



**HAL**  
open science

# Contribution à la compréhension du comportement mécanique des assemblages rivetés anciens

Linamaría Gallegos Mayorga

► **To cite this version:**

Linamaría Gallegos Mayorga. Contribution à la compréhension du comportement mécanique des assemblages rivetés anciens. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2016. Français. NNT : 2016BRES0038 . tel-01612494

**HAL Id: tel-01612494**

**<https://theses.hal.science/tel-01612494>**

Submitted on 6 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

*sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

*Mention : Génie Mécanique, mécanique des fluides et énergétique  
École Doctorale des Sciences de la Mer (EDSM)*

présentée par

**Linamaría GALLEGOS  
MAYORGA**

Préparée à l'IRDL (CNRS FRE 3744)  
Institut de Recherche Dupuy de Lôme

**Contribution à la  
compréhension du  
comportement mécanique  
des assemblages rivetés  
anciens**

**Thèse soutenue le 28 juin 2016**

devant le jury composé de :

**Bernard ESPION**

Professeur, Université Libre de Bruxelles  
*Rapporteur*

**Gilles FORET**

Professeur à l'École de Ponts, École des Ponts Paristech  
*Rapporteur*

**Thierry GROSDIDIER**

Professeur des Universités, Université de Lorraine  
*Président du jury*

**Ine WOUTERS**

Professeur, Vrije Universiteit Brussel  
*Examinatrice*

**Thierry AUBRY**

Professeur des Universités, Université de Bretagne Occidentale  
*Examineur*

**Bernard PLU**

Chef de Département, SNCF Réseau - Département des Ouvrages d'Art  
*Invité*

**Stéphane SIRE**

Maître de Conférences HDR, Université de Bretagne Occidentale  
*Directeur de thèse*







THÈSE DE DOCTORAT  
de L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE  
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire  
**École Doctorale des Sciences de la Mer**

MENTION : GÉNIE MÉCANIQUE, MÉCANIQUE DES FLUIDES ET  
ÉNERGÉTIQUE

Présentée à l'Université de Bretagne Occidentale par :

LINAMARÍA GALLEGOS MAYORGA

---

**Contribution à la compréhension du comportement  
mécanique des assemblages rivetés anciens**

---

Soutenue publiquement le 28 juin 2016 à Brest  
devant le jury composé de :

BERNARD ESPION	Professeur Université Libre de Bruxelles	<i>Rapporteur</i>
GILLES FORET	Professeur à l'École des Ponts École des Ponts ParisTech	<i>Rapporteur</i>
THIERRY GROSDIDIER	Professeur des Universités Université de Lorraine	<i>Président du jury</i>
INE WOUTERS	Professeur Vrije Universiteit Brussel	<i>Examinatrice</i>
THIERRY AUBRY	Professeur des Universités Université de Bretagne Occidentale	<i>Examineur</i>
BERNARD PLU	Chef de Département, SNCF Réseau Département des Ouvrages d'Art	<i>Invité</i>
STÉPHANE SIRE	Maître de Conférences HDR Université de Bretagne Occidentale	<i>Directeur de thèse</i>



---

*À mes parents,  
à Abdelali,  
à leur soutien infatigable,  
leur amour indestructible  
et leur volonté de fer.*

*A mis padres,  
a Abdelali,  
a su apoyo infatigable,  
su amor indestructible  
y su voluntad de hierro.*





# Remerciements

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le cadre d'une collaboration ente le Laboratoire Brestois de Mécanique et de Systèmes (aujourd'hui l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme) et la Société Nationale des Chemins de Fer Français. Son aboutissement est ainsi le fruit des contributions et du soutien des nombreuses personnes. Je garde l'espoir qu'elles trouveront dans ces quelques lignes l'expression de ma plus sincère gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier Stéphane SIRE, enseignant-chercheur à l'Université de Bretagne Occidentale de m'apprendre avec l'exemple que l'humanité, la modestie, la patience et l'amour profond pour le savoir font partie essentielle du métier du chercheur. Merci de m'avoir fait découvrir le monde des structures anciennes où la mécanique, la métallurgie et l'histoire de la construction contribuent à comprendre le comportement des ponts métalliques du XIXème siècle.

Un grand merci également à mes encadrants du Département des Ouvrages d'Art de la Direction de l'Ingénierie de SNCF Réseau, Muriel RAGUENEAU et Bernard PLU, ainsi qu'à Thomas JOINDOT pour m'avoir accueillie au sein de l'équipe. Je vous remercie de m'avoir confié un sujet aussi passionnant ; j'ai beaucoup apprécié vos nombreux conseils tout au long de ces travaux de recherche.

