ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

CONTEXTE

Le présent document concerne le fonctionnement des assemblages des ponts à poutres en acier [1] présentant des assemblages. Il ne traite pas des défauts de fatigue qui font l'objet de la méthodologie de diagnostic E3-2, ni des défauts en zone courante des éléments de la structure (instabilité, déformation locale, perte de section par corrosion, etc.).

L'évaluation du fonctionnement d'un assemblage peut être réalisée dans le cas d'observation de désordres sur l'assemblage pour en comprendre l'origine et en évaluer les conséquences sur le fonctionnement de la structure.

Les trois principales techniques d'assemblages des ponts qui peuvent être distinguées au cours du temps sont les suivantes :

– le rivetage ;
– le boulonnage par boulons précontraints ;
– la soudure.

Le boulonnage par boulons ordinaires a également été utilisé au XIX^{e} siècle et au début XX^{e} siècle mais de façon assez marginale et il ne subsiste que peu d'ouvrages assemblés de la sorte en France métropolitaine (cf. Guide STRRES FAME 1 - § 2.3.1) [2]. L'assemblage par boulons ordinaires est désormais proscrit pour l'ossature métallique définitive des ponts et le fascicule 66 du CCTG [3] limite l'emploi des boulons aptes à la précontrainte à la classe 10.9. En réparation ou renforcement, les boulons injectés peuvent être utilisés, ils sont mentionnés dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [4] et dans la norme NF EN 1090-2 (annexe K) [5].

Les rivets

Les assemblages dans les ponts au XIX^{e} siècle et au cours de la première moitié du XX^{e} siècle sont essentiellement réalisés par rivetage et dans une moindre mesure par boulons ordinaires.

L'assemblage par rivetage représente le plus ancien mode d'assemblage de pièces en construction métallique. Au 19^{e} siècle, il existe une grande variété géométrique et dimensionnelle des têtes et des corps de rivets proposée par chaque fabricant. Néanmoins, la tête ronde fut la forme la plus largement utilisée en constructions métalliques [6]. Selon la nature des pièces à assembler, on pouvait alors trouver des rivets en fer ou en acier. Le premier règlement faisant état des caractéristiques mécaniques à respecter pour les matériaux constitutifs des éléments d'assemblages date du 29 août 1891. À partir de 1913, les rivets en fer disparaissent des règlements, et seuls les rivets en acier subsistent [7].

Le règlement de 1960 introduit deux classes de qualité des rivets : R38 (pour l'assemblage de pièces en acier Ac42) et R42 (pour l'assemblage de pièces en acier à haute résistance). Ce règlement précise également les dispositions constructives à respecter (espacement des rivets, conditions de pince) qui seront reprises à l'identique par les règlements français suivants.

Le règlement de 1970 modifie uniquement la désignation des rivets (R38 devient A37 et R42 devient A52R). Le CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales), titre IV du fascicule 4, de 1976 [8], fait alors référence à deux classes de qualité pour les aciers destinés à la fabrication des rivets : l'acier A37R (destiné à l'assemblage de pièces en acier A42) et l'acier A42R (pour les pièces en acier A52).

Les dispositions constructives relatives aux assemblages rivetés ne furent normalisées qu'à partir d'avril 1978 avec l'édition de la norme NF P22-410 « Construction métallique – Assemblages rivés – Dimensions constructives – Calcul des rivets » (révisée en janvier 1982). Cette norme s'applique à la construction, au renforcement ou à la réparation des ouvrages rivetés en acier. Le fascicule 66 du CCTG spécifie alors de retenir la classe 2 de la norme, à savoir la classe la plus sévère.

Aujourd'hui, la norme NF E27-156 « Éléments de fixation – rivets destinés à l'exécution des constructions métalliques » [9], fait toujours référence aux classes A37R et A42R, étant toujours les seules qualités d'acier pour la fabrication des rivets utilisés en ouvrages d'art.

L'Eurocode 3 modifie légèrement les dispositions antérieures relatives à l'entraxe de rivets et aux pinces.

