ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UNE SECTION DE PONT MIXTE ACIER-BÉTON

CONTEXTE

Le présent document concerne les ponts à poutres en acier connectées à un hourdis béton par leur semelle supérieure, dont le fonctionnement relève de la mixité acier-béton.

Note : certains ouvrages anciens comportent des connecteurs mais n'ont pas été conçus et dimensionnés en tant que structure mixte.

Le fonctionnement mixte des sections est assuré par l'intermédiaire de connecteurs. Les particularités de ces structures sont principalement :

– la connexion, assurant le fonctionnement mixte de la structure ;
– la maîtrise de la fissuration de la dalle dans les zones où elle est tendue.

Trois textes réglementaires ont successivement encadré la conception de ces structures :

– les prescriptions du 25/03/1966 concernant le calcul des ouvrages mixtes acier-béton – ponts routiers de portée moyenne [1] ;
– la circulaire du 28/07/1981 relative au règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton [2] ;
– les Eurocodes et notamment la norme NF EN 1994-2 [3].

En complément aux règlements français, le Sétra a publié en 1995 un guide sur la maîtrise de la fissuration des hourdis de ces ponts [4].

Connexion acier – béton

Les règlements relatifs aux ponts mixtes ont toujours exigé des justifications de la connexion. Pour tous les règlements, la connexion est considérée comme parfaitement rigide et doit empêcher le glissement relatif du béton et de l'acier. Toutefois, pour la justification de l'accrochage de l'effort de cisaillement longitudinal dû aux effets isostatiques de la température et du retrait du béton, prévue dans chacun des règlements, une répartition des efforts sur une certaine longueur est admise aux extrémités des plots de hourdis.

L'influence du béton tendu n'est pas prise en compte dans les justifications.

La justification en fatigue de la connexion est introduite par la circulaire de 1981.

Les Eurocodes introduisent un critère de vérification complémentaire dans le cas de l'atteinte effective de la plastification des sections à l'état limite ultime (ELU). En effet, lorsque le comportement de la structure n'est plus élastique, la loi donnant le flux de cisaillement au niveau de la connexion en fonction des efforts généraux n'est plus linéaire. On assiste en général à une sollicitation importante de la connexion et à de fortes redistributions entre sections voisines nécessitant une évaluation particulière.

La détermination de la résistance des goujons et des cornières est fournie dans les Eurocodes 4 et dans la circulaire de 1981. La détermination de la résistance des arceaux est fournie dans le dossier pilote OM66 [5] et dans la circulaire de 1981. Lorsque le type de connecteur n'est pas décrit par un règlement, sa résistance de calcul, voire sa loi de comportement pourra être estimée par une modélisation aux éléments finis ou, plus rarement, sur la base de résultats d'essais.

Les cas signalés d'insuffisance de la connexion sont rares et semblent essentiellement concerner l'ancrage de la dalle aux abouts. On notera que des réserves de connexion existent (frottements, etc.) et que de ce fait des ponts non conçus pour fonctionner en mixte peuvent néanmoins fonctionner de façon mixte ou partiellement mixte.

Maîtrise de la fissuration

Les règlements relatifs aux ponts mixtes ont toujours intégré des justifications visant à maîtriser la fissuration du hourdis. On notera cependant différentes périodes :

Avant 1981, les prescriptions de 1966 exigeaient que le béton reste comprimé à vide. Le risque de fissuration était donc théoriquement relativement limité. Ces règles n'admettaient pas en principe de reprise de bétonnage transversale. Elles imposaient en outre une limitation de la contrainte dans les aciers passifs sous l'effet de la flexion générale.

La circulaire de 1981 admet la fissuration des dalles de pont en imposant une condition de ferraillage minimum et en limitant la contrainte dans les aciers. Ces règles n'ont cependant pas permis de maîtriser correctement la fissuration et on a pu observer fréquemment une fissuration en zone de moment positif où le béton est théoriquement comprimé.