Merci également aux nombreux collègues du Département des Ouvrages d'Art qui ont participé à cette aventure : Luc DIELEMAN, Suzhe YANG, Céline ANICOTTE et Patrice SCHMITT. Merci aux experts de réparation des ouvrages métalliques anciens : Jean-Luc MARTIN, Pascal MARTIN (un jour je tiendrai ma promesse !) et Patrick VERNISSE. Les visites de chantiers et vos archives sur le Pont sur l'Adour ont été une aide précieuse durant ces années d'étude ! Je n'oublie pas Charlie, Laurent et Sébastien, l'équipe de riveteurs RPM (Réparation de Ponts Métalliques) qui sont venus à Brest pour transformer les plans de mes éprouvettes en véritables éléments rivetés. Travailler au sein de ce département a été une expérience très enrichissante tant au niveau professionnel que personnel.

Je remercie vivement l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'examiner mes travaux : Thierry GROSDIDIER de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury, Bernard ESPION et Gilles FORET d'avoir accepté la lourde tâche de rapporter mon mémoire. Vos commentaires et remarques constructives m'ont beaucoup apporté. Merci également à Ine WOUTERS, Thierry AUBRY et Bernard PLU pour les échanges très enrichissants que nous avons eus au cours de la soutenance.

Je remercie également les membres du Laboratoire et de l'Université qui de près ou de loin ont rendu ces recherches possibles. Un merci particulier pour Gérard SINQUIN et Philippe ELIES à la Plateforme d'Imagerie et de Mesures en Microscopie (PIMM).

Merci à mes complices et amis de longue date : Leonell SERRANO, Camilo CASTRO et Paola VALLEJO. Au delà de notre amitié, vous faites désormais partie de ma famille.

Je remercie du fond du cœur mes parents, deux personnes extraordinaires qui se sont battues toute leur vie pour me donner une bonne éducation, pour m'apprendre la valeur de la discipline et du travail honnête. Cette réussite est la votre !

*Agradezco desde el fondo de mi corazón a mis padres, dos personas extraordinarias que lucharon toda su vida por darme una buena educación, por enseñarme el valor de la disciplina y del trabajo honesto. ¡Este éxito es de ustedes !*

Finalement, j'adresse un très grand merci à Abdelali. Merci d'avoir été patient, de m'avoir soutenue et encouragée pendant les moments difficiles. C'est un grand privilège de partager ma vie avec toi.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>v</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xix</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xxi</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
Contexte et objectif . . . . .	1
Portée et limites . . . . .	4
Méthodologie . . . . .	5
<b>I De l'ouvrage d'art au matériau</b>	<b>9</b>
<b>1 Surveillance et vérification des ouvrages métalliques anciens</b>	<b>11</b>
1.1 Généralités sur les ponts métalliques du réseau ferroviaire français . . . . .	13
1.1.1 Pathologies dans les ouvrages métalliques anciens . . . . .	14
1.1.2 Les fissures de fatigue dans les ponts métalliques anciens . . . . .	16
1.1.3 Pathologie particulières des ouvrages métalliques rivetés . . . . .	17
1.2 Généralités sur la fatigue des matériaux et des structures . . . . .	21
1.2.1 Historique de l'étude du phénomène de fatigue . . . . .	21
1.2.2 Caractérisation du phénomène de fatigue . . . . .	23
1.2.3 Modélisation du phénomène de fatigue . . . . .	32
1.3 Vérification de la tenue à la fatigue des vieux ponts métalliques . . . . .	33
1.3.1 Disposition constructive et notion de catégorie de détail . . . . .	36
1.4 Bilan . . . . .	43

