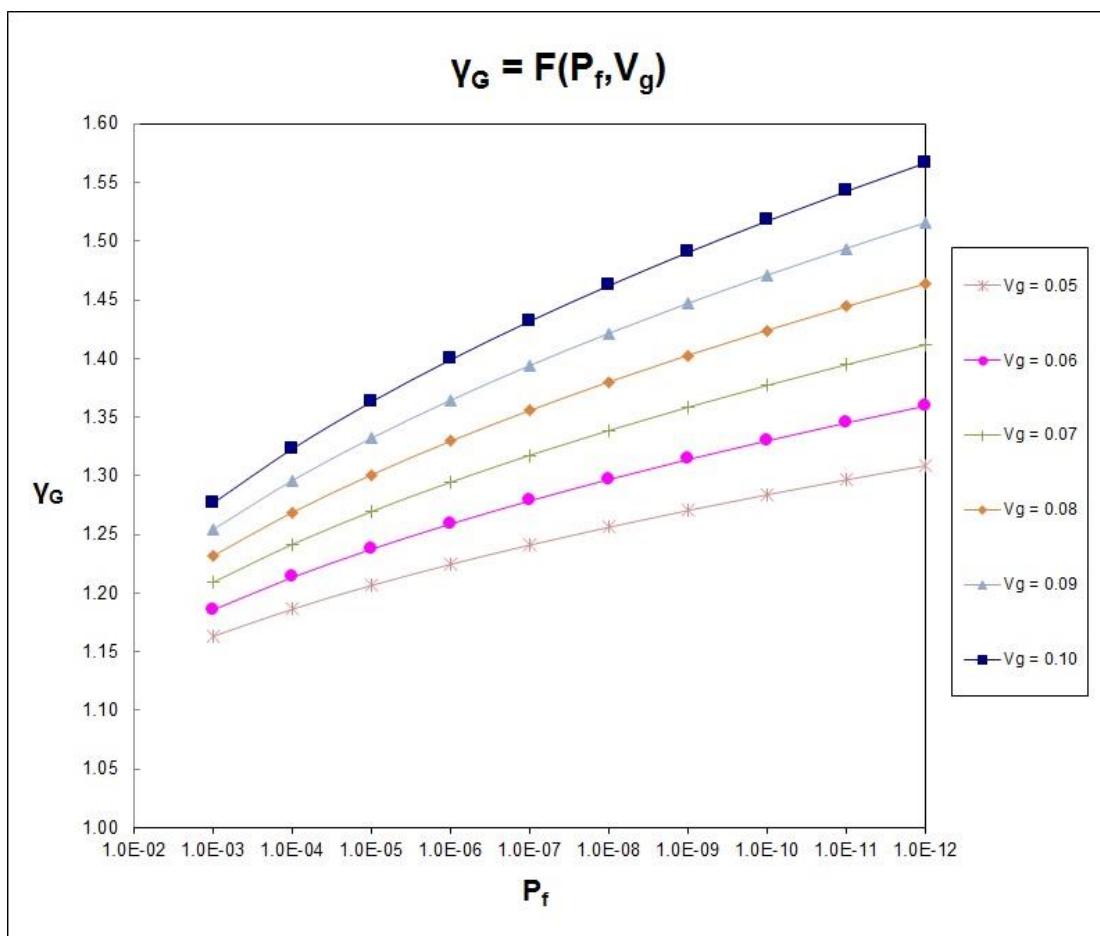


Figure 5. Evolution du coefficient partiel γ_G

On constate que la valeur usuelle de $\gamma_G = 1.35$ est retrouvée pour une probabilité de défaillance $P_f = 10^{-4}$ à 10^{-5} sur une durée de 50 ans et un coefficient de variation $V_g = 0.09$ à 0.10.

Pour des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (sur une durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , il convient d'adapter en fonction de P_f la valeur du coefficient partiel des charges permanentes γ_G qui, comme le montre ce calcul, peut varier entre 1.35 et 1.57.

B. Evaluation du coefficient partiel (γ_Q) : Charges variables

La distribution statistique des charges variables est supposée suivre une loi de Gumbel, nous pouvons alors estimer la valeur de calcul Q_d en utilisant la formule suivante (α a une valeur négative, voir le tableau 2) :

$$Q_d = X_d = \mu - \frac{0.577\sqrt{6}\sigma}{\pi} - \frac{\sqrt{6}\sigma}{\pi} \ln\{-\ln\phi(-\alpha\beta)\} \quad (13)$$

Le facteur γ sur les charges variables peut s'écrire :

$$\gamma_q = \frac{Q_d}{Q_k} = \frac{\mu_f - \frac{0.577\sqrt{6}\sigma_q}{\pi} - \frac{\sqrt{6}\sigma_q}{\pi} \ln\{-\ln\phi(-\alpha\beta)\}}{\mu_q - \frac{0.577\sqrt{6}\sigma_q}{\pi} - \frac{\sqrt{6}\sigma_q}{\pi} \ln\{-\ln(0.95)\}} = \frac{1 - \frac{0.577\sqrt{6}V_q}{\pi} - \frac{\sqrt{6}V_q}{\pi} \ln\{-\ln\phi(-\alpha\beta)\}}{1 - \frac{0.577\sqrt{6}V_q}{\pi} + 2.97 \frac{\sqrt{6}V_q}{\pi}} \quad (14)$$

Où un fractile de 5% sur une durée de référence de 50 ans est considéré.

Selon la nature des différents types de charges variables, leur variabilité peut être très importante. Par exemple, pour les charges d'exploitation sur les ponts, le coefficient de variation V_q est proche de 0.10 [3]. Par contre, pour les charges d'exploitation sur les planchers de bâtiment, le coefficient de variation V_q est plutôt proche de 0.40 [3]. Les informations dans le code modèle JCSS [13] confirment cette variabilité. Dans les études paramétriques qui suivent, nous considérons une fourchette de $V_q = 0.10$ à 0.60.

Le coefficient partiel des charges variables pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 6 et la figure 6.

Les valeurs des constantes sont : $\gamma_{sd} = 1.125$; $\alpha_q = -0.7$.

