



Durabilité des structures métalliques

Fatigue Design*

Application aux suspentes

J. Berthelley



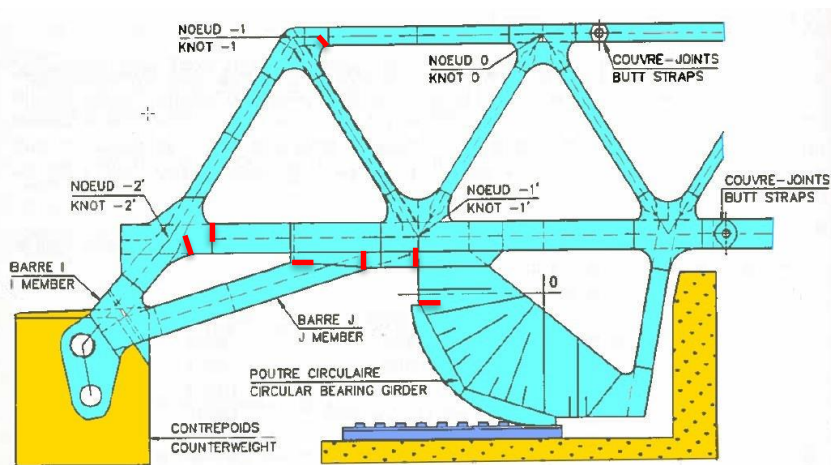
Direction technique
infrastructures de transport et matériaux

Design = Conception, calcul, surveillance et entretien

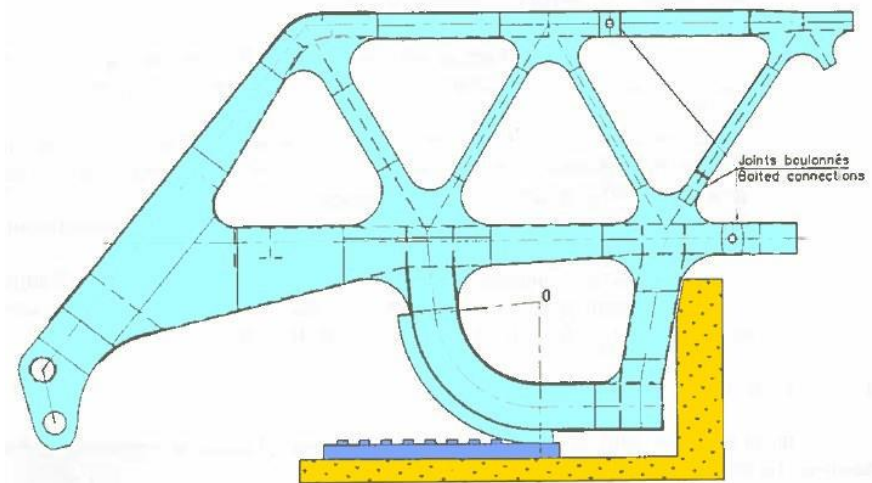
Pont mobile François Ier au Havre



Remplacement de la culasse (Richard-Ducros)



Ancienne culasse des '70



Nouvelle culasse

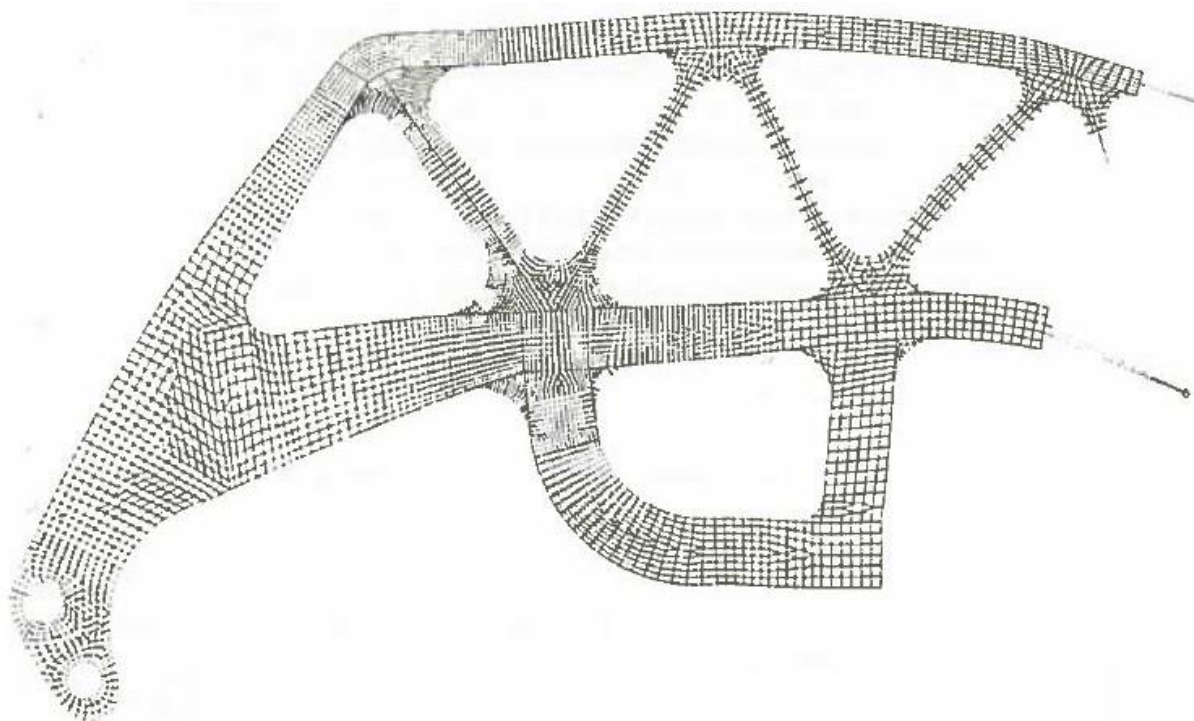
Nombreuses fissures de fatigue : Renforcements puis remplacement

Rappel historique : Pratique jusqu'en 1987

Maintenance des ouvrages anciens

Évaluation des facteurs d'intensité des concentration de contrainte :

- 1- par des jauges sur la structure réelle en place (calibrage)
- 2- par des modèles aux éléments finis appropriés sur l'existant et le projet de remplacement



Pratique jusqu'en 1987

Maintenance des ouvrages anciens

1983 A8 Échangeur nord de Cannes

Pas de calcul en fatigue exigé, mais :
Pièces de pont assemblées
avec goussets arrondis anti- fatigue



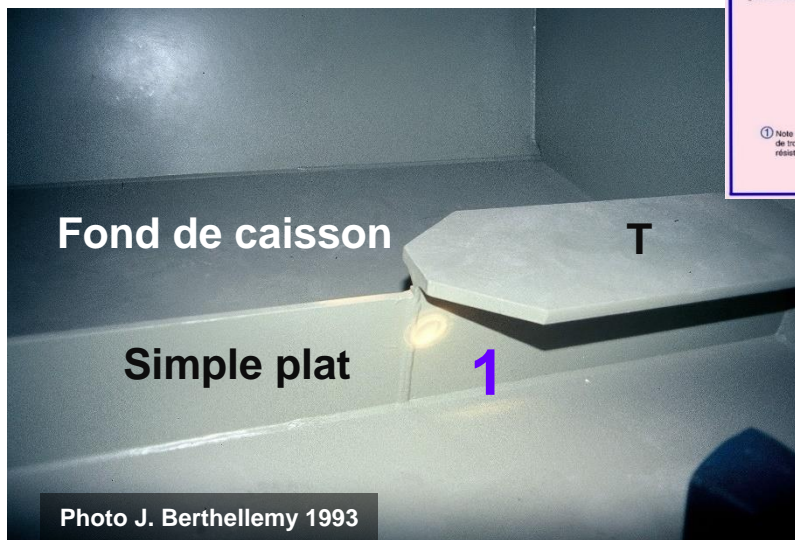
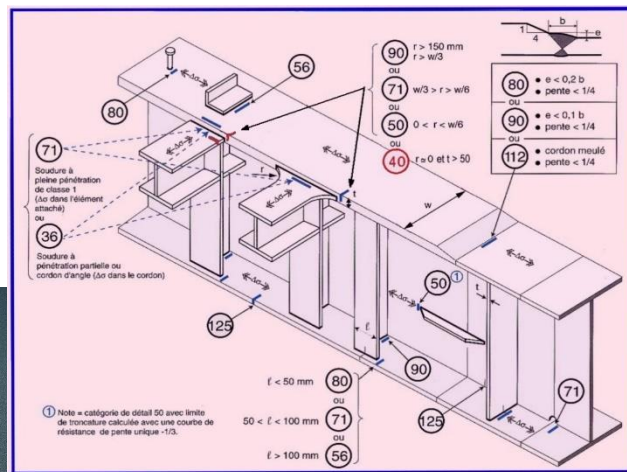
Pratique jusqu'en 1987

Conception des ponts neufs

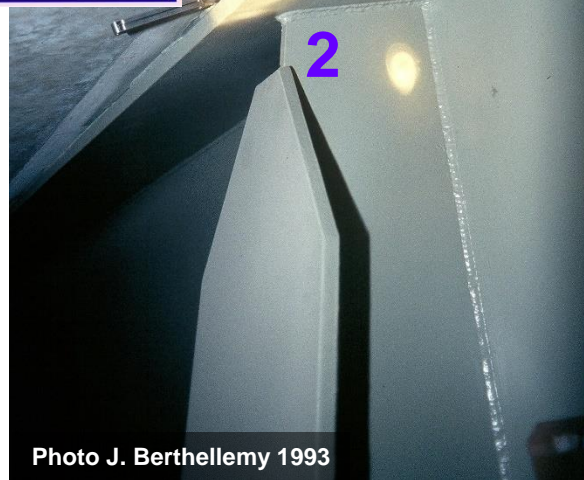
Recours à la méthode des FEM n'est pas encouragé dans les '90 car ...
 Tout détail est supposé trouver exactement sa case dans le tableau des
 dispositions classées ...
 au moins 90% des cas.