Même si le serrage du rivet lors de son refroidissement a tendance à plaquer les tôles entre elles et à augmenter sensiblement leur frottement, il est d'usage de considérer que le fonctionnement des assemblages par rivets mobilise principalement le cisaillement du corps du rivet.

Les boulons précontraints

Les boulons précontraints ont fait leur apparition au cours des années 1950 pour des utilisations qui concernaient essentiellement la réparation et le renforcement de ponts rails rivetés. L'utilisation dans les ouvrages neufs a débuté dans les années 1960 et a été introduite par un complément au fascicule 61 titre V de 1960 datant du 14/09/1967. Le fascicule 61 titre V de 1970 intègre les clauses relatives aux conditions de sécurité des assemblages boulonnés. La norme NF P22-460 « Assemblages par boulons à serrage contrôlé – Dispositions constructives et vérification des assemblages » reprend les principes de vérification du fascicule 61 titre V et propose le même niveau de sécurité pour les assemblages de classe 2 selon cette norme. Le fascicule 66 du CCTG spécifie alors de retenir la classe 2 de la norme, à savoir la classe la plus sévère. Les Eurocodes intègrent les boulons précontraints comme organe d'assemblage dans les ponts en cohérence

avec les normes « produits » relatives à la fourniture de ces boulons, la norme d'exécution EN 1090-2 et le fascicule 66 du CCTG. Les critères de vérification de l'Eurocode 3 considèrent un coefficient de frottement, donné par la norme NF EN 1090-2, qui est légèrement supérieur pour ce qui concerne les surfaces grenaillées ou sablées (0,50 pour 0,45 antérieurement).

Le fonctionnement des assemblages par boulons précontraints mobilise le frottement entre les pièces assemblées.

La soudure

Les premiers assemblages soudés dans les ponts datent des années 1950 (pont d'Oissel sur la Seine en 1948, pont Corneille à Rouen en 1950). Ces assemblages soudés étant alors essentiellement réalisés en atelier. Les progrès réalisés sur l'élaboration des aciers dit modernes ont progressivement permis la généralisation du soudage tant en atelier que sur chantier à partir du milieu des années 1970. Le recours à la soudure comme moyen d'assemblage fait l'objet de règles de justification pour la première fois dans le fascicule 61 titre V de 1960. Les contraintes admissibles pour les soudures de chantier sont alors plus faibles que pour les soudures d'atelier. En outre, si les contraintes calculées dans une soudure changent de signe en service, elles doivent être majorées, ce qui constitue une première prise en compte de la fatigue dans les assemblages. Le fascicule 61 titre V de 1970 supprime la distinction entre les soudures de chantier et les soudures d'atelier. Les Eurocodes fournissent l'ensemble des règles nécessaires à la justification des assemblages soudés.

> *Les différents modes d'assemblage de pièces métalliques cités précédemment fonctionnent selon des principes très différents : la soudure reconstitue la continuité de la matière, les boulons précontraints transmettent les efforts par frottement et les rivets fonctionnent au cisaillement. Il est souvent dangereux de vouloir associer différents moyens d'assemblage entre pièces métalliques pour transmettre un même effort, et les méthodes de réparation doivent être cohérentes avec le fonctionnement global de l'assemblage.*