P_f (/50 ans)	β	$\gamma_Q = \gamma_{Sd} \times \gamma_q$					
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
1.0E-03	3.09	1.21	1.28	1.33	1.37	1.40	1.42
1.0E-04	3.72	1.30	1.43	1.53	1.61	1.67	1.72
1.0E-05	4.27	1.39	1.58	1.73	1.85	1.94	2.02
1.0E-06	4.75	1.48	1.73	1.93	2.08	2.21	2.31
1.0E-07	5.20	1.56	1.88	2.13	2.32	2.47	2.60
1.0E-08	5.61	1.65	2.03	2.32	2.55	2.73	2.89
1.0E-09	6.00	1.73	2.18	2.52	2.78	3.00	3.17
1.0E-10	6.36	1.82	2.33	2.71	3.01	3.26	3.46
1.0E-11	6.71	1.91	2.47	2.91	3.25	3.52	3.75
1.0E-12	7.03	1.99	2.62	3.10	3.48	3.78	4.03

Tableau 6 : Valeurs du coefficient partiel γ_Q

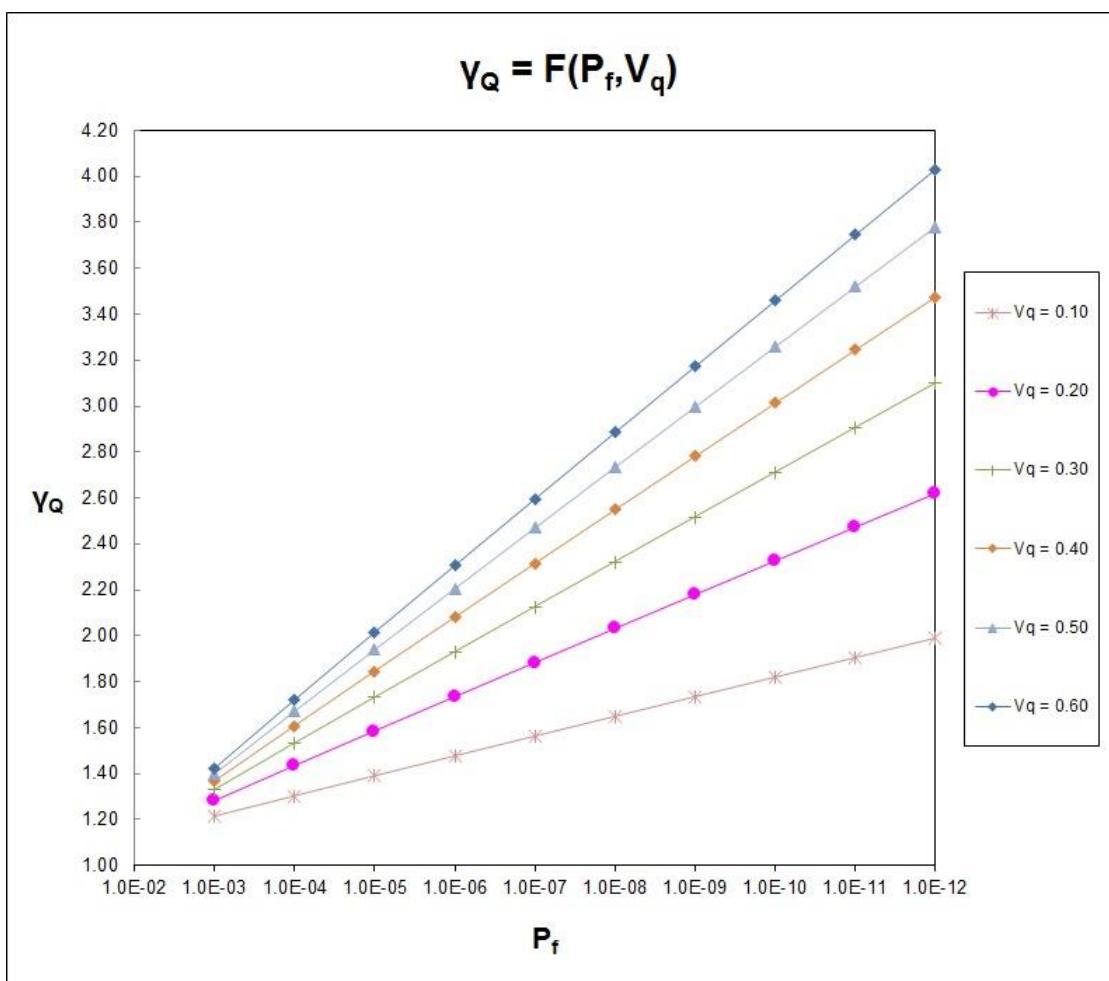


Figure 6. Evolution du coefficient partiel γ_Q

On constate que la valeur usuelle de $\gamma_Q = 1.5$ est retrouvée pour une probabilité de défaillance $P_f = 10^{-4}$ à 10^{-5} sur une durée de 50 ans et un coefficient de variation $V_Q = 0.20$ à 0.30.

Pour des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (sur une durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , il convient d'adapter en fonction de P_f la valeur du coefficient partiel des charges variables γ_Q qui, comme le montre ce calcul, peut varier entre 1.5 et 4.03.

3. Calcul des coefficients partiels sur l'incertitude de modèle

Selon le code modèle JCSS [13], l'incertitude de modèle est généralement une variable aléatoire prenant en compte les effets négligés dans les modèles et les simplifications dans les relations mathématiques, elle peut être liée au :

- modèle de résistance ;
- modèle pour l'effet des actions.

En prenant en compte l'incertitude de modèle, la fonction de l'état limite ultime est devenue : $g = \theta_R R - \theta_E E$, où θ_R et θ_E sont les variables qui modélisent respectivement les incertitudes liées au modèle de résistance et au modèle pour l'effet des actions.

L'incertitude de modèle est un sujet encore en cours de recherche, une meilleure description de l'incertitude de modèle peut être obtenue à l'aide des comparaisons entre les tests physiques et les résultats de modèles de calcul [5] [14]. Si nous adoptons la loi de distribution lognormale pour ces variables θ_R et θ_E , les coefficients partiels γ_{Rd} et γ_{Sd} correspondants peuvent être définis comme :

$$\gamma_{Rd} = \frac{\theta_{Rk}}{\theta_{Rd}} = \frac{\theta_{Rk}}{\mu_{\theta R} \exp(-\alpha_R \beta V_{\theta R})} \quad (15a)$$

$$\gamma_{Sd} = \frac{\theta_{Ek}}{\theta_{Ed}} = \frac{\mu_{\theta E} \exp(-\alpha_E \beta V_{\theta E})}{\theta_{Ek}} \quad (15b)$$

Dans les cas où la résistance et l'effet des actions sont fonction de plusieurs variables (θ_R , R , θ_E , E), nous appliquons les coefficients suivants aux variables non dominantes (θ_R , θ_E) [5] [14] : $\alpha_R = 0.4 \times 0.8 = 0.32$ et $\alpha_E = 0.4 \times (-0.7) = -0.28$.

De plus, d'une manière simplifiée, nous ne traitons que les cas sans biais dans les applications numériques suivantes, à savoir $\theta_{Rk} = 1$ et $\theta_{Ek} = 1$.

A. Evaluation du coefficient partiel (γ_{Rd}) lié à l'incertitude du modèle de résistance

Selon les valeurs des caractéristiques statistiques (μ : valeur moyenne et V : coefficient de variation) pour la résistance des matériaux et leur modèle fournies dans les références [4] [5] [13] [14], nous présentons l'évaluation du coefficient partiel γ_{Rd} dans les cas suivants :

- Cas 1 – résistance en compression du béton : $\mu_{\theta R} = 1.24$ et $V_{\theta R} = 0.18$;
- Cas 2 – résistance en traction de l'acier : $\mu_{\theta R} = 1.12$ et $V_{\theta R} = 0.053$;
- Cas 3 – modèle de résistance en compression : $\mu_{\theta R} = 1.00$ et $V_{\theta R} = 0.05$;

- Cas 4 – modèle de résistance à la flexion : $\mu_{\theta R} = 1.10$ et $V_{\theta R} = 0.10$;
- Cas 5 – modèle de résistance au cisaillement sans armature d'effort tranchant : $\mu_{\theta R} = 1.00$ et $V_{\theta R} = 0.15$;
- Cas 6 – modèle de résistance au cisaillement avec armature d'effort tranchant ($\rho_w f_{yw} \leq 1$ MPa) : $\mu_{\theta R} = 1.80$ et $V_{\theta R} = 0.25$.