... ce qui couvre

Un des premiers ponts
 « calculés » en fatigue



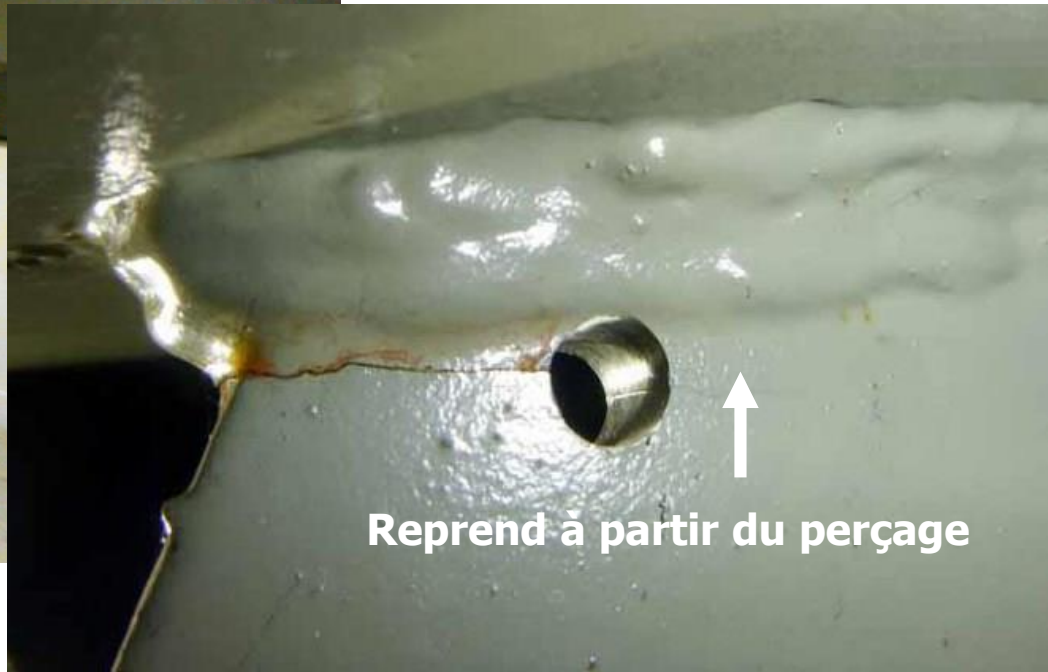
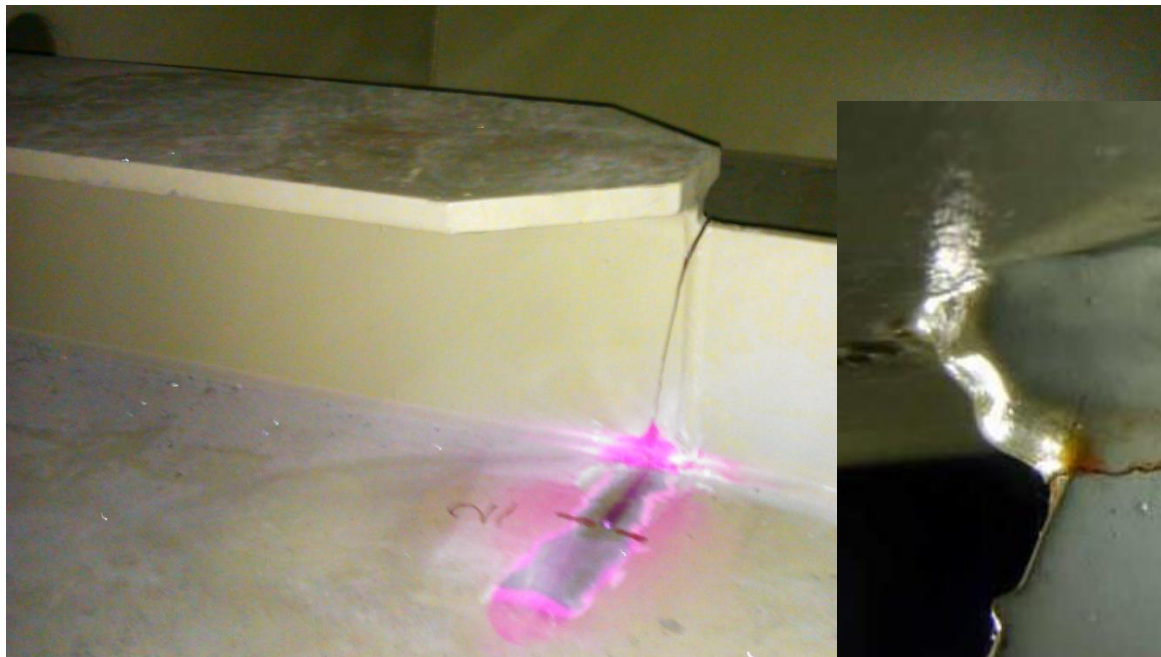
Guide de 1996
 excellent par ailleurs



... arrêt de T non classé,
 et donc non calculé

Errements entre 1987 et 2011

Les deux fissurations annoncées sont découvertes en 2014 et en 2015



La photo présente la fissure ayant le plus avancé dans le fond de caisson, avant d'avoir été découverte.

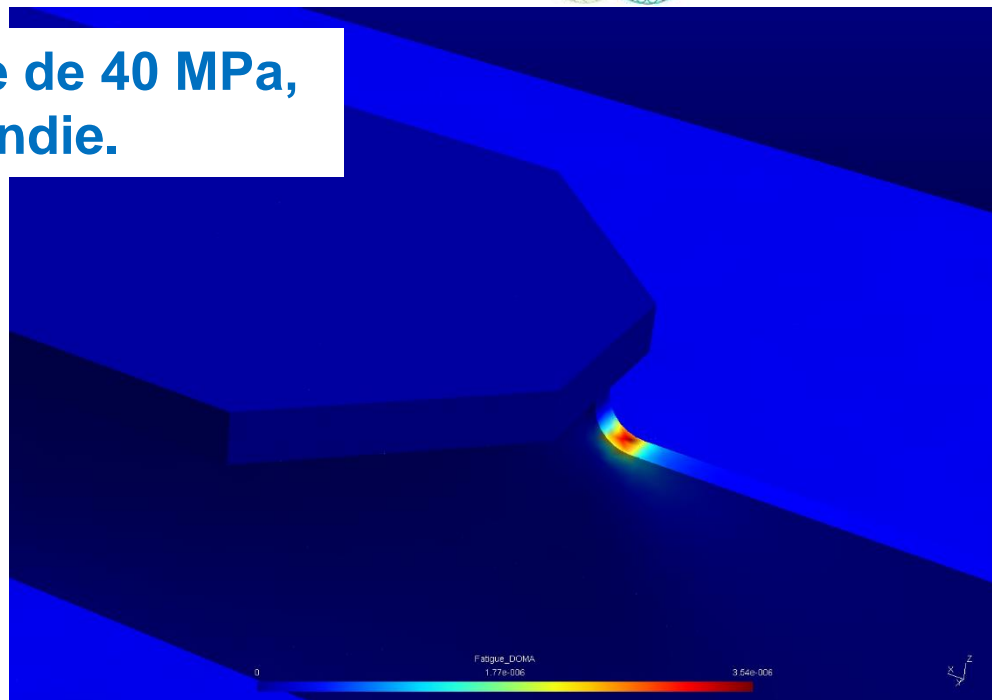
La même année, 16 assemblages de ce type sur les deux ponts sont concernés :
50 % des assemblages sont fissurés.

Errements entre 1987 et 2011

**Résultat de l'évaluation : classe de 40 MPa,
à 50 MPa si la découpe est arrondie.**

Carte des dommages cumulés
lors du cycle de référence :
probabilité maximale de 3,54 E-6
d'initiation d'une fissure

*L'Eurocode précisera plus en détail
les méthodes à employer pour affiner
numériquement une classe*



Le résultat signifie que statistiquement l'initiation de la fissure apparaît pour 282 486 cycles de 100 MPa d'étendue de contrainte ($1/N = 3,54 \text{ E-6}$).

La classe de fatigue se déduit directement du résultat obtenu par Code_Aster, en admettant avec l'eurocode l'hypothèse d'une courbe bi- logarithmique de Woehler de pente $m=3$:

$$\ln (N / 2E6) = -3 * \ln (100 / \text{Classe})$$

d'où $\text{Classe} = 100 / \exp (-0,3333 * \ln (1 / (2E6 * 3,54E-6))) = 52 \text{ MPa}$ arrondi à **50 MPa**

**Il est facile de déterminer dans ce cas la classe
par un calcul FEM approprié**

Réglementation depuis 2011 NF EN 1993-1-9

1.3.1.3

contrainte nominale **modifiée**

contrainte nominale multipliée par un facteur approprié de concentration de contrainte k_f permettant de tenir compte d'une discontinuité géométrique qui n'a pas été prise en considération dans la classification d'un détail constructif

6.3 Valeur de calcul de l'étendue de contrainte nominale **modifiée**

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul des étendues de contrainte nominale modifiée $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}$ et $\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}$ comme suit :

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta \sigma (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (6.2)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta \tau (\gamma_{Ff} Q_k)$$

où

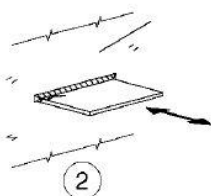

k_f est le facteur de concentration de contraintes qui rend compte d'une augmentation locale des contraintes, liée à la géométrie du détail, non prise en compte dans la courbe $\Delta \sigma_{R-N}$ de référence.

NOTE Des valeurs de k_f peuvent être obtenues dans la littérature ou **par des calculs aux éléments finis appropriés.**

De plus l'Annexe Nationale française renvoie aux publications de l'IIW

Réglementation depuis 2011 NF EN 1993-1-9

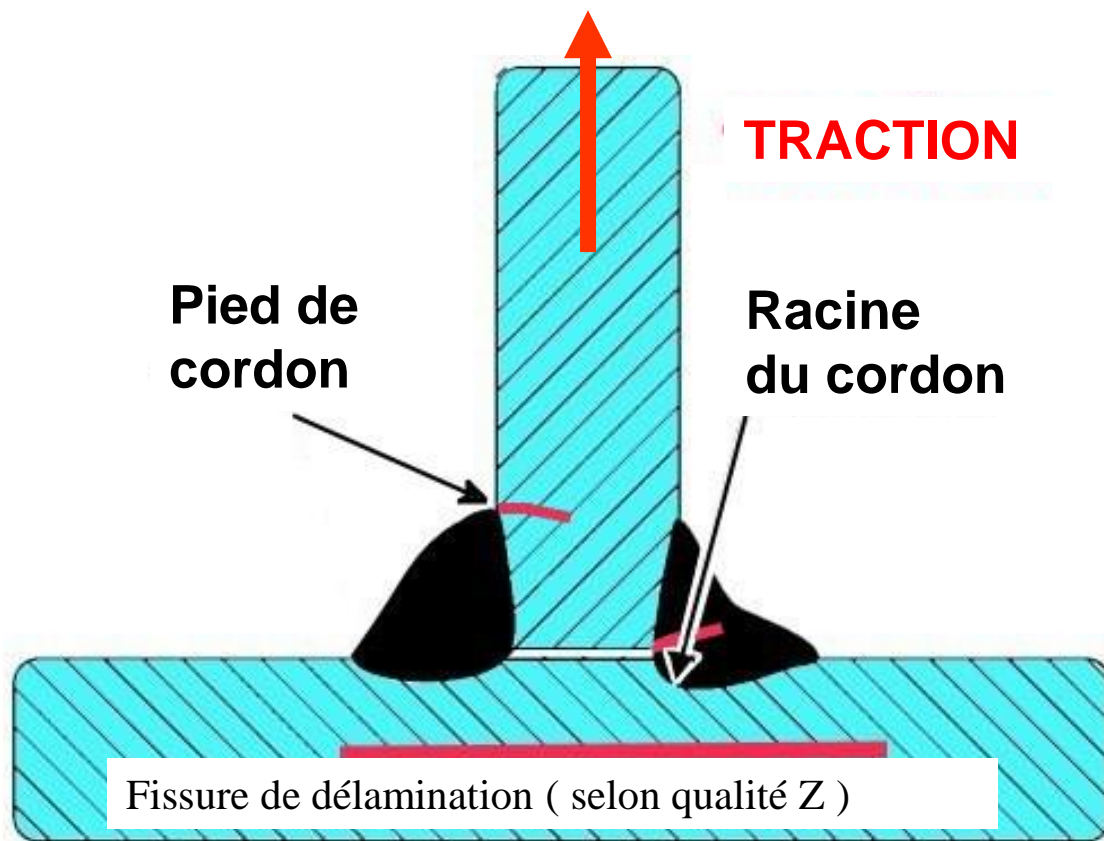
Tableau 8.5 — Assemblages soudés transmettant des efforts

Catégorie de détail	Détail constructif		Description	Exigences
80	$\ell < 50$	tout t	<p><u>Assemblages en croix et en T :</u></p> <p>1) Concerne une fissure en pied de cordon d'une soudure à pleine pénétration, et dans tous les assemblages à pénétration partielle.</p>	<p>1) Après contrôle, aucune discontinuité ou défaut d'alignement hors des tolérances de l'EN 1090.</p> <p>2) Pour le calcul de $\Delta\sigma$, on utilise la contrainte nominale modifiée.</p> <p>3) Dans les assemblages à pénétration partielle deux vérifications à la fatigue sont exigées. En premier lieu la fissuration en racine est évaluée par rapport aux contraintes définies dans la section 5, en prenant les catégories 36* pour σ_w et 80 pour τ_w. En second lieu, la fissuration en pied de cordon est évaluée en déterminant $\Delta\sigma$ dans le plat sollicité.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$	tout t		
63	$80 < \ell \leq 100$	tout t		
56	$100 < \ell \leq 120$	tout t		
56	$\ell > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < \ell \leq 200$	$t > 20$		
	$\ell > 200$	$20 < t \leq 30$		
45	$200 < \ell \leq 300$	$t > 30$	<p>2) Concerne une fissure au bord du plat attaché, la concentration de contraintes aux extrémités des soudures résultant de la flexibilité de la plaque receveuse.</p>	<p><u>Détails 1) à 3) :</u></p> <p>Il convient que le défaut d'alignement des plats sollicités ne dépasse pas 15 % de l'épaisseur du plat intermédiaire.</p>
	$\ell > 300$	$30 < t \leq 50$		
40	$\ell > 300$	$t > 50$		
Comme détail 1) du Tableau 8.5	<p>Plaque flexible</p> 			
36*			<p>3) Concerne une fissure en racine dans les soudures en T à pénétration partielle ou pleine pénétration efficace, ou dans les soudures d'angle en T.</p>	

Ces catégories de détail s'appliquent à des structures dans des conditions atmosphériques normales, suffisamment protégées contre la corrosion et régulièrement entretenues.