Pour pallier ces insuffisances, un guide de recommandations a été publié par le Sétra en 1995. Ces recommandations portent sur la prise en compte du retrait au jeune âge et sur des mesures complémentaires pour limiter l'ouverture des fissures (mise en œuvre d'un ferraillage minimal sur l'ensemble de l'ouvrage et limitation supplémentaire de la contrainte de traction dans les aciers passifs).

Les Eurocodes prévoient de maîtriser la fissuration du béton par la mise en place d'un ferraillage minimum de non-fragilité et par la vérification de l'ouverture des fissures.

L'évaluation de l'aptitude au fonctionnement mixte d'une structure existante peut être réalisée pour :

– apprécier la déficience de la connexion en particulier aux abouts des plots de hourdis ;
– évaluer le fonctionnement mixte sous moment positif :
  – caractériser des dispositions non classiques (connecteurs non couverts par des règles ou normes, innovations : précontrainte, etc.),
  – valider le bon fonctionnement de la section mixte ;
– évaluer le fonctionnement mixte sous moment négatif :
  – évaluer l'influence de la rigidité des sections fissurées dans l'analyse globale,
– évaluer le comportement réel de la structure :
  – établir le diagnostic afin de définir un éventuel renforcement ,
  – caractériser la répartition transversale des charges ;
– évaluer le comportement d'une structure renforcée ou modifiée.

Cette analyse repose sur une évaluation par le calcul du fonctionnement des sections, croisée avec les résultats d'une instrumentation.

Dans certains cas particuliers (ouvrages très souples par exemple), il peut parfois être nécessaire de considérer une certaine participation des superstructures dans la rigidité pour analyser les résultats issus de la modélisation et de l'instrumentation.

TYPES DE CONNECTEUR

Différents types de connecteurs sont envisagés dans les textes réglementaires.

Les arceaux (Prescriptions de 1966, Circulaire de 1981)

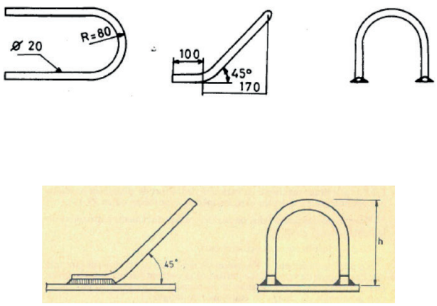


Figure 1 : Géométrie des arceaux
En haut : Prescriptions de 1966
En bas : Circulaire de 1981

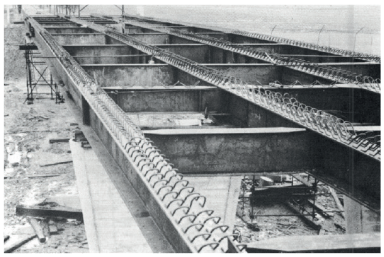


Figure 2 : Exemple de connexion par arceaux selon le dossier OM66

Les cornières (Circulaire de 1981, Eurocode 4)

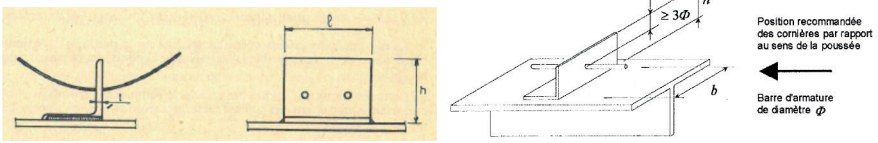


Figure 3 : Géométrie des cornières – À gauche : Circulaire de 1981 – À droite : Eurocode 4

Les goujons à tête ronde (Prescriptions de 1966, Circulaire de 1981, Eurocode 4)

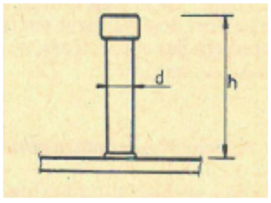


Figure 4 : Géométrie des goujons
(Circulaire de 1981 et Eurocode 4)



Figure 5 : Poutres équipées de connecteur goujons

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,
  - coupe transversale complète (y compris superstructures),
  - hypothèses de calcul de dimensionnement (règles de calcul en métal seul ou en structure mixte, retrait, température, dénivellation d'appui, typologie et justification de la connexion, 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 y compris calepinage de la connexion,
  - plan de ferraillage du hourdis,
  - modalités de réalisation du hourdis (préfabrication ou non, calepinage, phasage de bétonnage, de clavage, conditions météorologiques de mise en œuvre),
  - résultats des épreuves de chargement,
  - éventuelles anomalies lors des opérations de construction (dénivellations d'appui non maîtrisées, problème de mise en œuvre de la connexion, problème de formulation ou de mise en œuvre du béton, etc.).

