

REPARATION DES OUVRAGES METALLIQUES

A- METHODES ET TECHNIQUES DE REPARATION

GÉNÉRALITÉS SUR LA DÉMARCHE DE DIAGNOSTIC ET LE PROJET DE RÉPARATION

> Toute réparation d'un ouvrage doit être précédée par un diagnostic de la structure et des désordres rencontrés. Dans ce cadre, un certain nombre de données doivent être regroupées :

- ✓ le type d'ouvrage et son fonctionnement ;
- ✓ la date de construction et de réparations ou renforcements réalisés s'il y a lieu ;
- ✓ la géométrie de l'ouvrage ;
- ✓ les caractéristiques des matériaux employés :
 - limite élastique,
 - charge de rupture,
 - allongement caractéristique de la ductilité,
 - soudabilité;
- ✓ les défauts existants observés lors de l'inspection détaillée :
 - fissurations (localisation, dimensions...),
 - corrosion : type de corrosion, appréciation des sections résiduelle...,
 - déformations,
 - défauts d'assemblage : fissuration de soudure, déconsolidation d'assemblage rivé ou boulonné, -
- ✓ les auscultations réalisées, s'il y a lieu, destinées à la compréhension des désordres et/ou du fonctionnement de la structure ;
- ✓ le recalcul de la structure s'il est réalisé.

> Ces éléments doivent permettre la compréhension des désordres, de leur apparition et le fonctionnement de la structure en l'état. L'analyse de ces éléments permet de conclure sur la ou les pathologies qui affectent l'ouvrage. Par exemple :

- ✓ enrouillement : défaut d'entretien de la protection anticorrosion ;
- ✓ corrosion avec réduction de section résistante : matériau sensible, exposition, mauvaise disposition constructive...
- ✓ fissuration : fragilité, chocs, sollicitations, fatigue matériau, fatigue des assemblages soudés...
- ✓ assemblages rivés et/ou boulonnés : déconsolidation, rupture d'éléments, défauts de conception, défauts d'exécution, modifications, excès de sollicitation...
- ✓

Le recalcul de l'ouvrage sera généralement réalisé avec les moyens actuels, mais il sera nécessaire de remettre en cause les hypothèses simplificatrices de l'époque de construction et intégrer les constats faits lors de l'inspection détaillée (ex : réduction de section suite à la corrosion...). Selon les cas, il sera nécessaire d'ajuster les charges et surcharges prises en compte et d'utiliser des modèles élaborés tels que calcul aux éléments finis pour apprécier les concentrations de contraintes qui peuvent être à l'origine de la formation de fissures.

Ainsi le projet de réparation pourra être élaboré en prenant en compte l'origine des désordres observés. Le projet devra également examiner le phasage des travaux et les répercussions sur la structure, par exemple :

- ✓ le remplacement d'un élément génère un report de charge sur le reste de la structure qu'il sera nécessaire de compenser provisoirement. De plus, l'élément remplacé, sauf disposition particulière, ne contribue pas à la reprise du poids propre de l'ouvrage ;
- ✓ le renforcement d'une section apporte une rigidité accrue et, par suite, une modification de la répartition des efforts

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DES STRUCTURES

L'ensemble des techniques et méthodes de construction sont utilisées en réparation, soit en atelier en préparation d'éléments, soit sur site pour raccorder ces éléments à la structure en place.

Les aciers modernes sont élaborés dans un objectif d'assemblage par soudage. Ce souci n'existait pas pour les matériaux métalliques anciens dont l'assemblage était réalisé par boulonnage et/ou rivetage. Depuis les années 1950 environ, les sidérurgistes ont développé les concepts de soudabilité métallurgique afin de faire évoluer les méthodes d'assemblage.

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude qui débute par la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement métallurgique afin d'apprécier le comportement au soudage, d'adapter les paramètres et, s'il y a lieu, d'exclure celui-ci au profit de techniques d'assemblage telles que le rivetage ou le boulonnage. Compte tenu du mode de fonctionnement différent de ces techniques d'assemblage, il n'est pas possible de les utiliser partiellement sur un même assemblage.

