

REHABILITATION ET MAINTENANCE DES CONSTRUCTIONS METALLIQUES

PRINCIPALES PATHOLOGIES DES OUVRAGES MÉTALLIQUES

PRINCIPALES PATHOLOGIES DES OUVRAGES MÉTALLIQUES

Les principales pathologies sur ouvrages métalliques peuvent être regroupées sous les rubriques suivantes :

- La corrosion
- La fragilité
- La fatigue
- La dégradation des assemblages
- Le comportement au feu
-

1.4.1 LA CORROSION

Tout d'abord il convient de fixer une notion de vocabulaire en distinguant : enrouillement et corrosion.

L'enrouillement est une altération de la protection anticorrosion, alors que la corrosion d'une pièce métallique correspond à un stade caractérisé par l'oxydation du métal avec formation de rouille.

L'évaluation de la dégradation des surfaces peintes est établie en référence à la norme NF EN ISO 4628 : « Evaluation de la dégradation des surfaces peintes – Désignation des types courants de défauts », qui se compose de 6 parties.

En inspection d'ouvrages d'art métalliques la partie 3 « détermination du degré d'enrouillement » est prépondérante. Elle définit 6 degrés d'enrouillement : le degré 3 sert généralement de base pour engager une remise en état de la protection anticorrosion.

La vitesse de corrosion dépend de la classification du milieu environnant ; toutefois ces valeurs sont non homogènes et peuvent varier selon l'emplacement.

Le tableau suivant illustre cette classification pour un acier ordinaire.

1.4.1 LA CORROSION

Dégradation des métaux (corrosion)

* *Quelques chiffres...*

- aux USA, $\frac{1}{2}$ tonne d'acier est détruit à chaque heure par la corrosion
- dans les pays industrialisés, le coût de la corrosion s'élève à environ 4% du P.N.B.

* *La dégradation dépend...*

- du type de matériau
- de l'environnement dans lequel se trouve ce matériau

1.4.1 LA CORROSION

ISO 12944	IMPACT	INTÉRIEUR	EXTÉRIEUR
C1	Très faible	Bâtiments chauffés avec un air sain. Par exemple : bureaux, magasins, écoles, hôtels, etc.	Sans objet.
C2	Faible	Bâtiments non chauffés avec condensation possible, par exemple des entrepôts et des salles de sport.	Atmosphère avec un niveau de pollution faible. Par exemple, environnement rural.
C3	Moyen	Bâtiments de production avec humidité de l'air élevée et une certaine pollution de l'air, par exemple fabricants de produits alimentaires, brasseries, industrie laitière et blanchisseries.	Zones urbaines et industrielles, pollution modérée au dioxyde de soufre. Zones côtières avec faible teneur en sel.
C4	Élevé	Entreprises chimiques, piscines, ports, docks maritimes.	Zones industrielles côtières avec impact moyen du sel.
C5-i	Très élevé – industrie	Zones et bâtiments à condensation presque permanente et à degré de pollution élevé.	Zones industrielles avec humidité élevée et atmosphère agressive.
C5-m	Très élevé	Zones et bâtiments à condensation presque permanente et à degré de pollution élevé.	Zones côtières et offshores avec teneur élevée en sel.

1.4.1 LA CORROSION

Corrosivité de l'atmosphère		Vcorr initiale ($\mu\text{m.an}^{-1}$)	Vcorr stationnaire ($\mu\text{m.an}^{-1}$)
C1	très faible	< 1,3	< 0,1
C2	faible	1,3 - 25	0,1 - 1,5
C3	moyenne	25 - 50	1,5 - 6
C4	élevée	50 - 80	6 - 20
C5	très élevée	80 - 200	20 - 90

Tableau IX - Corrosivité de l'atmosphère, selon la norme NF EN ISO 9226, pour l'acier au carbone

1.4.1 LA CORROSION

La corrosion est un phénomène électrochimique qui se présente sous forme de piqûres, localisées ou généralisées.