Les fissures de fatigue apparaissent le plus souvent :

- 1 / à la racine (root)
- 2 / en pied



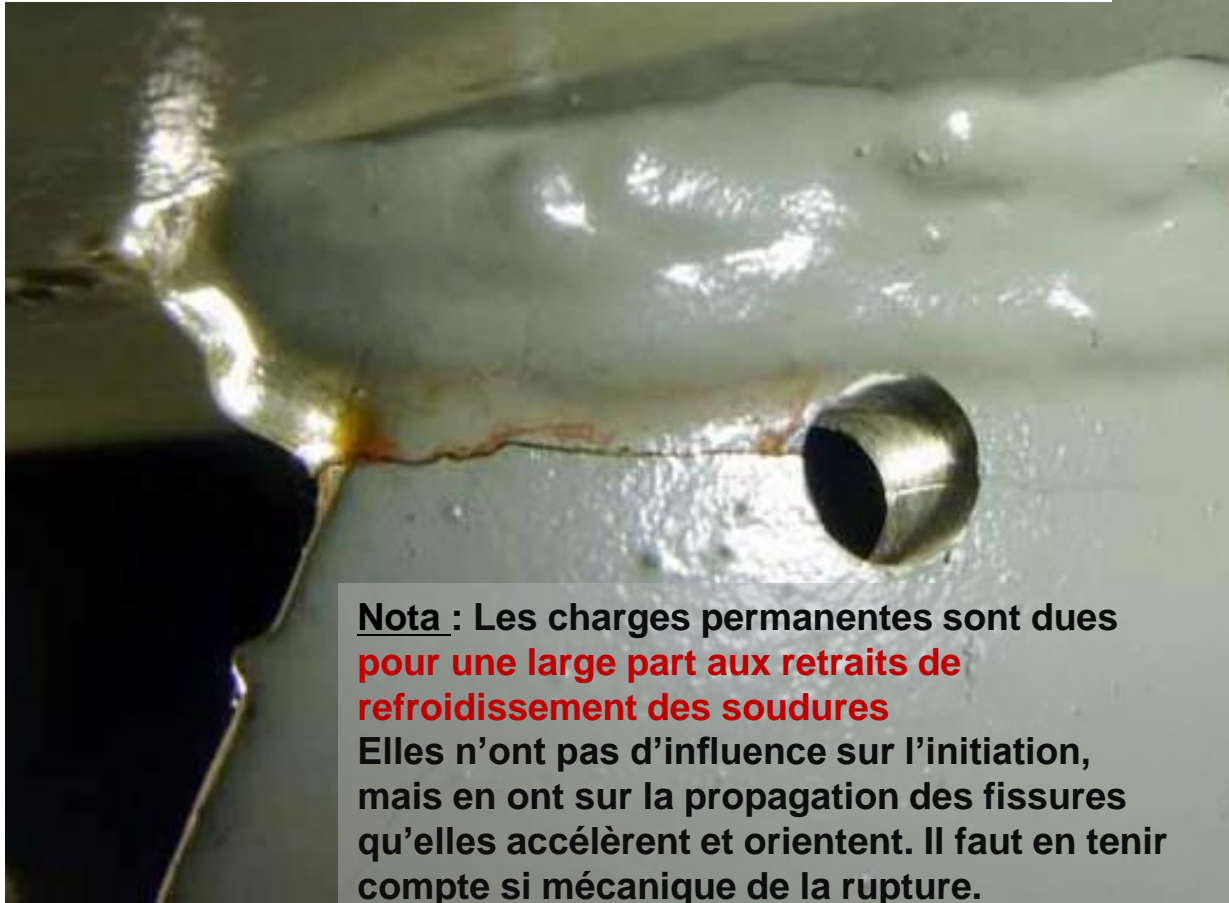
**Classe :
36 MPa**

Tableau 8-5 de
l'Eurocode 3-9

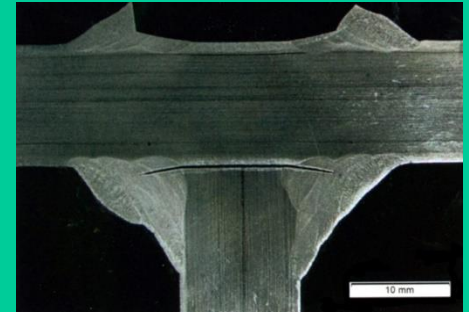
36*		<p>3) Root failure in partial penetration Tee-butt joints or fillet welded joint and effective full penetration in Tee-butt joint.</p>
-----	--	---

Les fissures les plus à craindre

**Propagation d'une fissure en pied
de cordon sur l'attache d'une pièce transversale de pont
(cas facile à détecter)**



**Nota : Les charges permanentes sont dues
pour une large part aux retraits de
refroidissement des soudures**
Elles n'ont pas d'influence sur l'initiation,
mais en ont sur la propagation des fissures
qu'elles accélèrent et orientent. Il faut en tenir
compte si mécanique de la rupture.



Fissure à la racine

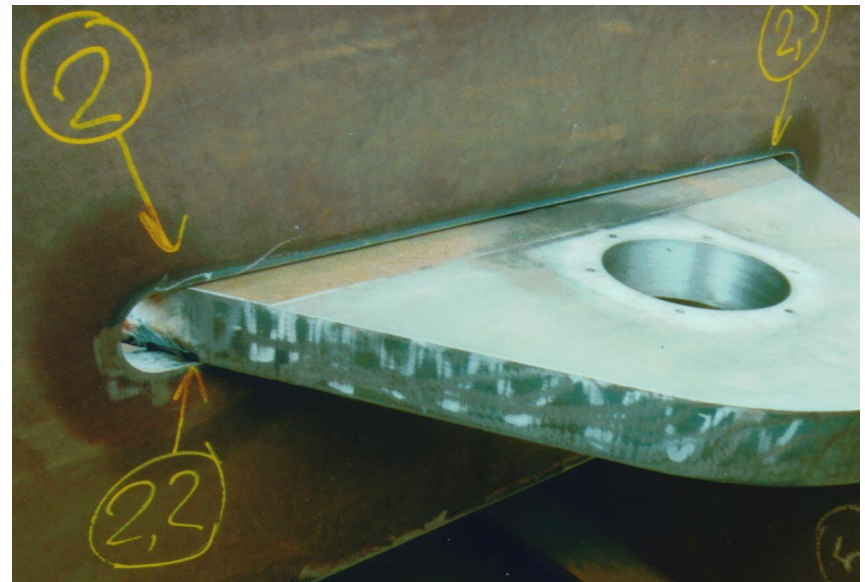
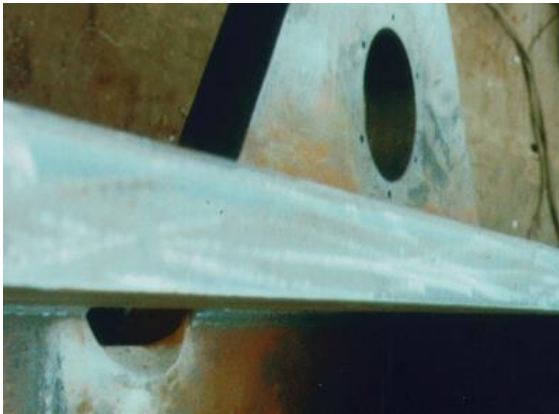
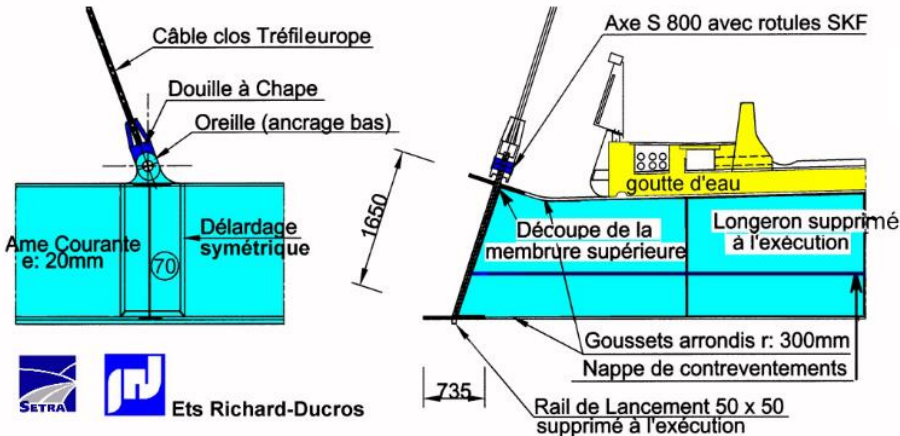
Très difficile à détecter
avant que la fissure
n'apparaisse en surface

Grande sensibilité des cordons d'angle

Bonnes dispositions constructives

Pont de Saint-Gilles sur le Rhône

Câble clos à fils enroulés en hélices. Culot au Zinc. avec douilles à chapes, connexion par un axe, Articulations au téflon, aux points d'ancrage bas

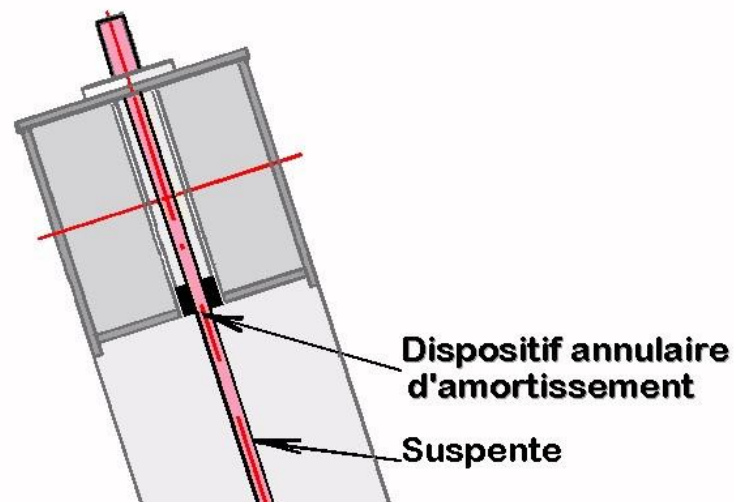


Application aux attaches de suspentes

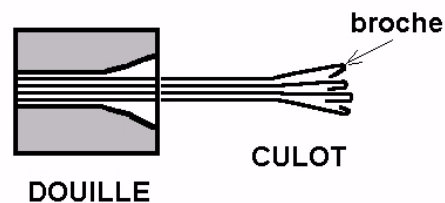


Pont de Saint-Gilles sur le Rhône

Dispositions d'ancrages aux points supérieurs d'attache



Douilles cylindriques sans chapes ni filetage
Il est d'ajouter si besoin un amortissement