Le coefficient partiel γ_{Rd} lié au modèle de résistance pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 7 et la figure 7.

P_f (/50 ans)	β	γ_{Rd}											
		Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
		$\mu_{\theta R}$	$V_{\theta R}$										
		1.24	0.18	1.12	0.053	1.00	0.05	1.10	0.10	1.00	0.15	1.80	0.25
1.0E-03	3.09	0.96		0.94		1.05		1.00		1.16		0.71	
1.0E-04	3.72	1.00		0.95		1.06		1.02		1.20		0.75	
1.0E-05	4.27	1.03		0.96		1.07		1.04		1.23		0.78	
1.0E-06	4.75	1.06		0.97		1.08		1.06		1.26		0.81	
1.0E-07	5.20	1.09		0.98		1.09		1.07		1.28		0.84	
1.0E-08	5.61	1.11		0.98		1.09		1.09		1.31		0.87	
1.0E-09	6.00	1.14		0.99		1.10		1.10		1.33		0.90	
1.0E-10	6.36	1.16		0.99		1.11		1.11		1.36		0.92	
1.0E-11	6.71	1.19		1.00		1.11		1.13		1.38		0.95	
1.0E-12	7.03	1.21		1.01		1.12		1.14		1.40		0.98	

Tableau 7 : Valeurs du coefficient partiel γ_{Rd}

Méthode

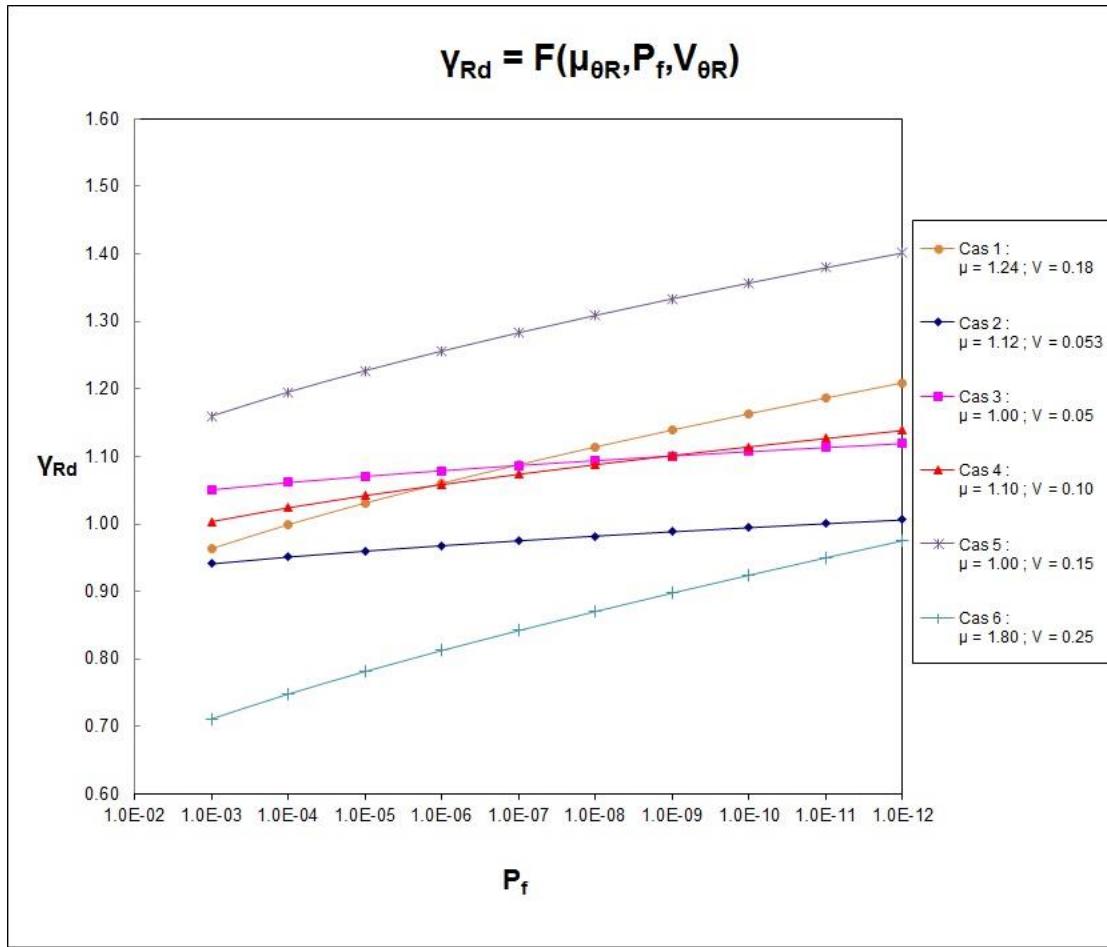


Figure 7. Evolution du coefficient partiel γ_{Rd}

On constate que la valeur $\gamma_{Rd}=1.10$ pour le béton permet de couvrir les cas usuels ($P_f < 10^{-7}$) et la valeur $\gamma_{Rd}=1.05$ pour l'acier permet de couvrir les cas usuels et exceptionnels ($P_f < 10^{-12}$) sur une durée de 50 ans.

Pour le modèle de résistance, la valeur du coefficient partiel γ_{Rd} peut varier entre 0.84 et 1.40 dans des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (sur une durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , une modélisation plus fine pourrait être une piste d'amélioration.

B. Evaluation du coefficient partiel (γ_{Sd}) lié à l'incertitude du modèle pour l'effet des actions

Selon les valeurs des caractéristiques statistiques (μ : valeur moyenne et V : coefficient de variation) pour les actions et de leur effet fournies dans les références [4] [5] [13] [14], nous présentons l'évaluation du coefficient partiel γ_{Sd} dans les cas suivants :

- Cas 1 – charges permanentes, efforts axiaux dans les portiques : $\mu_{\theta R} = 1.00$ et $V_{\theta R} = 0.05$;
- Cas 2 – charges variables, moments et efforts tranchants dans les portiques et efforts dans les plaques : $\mu_{\theta R} = 1.00$ et $V_{\theta R} = 0.10$;
- Cas 3 – moments dans les plaques : $\mu_{\theta R} = 1.00$ et $V_{\theta R} = 0.20$.

Le coefficient partiel γ_{Sd} lié au modèle pour l'effet des actions pour les différentes valeurs de P_f est évalué dans le tableau 8 et la figure 8.