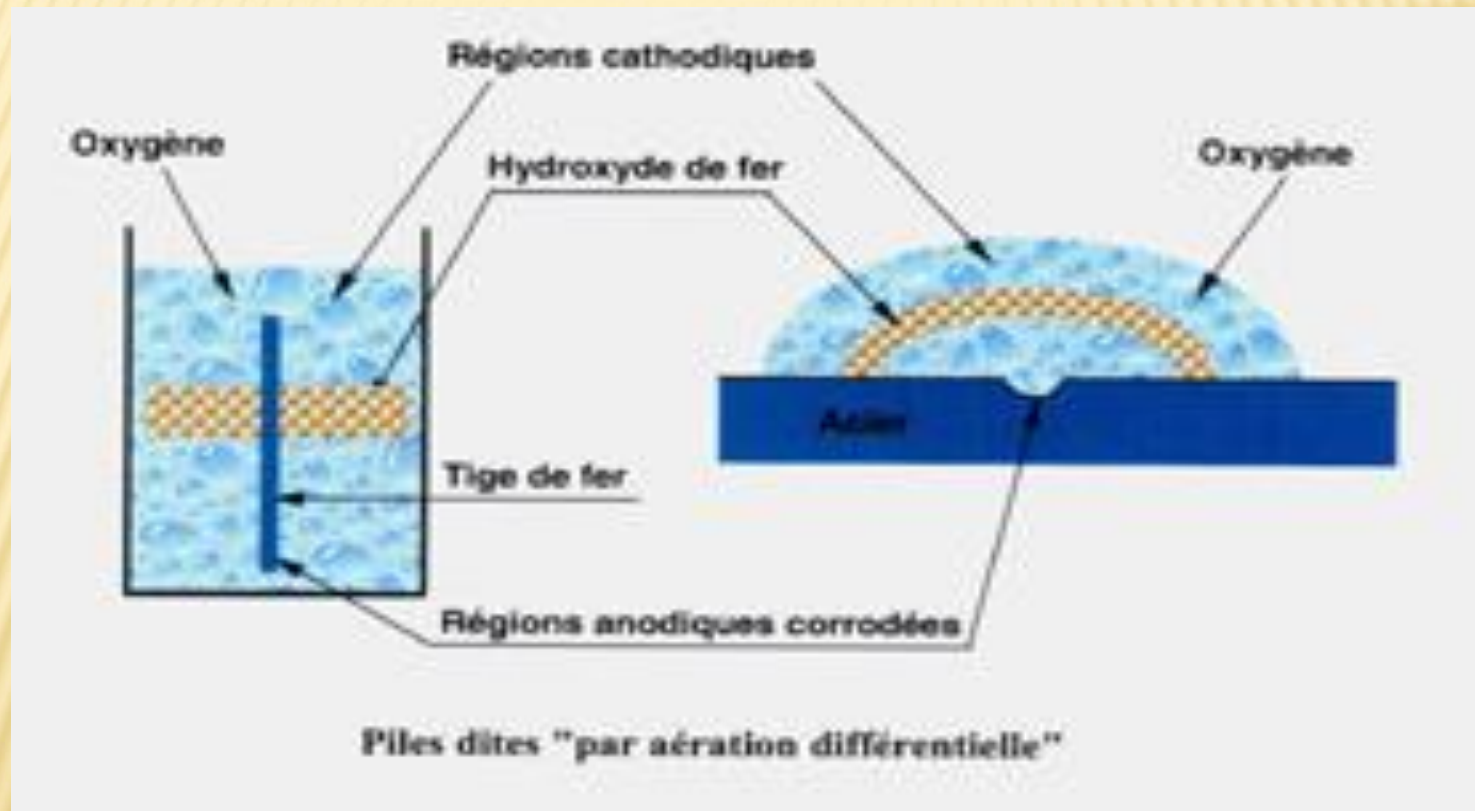


Figure 28 : Piles dites « par aération différentielle »

1.4.1 LA CORROSION

De façon simplifiée, les réactions chimiques de la corrosion sont :

- dans la zone cathodique : $O_2 + 2 H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$
- dans la zone anodique : $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$
- dans la zone intermédiaire : $Fe^{++} + 2 OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$
- par oxydation ultérieure : $2Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2 O_2 \rightarrow 2 Fe(OH)_3$

Il convient de noter que la rouille présente une expansion correspondant à 8 fois le volume de métal dégradé selon les oxydes et hydroxydes formés ; en conséquence, il convient d'apprécier les sections résiduelles de métal sain.

1.4.1 LA CORROSION

Les facteurs de corrosion sont :

- les dispositions constructives non adaptées
- les pièges à poussières
- les pièges à eau
- les éléments agressifs (ex. atmosphères marines, industrielles...)
- le manque d'entretien

1.4.1 LA CORROSION

> Les illustrations ci-après présentent quelques cas de corrosion observés sur ouvrages :



Figure 29 : Piège à poussière, maintien de l'humidité, végétation, foyer de corrosion

1.4.1 LA CORROSION



Figure 30 : Renforts de membrure inférieure formant piège à eau et / ou piège à poussière

1.4.1 LA CORROSION



Figure 31 : Enrouillement, et début de corrosion sur zone condensante en sous-face d'une membrure inférieure de pièce de pont

1.4.1 LA CORROSION

Cet aspect de corrosion
peut être la conséquence
de la formation de
structures
métallographiques
ferrite – perlite rubanées
suite à un laminage à
température basse



Figure 32 : Corrosion feuilletante d'une membrure inférieure d'une poutre d'un pont à poutrelles enrobé

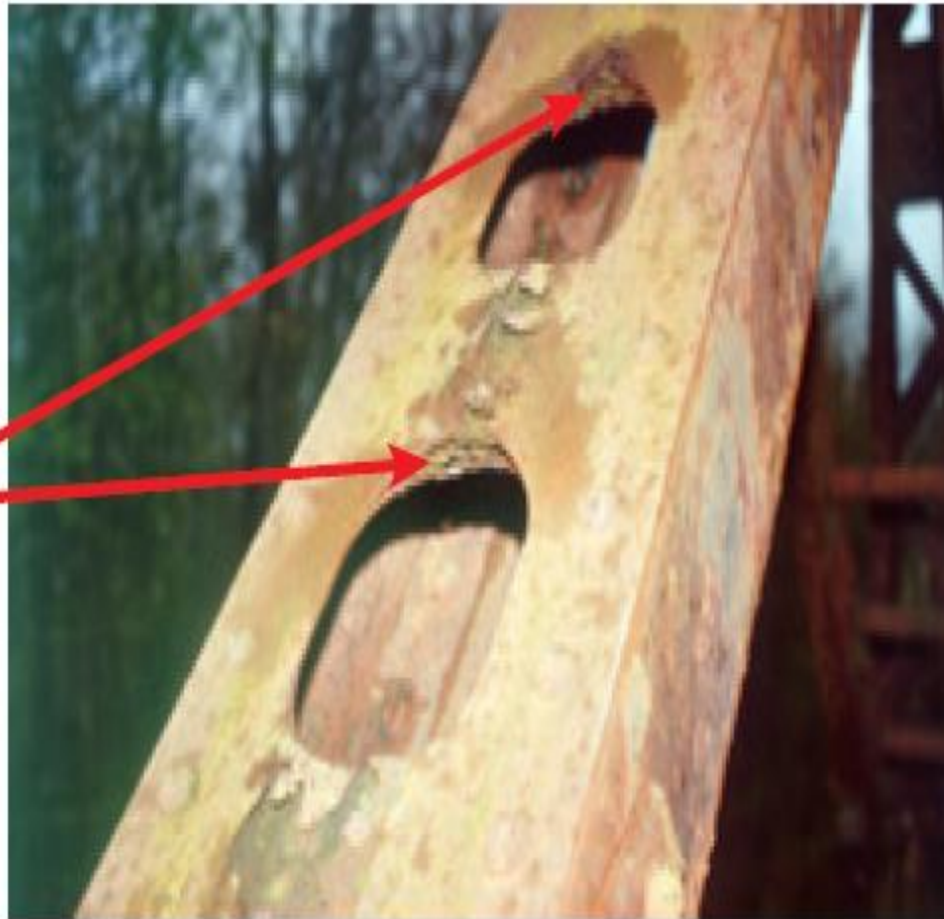
1.4.1 LA CORROSION



Figure 33 : Corrosion feuilletante d'un gousset sur un ouvrage des années 1960.