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE

Objectif : détection des éventuels défauts liés à une déficience de la connexion et recherche des informations sur le fonctionnement mixte du tablier

- déficience de la connexion :
  - mouvement relatif longitudinal (surtout à l'about),
  - battement vertical du hourdis,
  - épaufrure du hourdis ;
- fonctionnement mixte :
  - comportement de l'interface acier – béton (cf. ci-dessus),
  - flèche anormale,
  - fissuration du hourdis, notamment en zone de moment négatif.

ÉTAPE 3 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES SECTIONS DE L'OUVRAGE ET AUSCULTATION

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

Objectif : caractérisation par le calcul du comportement des sections mixtes

Cette analyse préalable aux investigations sur site est réalisée notamment pour déterminer les sections pertinentes à 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 de la connexion et de la fissuration du béton armé en vue du diagnostic final.

Il s'agit de réaliser un recalcul de l'ouvrage en ciblant notamment le fonctionnement des sections représentatives en travée et sur appui, les déformations d'ensemble des poutres, le dimensionnement de la connexion et la maîtrise de la fissuration du hourdis.

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

Si le type de connecteur utilisé n'est pas couvert par un règlement, une modélisation aux éléments finis peut également être réalisée pour évaluer sa résistance et son comportement.

3.2 - Auscultation et instrumentation

Objectif : caractérisation in situ du fonctionnement mixte des sections

Le fonctionnement mixte sera analysé à la fois en termes d'ancrage des efforts dus à la température et au retrait aux extrémités des poutres mixtes, et de fonctionnement des sections mixtes sous moments positif et négatif.

Les étapes précédentes ont permis de déterminer les zones pertinentes à ausculter et/ou à instrumenter.

Auscultation de la connexion

Le cas échéant, une auscultation des organes de connexion peut être réalisée. Il s'agit de réaliser une fenêtre par le dessus, ce qui a l'inconvénient d'imposer une dépose locale de l'étanchéité ou éventuellement par le dessous (opération délicate). Le recours à l'hydrodémolition paraît à privilégier pour éviter de dégrader les organes de connexion.

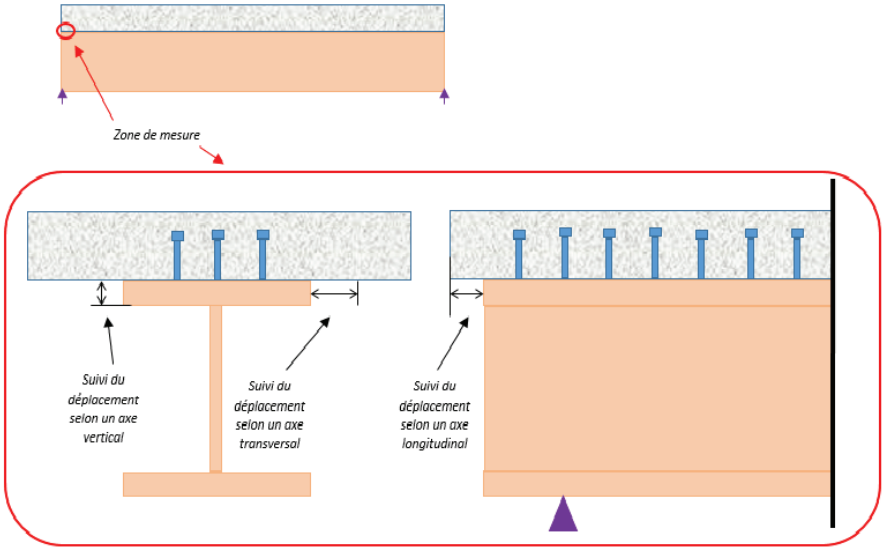
ÉTAPE 3
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES SECTIONS DE L'OUVRAGE ET AUSCULTATION

L'auscultation consiste ensuite à observer l'état du béton au contact des connecteurs (écrasement, fissuration, etc.), l'état des connecteurs eux-mêmes (fissures, déformation, etc.) et des cordons ou points de soudure (géométrie, fissuration). Des méthodes CND (ressuage, magnétoscopie, US, radiographie, ACFM) peuvent également compléter les observations visuelles en cas de doute.