P_f (/50 ans)	β	γ_{Sd}					
		Cas 1		Cas 2		Cas 3	
		$\mu_{\theta E}$	$V_{\theta E}$	$\mu_{\theta E}$	$V_{\theta E}$	$\mu_{\theta E}$	$V_{\theta E}$
		1.00	0.05	1.00	0.10	1.00	0.20
1.0E-03	3.09	1.04		1.09		1.19	
1.0E-04	3.72	1.05		1.11		1.23	
1.0E-05	4.27	1.06		1.13		1.27	
1.0E-06	4.75	1.07		1.14		1.30	
1.0E-07	5.20	1.08		1.16		1.34	
1.0E-08	5.61	1.08		1.17		1.37	
1.0E-09	6.00	1.09		1.18		1.40	
1.0E-10	6.36	1.09		1.19		1.43	
1.0E-11	6.71	1.10		1.21		1.46	
1.0E-12	7.03	1.10		1.22		1.48	

Tableau 8 : Valeurs du coefficient partiel γ_{Sd}

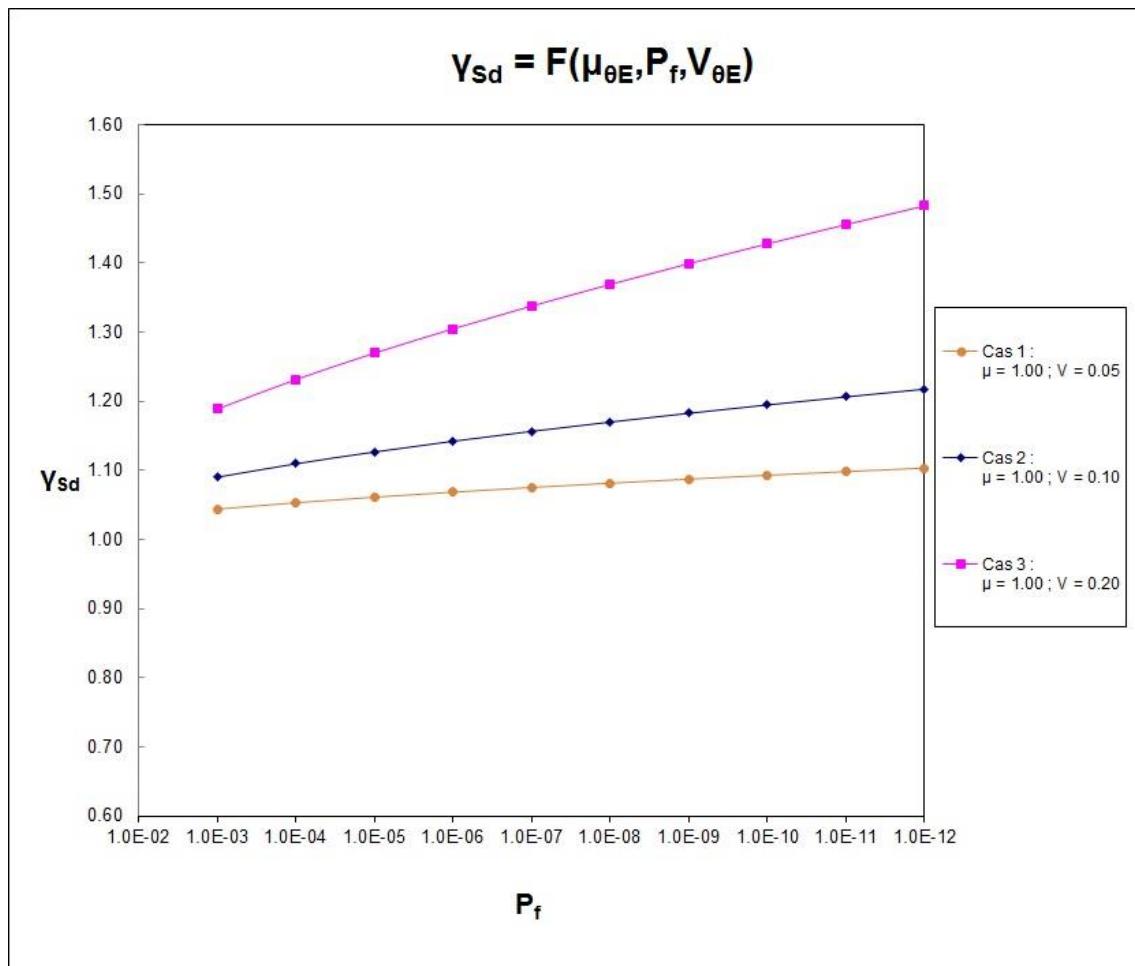


Figure 8. Evolution du coefficient partiel γ_{Sd}

On constate que les valeurs $\gamma_{Sd}=1.05$ pour les charges permanentes et $\gamma_{Sd}=1.125$ pour les charges variables permettent de couvrir les cas usuels ($P_f < 10^{-5}$) sur une durée de 50 ans.

Pour le modèle de l'effet des actions, la valeur du coefficient partiel γ_{Sd} peut varier entre 1.16 et 1.48 dans des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance P_f (sur une durée de 50 ans) de 10^{-7} à 10^{-12} , une modélisation plus fine pourrait être une piste d'amélioration.

VI. DISCUSSION

Les chapitres III, IV et V du présent article montrent comment évaluer les valeurs des coefficients partiels de sécurité selon la méthode FORM, lorsque l'on souhaite un niveau de fiabilité supérieur à celui prévu par l'Eurocode.

Néanmoins, le choix des coefficients partiels majorés n'est qu'une mesure parmi celles présentées dans le chapitre 2 pour atteindre le niveau de fiabilité exigé. En complément de ces calculs, et pour éventuellement limiter le surdimensionnement matériel auquel conduit cette méthode simplifiée, si les valeurs numériques caractérisant les dispersions et incertitudes ne sont pas réajustées, il conviendrait également :

- D'assurer davantage la qualité des matériaux mis en place, ce qui revient à réduire le coefficient de variation de la résistance de ces matériaux γ^* ;
- De contrôler rigoureusement les travaux d'exécution, ce qui conduit à améliorer la résistance effective dans l'ouvrage et se traduit par une valeur plus favorable et moins dispersée des facteurs η_C et η_S ;
- De contrôler régulièrement les conditions d'entretien et d'usage de la construction, ce qui permet de limiter l'incertitude sur les actions d'exploitation ;
- De modéliser plus finement le comportement des matériaux et leur modèle de résistance, les actions et leur modèle de l'effet afin de réduire les incertitudes liées aux modèles de calcul (réduction de γ_{Rd} et γ_{Sd}). L'impact de cette piste d'amélioration sera plus ou moins prometteur, en termes de gain sur les autres coefficients partiels, suivant le caractère plus ou moins finement connu et modélisé des situations de calcul dimensionnantes.

De plus, lorsque la probabilité de défaillance devient très petite, l'hypothèse de la méthode FORM peut générer des erreurs plus importantes pour les cas de distributions non normales.

En outre, cette méthode simplifiée est applicable aux constructions neuves, pas aux ouvrages existants endommagés car la valeur probable et l'écart type de la résistance d'un matériau endommagé sont très difficiles à évaluer.

