

Projet de renforcement ou de réparation d'un pont

Méthodologie

par **Daniel POINEAU**

*Ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'État – Ex-Directeur technique à la Division des Grands Ouvrages du Sétro
Professeur à l'École nationale des Travaux Publics de l'État, à l'École spéciale des Travaux Publics et à l'École supérieure des ingénieurs des Travaux de la construction
Consultant*

et **Jean-Armand CALGARO**

*Ingénieur général des Ponts et Chaussées
Membre permanent du Conseil général de l'Environnement et du Développement Durable
Professeur au Centre des Hautes Études de la Construction*

Cette édition est une mise à jour de l'article de Roger LACROIX et Jean-Armand CALGARO intitulé Projet de renforcement ou de réparation d'un pont paru en 1999.

1. Terminologie	C 7 803 – 2
2. Projet de réparation ou de renforcement	— 2
3. Hygiène et sécurité – Traitement des déchets – Législation sur l'eau.....	— 3
4. Réparation et/ou renforcement d'un pont en béton	— 3
4.1 Contexte.....	— 3
4.2 Principes généraux pour les ponts en béton armé	— 4
4.2.1 Désordres du matériau béton.....	— 4
4.2.2 Corrosion des armatures.....	— 4
4.2.3 Insuffisance de capacité portante de la structure en béton armé	— 4
4.3 Principes généraux pour les ponts en béton précontraint	— 5
4.3.1 Considérations.....	— 5
4.3.2 Précontrainte additionnelle	— 6
4.3.3 Remplacement de la précontrainte	— 7
4.3.4 Déformations imposées par vérinage	— 7
Pour en savoir plus.....	Doc. C 7 803

Ce dossier, suite logique des articles traitant de la « Pathologie et évaluation des ponts existants » ([C 7 402], [C 7 403], [C 7 404] et [C 7 405]) s'adresse, bien entendu et pour les mêmes raisons, aux mêmes lecteurs.

Un pont existant a été conçu pour assurer un certain service. Or, à cause d'erreurs de conception et/ou d'exécution, du vieillissement de ses matériaux, des attaques de l'environnement, de l'agressivité du trafic, d'actions accidentelles..., ce pont peut présenter des désordres et ne plus assurer le service prévu. Il faut donc le réparer, voire le remplacer.

Dans certains cas, la capacité portante et la géométrie d'un pont existant ne sont plus adaptées aux nouveaux besoins qui se font jour à cause de l'augmentation du trafic et des charges... Il faut donc permettre à l'ouvrage de remplir ces nouveaux services, ce qui impose, dans la majeure partie des cas, de le renforcer.

Ce dossier est consacré à :

– définir un certain nombre de termes liés au domaine de la réparation et du renforcement ;

- détailler les différentes étapes à suivre pour aboutir à un « bon » projet de réparation et de renforcement ;
- développer les différentes méthodes de réparation et de renforcement des ponts ou parties de ponts en béton (béton armé et béton précontraint).

Cette dernière partie a été profondément remaniée pour tenir compte du fait que, d'une part, de nouvelles méthodes se sont développées et, d'autre part, la normalisation européenne se substitue de plus en plus à la normalisation française. C'est ainsi que les normes produits de la série P 18-800 ont été, pour la plupart, remplacées par les normes de la série EN 1 504-00, ce qui a rendu obsolètes les normes d'exécution de la série P 95-100.

Les dossiers suivants traitent spécifiquement des méthodes de :

- réparation, protection du béton et des armatures, [C 7 804] ;
- réparation et renforcement par armatures additionnelles, [C 7 805] ;
- réparation et renforcement des ponts métalliques, [C 7 806].

1. Terminologie

■ État de service

Un pont existant comme un pont-route a été conçu pour satisfaire à un certain nombre de besoins prévisibles à l'époque de sa conception. Il présente donc certaines caractéristiques comme sa largeur de plateforme (chaussée et trottoirs), sa capacité portante, sa résistance à certaines sollicitations accidentelles... Il assure donc un certain **état de service**.

Avec le temps, ses matériaux constitutifs vieillissent, le trafic augmente en quantité et en charge, les besoins en sécurité évoluent, une crue exceptionnelle peut affouiller ses fondations..., en conséquence son état de service diminue ou n'est plus adapté aux besoins actuels ([1] et [4]).

■ Réparation

La réparation a pour but de redonner à un ouvrage existant l'**état de service** qu'il avait lors de sa réalisation.

■ Renforcement

Le renforcement doit donner à un ouvrage existant un **nouvel état de service**. Un élargissement, une nouvelle capacité portante font partie des opérations de renforcement.

■ Démolition-reconstruction

Dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, que le coût de la réparation ou du renforcement sont trop élevés, que le tracé routier doit être modifié..., la solution consistant à démolir entièrement le tablier et les appuis, ou seulement le tablier puis, à reconstruire le pont entièrement ou partiellement, peut s'imposer.