Remplacement d'éléments endommagés

De très nombreux ouvrages sont constitués par des structures triangulées intérieurement hyperstatiques et il est parfois possible de démonter une barre (diagonale, ou montant) sans mettre en cause la stabilité de l'ouvrage sous poids propre. Si l'on se contente de démonter une barre et de la remplacer sans précautions particulières, il est évident que la barre neuve ne participera pas à la résistance de l'ouvrage sous l'effet des charges permanentes. Il convient donc de mettre en place un dispositif provisoire capable d'équilibrer les efforts existant dans la barre à remplacer. Dans le cas d'une barre tendue, ce dispositif peut être facilement réalisé à l'aide de barres de brelage. L'utilisation de barres à haute résistance étant susceptible de fragilité, il convient d'éviter chocs, soudures....

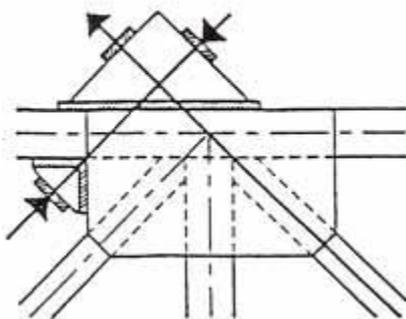


Fig. 1 : Principe d'ancrage de barres de brelage



Fig. 2 : Remplacement d'un montant d'une poutre treillis – dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de brelage

Dans le cas d'une barre comprimée, il est possible d'imaginer un dispositif similaire composé de butons et de vérins mais un tel système est encombrant et plus difficile à ancrer en ses extrémités.

Afin d'éviter tout effort et déformation parasites, il faut veiller à ce que la résultante des efforts du dispositif provisoire soit portée par la fibre moyenne de la barre.

Il n'est pas toujours facile de connaître avec précision l'effort exact existant dans une barre (charges permanentes mal connues, déformations imposées à l'ouvrage, phasage de construction inconnu ou mal connu, etc.). Pour compenser le manque d'informations, il est possible de procéder de la manière suivante :

- mise en charge du dispositif provisoire à l'effort donné par le calcul ;
- réalisation d'un repère d'alignement de la barre et de son gousset d'attache ;
- élimination des rivets d'attache de la barre sur son gousset et de tout élément pouvant gêner un mouvement relatif ;
- vérification qu'il n'y a pas eu de mouvement relatif barre-gousset, sinon ajustement de l'effort dans le dispositif provisoire de sorte à réaligner le repère.

En appliquant les mêmes principes il est possible de remplacer des goussets d'attache de barres (opération délicate nécessitant des vérifications par étapes) mais, ceux-ci assurant en général la liaison entre trois barres (deux diagonales et une membrure par exemple), il convient, soit de mettre en place un dispositif qui annule les efforts dans les deux diagonales simultanément (ce qui n'est pas toujours facile à réaliser), soit de procéder par étapes selon le phasage suivant (Fig.3) :

- reprise des efforts dans la diagonale A par un dispositif provisoire ;
- coupe du gousset en deux parties suivant la bissectrice des deux diagonales ;
- dépose du demi-gousset attachant la diagonale A ;

- mise en place d'un demi-gousset neuf ;
- mêmes opérations pour la diagonale B ;
- soudure des deux demi-goussets entre eux.

Afin de limiter les contraintes dues au retrait de soudage, les rivets voisins du joint ne seront mis en place qu'après réalisation de la soudure. Si cela n'est pas possible, la soudure sera remplacée par une éclisse rivée ou boulonnée.

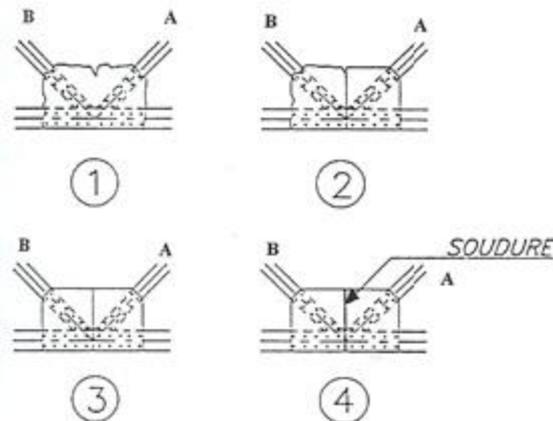


Fig. 3 : Remplacement de gousset

Ajout de matière

Il est possible de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cette possibilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement.