1.4.1 LA CORROSION

Dédoublure



Les dédoublures ont pour origine un chutage insuffisant du lingot lors de l'élaboration de l'acier (chutage : élimination de la tête de lingot où se concentrent les vides et impuretés)

Figure 34 : Corrosion foisonnante sur dédoublure sur une poutre caisson élégie

1.4.1 LA CORROSION

La rouille formée peut atteindre 8 fois le volume de métal dégradé



Figure 35 : Corrosion foisonnante entraînant une importante traction sous tête des rivets

1.4.1 LA CORROSION

Les aciers de décolletage peuvent être choisis parmi des nuances resulfurées (ce qui permet la fragmentation des copeaux), qui entraînent une mauvaise tenue à la corrosion. Ici, les écrous ont quasiment disparus par corrosion, alors que les tiges filetées ne sont pas ou peu dégradées



Figure 36 : Corrosion d'écrous

1.4.1 LA CORROSION

Une telle fissuration, située sous l'écrou, est indétectable en inspection visuelle d'ouvrage. En conséquence, il est préconisé d'assurer un environnement particulièrement sain autour de tels assemblages (éliminer les stagnations d'eau, et détritux divers...). Ces fissures sont généralement localisées au niveau du premier filet porteur, le plus sollicité

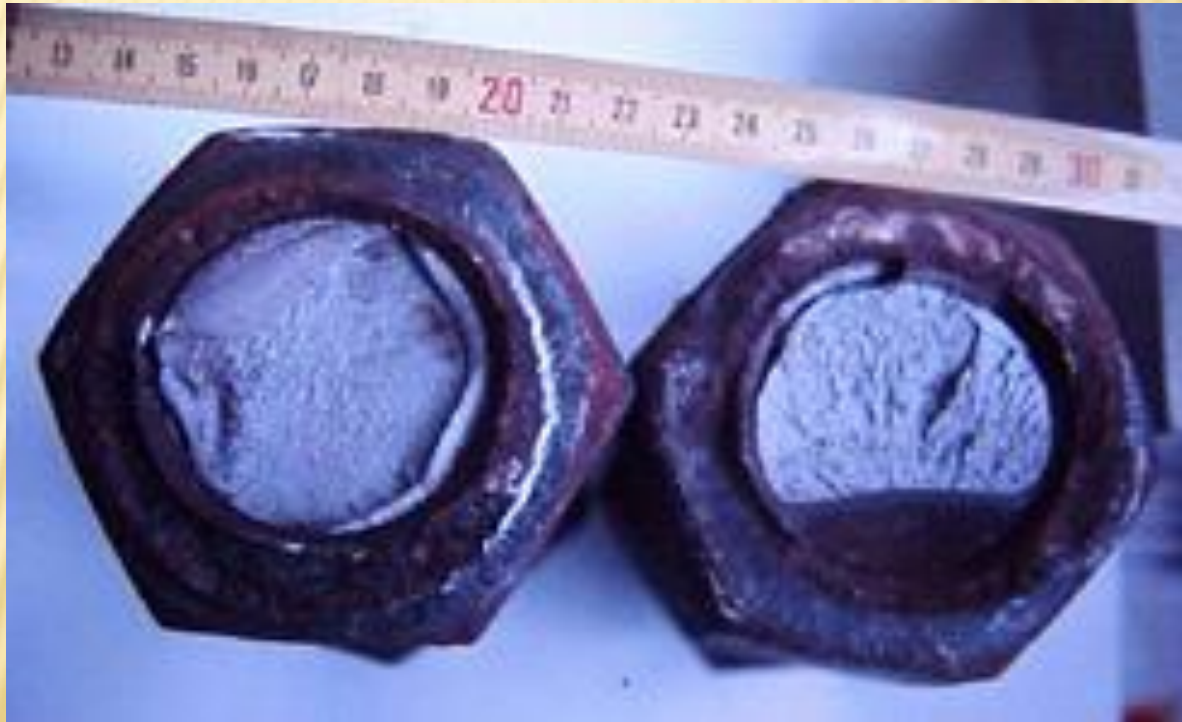


Figure 37 : Corrosion fissurante sur assemblage boulonné de tige d'ancrage

1.4.1 LA CORROSION

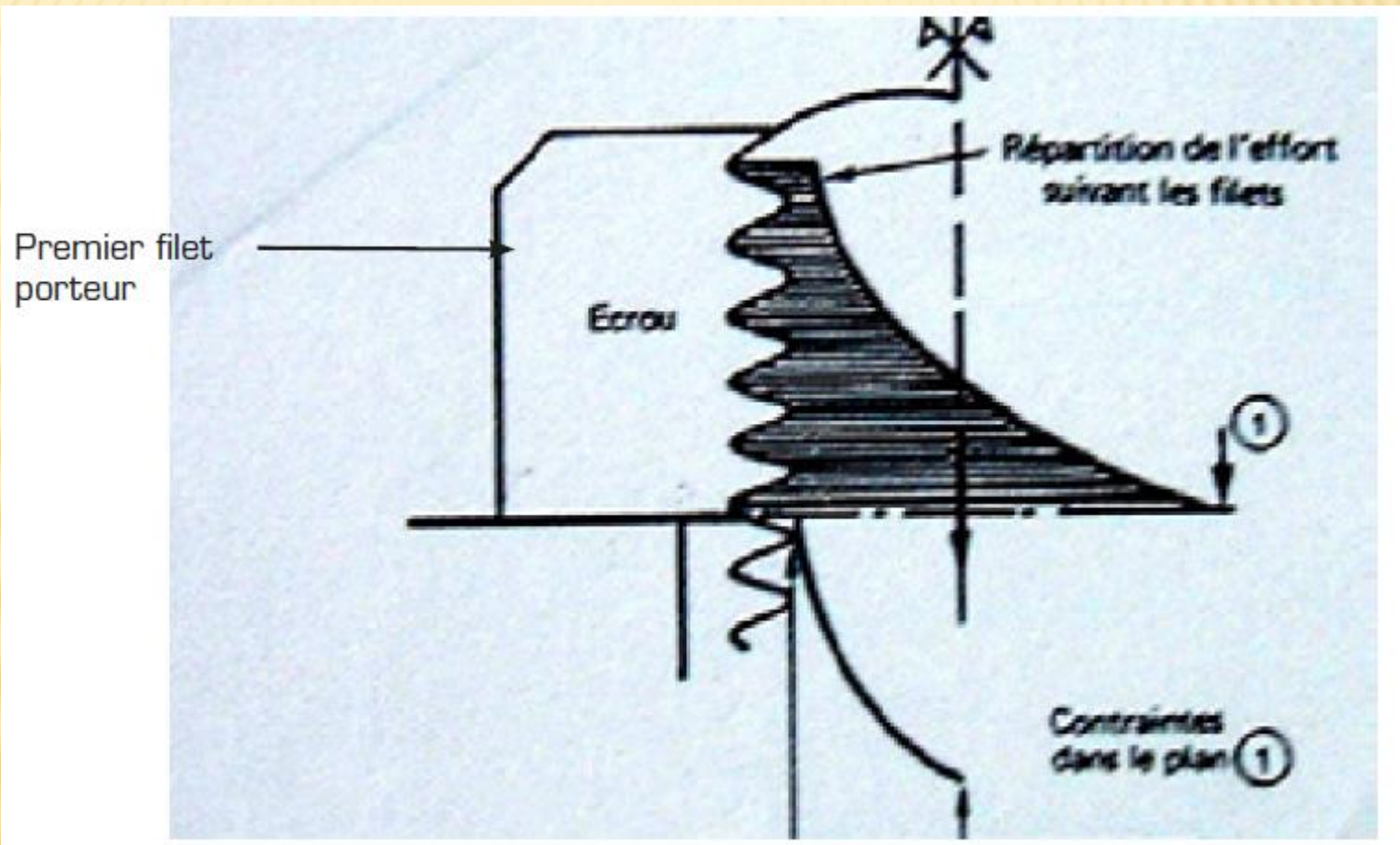


Figure 38 : contraintes dans un assemblage boulon écrou

1.4.1 LA CORROSION



Figure 39 : Corrosion des têtes de rivet, risque de perte de résistance à la traction sous tête

1.4.1 LA CORROSION



Figure 40 : Dégradation des têtes de rivet par corrosion

1.4.1 LA CORROSION



Figure 41 : Membrure inférieure corrodée latéralement, conservée après vérification par calcul et traitement anticorrosion.

1.4.1 LA CORROSION



Figure 42 : Dégradation, avec écrasement de la zone d'appui d'une poutre encastrée, affaiblissement par corrosion

1.4.1 LA CORROSION



Figure 43 : Corrosion de pièce noyée dans la maçonnerie. Perforation de l'âme, corrosion des cornières de membrures au contact de la maçonnerie

1.4.1 LA CORROSION

> Corrosion entre métaux

Les dispositions constructives non adaptées

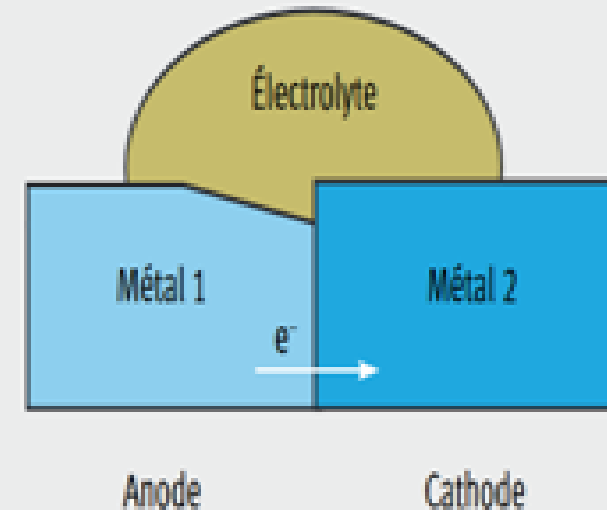
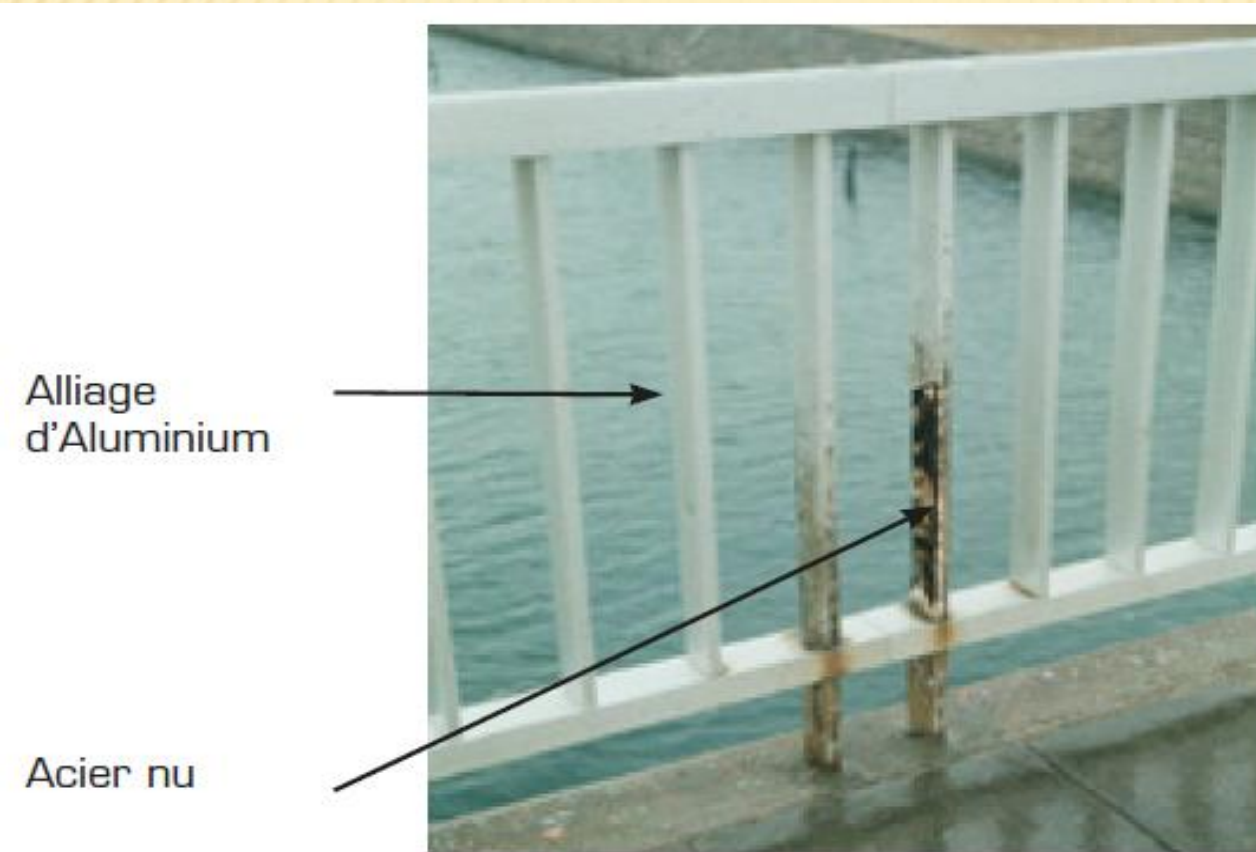


Figure 44 : Corrosion galvanique d'un garde-corps en alliage d'aluminium fixé sur montants « acier ».