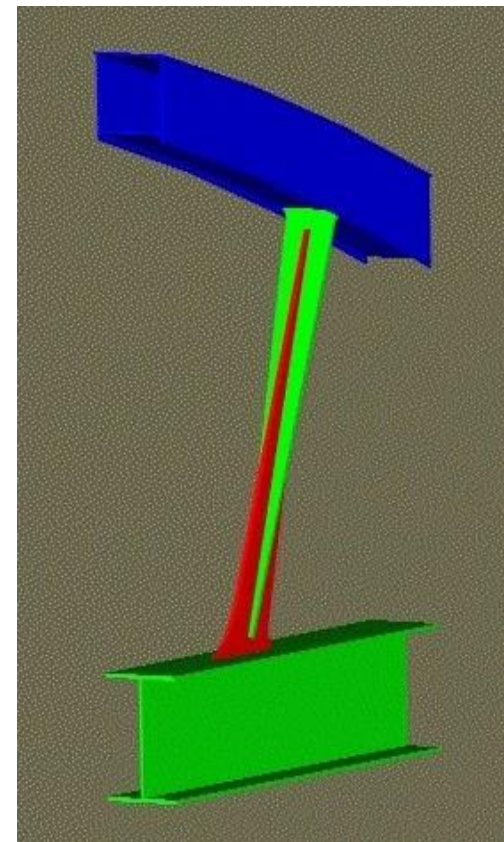


**Bonnes dispositions
constructives**



**Pont du Roboul
Pyrénées
Orientales**

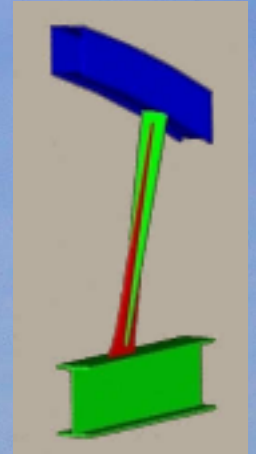
**Pont de
Ko-Wé-Kara
NC - Sud**



**Des solutions économiques
ont permis de réaliser
des petits ponts**

Bonnes dispositions constructives

Pont du Roboul :
Portée de 32 m



Les suspentes soudées constituées de simples plats permettent des solutions économiques pour de très petits ponts (moins cher ici que la variante Warren)
La robustesse en fatigue est supérieure à celle des tiges filetées.

Pont de Ko-Wé-Kara NC Province-Sud : 45 m de portée

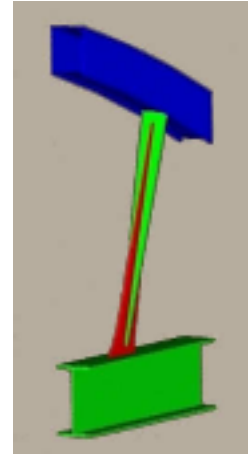
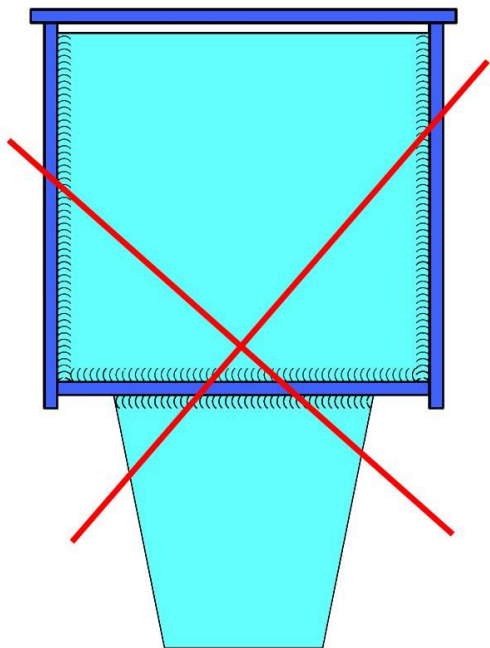


Photo P. Peyrac

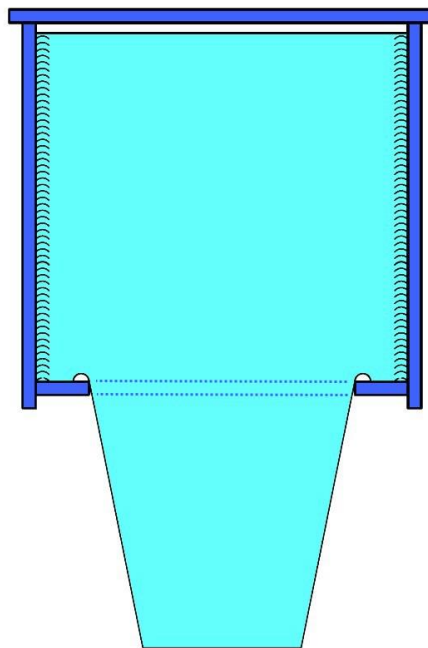
Pont de Bédarieux , Hérault : 90 m de portée

Bonnes dispositions constructives

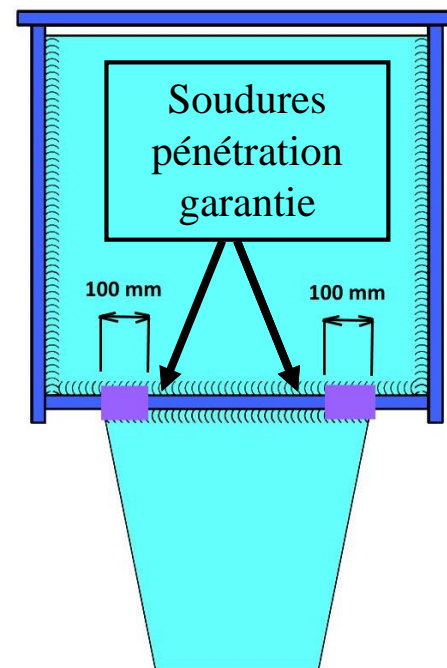
Bonnes dispositions constructives



À éviter

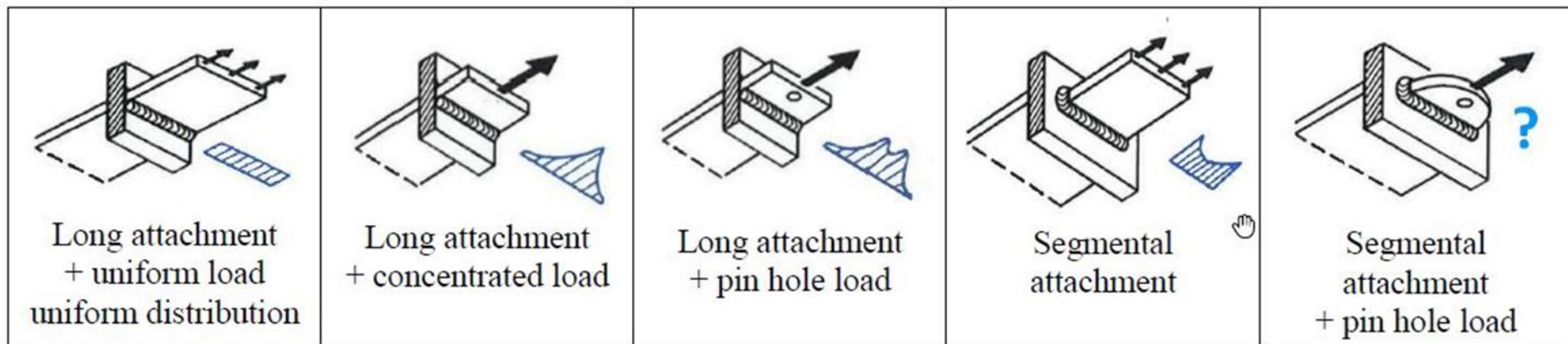


Préférable



Acceptable

Note : Dispositions constructives pour les attaches supérieures,
les mêmes principes s'appliquent aux attaches inférieures



Si l'on veut tenter de justifier avec la nouvelle norme des attaches de suspentes
par cordons d'angle,

il faut tenir compte de la distribution

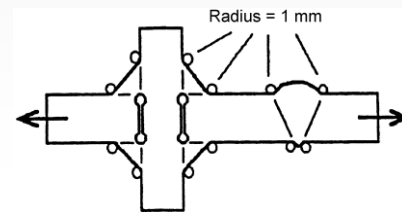
ÉLASTIQUE des contraintes qui est **cruciale en fatigue**

Une étude aux éléments finis est indispensable

Oui l'EC3 le prévoit aussi et ce n'est pas simple !

1- "Hot spot stress method"

2- "Effective notch stress method" ($r = 1\text{mm}$)



Depuis 2011 : l'Eurocode fait Loi

EF Code_Aster + GMSH

Répartition sur l'attache réelle :
Étendue des contraintes nominales
modifiées

Répartition uniforme :
Étendue des contraintes nominales

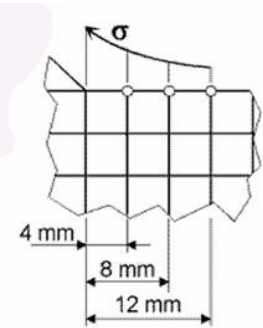
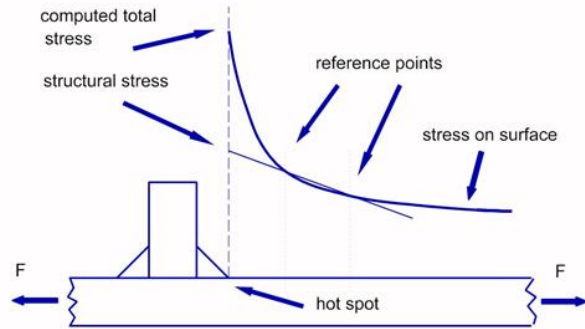
Les échelles
de couleurs sont
les mêmes

Point de risque fort d'une
initiation de fissure

Rapport établi entre répartitions : **Uniforme** et **Réelle**,
même charge et même concept de contrainte
Le modèle EF approprié est 3D volumique

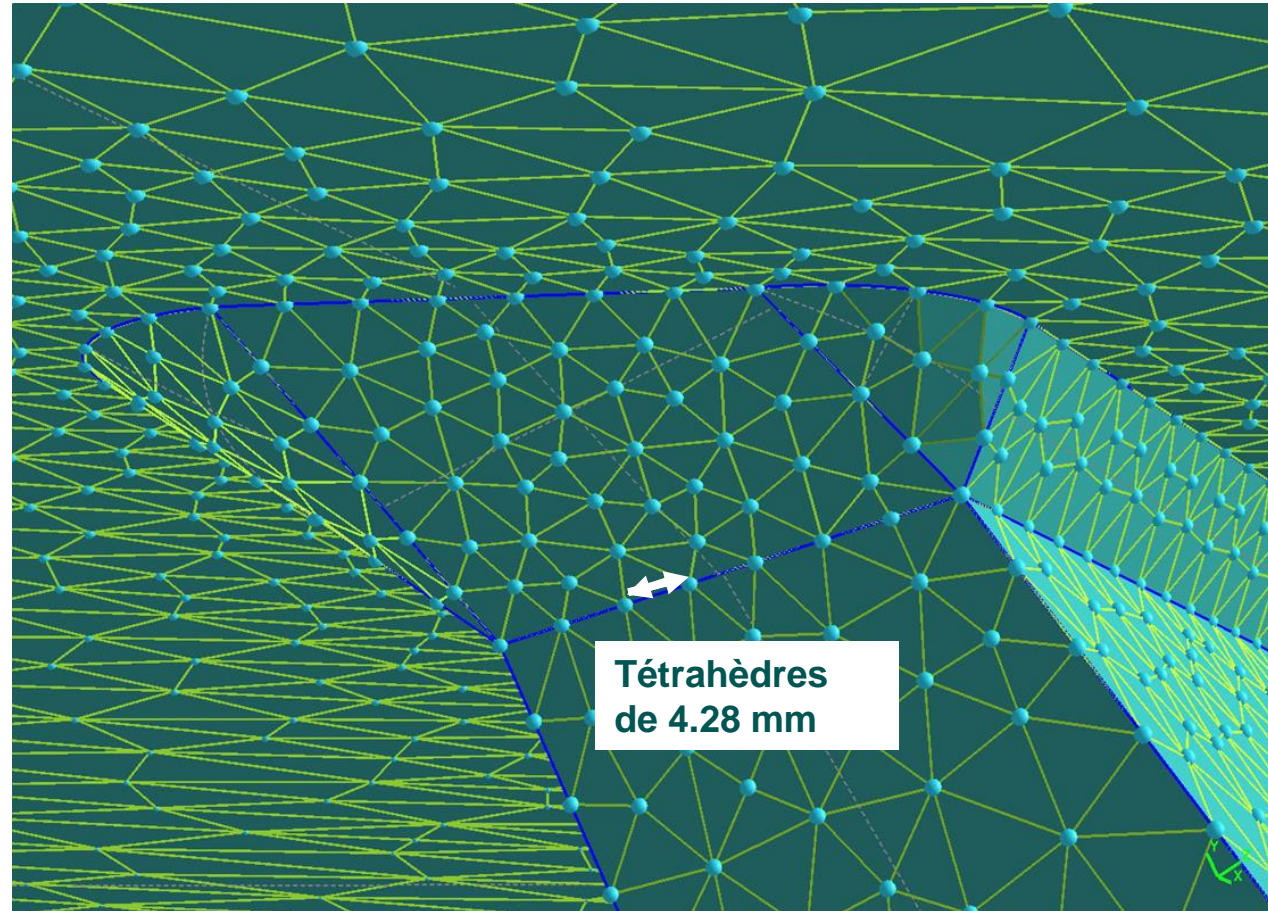
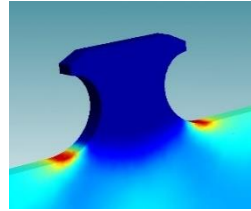
kf peut atteindre 2,7 sur cet exemple (rapport des contraintes principales dominantes)