Si l'on excepte certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous poids propre. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées :

- installation de l'ouvrage sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour d'évidentes raisons de site ;
- mise en œuvre d'une précontrainte provisoire. Lorsqu'il s'agit de renforcer une diagonale ou un montant, l'installation et l'ancrage de barres de brelage ne pose pas de problèmes majeurs dans les cas courants. Lorsqu'il s'agit de renforcer une membrure de poutre, l'ancrage des barres ou des câbles de précontrainte pose des problèmes technologiques (difficulté pour ancrer un effort concentré en partie courante d'une membrure, problèmes d'encombrement aux abouts de l'ouvrage) ;
- recours aux dénivellements d'appuis : cette méthode, facile à mettre en œuvre dans de nombreux cas, voit son domaine d'application limité par la résistance des sections sollicitées par les transferts d'efforts.

L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure, ce qui provoque une modification de la courbe des moments fléchissant et il convient d'en tenir compte dans le calcul. Il ne faut pas oublier de vérifier et éventuellement de renforcer les goussets d'attache.

Il est inutile de prévoir des renforts en acier à haute limite élastique, les contraintes à ne pas dépasser en service normal étant limitées par la qualité des aciers en place.

> En ce qui concerne les dispositions constructives, il faut :

a) éviter les concentrations de contraintes et les efforts parasites en déladant les extrémités des pièces de renfort, en meulant les extrémités des cordons de soudure, en réalisant l'attache des pièces de renfort dans des zones où l'effort est aussi faible que possible, en respectant le tracé des lignes d'épures, etc. ;

b) éviter de créer des « pièges à eau » ; cette exigence est parfois en contradiction avec le de la position des centres de gravité. La figure ci-dessous illustre cette contradiction :

le renfort de la membrure supérieure modifie la position du centre de gravité de cette membrure mais ne gêne pas l'évacuation des eaux de pluie. Le renfort de la membrure inférieure présente le défaut inverse. Dans le cas où il n'est pas possible de concilier les deux exigences, il y a lieu d'éviter les pièges à eau et de réaliser un modèle de calcul tenant compte des excentricités des centres de gravité.

Cette disposition est à exclure si elle constitue un piège à eau et/ou à poussière. La figure ci-dessous présente le renforcement du pont de Douarnenez par des barres rectangulaires positionnées sous les membrures, entre les lignes de rivets.

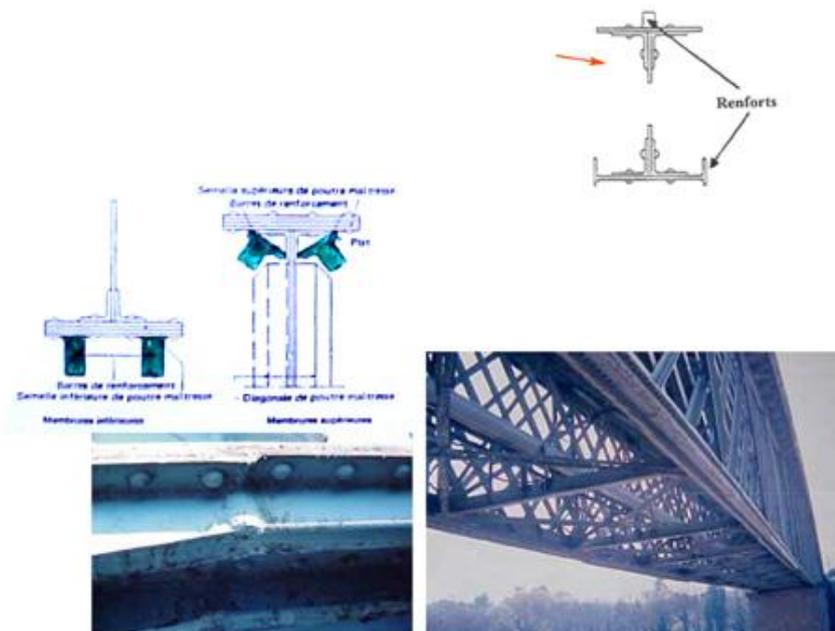


Fig. 4 : Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez)

Dans de nombreux cas, la résistance d'une barre (diagonale ou membrure) est limitée non par sa limite élastique mais par sa contrainte critique de flambement. Dans un tel cas, le problème est très simplifié puisqu'il n'est nécessaire ni d'annuler (ou de réduire) les contraintes à vide, ni d'assurer l'attache du renfort aux extrémités de la barre. Il convient toutefois de prendre les précautions élémentaires suivantes :

- éviter que le renfort constitue un piège à eau ;
- maintenir la position des centres de gravité ;
- empêcher les concentrations de contraintes en évitant les changements de section trop brutaux ;
- tenir compte de la nouvelle loi d'inertie dans le cas du renforcement d'une membrure.