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	**Objectif : analyse préliminaire** On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic : – Renseignements généraux : – date de construction, – matériaux constitutifs, – hypothèses de calcul de dimensionnement (règlements de calcul de la structure et des assemblages, règlements de charges, etc.). On cherchera à identifier les assemblages sensibles (dispositions constructives défavorables, dimensionnement au plus juste vis-à-vis des sollicitations, assemblages non calculés en fatigue, etc.), – isostaticité ou hyperstaticité de la structure, – trafic supporté par l'ouvrage ; – Exécution de la structure (plans, carnets de chantier, comptes rendus de réunions, etc.) : – plan de répartition matière, – plan des assemblages, – documents de réception matière, – cahier de soudage le cas échéant, – résultats des épreuves de chargement, – éventuelles anomalies lors des opérations de construction (problème de mise en œuvre au niveau des assemblages, etc.) ; – Résultats des précédentes inspections : – présence et nature des défauts précédemment constatés.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE	**Objectif : détecter des éventuels défauts liés à une déficience des assemblages** – Déficience d'un assemblage : – jeux dans les rivets et boulons (test au marteau des têtes de rivet, contrôle du serrage des boulons, etc.), – rupture de rivet ou de boulons, fissures dans les soudures, – mouvement relatif entre pièces assemblées, vibration des pièces témoignant de la déconsolidation des assemblages ; dans le cas des assemblages rivetés, ce phénomène évolutif est observable à différents stades : • Rupture du film de peinture accompagné d'un léger ressuage d'oxyde, • Mouvement des plaques et des rivets (l'effort de serrage du rivet est rompu, celui-ci travaille en cisaillement de sa tige et un phénomène d'ovalisation du trou peut être observé), • Rupture des rivets et/ou de l'assemblage. – contacts et chocs entre pièces (battage), – déformation des pièces assemblées (ovalisation des trous, déformation plastique des pièces et des raidisseurs, etc.), – présence de corrosion (corrosion foisonnante entre pièces, coulures traduisant une corrosion interne, etc.). Les résultats de l'inspection détaillée doivent être comparés aux résultats des inspections précédentes pour apprécier le degré d'évolutivité des défauts concernés.

ÉTAPE 3
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES DE L'OUVRAGE

3.1 - Évaluation théorique initiale basée sur les règles de dimensionnement pour ouvrages neufs

Cette première phase de l'étape a pour objectif de caractériser par le calcul le comportement des assemblages. Cette analyse préalable aux investigations sur site est réalisée notamment pour déterminer les sections pertinentes à ausculter et/ou instrumenter et pour fixer les seuils de mesure. Cette analyse a également pour objet d'évaluer la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis du comportement des assemblages en vue du diagnostic final.

Il s'agit de réaliser un recalcul de l'ouvrage en ciblant notamment le fonctionnement des assemblages les plus sollicités ou les plus dégradés en étudiant l'influence d'une déficience de ces assemblages sur le fonctionnement global de la structure. Ce recalcul intègre les éventuels reports de charges dus à la défaillance d'un assemblage, les effets structuraux de l'apparition de rotules, etc.

Cette analyse précise les cas de charge à prévoir pour apprécier le comportement de l'ouvrage lors des épreuves instrumentées de l'étape 3.2.

En cas de défauts évolutifs, cette analyse pourra intégrer les conséquences de l'évolution prévisible des défauts.

3.2 - Auscultation et instrumentation

Cette seconde phase de l'étape a pour objectif de caractériser le fonctionnement des assemblages et les conséquences sur le fonctionnement global de la structure, les étapes précédentes ayant permis de déterminer les zones pertinentes à ausculter et/ou à instrumenter.

3.2.1 - Auscultation des assemblages

Il s'agit notamment de rechercher la présence de décohésion de pièces assemblées, le desserrage d'organes d'assemblage, de fissures dans les pièces et/ou les organes d'assemblage ou les soudures.

Suivant les cas, l'auscultation peut être basée sur un examen visuel, un sondage au marteau (détection de rivets ou boulons desserrés) ou sur la mise en œuvre de techniques de contrôle non destructif :

- la magnétoscopie (sur la base des normes NF EN ISO 17638, NF EN ISO 9934-1 à NF EN ISO 9934-3),
- le ressuage (sur la base des normes NF EN ISO 23277, NF EN 3452-1 à NF EN ISO 34542-6) ;
- les ultrasons (sur la base des normes NF EN ISO 17640, NF EN ISO 23279, NF EN ISO 11666, document IS US 319-21 de juin 1995),
- la radiographie/gammagraphie (sur la base des normes NF EN ISO 10675-1 et 10675-2, NF EN ISO 17636-1et 17636-2, utilisée notamment pour les éléments d'assemblage où les défauts peuvent être localisés sur les plaques médianes et donc non détectables par les méthodes précédentes, exemple : cas des cornières rivetées),
- l'ACFM, etc.