Dans ces cas, l'approche déterministe, postulant un évènement conventionnel de calcul largement majorant, pourrait aussi être une alternative et un complément de l'approche semi-probabiliste.

VII. CONCLUSION

Les Eurocodes ont mis en pratique la théorie de la fiabilité pour calibrer l'approche semi-probabiliste couramment employée. Dans cet article, nous avons présenté une méthode fiabiliste simplifiée pour l'ajustement des coefficients partiels de sécurité à l'état limite ultime en fonction de la fiabilité spécifiée pour un ouvrage neuf à concevoir, lorsque la fiabilité exigée est supérieure à celle prévue dans l'Eurocode (classe de fiabilité supérieure à RC3 avec une probabilité de défaillance P_f inférieure à 10^{-7} / 50 ans). Cette méthode a effectivement pu être appliquée dans un cas pratique de conception, elle n'est en revanche pas adaptée à l'évaluation de la fiabilité d'un ouvrage existant.

En appliquant cette méthode simplifiée de niveau II, les valeurs usuelles des coefficients partiels ont été retrouvées pour les matériaux (béton et acier) et les actions (permanentes et variables) avec une probabilité de défaillance de 10^{-4} à 10^{-5} sur une durée de 50 ans. De plus, de nouvelles valeurs pour ces coefficients partiels ont été calculées dans des situations plus contraignantes avec une probabilité de défaillance de 10^{-7} à 10^{-12} sur une durée de 50 ans. Ces situations sont souvent appliquées aux ouvrages « sensibles » avec de forts enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Les nouvelles valeurs des coefficients partiels ont été évaluées en tenant compte des incertitudes des modèles, de la conversion des résultats et de la variabilité de la résistance des matériaux et de l'effet des actions. Néanmoins, compte tenu de certaines hypothèses simplificatrices retenues dans l'article, ces nouvelles valeurs restent données à titre informatif. Il convient de définir les valeurs appropriées dans chaque projet particulier. On note que la révision en cours de l'Eurocode 0 [15] prévoit explicitement de détailler des valeurs pour des niveaux de fiabilité plus exigeants que les classes RC1, RC2 et RC3 actuelles.

Les coefficients partiels adaptés issus de la méthodologie présentée, accompagnés si possible d'autres mesures pragmatiques (meilleur contrôle de la qualité des matériaux et de l'exécution, prise en considération d'un suivi et d'un entretien renforcés de l'ouvrage, et précision améliorée de la modélisation), permettent d'assurer la fiabilité spécifiée de l'ouvrage tout en limitant le surdimensionnement.

REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier le Professeur Jean-Armand CALGARO, ancien président du comité de normalisation européenne en charge des Eurocodes (TC 250), pour sa relecture critique de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NF EN 1990 Eurocode 0 (2003). Bases de calcul des structures.
- [2] ISO 2394 (2015). General principles on reliability for structures.
- [3] Calgaro J.-A. (2016). Eléments de fiabilité des constructions – Introduction aux Eurocodes. Editions Le Moniteur, Paris, France.
- [4] Caspee R., Sykora M., Allaix D.L. and Steenbergen R. (2013). The design value method and adjusted partial factor approach for existing structures. Structural Engineering International, 4/2013, 386-393.
- [5] Partial factor methods for existing concrete structures (2016). Bulletin 80 CEB-FIB.
- [6] H. Mathieu (Décembre 1979/Janvier 1980). Manuel “Sécurité des structures – 1e partie”. Bulletin d’Information CEB N°127.
- [7] H. Mathieu (Décembre 1979/Janvier 1980). Manuel “Sécurité des structures – 2e partie”. Bulletin d’Information CEB N°128.
- [8] Model Code 2010 (2012). Final draft – Volume 1. Bulletin 65 CEB-FIB.
- [9] Model Code 2010 (2012) Final draft – Volume 2. Bulletin 66 CEB-FIB.
- [10] Lemaire M. (2005). Fiabilité des structures – couplage mécano-fiablestatique. Hermès Science Publications, LAVOISIER 2005.
- [11] Konig G. and Hosser D. (1982). The simplified level II method and its application on the derivation of safety elements for level I. Bulletin d’Information CEB N°147.
- [12] Ostlund L. (1991). Reliability of concrete structures – An estimation of gamma-Values: an application of a probabilistic method. Bulletin d’Information CEB N°202.
- [13] Joint Committee on Structural Safety (2001). JCSS Probabilistic Model Code 2001.
- [14] Holicky M., Sykora M., Barnardo-Viljoen C., Mensah K.K., Retief J.V. (2013). Model uncertainties in reliability analysis of reinforced concrete structures. Proceeding of the 5th International Conference on Structural Engineering Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa.

[15] CEN TC 250/SC10 (2017). WG7.T1 document N070K, EN 1990 Eurocode. Basis of structural design, second edition, 2nd draft (version de travail en vue de la 1^{ère} révision de l'Eurocode 0, 30 avril 2017).

Expertise des VIPP : experimentation d'une poutre du VIPP de Clerval

1. Contexte

Les Viaducs à travées Indépendantes en Poutres Précontraintes par post-tension (VIPP) ont été construits en nombre important en France en particulier avant 1970. Le Réseau routier National (RRN) comprend 217 ouvrages dont 20% sont en mauvais état (note 3 ou 3U selon l'IQOA). Les ouvrages dits « de première génération » ont été conçus dans l'idée d'une précontrainte totale, durable en raison de la parfaite étanchéité du béton comprimé. Dans la réalité, un certain nombre de ces anciens VIPP souffrent de la corrosion des câbles de précontrainte. Certains ouvrages sont ainsi très vulnérables à la corrosion de la précontrainte notamment en raison de leur déficit en aciers passifs et de la possibilité de ruptures fragiles notamment vis-à-vis de l'effort tranchant.

Les gestionnaires de tels ouvrages sont en attente de diagnostics fiables pour évaluer la précontrainte résiduelle et son évolution dans le temps qui gouverne fortement la capacité portante de l'ouvrage. Une analyse des risques a déjà été menée sur l'ensemble des VIPP du RRN pour évaluer les risques liés à la corrosion de leurs câbles de précontrainte.

2. Etudes conduites sur une poutre du VIPP de Clerval

Le VIPP de Clerval a été construit entre 1952 et 1954. Souffrant de défauts d'étanchéité et d'injection ayant généré la corrosion de câbles de précontrainte et l'affaiblissement de la capacité portante de l'ouvrage, celui-ci a été démolie et reconstruit en 2002. Le laboratoire d'Autun a alors récupéré la poutre de rive amont de la travée Rive Droite (longueur de 30 m et hauteur de 1,30 m), poutre endommagée puisque présentant avant la démolition de l'ouvrage deux fissures de flexion d'ouverture maximale de 0,2 mm.