L'ajout de matière peut aussi être réalisé par des éléments plats au niveau des âmes et des membrures. L'assemblage pourra être effectué par soudage, par rivetage ou boulonnage. La figure 82 présente différentes dispositions de renforcement par placage.

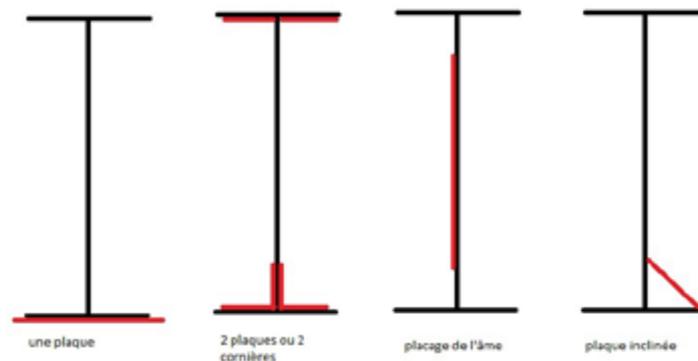


Fig. 5 : Renforcement par placage d'une poutre en I

Déconsolidation d'assemblages rivés

> Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrants et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux :

- ✓ soit par de nouveaux rivets au moins du diamètre immédiatement supérieur à ceux remplacés, posés avec soin, sous réserve du respect des règles de trusquinage (pincées...)
- ✓ soit, si l'on est dans l'impossibilité de poser de nouveaux rivets, par des boulons HR, à condition de remplacer tous les rivets constituant l'assemblage et de maîtriser le coefficient de frottement des surfaces en contact.
- ✓ soit, dans le cas où le nombre de rivets à remplacer est faible, par boulons calibrés,
- ✓ soit, par des boulons injectés.

L'alésage définitif avant la pose du rivet ou du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement.

Il arrive fréquemment que l'état des pièces se soit dégradé dans le temps en raison de l'ébranlement ou que les rivets soient mal posés. D'autre part, l'enlèvement des anciens rivets et la pose de nouveaux, si ces opérations ne sont pas réalisées dans les règles de l'art, fatiguent toujours quelque peu le métal des pièces à assembler (chocs, déformations). Si bien qu'un tablier métallique peut se trouver en plus mauvais état après réparation qu'avant. Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessitent une surveillance continue.

> Les réparations des ébranlements nécessitent toujours une étude préalable en vue de déterminer :

- ✓ s'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage (par exemple : établissement d'une continuité entre longerons, pose d'un raidisseur sous dispositif d'attache de voie),
- ✓ si le diamètre du rivet ou boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées.



Fig. 6 : Déconsolidation d'assemblage rivé avec rupture de rivet

Dans le cas de tabliers en acier doux ou en fer puddlé, des contrôles non destructifs peuvent être nécessaires pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures initiées autour des trous de rivets dans les parties non visibles (sur les âmes des longerons, sous les cornières membrures ou montantes par exemple).

La réparation des déconsolidations d'assemblages boulonnés HR nécessite une étude spécifique.

Eviter les zones de concentration de contraintes, améliorer le comportement à la fatigue

Le bridage des soudures, les variations brutales de géométrie, ... constituent des zones de concentration de contraintes et peuvent générer des initiations de fissure sous effets de sollicitations répétées (fatigue). Il convient d'adopter des dispositions constructives adaptées pour épanouir les concentrations de contraintes, tout particulièrement sur les matériaux métalliques anciens de soudabilité médiocre.

La figure 84 présente la fissuration d'une poutre d'ouvrage ancien sous l'effet de bridage de soudage au niveau des angles d'un mouchoir positionné en réparation d'un impact. La réalisation d'arrondi (rayon de 5 cm par exemple) aurait été de nature à améliorer cette réparation.