2. Projet de réparation ou de renforcement

■ Rappel, un projet de réparation doit être basé sur l'**évaluation de la structure** concernée ([1], [4]) qui comporte deux étapes :

- le **pré-diagnostic**, permettant de déterminer les causes probables des désordres, de prendre les mesures de sécurité qui s'imposent (étalement provisoire, comblement de vides sous les fondations...) et de définir le programme des investigations à effectuer ;

- le **diagnostic**, qui donne les causes des désordres et la capacité portante de la structure après réalisation des investigations sous forme d'essais en laboratoire ou sur le site et de recalculs.

Une réparation ou un renforcement ne doivent en aucun cas être lancés sur une simple inspection détaillée de la structure car celle-ci ne permet que de déceler les désordres apparents et sur les seules parties accessibles, et sûrement pas les vices cachés.

Par **exemple**, il faut avoir en tête que la **réutilisation d'appuis existants** impose impérativement, au minimum, une étude de l'état et de la capacité portante de chaque appui et de sa fondation avant tout travaux, même si ceux-ci paraissent en bon état.

Dans certains cas, il faut aussi étudier l'évolution probable du cours d'eau (déplacement du lit mineur, augmentation des affouillements...).

■ Un projet de réparation et/ou de renforcement comporte les **mêmes étapes qu'un projet d'ouvrage à construire** :

- étude préliminaire (EP) ;
- avant-projet de réparation d'ouvrage d'art (APROA) ;
- projet de définition (P de D) ;
- dossier de consultation des entreprises (DCE).

La différence essentielle est que le projet concerne une structure existante dont la géométrie, le ferrailage, le câblage, les superstructures... sont imposées et ne correspondent pas toujours aux plans du dossier de l'ouvrage, faute de plans de recollement.

Les deux étapes essentielles dans ce processus sont la réalisation de l'étude préliminaire et l'élaboration du DCE.

• L'**étude préliminaire** repose sur le **programme du maître d'ouvrage** qui définit les **objectifs** de la réparation ou du renforcement (parties d'ouvrage à réparer ou renforcer) et les **contraintes** qui s'y rattachent (présence de réseaux, périodes de travaux souhaitées, déviations du trafic possible ou non...). Cette **étude préliminaire** se doit d'envisager :

- les **différentes solutions possibles** ;
- les **moyens à utiliser** pour les accès et les travaux en vérifiant la possibilité de pouvoir mettre en œuvre ces moyens, compte tenu de la géométrie et de la capacité portante de la structure ;
- l'**ordre de réalisation des travaux** ;
- le **coût des solutions** ;
- leurs **avantages et inconvénients**...

Cette étude permet d'aboutir **au choix d'une, voire de plusieurs solutions**, ainsi que des **solutions variantes** envisageables.

- Le **DCE** se doit de définir :
 - les **sujétions d'exécution imposées à l'entrepreneur** à partir du programme du maître d'ouvrage aménagé pour tenir compte des conclusions de l'EP ;
 - les **investigations et études déjà effectuées** lors de l'expertise et celles à effectuer (par exemple, la radiographie de l'âme d'une poutre, traversée par des câbles de précontrainte dans laquelle est prévu le forage de trous, doit être de la responsabilité de l'entreprise) ;
 - les **matériels et techniques autorisées et interdites** (par exemple, l'interdiction d'utiliser le marteau-piqueur pour démolir une portion de la structure afin de ne pas endommager le ferrailage qui doit être réutilisé...) ;
 - les **responsabilités du maître d'ouvrage et de l'entrepreneur et les garanties à apporter** car les travaux peuvent parfois déboucher sur un endommagement de la structure, voire son effondrement (par exemple, l'entrepreneur peut avoir l'obligation ou non de refaire l'évaluation de la structure, les plans fournis avec le DCE peuvent être garantis ou non conformes à l'exécution...) ;
 - le **cadre du plan d'assurance de la qualité (PAQ) et les variantes et propositions techniques autorisées**.

Le guide [5] explicite dans le détail la démarche à suivre.

3. Hygiène et sécurité – Traitement des déchets – Législation sur l'eau...

■ La **législation du Travail** impose des obligations lorsque la sécurité et la santé des intervenants sur un chantier peuvent être mises en jeu. Un chantier de réparation de pont impose, souvent, le travail en hauteur, l'utilisation de produits pouvant contenir des substances agressives ou toxiques... La présence d'un **Coordonnateur de sécurité et de protection de la santé (PSP)** est normalement nécessaire. Les **fiches de sécurité (FDS)** permettent de connaître les précautions à prendre lors de la mise en œuvre des différents produits de réparation.

■ Le **Code de l'environnement** oblige à gérer les déchets du chantier avec des procédures différentes suivant les risques qu'ils présentent. Les déchets sont classés en trois catégories :

- classe I : déchets industriels spéciaux (DIS) considérés comme dangereux ;
- classe II : déchets industriels banaux (DIB) ;
- classe III : déchets industriels inertes.

Dans le cas des chantiers de réparation et/ou renforcement, il faut, non seulement gérer les déchets apportés par les travaux de réparation et/ou renforcement, mais également gérer les **déchets issus de l'ouvrage existant** (par exemple : résidus du décapage de peintures ou de revêtements anciens pouvant contenir de l'amiante ou du plomb, anciennes canalisations en amiante-ciment à démonter...). Il est donc impératif de faire un bilan des risques présentés par les matériaux constitutifs du pont existant lors de la réalisation des études de conception et avant la mise au point du DCE.