Un projet d'expérimentation a été monté par le Cerema Centre-Est, dans le cadre d'une collaboration Cerema - Ifsttar - ASFA et l'Ifsttar, avec pour objectifs :

- l'amélioration des techniques et matériels d'auscultation, des méthodes d'interprétation, des outils de modélisation et de calcul des VIPP essentielle pour mener à bien une ré-évaluation pertinente de leurs performances,
- la meilleure connaissance du fonctionnement mécanique des structures en béton précontraint pré-endommagées renforcées par matériaux composites collés.

Le projet a prévu, dans sa première partie, de solliciter la poutre en flexion trois points en alternant des phases de renforcement par matériaux composites collés et des phases d'essais de chargement.

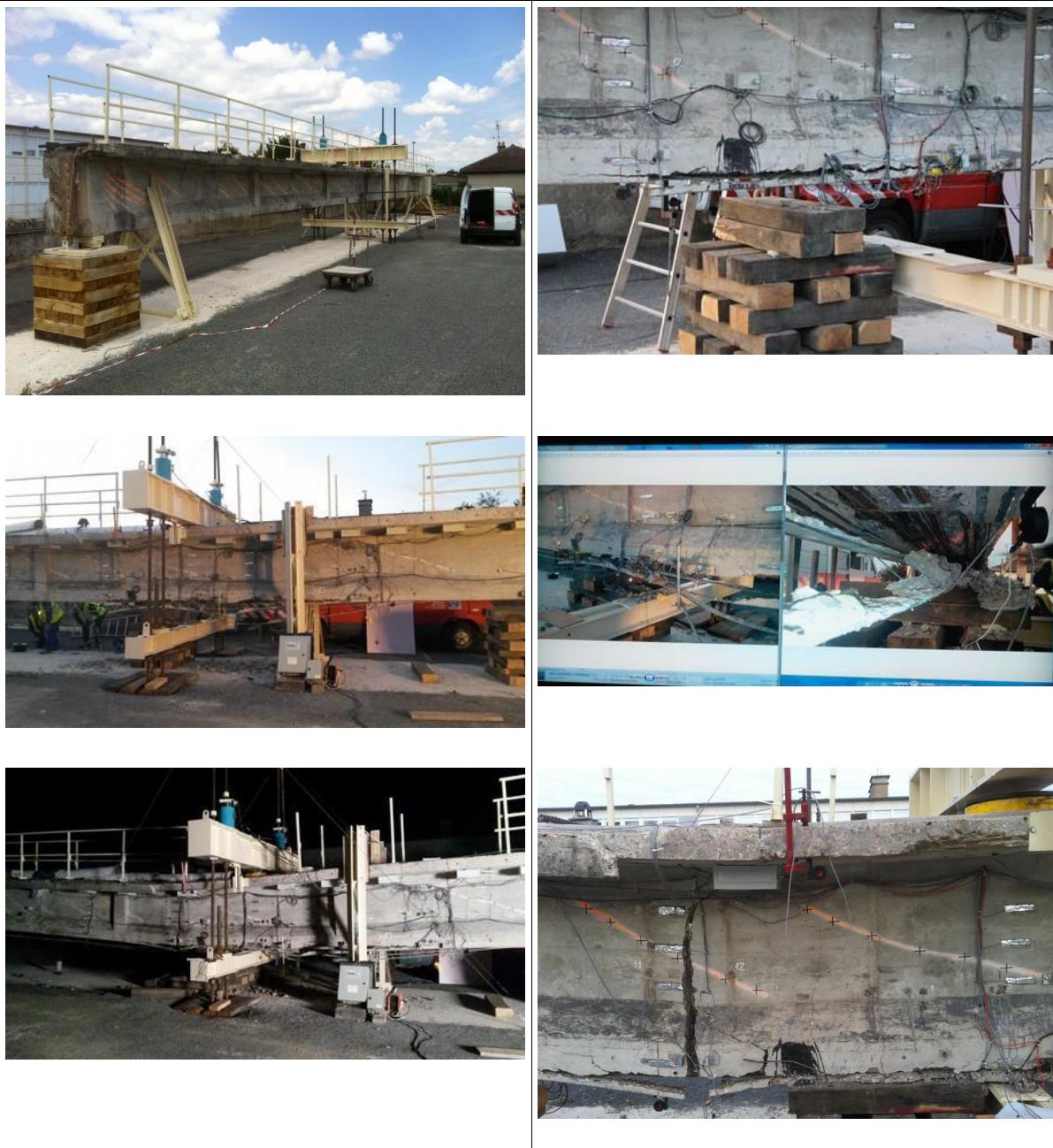
Un tronçon de la poutre a ensuite été sollicité à l'effort tranchant au niveau la zone d'about après renforcement par matériaux composites collés.

Les principaux bénéfices attendus au terme de l'expérimentation sont ainsi :

- une aide aux Maîtres d'Ouvrage pour la gestion du risque « VIPP » : amélioration des méthodologies de surveillance et d'auscultation, d'évaluation structurale des VIPP,

- des résultats validés sur l'efficacité des renforcements composites collés notamment pour les ouvrages « critiques », qui nécessitent des renforcements « d'urgence » dans l'attente des conclusions d'une étude de diagnostic approfondie,
- des règles de justification adaptées notamment vis-à-vis du contrôle de la fissuration.

3. Enseignements sur la résistance en flexion



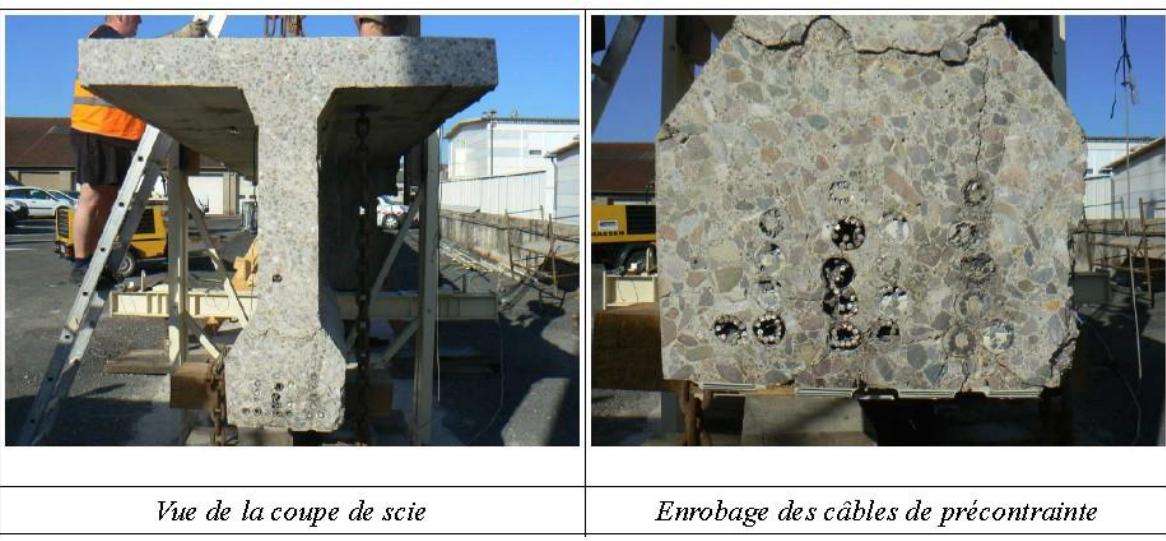
Les Brèves du CTOA



Les essais de chargement à rupture de la poutre de Clerval ont confirmé la **difficulté d'évaluer finement la sécurité structurale d'une poutre de VIPP fortement endommagée par la corrosion des câbles de précontrainte.**

Malgré de nombreuses auscultations réalisées (gammagraphie, radar, fenêtres, mesures à l'arbalète...), il s'est ainsi avéré impossible de définir l'endommagement réel de la précontrainte ainsi que les vraies conditions de ré-ancre des fils rompus.