Fig. 7 : Fissuration par concentration de contraintes en zone de fort bridage

La figure 8 présente une réparation par ajout d'un gousset d'épanouissement au niveau d'une variation géométrique de la membrure inférieure. Les effets de concentrations de contraintes, amplifiés par le rail de

lancement interrompu dans la même section, ont entraîné la fissuration de la membrure inférieure du caisson à proximité de l'appui.

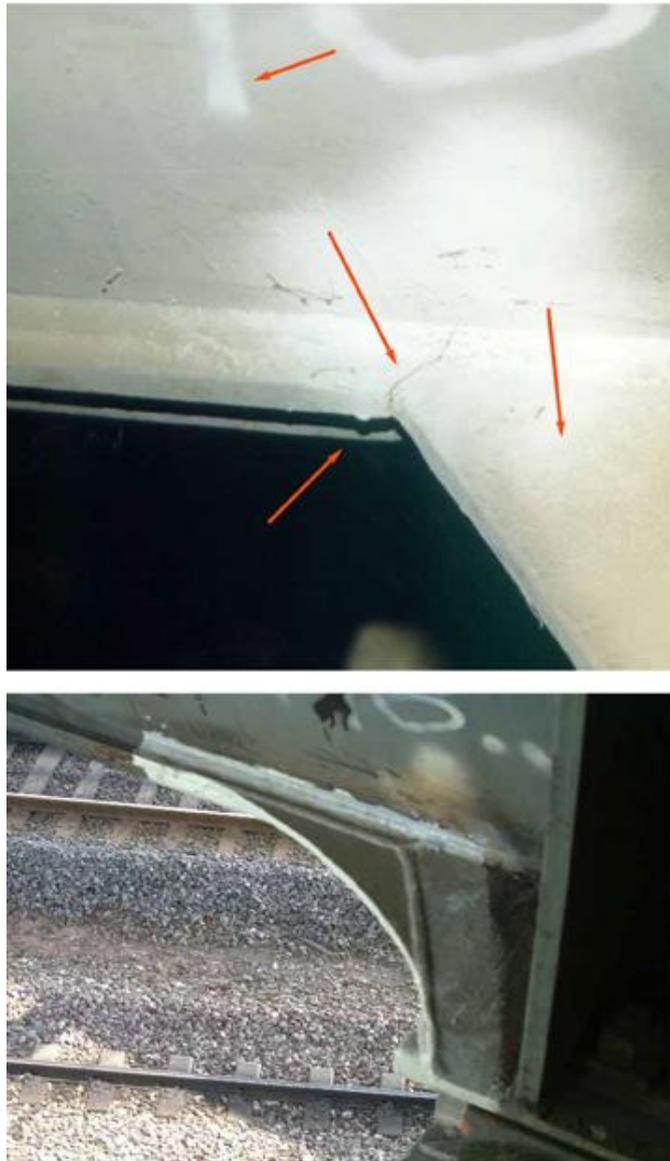


Fig. 8 : Désordre de fatigue et réparation avec gousset d'épanouissement

> Pour améliorer le comportement d'assemblages soudés, diverses techniques peuvent être mises en œuvre, par exemple :

- ✓ le meulage du bombé des soudures bout à bout,
- ✓ l'élimination de caniveaux par rechargement,
- ✓ la refusion TIG permet un raccordement adouci en pied de cordon d'angle ; il peut aussi être employé des électrodes à coulabilité améliorée,
- ✓ le shoot peening ou grenailage de précontrainte permet par écrouissage à froid l'inversion des contraintes résiduelles de traction dues au bridage.

Toutefois, ces techniques sont efficaces uniquement si elles sont appliquées au niveau de la zone d'initiation des fissures de fatigue.

La technique d'arrêt de fissure au moyen d'un trou peut être employée en phase provisoire ou définitive en accompagnement d'un renforcement par placage par exemple. Pour être efficace, le trou (ϕ 20 mm) doit être réalisé en pointe de fissure, ce qui nécessite généralement une localisation par ressuage. Le trou ne doit pas être rebouché, même si les lèvres de la fissure sont ressoudees. La figure 9 présente une réparation par placage d'une âme de longeron.