Évaluation EF des contraintes modifiées



recommendations
IIS-IIW

La procédure technique du calcul
a déjà été testée par le Sétra lors du RFCS Precobeam
(Projet de Recherche européen Charbon-Acier)
Elle permet de retrouver les classes de fatigue
de détails classés expérimentalement pour l'Eurocode

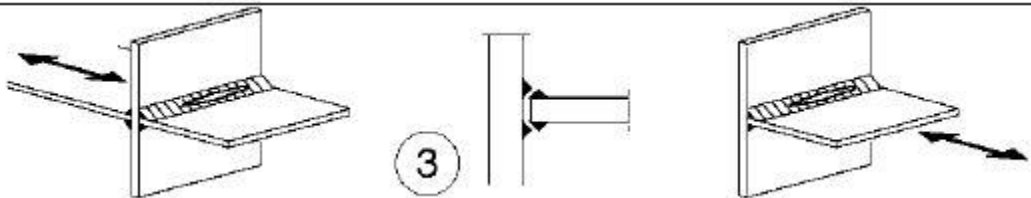


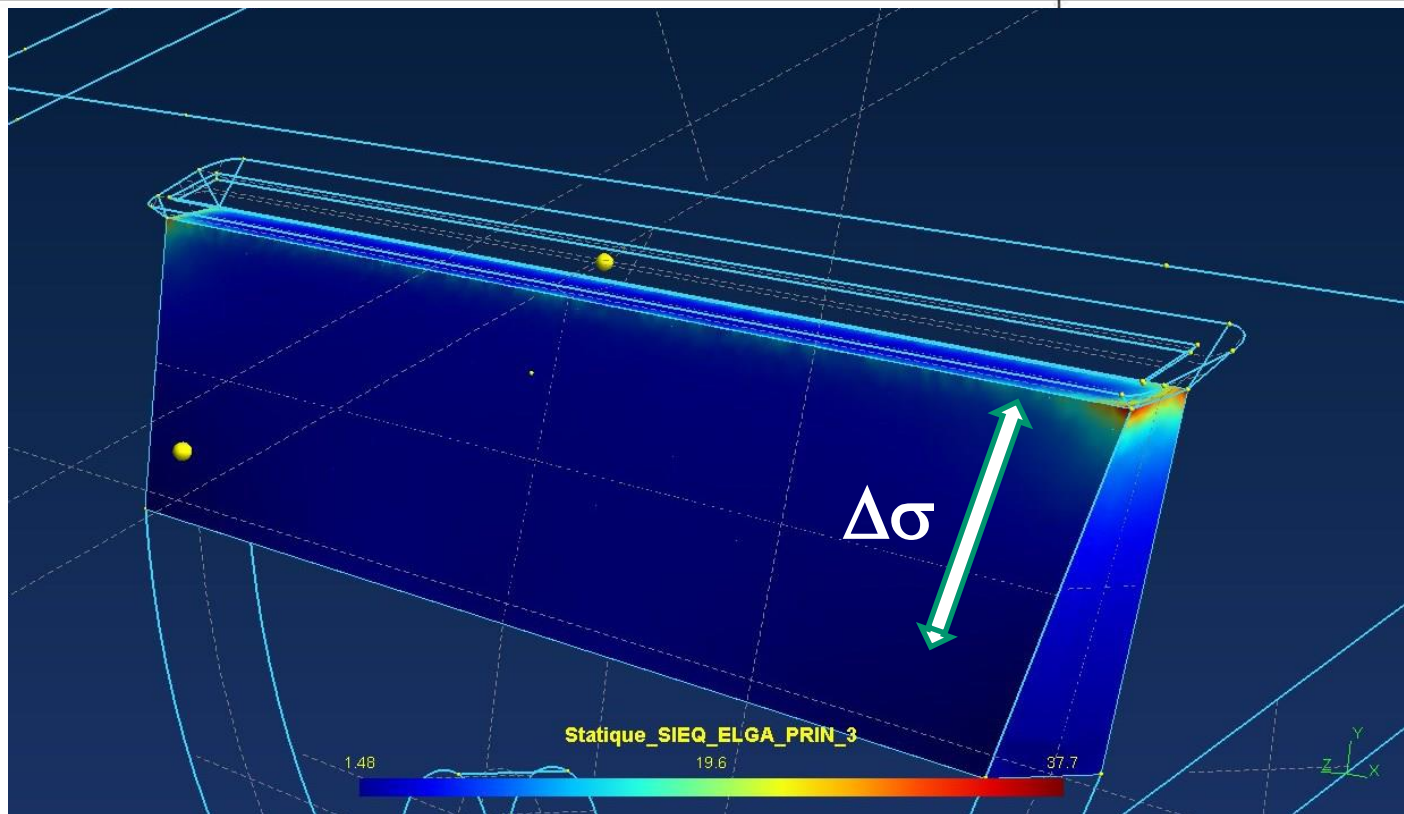
Code_Aster est un logiciel GNU GPL :
General Public License
<http://www.code-aster.org>

*L'évaluation de la contrainte au point chaud
est mise en œuvre industriellement
pour tous les tétraèdres
en lissant les résultats
dans GMSH*

Évaluation EF des contraintes modifiées

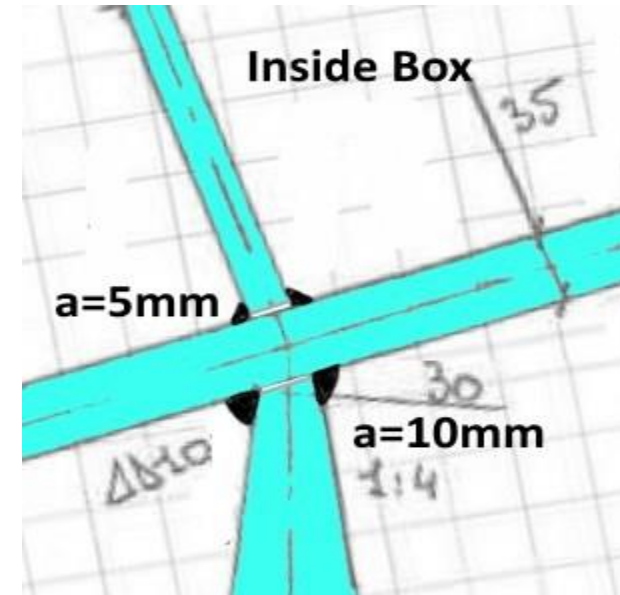
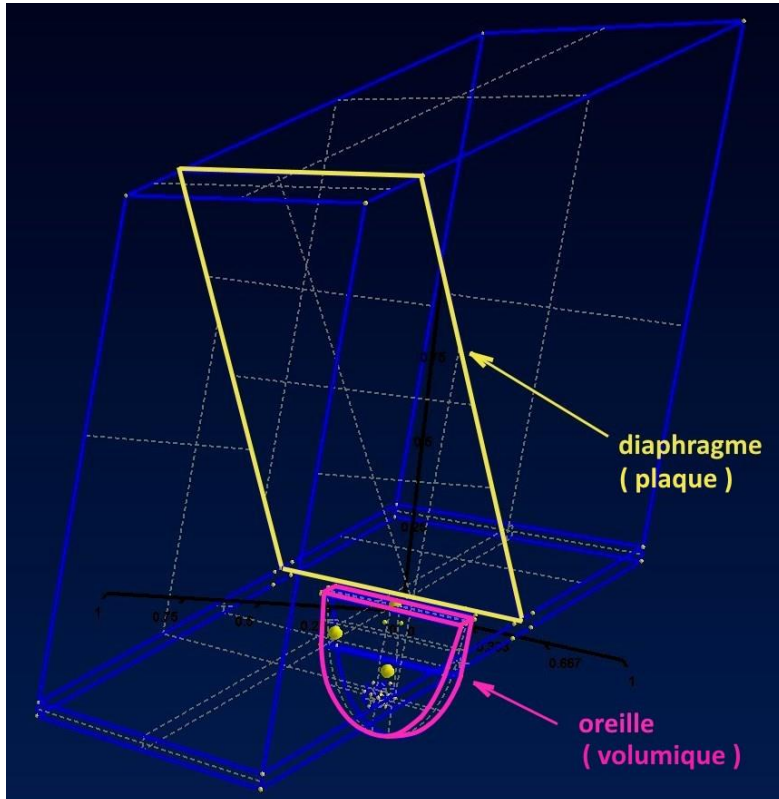
Autre présentation du résultat à prendre en compte

36*		3) Root failure in partial penetration Tee-butt joints or fillet welded joint and effective full penetration in Tee-butt joint.
-----	--	--