■ La **législation sur l'Eau** impose un régime d'autorisation ou de déclaration à partir du moment où l'opération rentre dans la nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités soumis au régime susvisé. Un chantier de réparation et/ou de renforcement peut se trouver situé sur, ou à proximité, d'un cours d'eau, d'un plan d'eau... Des dispositions particulières sont donc à prendre :

- lors du projet, pour aménager l'ouvrage, surtout en matière de drainage et d'évacuation des eaux ;
- pendant les travaux, pour éviter de perturber le milieu aquatique et les ressources en eau...

4. Réparation et/ou renforcement d'un pont en béton

4.1 Contexte

■ Parmi les **normes européennes de la série NF EN 1504-00** relatives aux produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, parues au début des années 2000, les deux normes suivantes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 traitent des méthodes de réparation et de renforcement (cf. [Doc. C 7 803]).

• La **norme NF EN 1504-9** donne, mais sans rentrer dans les détails :

- la démarche à suivre pour déterminer les origines des défauts constatés et évaluer ainsi une structure en béton existante ;
- la démarche à suivre pour choisir la méthode de protection ou de réparation à mettre en œuvre ;
- les fonctions (appelés « principes ») au nombre de 11 auxquelles doivent satisfaire les méthodes de protection ou de réparation listées dans la norme.

• La **norme NF EN 1504-10** :

- reprend la notion des 11 fonctions de la norme NF EN 1504-9 et classe en deux catégories les méthodes de protection et de réparation :

- la première catégorie regroupe dans des tableaux toutes les méthodes, au nombre de 30, qui relèvent de la norme et satisfont aux 11 fonctions, sachant que ces méthodes font appel aux produits et systèmes relevant des autres normes de la série (NF EN 1504-2 à NF EN 1504-7), et que le contrôle qualité de ces produits et systèmes, lors de leur élaboration en usine, relève de la norme NF EN 1504-8. Il est à noter que certaines des méthodes assurent plusieurs fonctions à la fois (par exemple, un revêtement de surface pour béton protège contre la pénétration des agents agressifs (première fonction) et préserve la passivité des armatures (deuxième fonction),
- la seconde catégorie regroupe les méthodes, au nombre de 12, qui ne relèvent pas de la norme, car traitées par d'autres normes européennes (cas du béton projeté), par aucune norme (cas de la précontrainte additionnelle) et qui, de toute façon, n'utilisent pas forcément les produits et systèmes susvisés ;

– traite également :

- des méthodes de préparation du support (béton et armatures) avant l'application des produits et systèmes,
- de la préparation et de la mise en œuvre des produits et systèmes,
- dans le tableau numéro 4, des contrôles à effectuer sur le support avant et après préparation (béton et/ou armatures), sur les produits et systèmes (réception, préparation) avant et après leur mise en œuvre. Le nombre total des essais de contrôle s'élève à 45. Dans ce tableau, figurent le nom de l'essai et, si elle existe, le numéro de la norme correspondante ;

– développe un peu et décrit (quelques lignes à une page) dans une **annexe informative** :

- les méthodes utilisables pour la préparation du support et la mise en œuvre des produits et systèmes avec des conseils sur les bonnes pratiques,
- les 45 essais et, surtout, l'interprétation des résultats de ces essais pour valider ou invalider les réparations effectuées.

■ Dans le texte qui suit, une simplification a été effectuée pour **regrouper les diverses fonctions en 4 classes principales** et y

associer les principales méthodes et techniques capables d'y satisfaire. Les quatre classes sont les suivantes :

- **méthodes de restauration du béton** qui ont pour but de traiter le béton endommagé par des agents physiques ou chimiques ;
- **méthodes de renforcement structurel** sous forme d'ajout de matière (béton, armatures passives...) et/ou de forces (armatures de précontrainte, déformations imposées...) ;
- **méthodes de préservation ou de restauration de la passivité des armatures** afin d'empêcher la corrosion des armatures ou de traiter les armatures corrodées ;
- **méthodes de protection du béton** pour empêcher la pénétration des différents agents agressifs. Elles sont utilisées seules, pour empêcher l'attaque du béton et/ou des armatures, ou en complémentarité des trois méthodes précédentes.

Dans ce qui suit, les principes généraux relatifs aux réparations et/ou renforcements sont examinés pour les ponts en béton armé et en béton précontraint, puis les principales techniques sont décrites en détail.