Cette opération nécessite la pose d'une fourrure pour compenser l'épaisseur des cornières. L'assemblage sera réalisé par rivetage après réalésage des trous et utilisation de rivets de diamètre supérieur

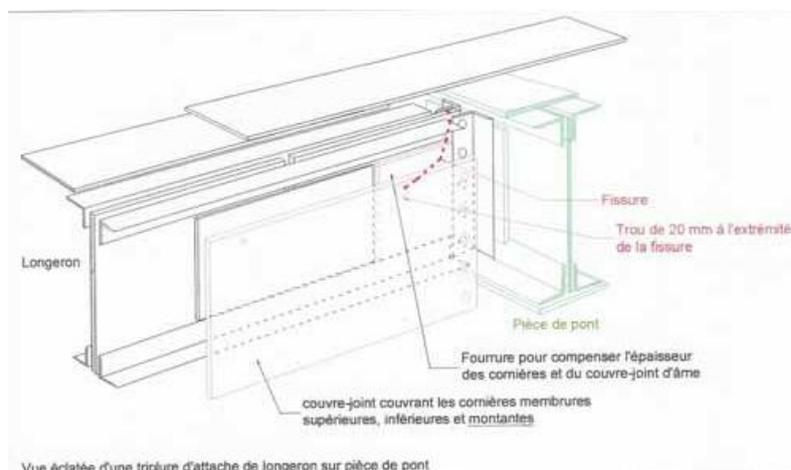


Fig. 9 : Réparation par placage d'une âme de longeron fissuré par fatigue

Eviter ou limiter la corrosion

Certaines dispositions constructives anciennes génèrent des espaces entre pièces qui rendent impossible l'application d'une protection anticorrosion. L'étanchéité pourra être obtenue par rechargement et/ou par la pose d'une fourrure soudée sur les tôles ou les profilés en place (figures 10 et 11). Cette technique présente des difficultés d'exécution et peut présenter certains risques de fissuration sur des aciers anciens non soudables. L'étanchéité peut aussi être obtenue par masticage mais nécessite une maintenance rigoureuse.

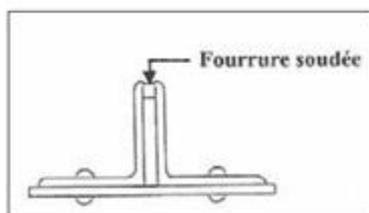
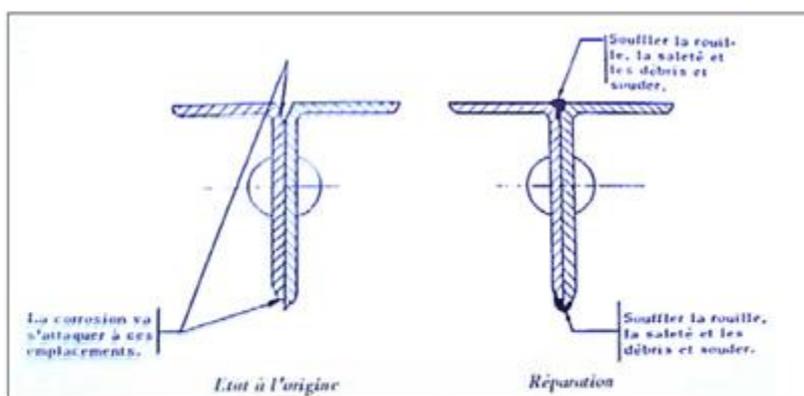


Fig. 10 : Schéma de rechargement par soudure
Fig. 11 : Schéma d'une fourrure soudée (bibliographie)

Sur les poutres jumelles l'utilisation de matériaux de remplissage tel que du béton se révèle inadaptée du fait du retrait et de la formation de zone de corrosion à l'interface acier – béton.

Utilisation des chaudes de retrait

La pratique des chaudes de retrait, essentiellement utilisée par les constructeurs métalliques en atelier, consiste à chauffer localement le métal en vue de réduire les déformations accidentelles ou non, résultant d'opérations antérieures, telles que le soudage, ou de produire volontairement des déformations impossibles à obtenir par un moyen mécanique.

Les chaudes de retrait génèrent des cycles thermiques et imposent des gradients de température susceptibles de modifier la structure métallographique du métal et de dégrader ses caractéristiques initiales. Le phénomène utilise les contraintes générées par les dilatations, les plastifications et les contractions produites par un cycle thermique localisé de chauffage et de refroidissement. La source de chaleur est généralement un chalumeau ou, pour les tôles minces, un inducteur.