En 2011 : l'Eurocode fait Loi

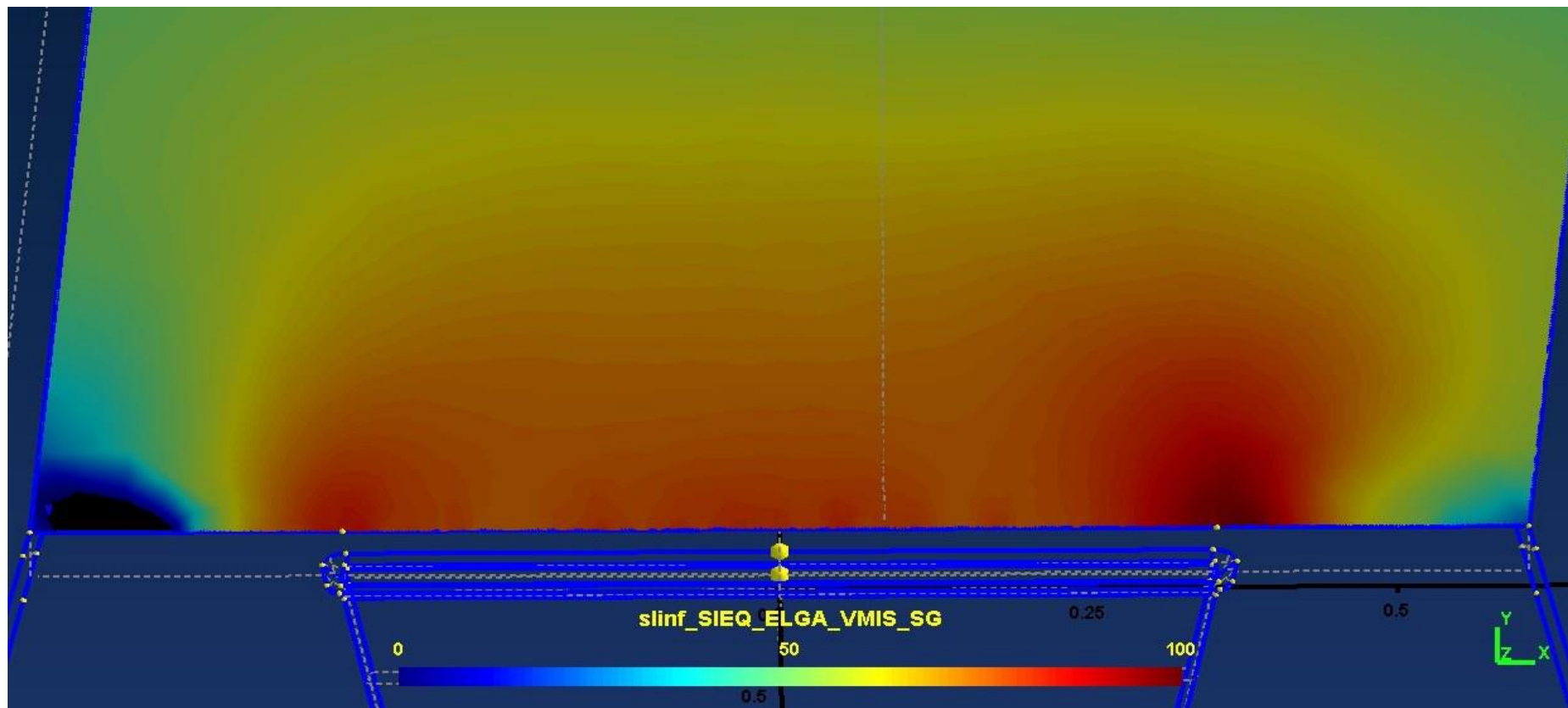
Les cordons d'angle de la face intérieure, à l'intérieur du caisson de l'arc sont exposés à la même traction et la répartition des contraintes peut y être calculée plus simplement :



1 – Les cordons d'angle à l'intérieur ne comportent pas de **contournement**. C'est très favorable et le diaphragme peut donc être modélisé par une simple coque en 2D.

2 – La membrure inférieure en 3D volumique assure une répartition favorable réelle.

Cordons d'angle de la face intérieure



Le coefficient de concentration (contrainte **modifiée**)
est de l'ordre de $k_f = 1,30$

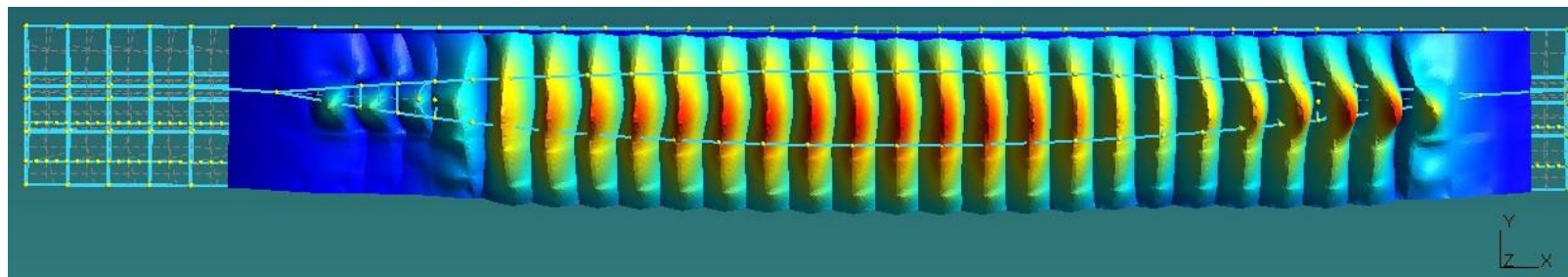
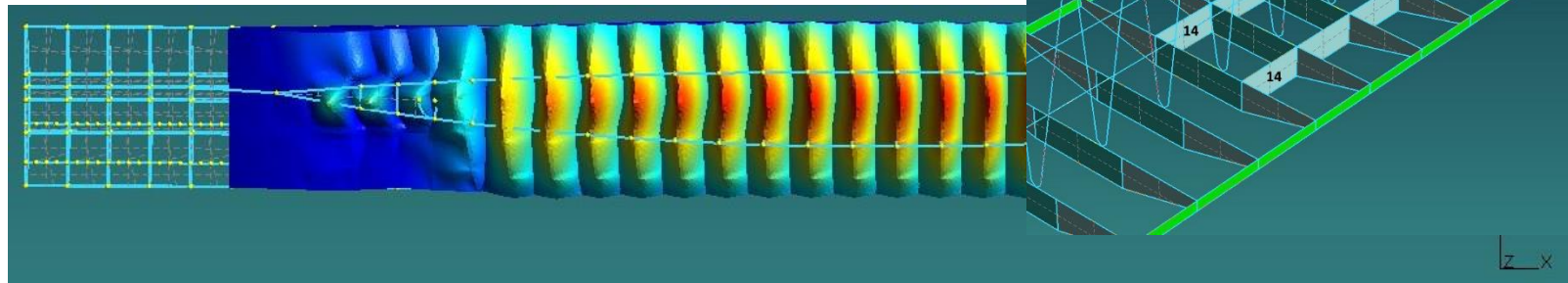
La distribution des contraintes des dissymétrique en raison de l'asymétrie
du diaphragme et de l'orientation de la force à attacher.

Cordons d'angle de la face intérieure

Importance de la poutre de rigidité

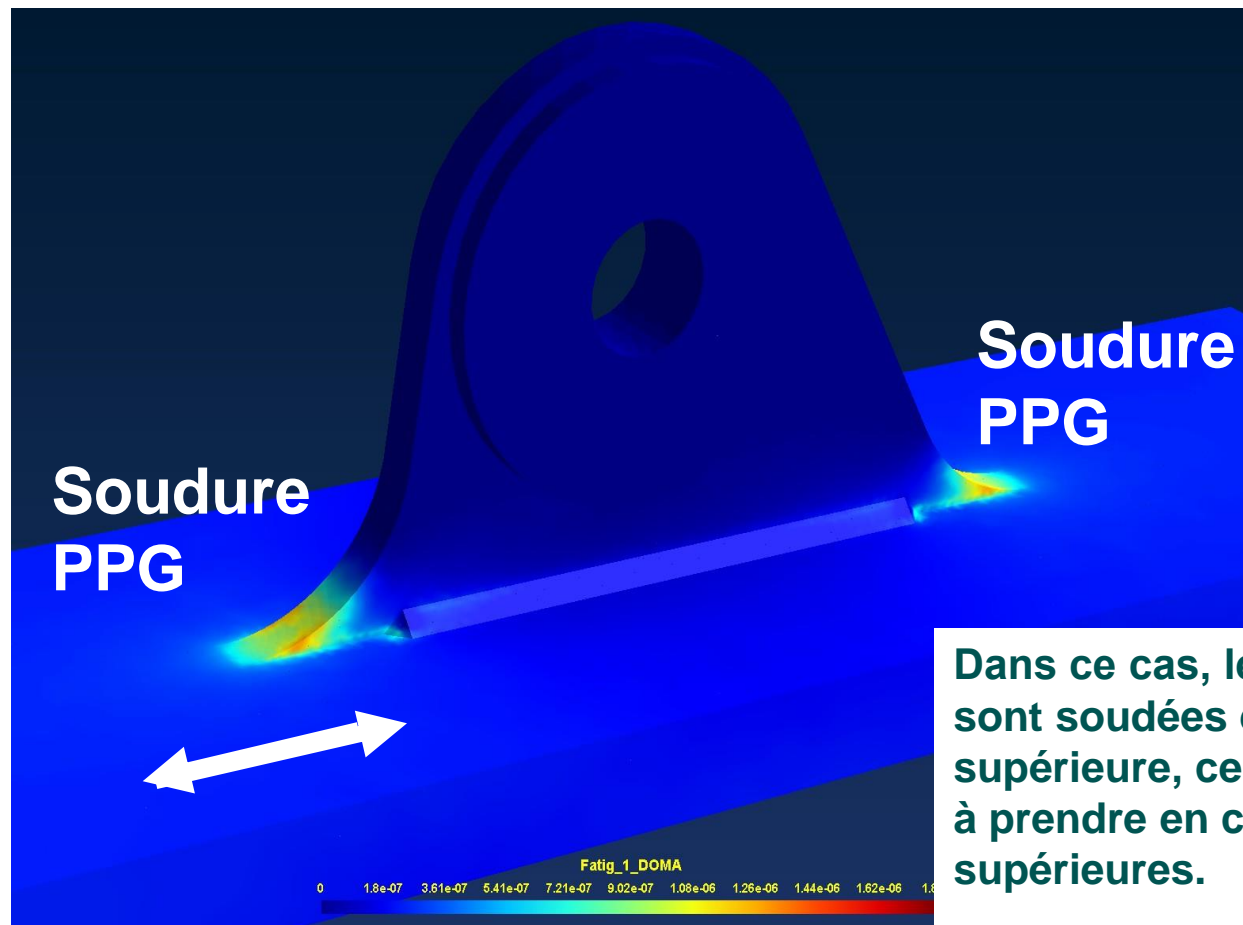
$L\phi = 4$ m au lieu de $L\phi = 16$ m

Quand les suspentes ne sont pas attachées à une poutre de rigidité



Objectifs : prendre en compte le coefficient de majoration dynamique approprié
associer un nombre de cycles à l'étendue de contraintes

Surfaces d'influence

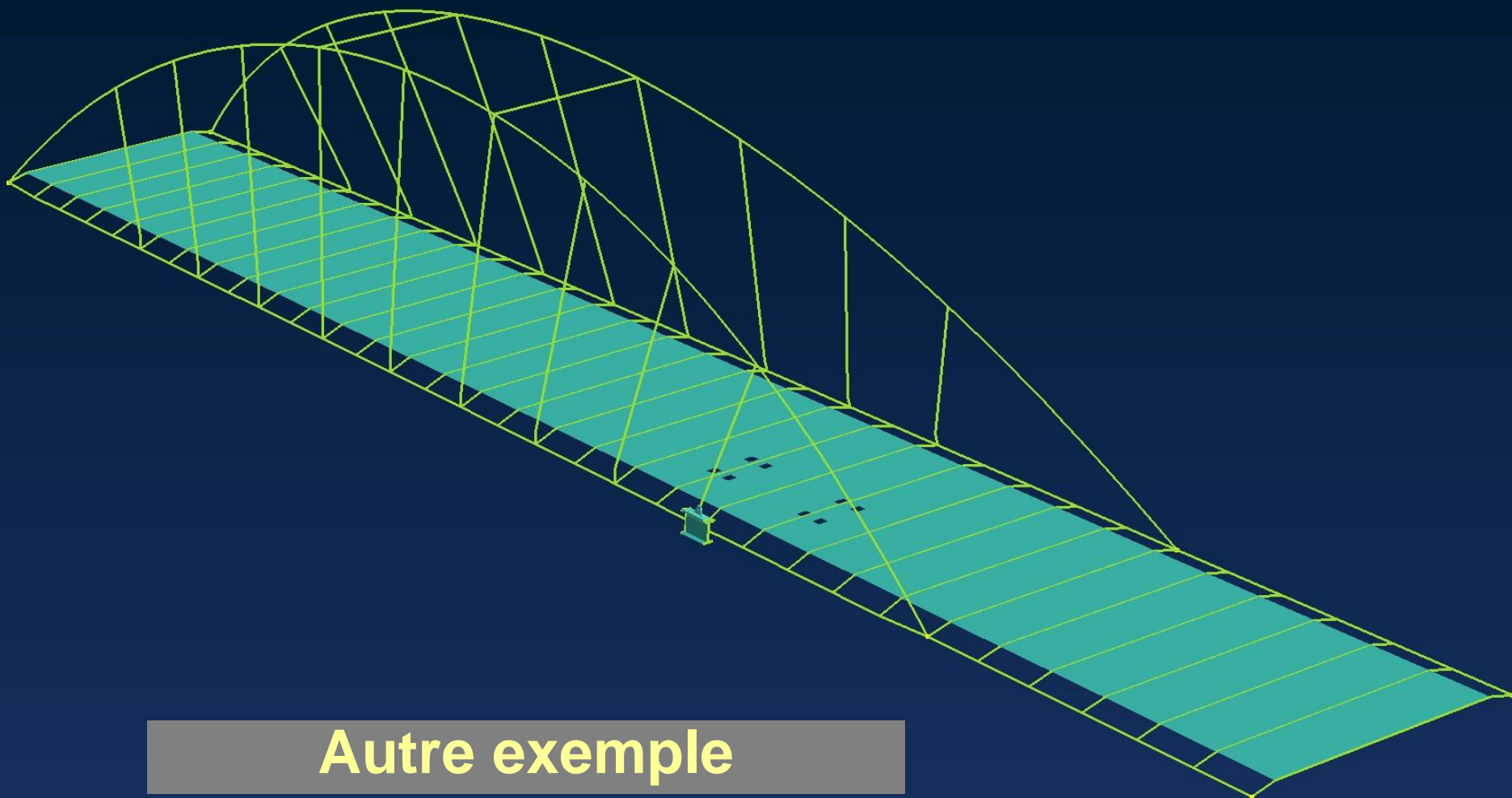


**Soudure PPG =
Pleine
Pénétration
Garantie**

Dans ce cas, les extrémités de l'attache sont soudées en PPG sur la membrure supérieure, cela réduit la classe de fatigue à prendre en compte pour les membrures supérieures.