4.2 Principes généraux pour les ponts en béton armé

Dans le texte ci-dessous sont listées les principales techniques de réparation à utiliser en fonction du (ou des) désordre(s) constaté(s) :

4.2.1 Désordres du matériau béton

Les ponts en béton armé peuvent présenter des désordres affectant le matériau béton en surface ou en profondeur et qui sont dus à des phénomènes physiques : retraits, gel, incendie, érosion..., ou chimiques : eaux pures, eaux acides, sulfates... Ils peuvent aussi présenter des désordres qui affectent le matériau béton à l'intérieur de la structure, comme les réactions de gonflement internes (RGI) que sont l'alcali-réaction (AR) et la réaction sulfatique interne (RSI) :

– **si le béton présente des fissures qui ne marquent pas une insuffisance de capacité portante** vis-à-vis de la flexion, de l'effort tranchant..., la réparation va consister simplement à boucher ces fissures comme suit pour empêcher la pénétration des agents agressifs :

- mettre en œuvre un revêtement à la surface du béton qui est utilisable si les fissures sont très fines, peu profondes et de positionnement anarchiques,
- réaliser un pontage ou un calfeutrement des fissures lorsqu'il n'est pas nécessaire que leur remplissage soit complet,
- injecter les fissures avec un produit souple (fissure active mais sans insuffisance de capacité portante) ou rigide (fissure considérée comme morte) ou gonflant (fissures dans un réservoir laissant passer l'eau...) lorsque le remplissage doit être complet ;

– **si le béton présente des vides en profondeur**, la réparation consiste à injecter le vide par une résine ou un coulis de ciment à base de ciments sur-broyés adaptés pour l'injection ;

– **si le béton présente une désorganisation du matériau plus ou moins profonde**, des vides en surface, des nids de cailloux..., la réparation consiste à :

- purger le béton désorganisé,
- puis, en fonction de l'importance et de la profondeur des dégradations, à le restaurer par différentes techniques : ragréage manuel, béton coulé, béton projeté...,
- enfin, d'appliquer un revêtement sur toutes les surfaces exposées pour des raisons d'aspect et/ou pour protéger le béton contre les agents agressifs.

Les techniques utilisables pour tenter de **prolonger la durée de vie** des ouvrages atteints par les RGI ne sont pas traitées dans le présent texte, il convient de se reporter aux documents [8] et [9].

4.2.2 Corrosion des armatures

La corrosion des armatures, due à la carbonatation du béton et/ou aux chlorures..., provoque le gonflement des barres qui entraîne la fissuration, puis l'éclatement du béton. Bien entendu, les désordres du matériau béton dus à d'autres causes peuvent se combiner aux effets de la corrosion ce qui complique d'autant la réparation.

■ **Si la corrosion est en période d'incubation ou à ses débuts**, la réparation porte sur la **conservation de la passivité des armatures** comme suit :

- cas où les agents agressifs n'ont pas encore atteint les armatures :
 - mettre en place un revêtement de protection,
 - augmenter l'enrobage qui va offrir une barrière supplémentaire et un ajout d'alcalins par diffusion,
 - mettre en œuvre une prévention cathodique ;
- cas où la corrosion est tout juste amorcée :
 - déchlorurer le béton,
 - ré-alcaliniser le béton,
 - mettre en œuvre une protection cathodique...

La **conservation de la passivité des armatures** peut être rattachée à un **entretien préventif**. Elle impose un **suivi particulier de l'ouvrage** pour contrôler, au fil du temps, la pénétration des agents agressifs afin de pouvoir intervenir à temps et, le plus souvent, par la mise en place d'un revêtement de protection d'un coût sans commune mesure avec une restauration de la passivité.

■ **Si la corrosion est en cours de développement ou est généralisée**, la réparation va consister à **restaurer la passivité des armatures** comme suit :

- purger le béton désorganisé ;
- enlever la rouille ;
- traiter, si nécessaire, les armatures par un passivant ;
- ajouter des armatures pour remplacer les barres corrodées, si besoin est ;
- reconstituer l'enrobage des armatures (dans le cas où l'épaisseur à mettre en œuvre est importante, il faut ajouter des armatures de peau pour limiter la fissuration) ;
- et enfin mettre en place, ou non, un revêtement de protection.

À la suite du traitement curatif, des traitements complémentaires peuvent être appliqués, comme la protection cathodique...

Remarque : lorsque certaines parties d'un ouvrage (corniches des ponts en zone montagneuse...) sont soumises à un environnement particulièrement agressif, et s'il faut remplacer les armatures corrodées, il est possible d'utiliser des armatures en acier inoxydable dont la composition doit être compatible avec l'environnement. Des dispositions particulières sont à prévoir pour éviter une corrosion bimétallique entre les deux sortes d'armatures.

4.2.3 Insuffisance de capacité portante de la structure

■ Modalités

La réparation, ou le renforcement, de la structure d'un pont en béton armé fait appel, le plus souvent, à « l'ajout de matière », plus rarement à « l'ajout de forces ».

• Les **techniques d'ajout de matière** sont utilisées pour les renforcements structuraux. Elles consistent à augmenter la section résistante d'une structure par ajout de béton ou d'acier, voire, plus simplement, à reconstituer la section résistante endommagée. Mais, pour qu'il y ait renforcement, il faut que la partie ajoutée participe effectivement à la reprise des efforts.

Dans les cas courants, la matière ajoutée ne participe qu'à la reprise des effets des charges d'exploitation (parfois du poids des équipements lorsqu'ils sont remplacés). En effet, pour que la matière ajoutée assure, à la fois, la reprise des charges permanentes et celle des charges d'exploitation, il faut recourir à des méthodes lourdes comme la mise sur cintre de l'ouvrage pendant les travaux de renforcement, l'introduction de déformations par vérinage, l'ajout d'une précontrainte additionnelle, etc.