S'agissant de contrôles destructifs, l'auscultation est accompagnée de réparations visant à reconstituer au mieux l'intégrité de la structure.

Instrumentation pour l'évaluation du comportement aux extrémités d'une poutre mixte

Il s'agit de réaliser une instrumentation par capteurs de déplacement positionnés à l'interface de la poutre et du hourdis selon la ou les directions pertinentes (axe longitudinal des poutres, axe vertical et le cas échéant axe transversal) pour quantifier le mouvement relatif hourdis béton / poutre acier. Le dispositif comprend également une instrumentation en température.



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 le glissement à l'interface (proportionnel à l'effort tranchant) peut être envisagé.

Pour apprécier le battement vertical de la dalle, des positionnements de charges localisées (roue ou groupement de roues) selon une grille locale à pas transversal et longitudinal fins pourront mettre en évidence l'influence des flexions locales du hourdis.

Instrumentation pour l'évaluation du fonctionnement global d'une poutre mixte

Il s'agit de caractériser le fonctionnement global du tablier mixte sous un chargement maîtrisé. Le dispositif comprend :

- une instrumentation en déformation de sections représentatives du fonctionnement mixte (jauges de déformation sur l'acier des poutres à au moins trois niveaux de hauteur, dont les membrures supérieure et inférieure, jauge ou extensomètre sur le béton *a priori* uniquement en intrados) ; dans le cas des structures hyperstatiques, au moins une section en travée et une section sur appui sont instrumentées ; on peut également comparer le fonctionnement de différentes poutres ;
- une instrumentation en température d'une section (au moins une mesure de température à mi-épaisseur du hourdis et une mesure de température de la poutre acier) ;
- une instrumentation en flèche des poutres (en général toutes les poutres) à mi-travée ou éventuellement une instrumentation en courbure (courburemétrie) ;
- le cas échéant une instrumentation en rotation des sections sur appuis intermédiaires ;
- le cas échéant une instrumentation de la variation d'ouverture des fissures de flexion générale du hourdis béton armé.

Un programme de chargement est établi (cf. étape 3.1) en s'inspirant des principes du guide Sétra « Épreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes » de mars 2004 [6]. On veillera à se limiter à un niveau de charge induisant des sollicitations inférieures à la valeur de résistance admissible en service.

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

Selon la conception et le comportement attendu de la structure, l'instrumentation de certains éléments transversaux peut s'avérer pertinente.

ÉTAPE 3
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES SECTIONS DE L'OUVRAGE ET AUSCULTATION

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

Objectif : confrontation des résultats de l'analyse théorique préalable avec ceux des auscultations et instrumentations in-situ

Le cas échéant, l'évaluation structurale pourra intégrer le comportement de la connexion ou plus globalement celui des sections mixtes résultant des mesures in-situ.

RÉFÉRENTIEL

[1] Circulaire d – 10 944 du 25 Mars 1966 - Prescriptions concernant le calcul des ouvrages mixtes acier – béton (Ponts routiers de portée moyenne).

[2] Instruction technique du 21 juillet 1981 relative au règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton annexé à la circulaire n" 81-63 du 28 juillet 1981.

[3] NF EN1994-2 - Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 2 : règles générales et règles pour les ponts.

[4] Sétra, Ponts mixtes - Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles, 1995.

[5] Sétra, Dossier pilote OM66,1966.

[6] Sétra, Epreuves de chargement des ponts-routes et passerelles piétonnes, 2004.

[7] Cerema, Guide « Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art », 2016.

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

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- 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 et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

E3-1 : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UNE SECTION DE PONT MIXTE ACIER-BÉTON