1.4.1 LA CORROSION

> Corrosion entre métaux

En milieu humide et/ou salin formation de couple galvanique entre métaux

Les métaux les plus électronégatifs se dégradent au profit des métaux plus « nobles » ; dans le cas précédent du garde-corps, l'aluminium se dégrade au profit de l'acier

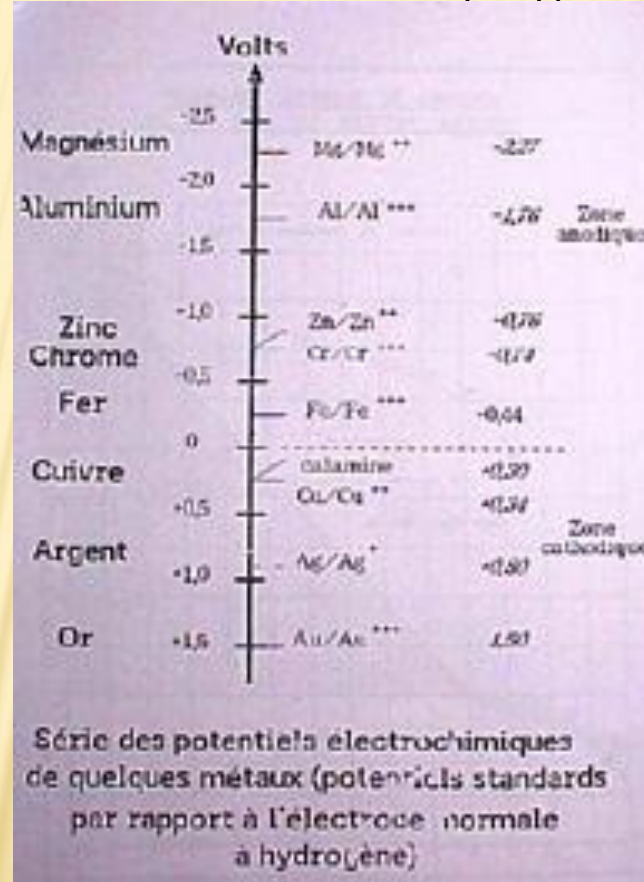


Figure 45 : série de potentiels électrochimiques de quelques matériaux (potentiels standards par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène)

1.4.2 LA FRAGILITÉ

La ductilité et, a contrario, la fragilité d'un matériau dépendent de nombreux paramètres, dont notamment le mode d'élaboration, la température et la vitesse de déformation.

Concernant la température, la plupart des matériaux cristallins sont fragiles à basse température et deviennent ductiles au-dessus d'une certaine température. Cette température est appelée la température de transition fragile-ductile.

En France le cas de rupture fragile le plus spectaculaire a été l'effondrement du pont de Sully-sur-Loire en janvier 1985.

Cet ouvrage, reconstruit en 1946, était un pont suspendu à câblerie discontinue en tête de pylône.

Il comportait 4 travées d'une centaine de mètres.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

Les câbles étaient reliés aux chariots en tête de pylône et aux ancrages par des étriers en barres filetées. Les suspentes étaient également constituées de barres en acier.

L'effondrement s'est produit le 16 janvier 1985 à 7h40 par une température de l'ordre de -23°C . Les 4 travées se sont effondrées dans le lit de la Loire, seule la travée de rive gauche est tombée sur la berge.

Les barres en acier de diamètre 56 et 60 mm présentaient des ruptures planes à fond de filetage.



Figure 46 : effondrement du pont de Sully-sur-Loire en janvier 1985

1.4.2 LA FRAGILITÉ

Les aciers en barre constituant étriers et suspentes présentait les compositions chimiques d'aciers durs à teneur en carbone élevée, élaboré par un procédé de type Thomas :

	Composition chimique - teneurs en %					
	Carbone	Manganèse	Soufre	Phosphore	Silicium	Azote
Etrier	0,55	0,52	0,035	0,06	0,06	0,014
Suspente	0,39	0,61	0,028	0,045	0,3	0,022

Tableau X : composition chimique – teneur en %



Figure 47 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre

1.4.2 LA FRAGILITÉ

> Température de transition ductile-fragile :

Si on réalise des essais de traction à basse température, on constate que la limite d'élasticité et la résistance augmentent, alors que l'allongement à rupture, l'allongement réparti et la striction diminuent. A une certaine température, la résistance est égale à la limite d'élasticité ; au-dessous de cette température, l'éprouvette casse à une contrainte appelée contrainte de rupture fragile.