Toute opération de chauffe de retrait est potentiellement une source de risques pour la construction métallique dans la mesure où, si le cycle thermique est mal maîtrisé, les caractéristiques des matériaux peuvent être affectées.

L'objectif essentiel de l'opérateur est d'obtenir une déformation satisfaisante sans pour autant dépasser une température maximale, variable selon la nuance de l'acier : les températures maximales de chauffe n'entraînant ni dégradation de la résistance mécanique ou de la tenue à la corrosion, ni augmentation de la fragilité, sont comprises entre 800 et 1 200°C, selon la nuance et l'épaisseur.

La norme NF EN 10025 et le prEN 1090-2 précisent des restrictions d'utilisation du formage à chaud pour les aciers thermomécaniques (NF EN 10025-4 paragraphe 7.4.2 .1) et trempés et revenus (NF EN 10025-6 paragraphe 7.4.2 .1). Le formage à chaud implique un chauffage homogène pleine épaisseur pendant le temps nécessaire à l'opération de formage. L'utilisation de chauffe de retrait correspondant à un chauffage ponctuel avec maintien de courte durée est possible pour les aciers thermodynamique et trempés – revenus, moyennant certaines précautions (prEN 1090-2, document OTUA / AFGC mai 1997 *Les aciers Thermomécaniques, une nouvelle génération d'aciers à hautes performances* -).

> Cette technique d'atelier, qui peut être proposée dans le cas de réparation sur site, de préférence localisée, devra mettre en œuvre une procédure appropriée pour s'assurer :

- ✓ de l'absence de modification de la structure métallographique du métal et de la dégradation de ses caractéristiques mécaniques.
- ✓ de la stabilité de la structure sous l'effet de l'affaiblissement des caractéristiques des aciers à température élevée avant refroidissement. La norme NF P 92-702 *Règles de calcul – Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier* présente les courbes types à prendre en compte.

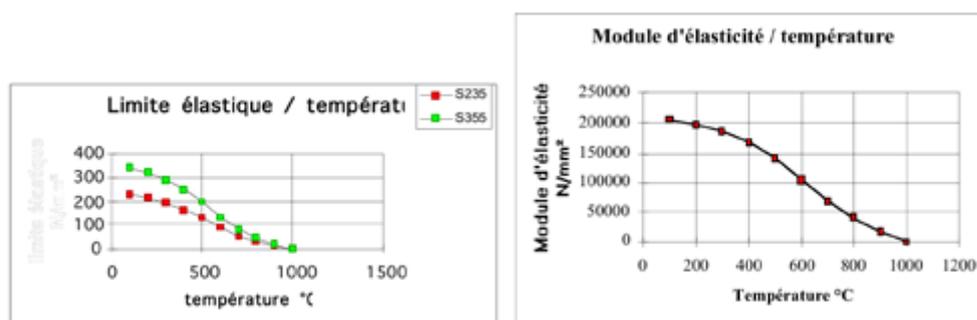


Fig. 12 : Comportement des aciers à température élevée

Appareils d'appui

En cas de désordre, les appareils d'appui doivent être remplacés ou remis en état et recalés après démontage et remplacement des éléments dégradés.

Parmi les appareils d'appui métalliques, les appareils à rouleaux multiples sont les plus vulnérables aux phénomènes de corrosion (feuilletage), notamment à proximité des joints de chaussée dont l'étanchéité laisse à désirer. Les ruptures de dents révèlent un fonctionnement anormal du système (effort horizontal excessif et/ou concentré en un point, dents mal conçues avec frottement important). Une forte inclinaison de rouleaux tronqués doit faire l'objet d'une prise de décision rapide.

A noter que le remplacement des appareils d'appui à balanciers et à rouleaux par un autre système d'appareils d'appui n'est pas toujours pertinent pour des raisons de modification de la répartition des efforts horizontaux sur les piles et culées ou des raisons architecturales.

Les normes NF EN 1337 – 4 et 6 proposent le marquage CE pour des appareils métalliques neufs ; on peut s'en inspirer pour établir un diagnostic selon les charges et l'état de l'ouvrage.