- Les trois techniques classiques d'ajout de matière sont :
 - l'ajout d'armatures passives internes au béton ;
 - l'ajout de béton ;
 - l'ajout d'armatures passives extérieures au béton, sous forme de tôles collées (parfois collées et boulonnées) ou d'armatures composites à base de fibres de carbone ou de verre.

L'ajout de béton peut être envisagé pour un renforcement local ou un renforcement général.

Renforcement local

Exemple

Un renforcement local, assimilable à une réparation locale, se justifie dans le cas d'un tablier de pont en béton armé à poutres multiples heurté par un camion hors gabarit. La réparation comporte alors les opérations suivantes :

- mise sur cintre (si nécessaire) ;
- purge du béton désorganisé ;
- scellement d'armatures de couture ;
- réfection du ferrailage (remplacement des barres de béton armé endommagées, avec recours à la soudure, si besoin est, et si les armatures sont soudables) ;
- mise en place d'un béton, soit par projection, soit par coulage en place ou injection (à l'intérieur d'un coffrage, parfois confectionné dans des conditions acrobatiques) ;
- injection de résine, si nécessaire, dans la zone de contact, entre le béton de la structure et le béton rapporté après durcissement de ce dernier, de façon à améliorer la qualité de la reprise de bétonnage ;
- réalisation d'un revêtement de protection pour des raisons d'aspect et, surtout, de protection contre les agents agressifs à cause de la fissure de retrait qui se développe au niveau de la reprise de bétonnage.

Les redistributions d'efforts par déformations gênées visées ci-après sont en général négligeables sauf, par exemple, s'il y a eu modification du schéma statique de la structure et des déformations importantes.

Renforcement général

Un renforcement général est nécessaire, par exemple lorsqu'il s'agit d'élargir la dalle de couverture d'un pont ou d'en augmenter l'épaisseur, de renforcer la section d'une pile non conçue pour résister au choc d'un camion...

Les déformations gênées dues au retrait du béton entraînent des redistributions d'efforts (effets isostatiques et hyperstatiques) dont il convient de tenir compte lors des vérifications vis-à-vis des états limites de service. Par contre, vis-à-vis des états limites ultimes de résistance, il est possible d'admettre qu'il y a eu adaptation.

Exemple

Lorsque les travaux de renforcement général conduisent à démolir certaines parties de la structure et à transformer son schéma statique comme supprimer l'articulation centrale d'un portique à trois articulations, le recalcul de l'ouvrage doit tenir compte de toutes les phases de démolition et de renforcement et, en sus, dans le cas cité, des effets hyperstatiques dus au retrait et aux variations thermiques qui se développent dès la suppression de l'articulation.

Le renforcement général peut être réalisé par ajout :

- de béton (béton coulé ou projeté, béton contrecollé) ;
- d'armatures passives intérieures au béton (barres de béton armé, armatures galvanisées, armatures en acier inoxydable ou armatures composites à base de fibres noyées dans une matrice à base de résine) ;
- d'armatures passives extérieures au béton, sous forme de tôles collées ou de plaques et de tissus composites ;
- de force, par l'intermédiaire d'armatures de précontraintes ou de déformations imposées.

• Il est noté que l'ajout de béton (par exemple pour épaissir une dalle de couverture) augmente le bras de levier des armatures de la dalle, des poutres et des entretoises éventuelles, et accroît le moment résistant des différentes sections. Cette technique est donc utilisable également pour renforcer une structure lorsque la section des armatures est légèrement insuffisante, bien que cet ajout de béton apporte un supplément de poids propre (l'emploi de béton léger peut être envisagé).

• Les tôles collées fournissent une méthode de renforcement dont l'efficacité a été prouvée à de nombreuses reprises. Elle est néanmoins onéreuse à cause de la mise en pression de la colle durant sa prise. De plus, les tôles disposées en sous-face d'un tablier, dégageant une hauteur libre un peu faible, résistent mal aux chocs (bâches flottantes de camions, véhicules hors gabarit, etc.).

Depuis une bonne vingtaine d'années, les produits composites collés, sous forme de plaques ou de tissus dont la mise en œuvre est relativement simple, se sont substitués aux tôles collées.

• Une insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion ou de l'effort tranchant d'une structure en béton armé peut être compensée par un ajout de forces sous forme d'une précontrainte additionnelle. Ainsi, les sections, soumises au départ à une sollicitation de flexion simple, sont amenées à supporter une sollicitation de flexion composée. C'est selon ce mode qu'il convient de les justifier, c'est-à-dire en suivant les règles du béton armé et non pas celles du béton précontraint.

L'attention est attirée sur le fait que, lorsqu'un pont en béton armé est renforcé par précontrainte, celle-ci est totalement extérieure. Il convient de la protéger efficacement vis-à-vis de chocs accidentels, des risques de vandalisme et, parfois même, du feu.