Note : confirmation du **caractère insuffisant des inspections visuelles pour ce type de ponts.**



Les **mesures à l'arbalète** ont montré une importante perte de tension des fils de précontrainte évaluée entre 47 et 56 % par rapport à leur mise en tension, avec une dispersion importante.

Dans le cadre de l'autopsie a posteriori des câbles de précontrainte de la poutre de Clerval, on a pu mettre en évidence :

- la qualité globalement mauvaise de l'injection (23 % du linéaire avec absence de coulis), avec des défauts inégalement répartis (5 câbles avec absence de coulis sur plus de 50 % de leurs linéaires) ; on observe l'absence de coulis même dans certaines parties basses du tracé des câbles en talon de poutre) ;
- une bonne protection contre la corrosion des fils en présence de coulis (même avec un remplissage partiel) ;

- la présence de cratères de dissolution (sans corrosion avancée sauf rares cas) sur les fils de précontrainte dans les zones de rupture des essais de traction (ce sont donc des points préférentiels d'initialisation), entraînant un abaissement de la force et surtout de l'allongement à rupture :

$Rm \text{ moy (12 essais)} = 1361 \text{ MPa} \text{ (valeurs comprises entre 1200 et 1428 MPa)}$

$Agt \text{ moy (12 essai)} = 2,4 \% \text{ (valeurs comprises entre 0,6 et 3,7\%) ;}$

- que de ce fait, la prise en compte dans les calculs des caractéristiques de résistance des armatures de précontrainte issues de la note de calcul initiale peut s'avérer trop optimiste (dans le cas d'espèce : $Rm = 1500 \text{ MPa}$) ;
- la présence de quelques ruptures de fils et d'une corrosion avancée des fils à proximité -aval- de certains ancrages relevés ;
- l'incidence directe de la qualité de l'injection sur la longueur de réancrage des extrémités de fils rompus, avec en outre une dispersion importante en cas de présence de coulis...

Difficulté des calculs prédictifs pour des comportements post-élastiques (rupture) :

Les « prévisions de rupture », malgré l'utilisation de codes de calculs sophistiqués (Éléments Finis avec *lois d'endommagement du béton*) et la prise en compte des défauts connus, se sont révélées optimistes (*747 KN sans coefficient de sécurité pour une charge maximale atteinte de 614 KN (déficit de sécurité)*).

L'étude a cependant mis en évidence plusieurs points « rassurants »:

- il aura fallu imposer une flèche de 20 cm pour atteindre la capacité maximale en flexion de la poutre en béton précontraint ;
- les instrumentations mises en œuvre sur la poutre (sections de jauge de déformation, fibres optiques, suivi des flèches, courburemétrie, inclinomètres sur appuis, capteurs de déplacement au droit des fissures, émission et surveillance acoustique...) se complètent et se recoupent et ont mis en évidence une modification du comportement global de la poutre pour une charge d'environ 450 KN ;
- les renforts composites (4 paquets de 3 lamelles superposées collés sous le talon) ont augmenté la résistance à la rupture en flexion de la poutre de béton précontraint endommagée (apport des composites, dont le dimensionnement et la conception n'avaient pourtant pas été optimisés, estimé à +20%), et permis d'obtenir une meilleure répartition et une limitation locale de l'ouverture des fissures (amélioration de la durabilité, limitation des surtensions dans les câbles de précontrainte) et un mode de rupture (par délamination du béton d'enrobage des conduits de précontrainte) plus ductile.

Les Brèves du CTOA

4. Enseignements sur la résistance à l'effort tranchant



Contrairement aux idées reçues, le mode de rupture sous sollicitations de tranchant a été **ductile**. En effet, après le pic d'effort (1970 KN), des capacités portantes significatives ont été conservées (1770 KN après rupture des lamelles collées sous talon et 580 KN après rupture de la première bande de tissu verticale) avec des déformées importantes (respectivement 31 mm et 48 mm).

L'apport des matériaux composites est aussi à souligner. Les renforts sous le talon des poutres, qui permettent de mieux répartir les fissures et de limiter localement leurs ouvertures, ont augmenté la capacité portante d'environ 10 %. **Les renforts sur l'âme ont une grande importance**. Ces bandes de renforcement d'âme ne sont mobilisées qu'en fonctionnement dégradé de la poutre (ELU). **Elles apportent de la ductilité dans le comportement à rupture et contribuent donc grandement à améliorer la sécurité de l'ouvrage en conservant une capacité portante résiduelle significative.**

Les instrumentations mises en œuvre sur la poutre (sections de jauge de déformation, fibres optiques, suivi des flèches, inclinomètres sur appuis, capteurs de déplacement au droit des fissures, émission et surveillance acoustique...) ont mis en évidence une modification du comportement global du tronçon de poutre (perte de linéarité) pour une charge de 1200 à 1300 KN.

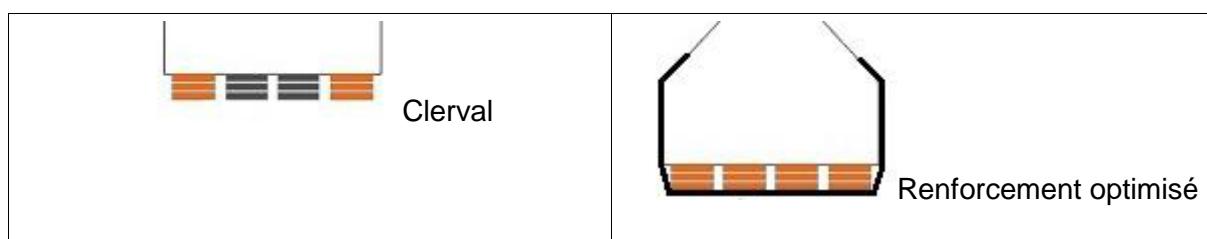
5. Dispositions constructives

Rappel : il est indispensable et capital de disposer :

- d'un béton de très bonne qualité pour envisager un renforcement par matériaux composites collés (*dans le cas d'espèce cohésion superficielle de surface > 5 MPa, résistance à la traction par fendage $R_{tm} = 4,5 \text{ MPa}$*),
- d'une pose des renforts composites collés respectant les règles de l'art (*entreprises qualifiées, procédés connus, procédure d'exécution, épreuve de convenance, épreuves de contrôle...*).