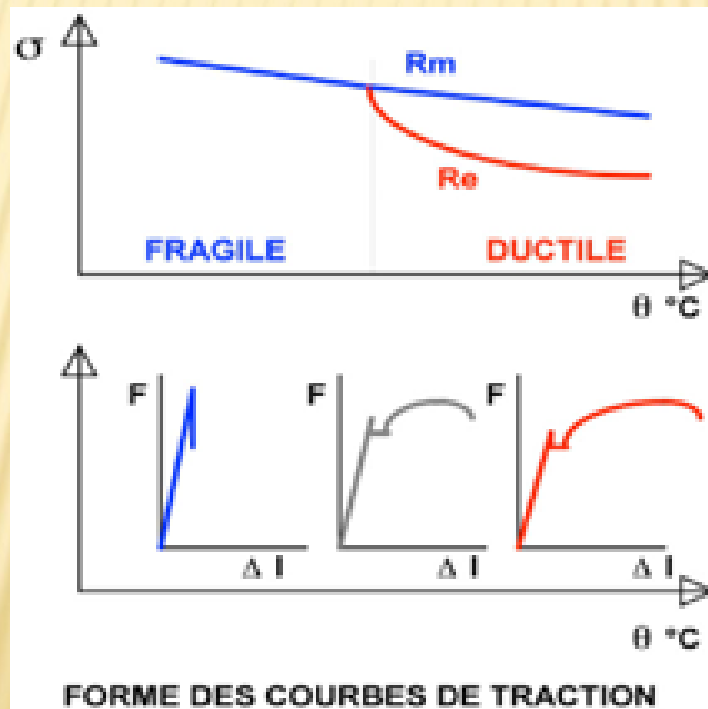


Figure 48 : Forme des courbes de traction en fonction de la température

1.4.2 LA FRAGILITÉ



Acier ductile : striction

Acier fragile : rupture plane

Figure 49 : Exemple d'essais de traction sur acier ductile et fragile

1.4.2 LA FRAGILITÉ

L'effondrement du pont de Sully-sur-Loire a entraîné une vaste campagne de vérification des ouvrages analogues afin de se prémunir du risque de rupture fragile ; ces concepts sont, maintenant, introduits dans les règlements de calcul tels que les Eurocodes.

> Autres exemples de rupture fragile :



Figure 51 : Rupture plane à fond de filet sur un élément en barre

1.4.2 LA FRAGILITÉ

> Autres exemples de rupture fragile :



Figure 52 : Fissures, amorces de rupture, suite à un choc de bateau sur acier fragile d'une membrure inférieure de pont.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

> Autres exemples de rupture fragile :



Figure 53 : Ruptures sur acier fragile par chocs de véhicules – acier des années 1925 environ.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

> Autres exemples de rupture fragile :



Figure 54 : Choc de véhicule sur un arc en fonte de 1903.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

Les phénomènes de fragilité se rencontrent plus particulièrement sur les fontes et les aciers de construction anciens effervescentiels élaborés selon le procédé Thomas.

Les facteurs aggravants étant la composition chimique par la présence d'éléments fragilisants (tels que teneur élevée en carbone, en éléments d'impuretés phosphore et azote), les chocs et les basses températures. Le soudage de ces aciers est délicat voire impossible.

1.4.2 LA FRAGILITÉ

La réglementation sur le sujet est relativement récente :

- 1986 : première recommandation CECM
- 1993 : ENV Eurocode 3 chapitre 9
- 1996 : Guide SETRA – SNCF – CTICM
- 2002 : EN Eurocode 3 partie 1-9 Fatigue

Les détails constructifs ont été classés selon leur résistance en nombre de cycles à variation de contrainte donnée.

1.4.3 LA FATIGUE

Compte tenu de la réglementation récente de ce phénomène, les ouvrages soudés de construction antérieure à celle-ci sont susceptibles de présenter cette pathologie.

Elle concerne les constructions soudées dont les assemblages présentent des conditions de contraintes internes élevées (bridage des soudures) en plus des sollicitations, mais peut également affecter des pièces présentant des variations géométriques brutales avec ou non découpe formant concentrations de contraintes.

> Les illustrations suivantes présentent des cas de fissuration par fatigue :

1.4.3 LA FATIGUE



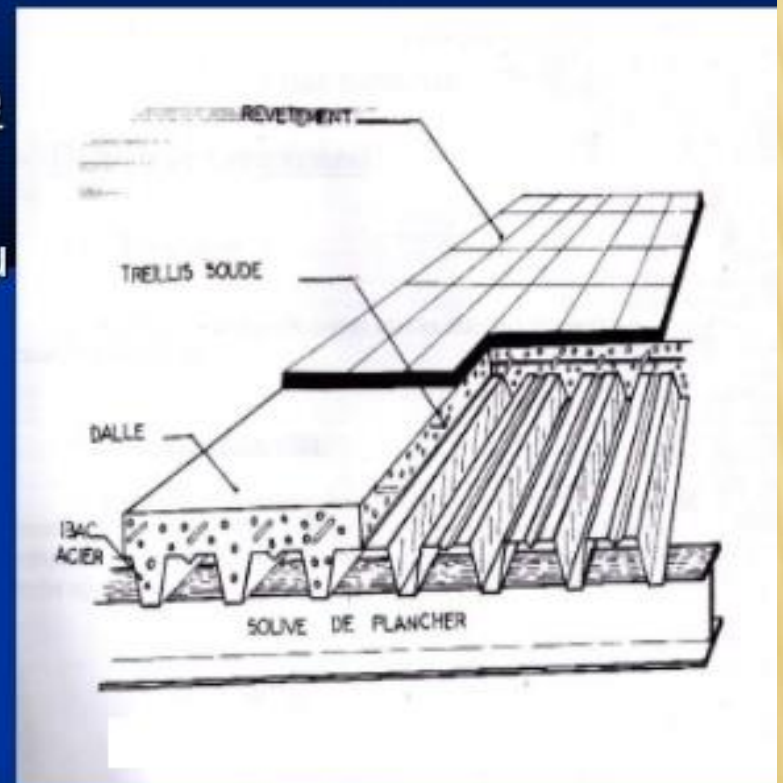
Figure 57 : Fissuration par fatigue de tôle de platelage sous l'effet de la circulation – ici platelage de 10 mm sur autoponts.