De plus les cordons d'angles qui se trouvent sous la membrure supérieure (âme, raidisseurs) doivent être évalués.

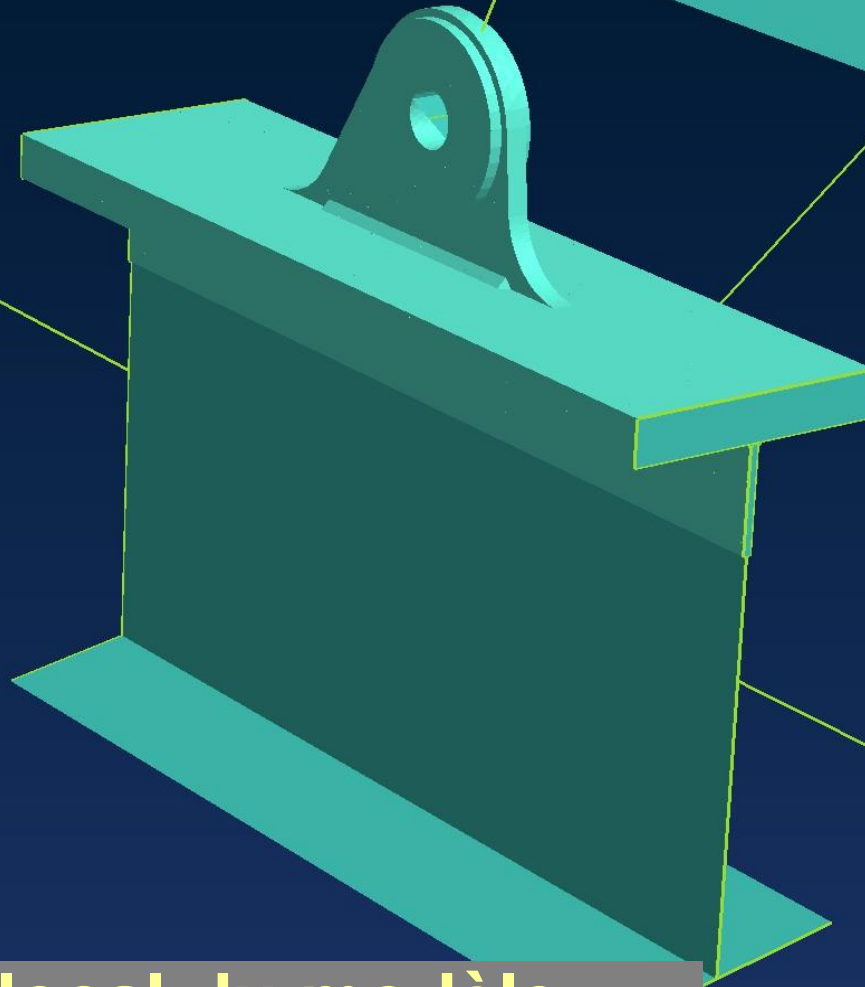
Autre exemple



Autre exemple

Modèle de charge : FLM3

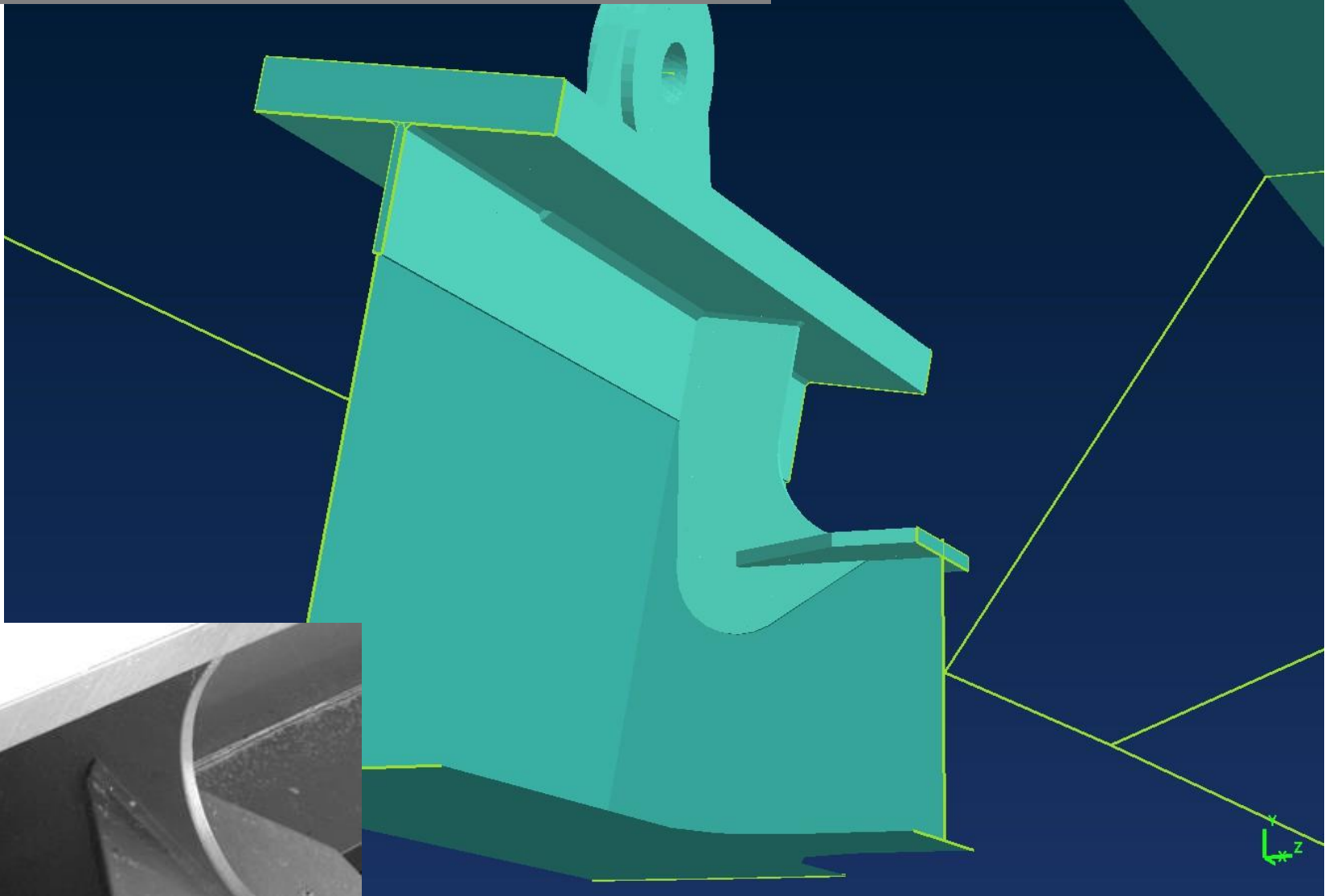


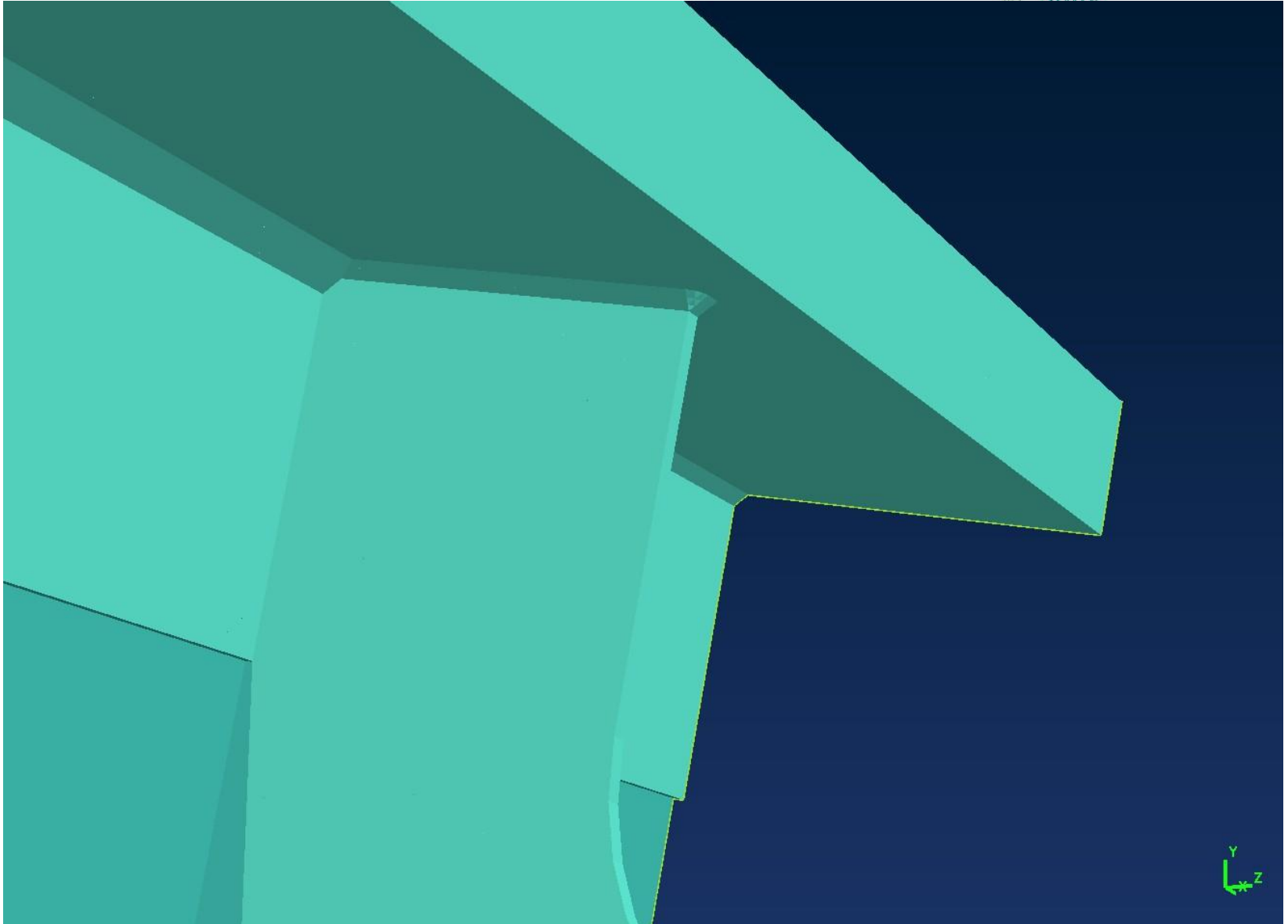


Détail local du modèle



Détail local du modèle





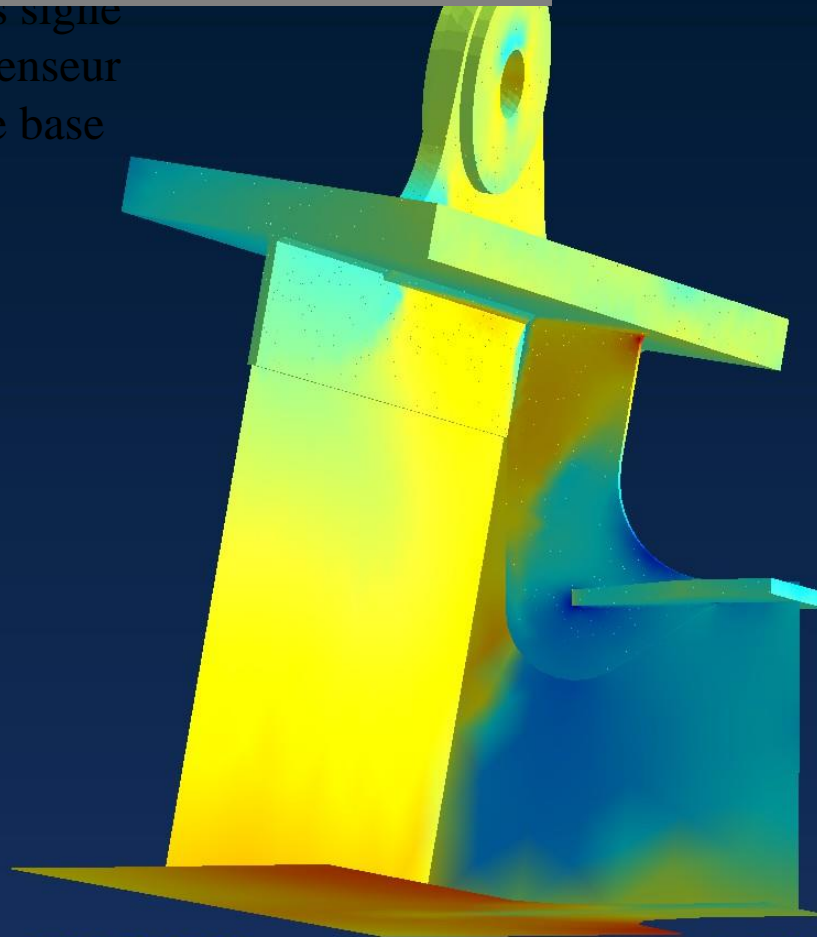
Détail local du modèle

Détail local du modèle

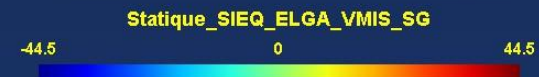


Resultat : effet de FLM3 non pondéré

Critère v. Mises signe
par la trace du tenseur
dans le métal de base



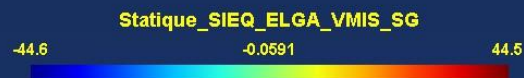
44 MPa > 36



Resultat : effet de FLM3 non pondéré

Critère V. Mises signé
par la trace du tenseur
dans le métal de base

44 MPa > 36

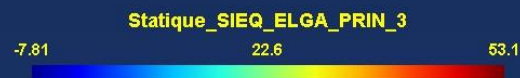
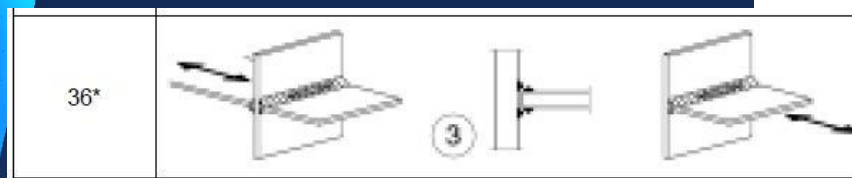


Resultat : effet de FLM3 non pondéré

Sigma PR3
dans le métal de base

53 MPa > 36

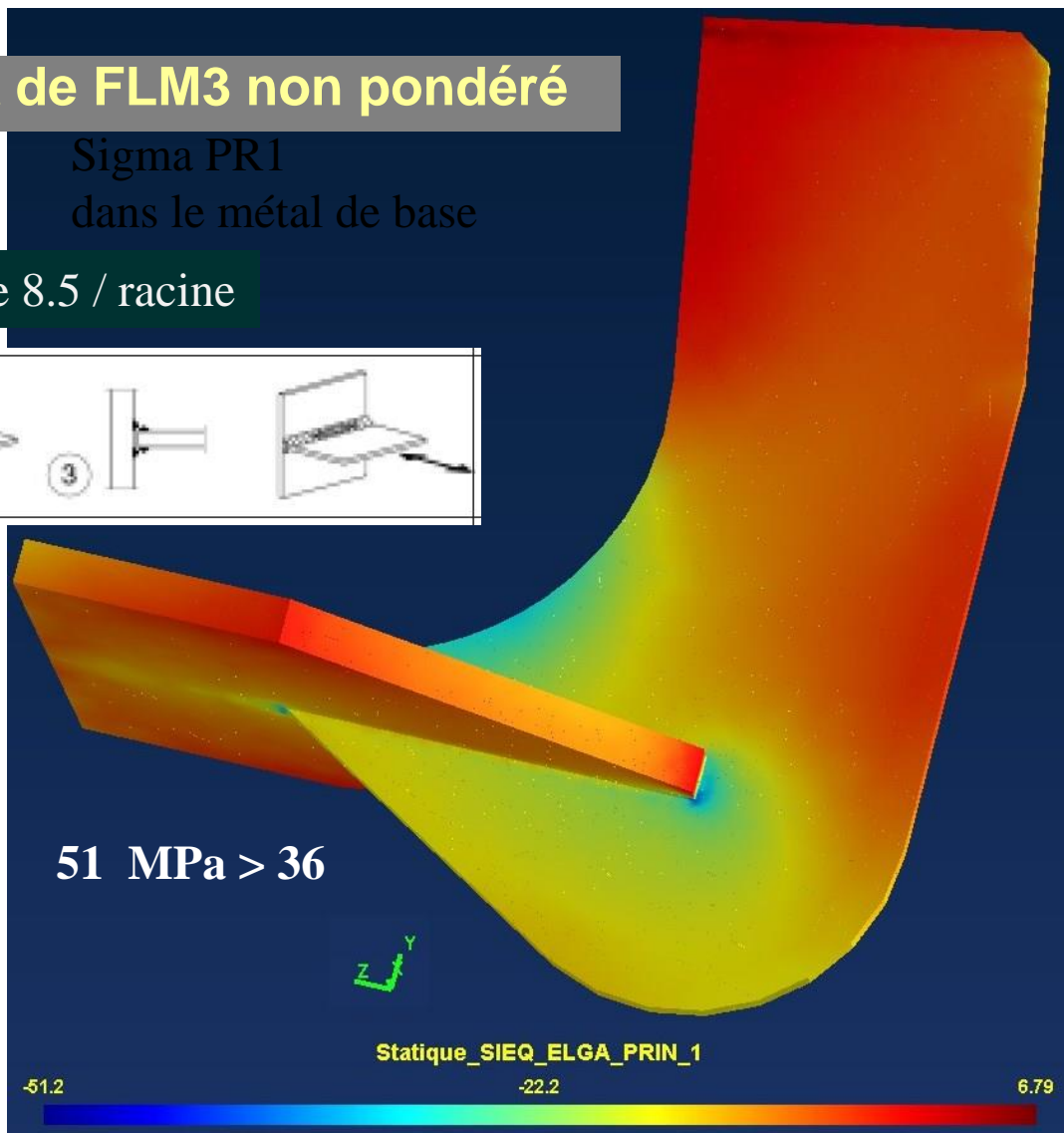