3.2.2 - Instrumentation pour évaluation du fonctionnement local d'un assemblage

Il s'agit de réaliser une instrumentation locale de l'assemblage en lien avec la modélisation de ceux-ci réalisée à l'étape 3.1. L'instrumentation peut consister en la mise en œuvre :

- de jauges de déformation ou de rosettes de jauges permettant de déterminer le mode de transmission et l'intensité des efforts au droit de l'assemblage (les jauges doivent être judicieusement disposées de manière à pouvoir évaluer les concentrations locales de contraintes) ;
- de capteurs de déplacement permettant de détecter un éventuel mouvement relatif des pièces assemblées.

Le mouvement est suivi dans le temps sous les effets du trafic et des variations de température. Le cas échéant, un chargement d'épreuves maximisant les efforts dans l'assemblage instrumenté peut être envisagé.

Sauf structures particulières, les effets du comportement des assemblages sur la distribution des sollicitations dans la structure et sur les déformations globales peuvent être négligés. Les assemblages classiques sont supposés rigides et en capacité de transmettre l'effort. Ils sont généralement modélisés comme tels dans le modèle d'évaluation structural initial. Il est alors vérifié si le dimensionnement de l'assemblage permet effectivement de transmettre les efforts obtenus.

Les résultats de l'instrumentation permettent d'approcher le mode de fonctionnement réel pour un niveau de charge généralement un peu inférieur au niveau de chargement obtenu à l'état limite de service (ELS) puis de le comparer au modèle d'évaluation structurale. Soit l'instrumentation montre un fonctionnement normal ou admissible de l'assemblage. Soit l'instrumentation montre un mode de fonctionnement dégradé. Dans ce cas, l'évaluation structurale doit en tenir compte dans le modèle de structure puis conclure sur la nécessité ou non de renforcement.

Extrait du guide « conception des réparations » du Cerema [10]

Les réparations ou les renforcements sont en général justifiés sur la base d'un modèle élastique linéaire. Une analyse plastique peut être envisagée pour justifier des situations de projet accidentelles. Une approche plastique n'est en général pas recommandée pour justifier les situations de projet durables et transitoires. Dans le cas où cette approche est retenue pour justifier l'ouvrage à l'ELU (état limite ultime) en combinaison fondamentale, il devient alors nécessaire de vérifier que la structure reste élastique à l'ELS (état limite de service), en tenant compte des moments résiduels résultants du déchargement de l'ELU.

Dans tous les cas, une analyse plastique nécessite de respecter les critères donnes par l'Eurocode 3 partie 1-1 § 5.6.

La section transversale où se forme la rotule plastique doit notamment posséder une capacité de rotation qui ne soit pas inférieure à celle requise à cet emplacement. Dans une barre uniforme, cela suppose notamment que la section transversale soit de classe 1 au sens des Eurocodes et que le risque d'instabilité par déversement soit écarté.

L'analyse plastique est proscrite pour les structures constituées de matériaux fragiles tel que la fonte et le fer puddle.

À noter que la modélisation initiale des assemblages dans le dimensionnement de la structure peut résulter d'un choix du concepteur qui doit alors s'assurer de la cohérence du modèle au regard de la géométrie des assemblages pour que la modélisation ne soit pas trop favorable vis-à-vis du dimensionnement de l'assemblage (risque de négliger des efforts). À titre d'exemple, on peut citer le cas des pièces de ponts d'ouvrages métalliques anciens qui sont dimensionnées en poutre bi-articulée (uniquement transmission de l'effort tranchant dans le dimensionnement de l'assemblage à la poutre principale) alors que l'assemblage est suffisamment rigide pour transmettre les efforts de flexion. Le plus souvent le dimensionnement de l'assemblage permet la reprise des efforts non pris en compte. De même dans les ponts à poutres treillis les diagonales sont généralement articulées aux poutres dans le modèle d'analyse globale, sous réserve d'un rapport de rigidité entre diagonale et membrure le permettant. Ce choix conduit à négliger les efforts de flexion dans les assemblages concernés.