1.4.3 LA FATIGUE

-Exemple de planchers métalliques :

- Plancher à platelage métallique

Ce plancher est formé de mince couche de tôle nervurée, simple ou doublée recouvertes de béton ou d'un autre matériau assurant la répartition des charges



1.4.3 LA FATIGUE



Figure 59 : Fissure frontale d'une semelle additionnelle de membrure inférieure de poutre

Les dispositions constructives ont évoluées afin de réduire les variations brutales de géométrie :

1.4.3 LA FATIGUE

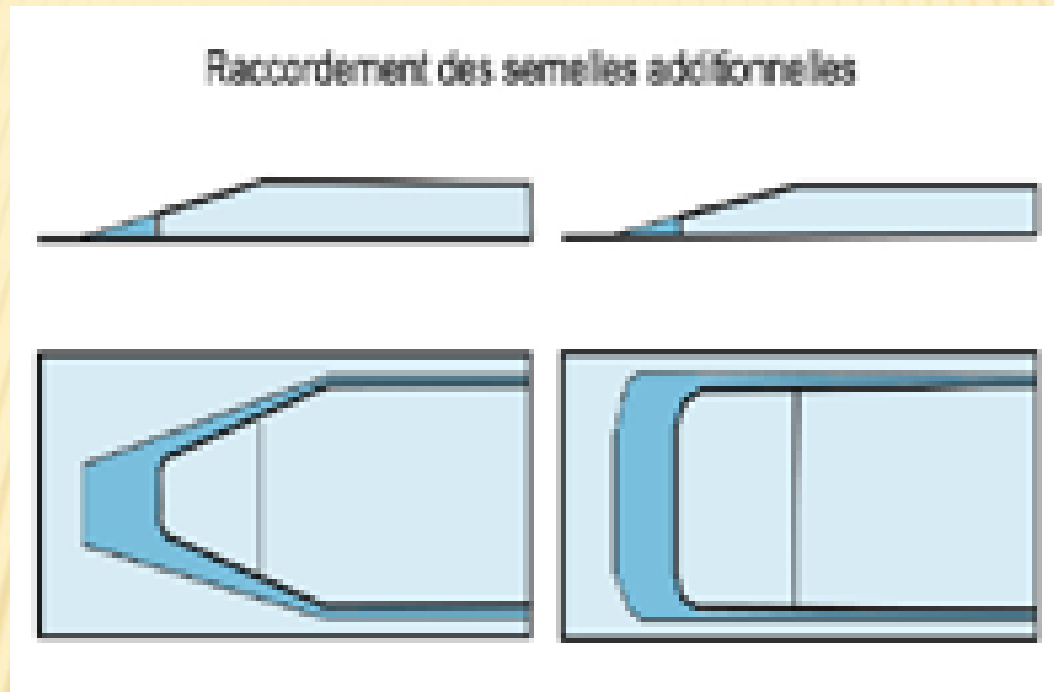


Figure 60 : raccordement des semelles additionnelles recommandé.

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES

La déconsolidation des assemblages boulonnés, rivés se matérialisent par des mouvements entre pièces (jeu d'assemblage) souvent mis en évidence par la rupture du film de protection anticorrosion.

Ces observations peuvent être localisées à un ou plusieurs boulons ou rivets, ou encore entre les pièces de l'assemblage. L'évolution du phénomène passe par les stades :

1. La rupture du film de peinture autour du boulon ou rivet ou assemblage
2. Un léger ressuage d'oxyde sur la peinture
3. Le mouvement de l'élément
4. La rupture d'un ou plusieurs rivets ou boulons

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES

La déconsolidation des assemblages boulonnés, rivés se matérialisent par des mouvements entre pièces (jeu d'assemblage) souvent mis en évidence par la rupture du film de protection anticorrosion.

Ces observations peuvent être localisées à un ou plusieurs boulons ou rivets, ou encore entre les pièces de l'assemblage. L'évolution du phénomène passe par les stades :

1. La rupture du film de peinture autour du boulon ou rivet ou assemblage
2. Un léger ressuage d'oxyde sur la peinture
3. Le mouvement de l'élément
4. La rupture d'un ou plusieurs rivets ou boulons

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES



Figure 61 : Jeu sur assemblage boulonné mis en évidence par la rupture du feuil de peinture et apparition de la couche de minium de plomb

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES



Figure 62 : Différents stades de déconsolidation d'un assemblage rivé

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES

Avec une déconsolidation, les mouvements entraînent un risque d'ovalisation des trous, ce qui nécessite en réparation de procéder à un réalésage au diamètre supérieur. L'ovalisation peut également accompagner l'initiation de fissures.

Sous efforts excessifs, les ruptures peuvent se produire par cisaillement des rivets ou boulons ou par arrachement (dépassement de la résistance en pression diamétrale)



Figure 63 : Effet de cisaillement sur un corps de rivet

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES



Figure 64 : Rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale sur une charpente

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES



Figure 65 : Sur ouvrage d'art, rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale pour l'âme, par excès de traction pour le couvre-joint de la membrure inférieure.

1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES



Figure 65 : Sur ouvrage d'art, rupture par dépassement des efforts en pression diamétrale pour l'âme, par excès de traction pour le couvre-joint de la membrure inférieure.

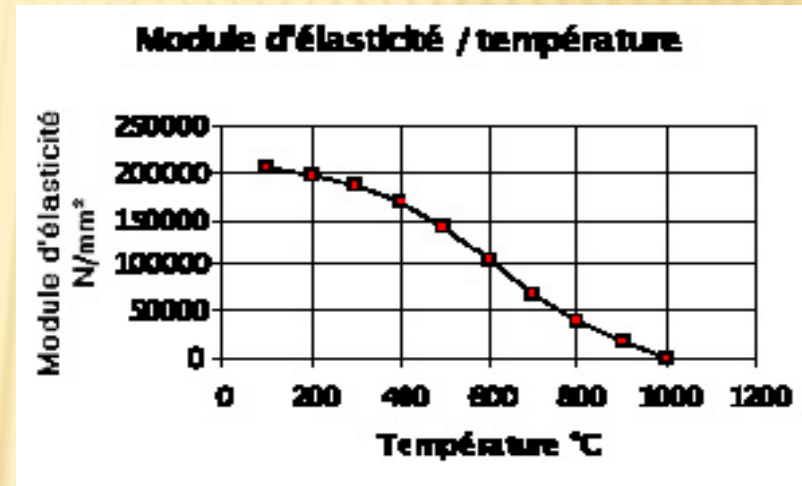
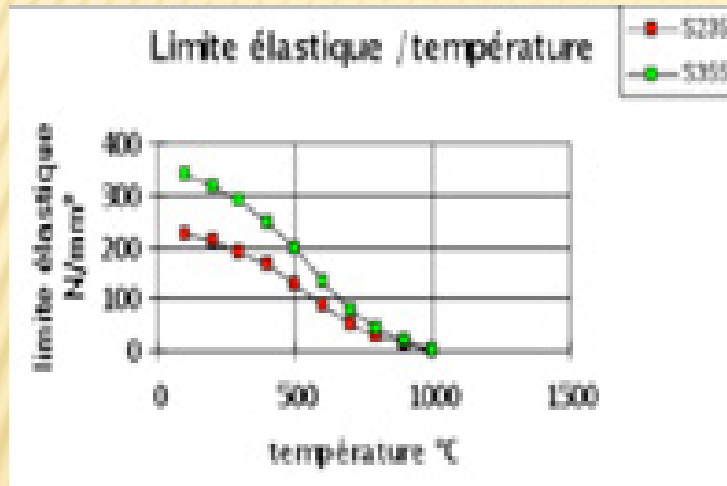
1.4.4 DÉCONSOLIDATION DES ASSEMBLAGES