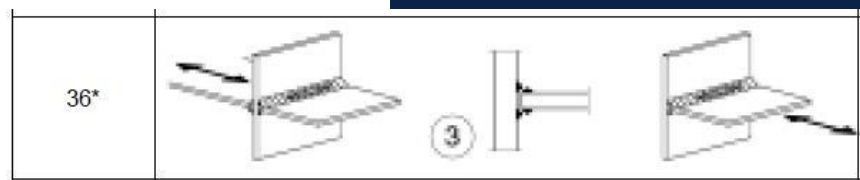
EC3-1-9 table 8.5 / racine



Résultat : effet de FLM3 non pondéré

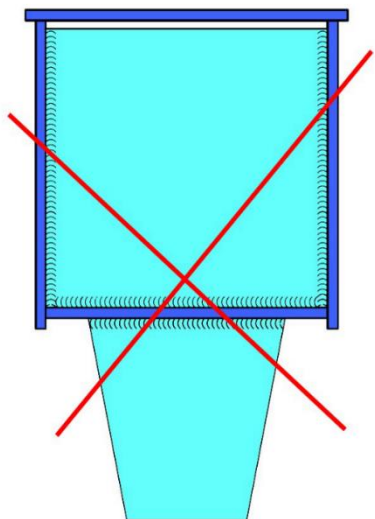
Sigma PR1
dans le métal de base

EC3-1-9 table 8.5 / racine

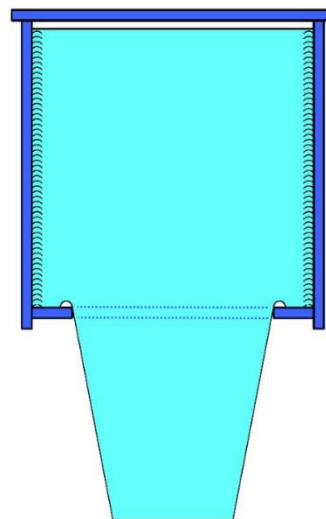


Conclusion pour attacher les suspentes

Préférer les dispositions constructives utilisées par le Sétra dans ses projets, qui ne sont pas remises en cause par les Eurocodes.



À éviter

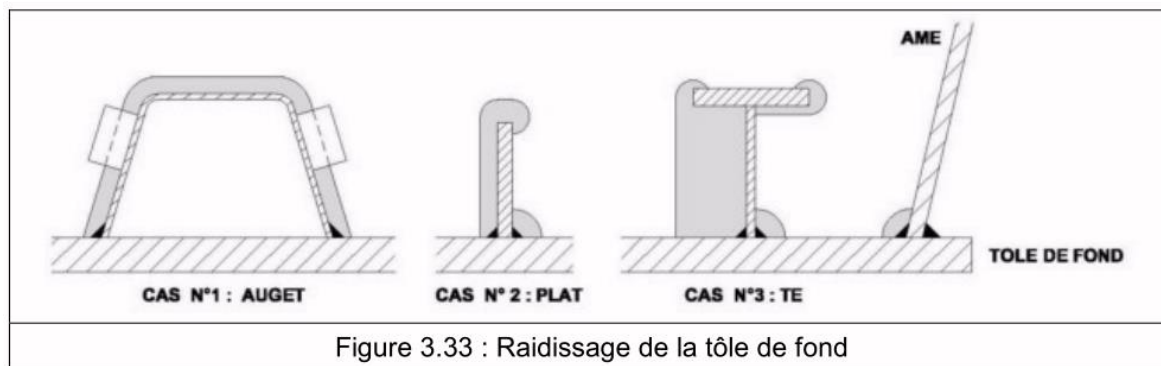


Recommandé

Nota : Les attaches basses
sont à concevoir
selon les mêmes principes

Conclusion pour les fonds de caisson

Ne pas associer les cas n°2 et n°3 du guide de 2010



Notas :

La réparation définitive et durable consiste à rétablir la continuité du raidissage

Préférer les raidisseurs en U qui à coût égal (2 cordons) raidissent une plus grande surface.



**Caisson
rectiligne
Nevers 1994**





**Merci aussi aux maîtres d'ouvrages
qui ont autorisé la publication de quelques données techniques
concernant les exemples.**