• L'ajout de forces par déformations imposées est utilisé, par exemple, pour régler la poussée d'un arc ou d'un portique à trois articulations. Il faut tenir compte du fait que le fluage du béton, même pour un béton très âgé, va réduire l'effet de la déformation imposée dans de fortes proportions (rappel ~ 2/3 dans le cas d'un béton âgé de 28 jours).

Le présent dossier est complété par le [C 7 804] qui détaille les techniques de réparation et de protection du béton et des armatures.

4.3 Principes généraux pour les ponts en béton précontraint

4.3.1 Considérations

Les désordres du matériau béton et des armatures de béton armé d'un pont en béton précontraint relèvent des mêmes techniques de réparation que celles applicables aux ponts en béton armé. Il y a cependant lieu de prendre des précautions particulières, par exemple :

- lors de purges importantes de parties en béton endommagées, il faut s'assurer que la réduction de la section ne risque pas d'entraîner des surcompressions locales, et il faut tenir compte du fait que le béton de remplacement ne sera pas précontraint ;
- certains des traitements électrochimiques de la corrosion des armatures passives peuvent avoir une incidence fâcheuse sur les armatures de précontraintes sous forme de corrosion fissurante sous contrainte (ce point est développé dans le dossier [C 7 804]).

Un pont en béton précontraint est très rarement précontraint dans les trois dimensions. Le plus souvent, il n'est précontraint que dans le sens longitudinal. Donc, dans ce cas, certaines de ses parties fonctionnent en béton armé, comme le hourdis supérieur ou le hourdis inférieur d'une poutre-caisson. Les techniques de réparation du béton armé peuvent être donc utilisées, mais il faut cependant tenir compte qu'il existe, au minimum, une précontrainte longitudinale.

■ La réparation, ou le renforcement, d'un pont en béton précontraint fait rarement appel à la **restauration de la passivité des armatures actives** ou à l'**ajout de matière**. Elle fait surtout appel à l'**ajout de forces**. La **restauration de la passivité des armatures de précontrainte**, par exemple par **réinjection des conduits de précontrainte**, est une opération complexe, délicate et onéreuse, qui ne doit être décidée qu'après une évaluation minutieuse de l'état de la structure et lorsque cette opération est, à la fois, nécessaire et physiquement possible du fait :

- de vides importants ;
- d'armatures non enrobées, partiellement ou totalement ;
- d'armatures peu sensibles à la corrosion fissurante sous contrainte (voir **Nota**) ;
- et, bien entendu, d'un accès possible aux zones à injecter.

Nota : les armatures sensibles à la corrosion fissurante sous contrainte présentent des microfissures qui vont continuer à évoluer vers la rupture. L'injection ne peut traiter que la corrosion classique par dissolution.

■ Pour ce qui est de l'**ajout de béton**, ce qui a été dit à propos des ponts en béton armé reste à peu près valable pour les ponts en béton précontraint.

On notera que la technique de reprise de bétonnage entre un béton ancien et un béton coulé en place est applicable à l'élargissement des ponts en béton précontraint. Dans ce cas, le renforcement est bien meilleur lorsque l'on met en œuvre, après réparation, une précontrainte additionnelle dans les deux directions : longitudinale et transversale (figure 1).

■ Pour ce qui est de l'**ajout d'armatures passives**, on pourrait songer à renforcer les ouvrages en béton précontraint à l'aide de **tôles collées** dans le but d'augmenter la quantité d'aciers passifs dans les sections présentant une insuffisance de précontrainte. Il faudrait alors admettre que l'ouvrage fonctionne en régime de précontrainte partielle et, non plus, en précontrainte totale.

En fait, plusieurs raisons font qu'une telle conception n'a été adoptée que dans des cas très particuliers, et on ne peut donc pas considérer qu'elle apporte une solution générale au problème du renforcement des ponts. Le fonctionnement local d'une tôle collée n'est pas rigoureusement identique à celui d'armatures passives enrobées à cause de l'incidence de la déformation de la colle et de la flexion locale de la tôle au droit des fissures [10]. Il s'ensuit une maîtrise incomplète de l'ouverture des fissures dont on veut bloquer les mouvements, en particulier lorsque les parois sont épaisses. Dans la plupart des cas, la zone à renforcer est étendue et la réalisation pratique de tels renforcements s'avère très difficile, voire impossible.

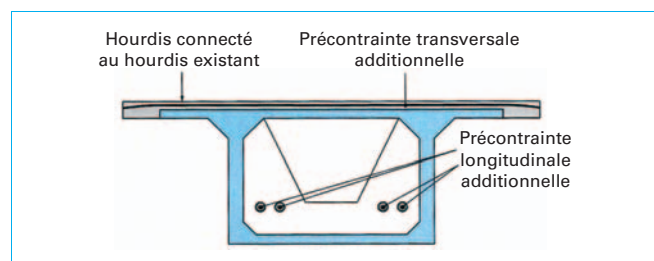


Figure 1 – Élargissement de la dalle de couverture d'une poutre-caisson

En l'absence de fissures, on peut compter sur une meilleure efficacité de la tôle. En outre, comme nous l'avons déjà dit précédemment, les tôles collées sont sensibles aux chocs. Elles ne sont pas utilisables là où la zone à renforcer surplombe une route ne dégageant pas une hauteur libre suffisamment confortable.