La pathologie des assemblages soudés, outre les défauts de construction qui doivent être préalablement éliminés, est principalement liée au comportement en fatigue. Quelques cas particuliers, tels que l'arrachement lamellaire et le dédoubleage des tôles, peuvent apparaître en cours de travaux de soudage sur des aciers des années 1960 à 1980 environ.

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

Sur ouvrages existants, le comportement au feu est lié à l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température et du maintien en température.

Les règlements donnent l'évolution de celles-ci :



Figures 66 et 67 : Evolution des caractéristiques mécaniques des aciers en fonction de la température

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

- A un niveau de 500 °C, l'acier présente des caractéristiques diminuées sensiblement de moitié. La stabilité de la structure est donc fonction de ces valeurs, avec toutes les conséquences de l'élévation en température, dilatations, blocage sur appui ...
- A 723°C, l'acier change de structure cristallographique et des transformations métallurgiques peuvent intervenir ; celles-ci sont réversibles mais des phénomènes, tels que le refroidissement rapide, peuvent entraîner des effets de trempe localisée.
- Après refroidissement, si la température atteinte n'a pas entraîné de transformation, les caractéristiques d'origine sont retrouvées à quelques effets de diffusion atomique près.
- Le point important est de pouvoir caractériser la température atteinte. Les dégradations de la protection anticorrosion sont souvent un bon indicateur de celle-ci.

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

> Quelques cas d'ouvrages soumis à incendie :



Figure 68 : Pont routier en Alabama USA – 5 janvier 2002 – incendie d'une citerne d'hydrocarbures.

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

> Quelques cas d'ouvrages soumis à incendie :



Figure 69 : Pont sur le Mungo – Cameroun – 2 juillet 2004 – incendie d'un camion-citerne d'hydrocarbures

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

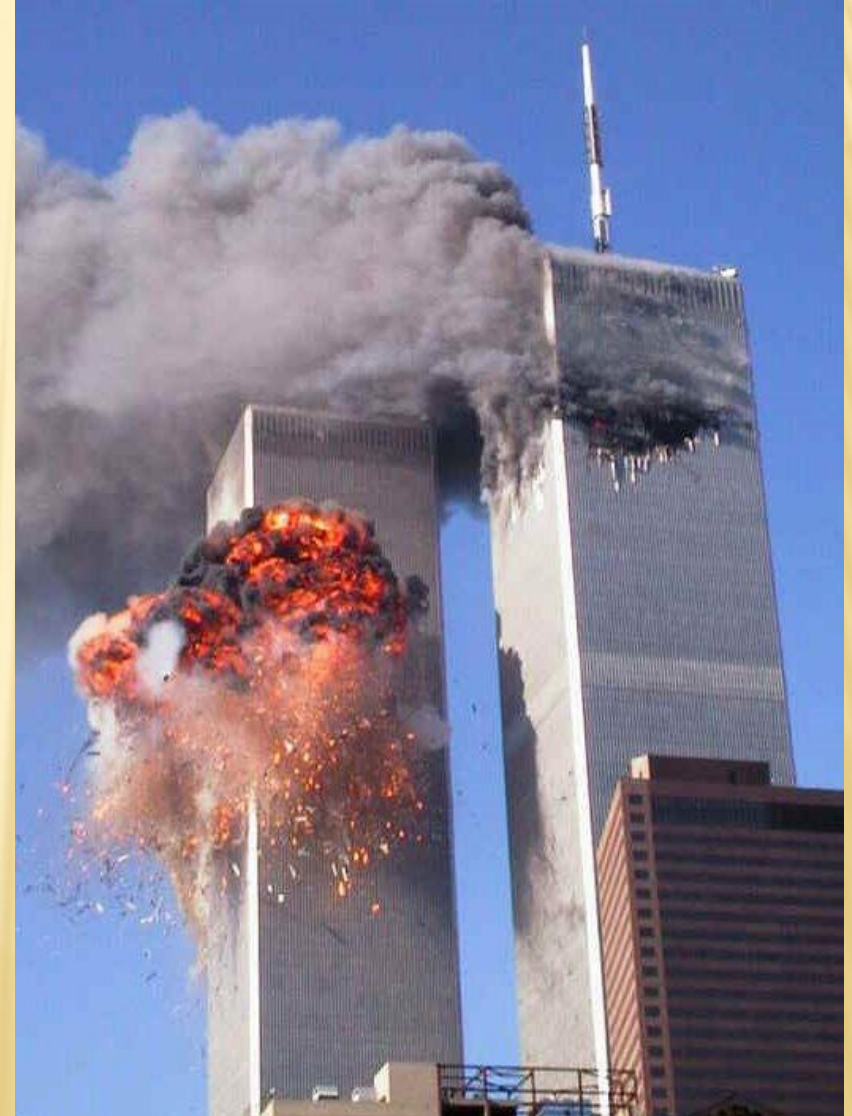
> Quelques cas d'ouvrages soumis à incendie :



Figures 70 et 71 : Pont Mathilde Rouen – 29 octobre 2012 – accident d'un camion-citerne sur l'ouvrage et propagation de l'incendie sous l'ouvrage.

1.4.5 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

> Quelques cas d'ouvrages soumis à incendie :



1.4.6 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 72 : Voilement d'âme en cours de lancement.

1.4.6 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 73 : Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité dans le plan

1.4.6 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 74 : Flambement de membrure supérieure de la poutre de rigidité hors du plan

1.4.6 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 75 : Choc de véhicule sur ouvrage moderne – déformations de la membrure inférieure et de l'âme de poutre.

1.4.6 AUTRES PATHOLOGIES



Figure 76 : Effondrement par fait de guerre d'un pont à haubans.