<b>2</b>	<b>Le rivetage à chaud : une méthode d'assemblage employée dans les ouvrages métalliques anciens</b>	<b>45</b>
2.1	Généralités sur les assemblages rivetés dans le contexte ferroviaire . . . .	47
2.1.1	Le rivet . . . . .	49
2.1.2	Types de joints . . . . .	50
2.1.3	Description du procédé de rivetage . . . . .	51
2.1.4	Évolution du procédé : du rivetage manuel au marteau pneumatique	56
2.1.5	Défauts observés dans les assemblages rivetés . . . . .	56
2.2	Scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté . . . . .	57
2.3	Bilan . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Le fer puddlé : matériau utilisé dans les ponts métalliques anciens</b>	<b>61</b>
3.1	Présentation du procédé de puddlage . . . . .	63
3.2	Caractérisation mécanique des fers puddlés . . . . .	66
3.2.1	Caractérisation sous chargement monotone . . . . .	66
3.2.2	Caractérisation sous chargement cyclique . . . . .	68
3.3	Métallurgie des fers puddlés . . . . .	69
3.4	Bilan . . . . .	71
<b>II</b>	<b>De l'éprouvette au détail constructif</b>	<b>73</b>
<b>4</b>	<b>Stratégie expérimentale</b>	<b>75</b>
4.1	Objectifs . . . . .	77
4.1.1	Identification des caractéristiques des matériaux . . . . .	77
4.1.2	Dissociation des mécanismes de transmission d'effort dans un assemblage riveté . . . . .	79
4.1.3	Identification des mécanismes selon le type de chargement considéré	81
4.2	Présentation des matériaux étudiés . . . . .	81
4.2.1	Acier S235 JR . . . . .	81
4.2.2	Fer puddlé provenant du pont sur l'Adour (Bayonne) . . . . .	81
4.3	Bilan . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Caractérisation des fers puddlés</b>	<b>89</b>
5.1	Caractérisation chimique . . . . .	91
5.1.1	Identification des compositions chimiques . . . . .	91
5.2	Caractérisation mécanique . . . . .	95
5.2.1	Essais sous chargements quasi-statiques en traction monotone . .	95
5.2.2	Essais sous chargements cycliques à amplitude de contrainte constante	116
5.2.3	Essais sous chargements cycliques par palier progressifs de contrainte (mesure de l'auto-échauffement) . . . . .	118
5.3	Caractérisation microscopique . . . . .	129
5.3.1	Différentes tailles et formes d'inclusions, microscopie optique . . . .	129
5.3.2	Répartition des éléments d'addition, analyse MEB-EDX . . . . .	130
5.3.3	Des bandes de Phosphore, réactif d'Oberhoffer . . . . .	132
5.3.4	Bilan . . . . .	133

---

5.4	Conclusion	133
<b>6</b>	<b>Caractérisation mécanique de détails constructifs simples sous chargements quasi-statiques</b>	<b>135</b>
6.1	La corrélation d'images comme outil de caractérisation	137
6.1.1	Système de corrélation GOM - ARAMIS	138
6.2	Identification des scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté	140
6.2.1	Identification des conditions initiales d'un assemblage riveté	140
6.2.2	Proposition d'un scénario de fonctionnement	143
6.2.3	Essais de traction monotone	145
6.3	Caractérisation de la raideur d'un assemblage riveté	157
6.3.1	Essais de charge-décharge à charge maximale constante	159
6.3.2	Essais de charge-décharge à charge maximale incrémentale	163
6.4	Conclusion	165
<b>7</b>	<b>Caractérisation mécanique de détails constructifs simples sous chargements cycliques</b>	<b>167</b>
7.1	Influence de la concentration de contrainte dans le comportement à la fatigue : essais sur plaques percées	170
7.2	Influence de la présence d'une pression diamétrale : essais sur assemblages avec tige à haute limite élastique	173
7.3	Influence de la présence d'un effort de serrage : essais sur assemblages rivetés	175
7.4	Conclusion	177
	<b>Conclusions générales et perspectives</b>	<b>181</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>185</b>
<b>A</b>	<b>Abaque de calcul de facteur de concentration de contrainte pour une plaque percée (Pilkey, 1997)</b>	<b>193</b>
<b>B</b>	<b>Publications et communications</b>	<b>195</b>
B.1	Articles dans des revues internationales issues de congrès	195
B.2	Communications lors des congrès internationaux	195
B.2.1	Présentations orales	195
B.2.2	Posters scientifiques	196
<b>C</b>	<b>Glossaire Technique</b>	<b>197</b>
<b>D</b>	<b>Dictionnaire Technique</b>	<b>199</b>