Les **composites collés**, du fait de la déformation de la colle risquent fort de se comporter comme les tôles collées, mais on manque d'information sur ce point. En l'absence de fissures, leur emploi est possible.

■ Les **méthodes de renforcement ou de réparation sont donc principalement basées sur l'adjonction de forces**, pouvant être obtenue par :

- précontrainte additionnelle ;
- remplacement de la précontrainte ;
- dénivellations d'appuis (vérinage).

C'est la mise en œuvre d'une précontrainte longitudinale additionnelle extérieure qui est de règle dans la grande majorité des cas pour réparer ou renforcer la structure vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant.

Mais, cette précontrainte longitudinale ne suffit pas toujours car il faut parfois procéder à des renforcements locaux : c'est le cas de la fissuration de poussée au vide et de la fissuration de diffusion à laquelle peut s'ajouter une fissuration d'effort tranchant. Dans de tels cas, la réparation, ou le renforcement, peut faire appel à une précontrainte transversale additionnelle du hourdis inférieur (très rarement du hourdis supérieur), une précontrainte verticale des âmes, voire à des tôles collées. Le remplacement de la précontrainte et les dénivellations d'appui sont traités par la suite.

Exemple : citons les cas particuliers des ponts de Terre-Noire et de Blagnac. La sous-face du hourdis inférieur du premier pont a été recouverte de tôles collées de grande largeur, pour le renforcer vis-à-vis des efforts de diffusion. Les tôles ont été percées de trous pour permettre à la colle de « baver » lors du placage des tôles (pression de l'ordre de 0,05 MPa).

Dans le second pont cité (figure 2), une partie du hourdis inférieur, trop fortement fissurée pour être renforcée à l'aide de tôles collées, a été découpée et évacuée. La compression sur le bas des âmes, lors de la mise en tension de la précontrainte additionnelle, étant excessive, des tôles épaisses collées et boulonnées ont été utilisées pour renforcer le béton.

4.3.2 Précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à mettre en œuvre une précontrainte (câbles, barres ou monotorons) dans un ouvrage pour en améliorer la résistance d'ensemble vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant dans le cadre d'une réparation ou d'un renforcement structurel.



Figure 2 – Vue des réparations du pont de Blagnac (Crédit D. Poineau)

■ Dans le cas d'une précontrainte longitudinale additionnelle, la détermination de l'effort de précontrainte résulte d'un calcul schématiquement illustré sur la figure 3 (ce modèle de calcul concerne les ouvrages où il n'y a pas assez d'armatures passives pour admettre une mise en traction du béton, c'est-à-dire conçus avant les règles BPEL ou lorsque les armatures ont été endommagées).

Signalons seulement que, les armatures étant disposées à l'extérieur du béton, il est parfois nécessaire de vérifier la sécurité de la structure vis-à-vis d'un phénomène de flambement en compression si les armatures ne sont pas régulièrement et solidement fixées à la structure par des déviateurs, et de s'assurer que les armatures ne risquent pas d'entrer en résonance sous l'effet des vibrations induites par le trafic (prévoir des points de fixation pour réduire la longueur libre).

■ Lorsqu'il s'agit de disposer une précontrainte additionnelle dans un ouvrage fissuré, les fissures, dans la mesure où leur ouverture est supérieure au seuil d'injectabilité (0,2 à 0,3 mm), doivent être injectées avec un produit d'injection rigide (cf. la norme NF EN 1504-5 [Doc. C 7 803]) pour rétablir la continuité du matériau béton avant la mise en tension des armatures additionnelles, sinon la précontrainte passe par les « points durs » et ne rétablit pas correctement la continuité mécanique de la pièce.

Pendant, dans certains cas particuliers, il a été admis :

- d'une part, que la partie centrale du hourdis inférieur d'une poutre-caisson pouvait se décompresser sous réserve que le bas des âmes et les goussets inférieurs, dans lesquels se trouvaient tous les câbles de précontrainte intérieurs au béton, restent comprimés ;

- d'autre part, que l'injection des fissures pouvait être évitée si la réparation était provisoire (renforcement provisoire d'un pont sans coupure de la circulation en attendant la construction de l'ouvrage de doublement pour faire la réparation définitive). Dans un tel cas, il faut faire appel à des armatures galvanisées pour réaliser la précontrainte additionnelle provisoire.

■ Lorsque l'ouvrage présente une insuffisance de résistance vis-à-vis de modes de sollicitation complexes associant la flexion, l'effort tranchant, la torsion et la diffusion des efforts de précontrainte (dans les zones d'ancrage), le renforcement peut être réalisé en déviant la précontrainte longitudinale additionnelle de façon à lui donner une inclinaison adéquate là où elle est bénéfique et/ou en disposant des étriers actifs, constitués de barres ou de monotorons gainés protégés, placés à l'extérieur de l'âme ou dans un forage pratiqué à l'intérieur de celle-ci (figure 4).