Les expérimentations ont mis en valeur l'importance des dispositions constructives :

- a) L'efficacité des renforts composites collés sur la limitation de l'ouverture des fissures est très locale ; il faut donc **répartir les renforts sur toutes les zones où l'on souhaite limiter l'ouverture des fissures**.
- b) Rupture en flexion par **délaminaison du béton d'enrobage des conduits de précontrainte** : il faut donc **prévoir des armatures de couture de ce plan privilégié de rupture** (tissus collés transversaux, remontant sur les flancs des talons de poutre)



- c) Il est primordial de **limiter au maximum les rabattements de lamelles composites** (idem pour les tissus) et, dans le cas où ils sont inévitables, **de placer les jonctions dans des zones faiblement sollicitées** de manière à réduire le risque de faiblesse locale que ces jonctions peuvent occasionner (elles constituent un point faible des

Les Brèves du CTOA

renforcements composites collés malgré le respect des dispositions recommandées pour les procédés de renforcement).

- d) Rupture au tranchant : il a été mis en évidence le **caractère potentiellement vulnérable de la zone de transition entre la zone de poutre sur appui (épaisseur d'âme maximale) et la zone de poutre en section courante (épaisseur d'âme minimale)**, en raison de la présence des câbles de précontrainte relevés (épaisseur de béton réduite) et des efforts de traction dans le talon de poutre (cumul flexion + effort tranchant) (**justification spécifique à mener**) ; dans le cas d'espèce, ont été démontrées l'**utilité des renforcements** :
 - ⇒ **par lamelles collées sous talon pour renforcer le tirant** (du treillis de Mörsch) ;
 - ⇒ **par bandes de tissu collé verticales (étriers), pour renforcer les tirants verticaux** (couture des fissures entre bielles de compression) **et apporter de la ductilité.**
- e) **Ancrages des tissus dans les zones concaves** : la mise en œuvre d'ancrages mécaniques dans les zones concaves du support béton, propices à la génération d'efforts de poussée au vide perpendiculaires au plan de collage des renforts composites est nécessaire. **L'utilisation de micro-mèches est pertinente** en cas de présence de nombreux conduits de précontrainte intérieure au béton, à faibles profondeurs. Cependant, pour reprendre un effort de poussée au vide donné, il faut un nombre significativement plus important de micro-mèches que de mèches.



6. Perspectives

Le CEREMA va publier en 2019 un guide sur la réparation des VIPP qui bénéficiera des apports de cette expérimentation grandeur nature.

Les enseignements permettront un meilleur suivi par instrumentation des ouvrages, une meilleure compréhension des modèles de calcul et la mise en œuvre de bonnes dispositions constructives pour la mise en œuvre de renforts composites collés (début de rédaction en 2018 de la norme NF P95-105 sur les renforcements par matériaux composites collés). Ils contribueront également à la mise au point de l'Eurocode dédié aux ouvrages existants.

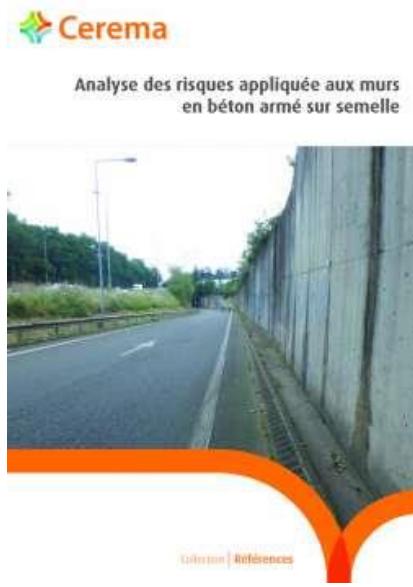
Christophe Aubagnac

Le Kiosque du CTOA

Les dernières publications Ouvrages d'Art

Toutes les publications présentées sont disponibles à la vente au bureau des ventes du CEREMA ITM : <http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/>

Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle.



À la demande de la DGITM/DIT (Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer/Direction des Infrastructures de Transport), le réseau scientifique et technique du ministère a mis au point une méthodologie d'analyse des risques spécialement adaptée à ce type d'ouvrage.

Cette méthode permet à un maître d'ouvrage d'analyser et de classer l'ensemble des murs de soutènement en béton armé sur semelle en fonction des aléas auxquels ils sont soumis, de leur vulnérabilité et des conséquences de leur défaillance potentielle.

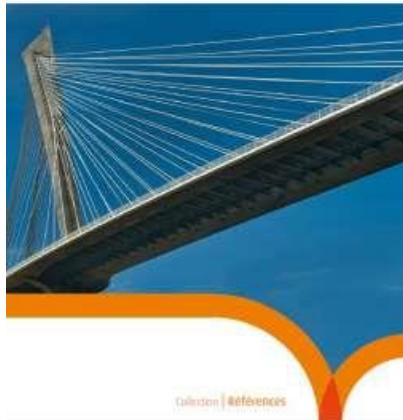
L'objectif est aussi d'aboutir aux meilleurs arbitrages techniques et financiers compte tenu des enjeux socio-économiques et humains.

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/analyse-risques-appliquee-aux-murs-beton-arme-semelle>

Conception des ponts à haubans - Un savoir faire français



Conception des ponts à haubans
Un savoir faire français



Le présent guide traite de la conception des ponts à haubans et de l'optimisation de la structure. En tant qu'élément marquant du paysage, la conception d'un pont à haubans doit être précédée d'une réflexion architecturale, mais par sa technicité, elle doit aussi reposer sur une analyse fine de son fonctionnement mécanique. Pour les grandes portées, le comportement aérodynamique du tablier devient très important et impose souvent la section transversale. A vide, les flexions sont minimisées et il devient donc impératif de respecter les équilibres statiques en particulier pour la conception du pylône.

Le présent document tente d'apporter des éléments de réponse à chacun de ces enjeux. Pour cela, il est divisé en 4 parties.

La première est un rappel de solutions possibles pour la conception de ces ouvrages. La seconde partie aborde les problèmes de dynamique, essentiels pour ce type de structures légères. La troisième partie concerne le réglage de la tension des haubans et la réalisation du tablier conformément à la géométrie souhaitée. Enfin, la quatrième partie aborde l'optimisation de la structure et sa mise en oeuvre au niveau des calculs informatiques, en apportant des conseils pour la préparation du marché d'un pont à haubans.

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/conception-ponts-haubans-savoir-faire-francais>

© 2018 - Cerema

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Égalité des territoires et du Logement. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durables, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Mise en page › Cerema ITM

Crédit photo de la couverture › © Cerema

Crédits photos › © IFSTTAR - © Cerema - © Spie Batignolles Génie Civil - @

ISBN : 978-2-37180-300-8

Pour toute correspondance › Redaction-BOA.CTAO.DTeclTM@cerema.fr

www.cerema.fr › Rubrique « Nos éditions »

Bulletin du Centre des Techniques d’Ouvrages d’Art

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

Aménagement et développement des territoires, égalité des territoires – Villes et stratégies urbaines – Transition énergétique et changement climatique - Gestion des ressources naturelles et respect de l'environnement - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Gestion, optimisation, modernisation et conception des infrastructures - Habitat et bâtiment