ÉTAPE 3
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES DE L'OUVRAGE

3.2.3 - Instrumentation pour évaluation du fonctionnement global de la structure

Il s'agit de caractériser le fonctionnement global de la structure sous un chargement maîtrisé pour évaluer les conséquences de la déficience d'assemblages. Le dispositif comprend :

- une instrumentation en déformation de sections représentatives du fonctionnement de la structure (jauges de déformation sur l'acier des poutres à au moins trois niveaux de hauteur) ; au moins une section en travée et une section sur appui sont instrumentées dans le cas des structures hyperstatiques, on peut également comparer le fonctionnement de différentes poutres,
- une instrumentation en température d'une section,
- une instrumentation en flèche des poutres (en général toutes les poutres) à mi-travée voire en courbure,
- le cas échéant une instrumentation en rotation des sections sur appuis intermédiaires.

> *Dans certains cas (structure associant acier et béton notamment), il pourra être utile d'apprécier l'influence de la connexion réelle existant entre les matériaux pour apprécier le mode de fonctionnement (mixte ou non) de sections et les conséquences sur les assemblages.*

Un programme de chargement est établi (cf. étape 3.1) en s'inspirant des principes du guide Setra « Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes » de mars 2004 [11]. On se limitera en général à un niveau de charge induisant des sollicitations inférieures à la valeur de résistance admissible en service en prenant en compte l'état observé de dégradation des assemblages.

Si des résultats d'épreuves initiales de chargement sont présents dans le dossier d'ouvrage, on visera à reproduire certains des cas de charges pour évaluer les modifications de comportement de la structure depuis sa mise en service.

Le programme de chargement comprendra utilement des cas de charge excentrés de façon à évaluer la répartition transversale des charges entre poutres.

3.3 - Évaluation de l'aptitude au service de l'ouvrage

Cette troisième phase a pour objectif de confronter les résultats de l'analyse théorique préalable et ceux des auscultations et instrumentations *in-situ* pour statuer sur l'aptitude au service de l'ouvrage.

Si le résultat de cette confrontation est satisfaisant, on s'orientera vers une surveillance classique ; mais si ce résultat n'est pas satisfaisant, alors il convient d'étudier si l'ouvrage doit faire l'objet d'une surveillance renforcée, de mesures d'exploitation (par exemple limitation des charges passant sur l'ouvrage), d'actions de réparation ou de renforcement, voire de démolition.

RÉFÉRENTIEL

[1] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 33 : ponts métalliques et mixtes – Cerema - 2017

[2] Guide STRRES FAME 1 – Réparation et rénovation des structures métalliques - www.strres.org

[3] Fascicule 66 du C.C.T.G. « Exécution des Ouvrages de Génie Civil à ossature en acier »

[4] NF EN1993-1-8 - Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 2 : règles générales et règles pour les ponts

[5] NF EN 1090-2+A1 - Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 2 : exigences techniques pour les structures en acier

[6] Q.Collette, I. Wouters, L. Lauriks, K. Verswijver – Les assemblages rivetés des structures historiques en fer et en acier : un siècle d'effervescences technologiques, structurelles et géométriques (1840-1940) – Matériaux & Techniques, vol.100, pp. 137-154, 2012

[7] OTUA – Bulletin Ponts Métalliques n°20 – 2000

[8] C.C.T.G. - Fascicule 4, titre IV : Rivets en acier, boulonnerie à serrage contrôlé destinés à l'exécution des constructions métalliques – Fascicule spécial n° 83-14 quinquiès du BO Urbanisme et logement, Transports, Environnement et qualité de la vie.

[9] NF E27-156 – Éléments de fixation – rivets destinés à l'exécution des constructions métalliques

[10] Guide « Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art » - Cerema - 2016

[11] Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes - Setra -2004

B3-3 Examen par ressuage
B3-4 Contrôle par magnétoscopie
B3-5 Contrôle par radiographie des soudures
B3-6 Contrôle de compacité des tôles et des soudures par ultrasons
C2-1 Suivi topométrique
C2-2 Mesure des déformations sous chargement (flèches)
C3-2 Mesures de déplacement - capteur électrique
C3-3 Mesures des rotations par nivelles et inclinomètres (ou clinomètres)
C3-5 Mesure de déformation par jauge
C3-6 Extensomètre mécanique amovible
C3-12 Courburemétrie
C3-17 Mesures de température par thermocouple, thermistance ou sonde

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

E3-3 : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