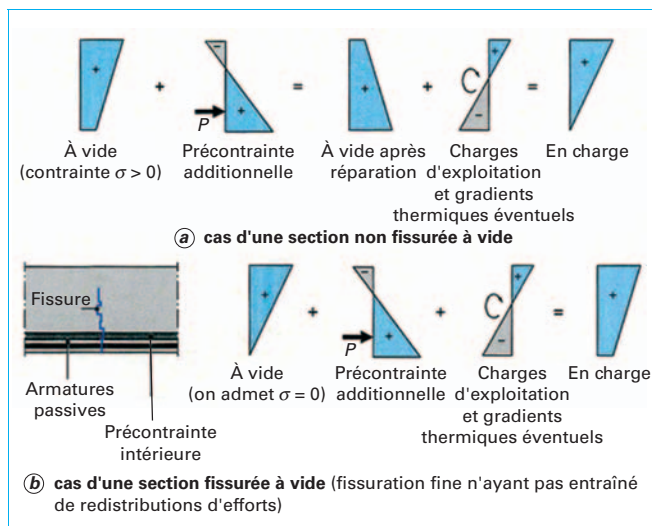


Figure 3 – Effets d'une précontrainte additionnelle

4.3.3 Remplacement de la précontrainte

Dans certains cas, la précontrainte existante (longitudinale ou transversale) endommagée peut être remplacée :

- dans les ponts anciens, lorsque les armatures de précontrainte se trouvent placées dans des encoches remplies de mortier et accessibles. Il suffit de dégager les armatures, par exemple par hydrodémolition, pour pouvoir les couper et les remplacer (cette méthode est également utilisable pour mettre en place une précontrainte transversale destinée au renforcement d'un hourdis) ;

- dans les hourdis, lorsque la précontrainte existante intérieure au béton est mal injectée et est fortement corrodée. Il est possible de la supprimer en détruisant les ancrages pour la remplacer par une précontrainte extérieure symétrique ;

- dans les ponts à précontrainte extérieure, lorsque celle-ci est endommagée (quelques ponts ont été concernés par une corrosion fissurante sous contrainte due à un défaut de prise du coulis d'injection causé par des incompatibilités entre le ciment et certains adjuvants). Des précautions spécifiques sont à prendre pour éviter des désordres dus à la libération de l'énergie accumulée dans les armatures lors de la coupe de celles-ci.

Si le remplacement d'une précontrainte transversale peut se faire par pianotage pour éviter une rupture locale, le remplacement de la précontrainte longitudinale impose souvent la mise en place d'une précontrainte provisoire destinée à sécuriser la structure pendant le démontage des armatures actives (figure 5).

La précontrainte extérieure de plusieurs ouvrages a été remplacée : viaducs de Val de Durance [6], de Pont-à-Mousson [7], de Saint-Cloud...

Des articles techniques ont été rédigés auxquels le lecteur est invité à se reporter.

4.3.4 Déformations imposées par vérinage

Le vérinage d'une structure dans le but de créer une dénivellation des appuis permet d'introduire dans la structure des sollicitations favorables à la résistance de celle-ci (recompression de fissures injectées ou non, réglage des réactions d'appui, etc.) ou de rattraper le profil en long d'un ouvrage présentant d'importantes déformations.

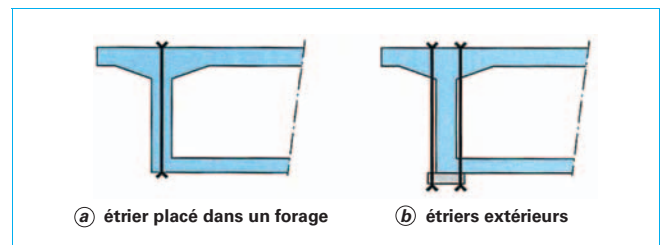


Figure 4 – Étriers actifs



Figure 5 – Précontrainte provisoire nécessaire au remplacement de la précontrainte extérieure endommagée située à l'intérieur de la poutre-caisson (Crédit D. Poineau)

Cependant, l'effet de ces dénivellations s'atténue relativement rapidement à cause des redistributions d'efforts par fluage du béton, et ce malgré le fait que l'on opère le plus souvent sur des ouvrages construits depuis plusieurs années (sur un béton âgé de 28 jours, la perte est sensiblement égale à 2/3 et plus le béton est âgé plus la perte diminue), c'est pourquoi on associe souvent une précontrainte additionnelle à une opération de dénivellation d'appui.

À noter qu'une dénivellation d'appui peut également compléter les effets de l'enlèvement, après injection et durcissement du produit d'injection, des charges mises en place sur une structure avant l'injection des fissures de celle-ci. Par ailleurs, le vérinage est

également utilisé pour le changement des appareils d'appui ou le réglage et la pesée des réactions d'appui, mais aussi le réglage de la poussée d'un arc ou d'un portique. Il peut aussi permettre d'augmenter une hauteur libre devenue insuffisante sous un tablier en relevant celui-ci en plusieurs phases dont le nombre est fonction de la course des vérins.

Le présent dossier est complété par le dossier [C 7 805] qui détaille les méthodes de réparation et de renforcement par armatures additionnelles.