# Table des figures

0.1	Évolution du réseau ferré national français (bilan provenant des rapports internes <i>SNCF Réseau</i> ). . . . .	2
0.2	Évolution des matériaux et des méthodes d'assemblage utilisés dans la construction des ponts métalliques (De Bouw <i>et al.</i> , 2009; Collette, 2014; Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). Exemples de ponts ferroviaires parmi lesquels se trouve le Pont sur l'Adour dont le matériau est étudié dans cette thèse. . . . .	3
0.3	Structure du manuscrit . . . . .	7
1.1	Ponts ferroviaires métalliques en service gérés par la SNCF, 2015 (rapports internes <i>SNCF Réseau</i> ). . . . .	14
1.2	Exemple d'une des éprouvettes sollicitées en traction par Fairbairn (1850) lors de ses études sur la résistance des assemblages rivetés. . . . .	18
1.3	Exemple d'arrachement d'un assemblage riveté sur armature suite au dépassement des efforts en pression diamétrale, adapté d'après Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES) (2014). . . . .	18
1.4	Exemple de cisaillement d'un rivet sur un assemblage à double recouvrement. . . . .	19
1.5	Quelques fait marquants dans l'évolution de l'étude du phénomène de fatigue des matériaux et des structures (Moore et Kommers, 1927; Cazaud et Persoz, 1943; Bathias et Pineau, 2008). . . . .	22
1.6	Exemple de chargement cyclique sinusoïdal (contrainte normale). $f$ = fréquence de sollicitation, $\Delta\sigma$ = étendue de contrainte, $\sigma_a = \Delta\sigma/2$ = amplitude contrainte, $\sigma_m$ = contrainte moyenne, $\sigma_{max}$ = contrainte maximale, $\sigma_{min}$ = contrainte minimale. . . . .	23
1.7	Contraintes calculées selon le type de pièce testée. . . . .	24
1.8	Représentation des essais de fatigue classique réalisés sur l'acier XC 10. La courbe de tendance correspond à l'expression donnée par le modèle de Stroe- meyer (Bathias et Pineau, 2008). . . . .	25



1.9	Représentation du comportement en fatigue classique sous chargement de cisaillement pour deux catégories de détail constructif. Courbes du type ( $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ ) (Comité Européen de Normalisation, 2005). . . . .	26
1.10	Représentation simplifiée d'une courbe S-N. Identification des domaines. . . . .	27
1.11	Schéma simplifié d'une courbe de fatigue (isoprobabilité de rupture de 50%) en représentation Semi-Log (Hénaff et Morel, 2005). . . . .	28
1.12	Représentation simplifiée des courbes de fatigue pour deux type de matériaux : un acier à comportement asymptotique (en bleu) et un alliage métallique au comportement non-asymptotique (en rouge). . . . .	29
1.13	Dispositif de mesure de température différentiel pour une éprouvette sollicitée en flexion rotative Stromeyer (1914). . . . .	30
1.14	Méthode de caractérisation par auto-échauffement. . . . .	30
1.15	Méthode empirique de dépouillement des essais d'échauffement (à gauche) et comparaison avec les essais classiques de fatigue (à droite) pour la nuance DP60. (Doudard, 2004). . . . .	31
1.16	Mesures thermométriques sur un alliage d'aluminium 2024, le trait pointillé correspond à la limite d'endurance à $10^5$ et le trait plein à $10^6$ (Krapez et Pacou, 2002). . . . .	31
1.17	Représentation schématique des phases d'amorçage et de propagation dans la durée de vie totale d'une pièce selon l'amplitude de chargement appliquée (Bathias et Pineau, 2008). . . . .	32
1.18	Diagramme simplifié de la procédure de vérification d'un ouvrage métallique ancien aux chargements en fatigue. . . . .	35
1.19	Modèle à plusieurs niveaux proposé par Kiss et Dunai (2000) (étude sur le pont Ozd Banreve en Hongrie). . . . .	35
1.20	Mesures de déformation pour les membrures supérieure (à gauche) et inférieure (à droite) pour un élément du pont Ozd Banreve (Hongrie). Comparaison des modèles et des mesures expérimentales par jauges (Kiss et Dunai, 2000). . . . .	36
1.21	Exemple du convoi de référence utilisé dans la norme de 1927 (Ministère des travaux publics, 1927) . . . . .	36
1.22	Évolution du réseau ferré national français (bilan provenant des rapports internes <i>SNCF Réseau</i> ) et de normes de construction qui les concernent. . . . .	37
1.23	Courbes de résistance à la fatigue proposées dans l'Eurocode 3 (Comité Européen de Normalisation, 2005). . . . .	38
1.24	Essais de fatigue classique pour poutres à âme pleine (à gauche) et poutres à treillis (à droite). Comparaison avec les courbes de fatigue des détails C71 (trait continu) et C63 (trait pointillé). . . . .	39
1.25	Représentation graphique du bilan des résultats des essais de fatigue trouvés dans la littérature (Taras et Greiner, 2010) . . . . .	40
1.26	Catégories de détail constructif proposées par Taras et Greiner (2010). . . . .	41
1.27	Expressions de normalisation des amplitudes de contrainte en fonction du rapport de charge et du matériau (Taras et Greiner, 2010). . . . .	41
1.28	Classement des détails constructifs selon les courbes de fatigue proposées dans l'Eurocode 3 (Taras et Greiner, 2010). . . . .	42

2.1	Exemples de ponts ferroviaires rivetés. . . . .	47
2.2	Exemples d'assemblages rivetés retrouvés sur le Viaduc de Garabit. . . . .	48
2.3	Distribution des contraintes de serrage à proximité d'un rivet (Akesson, 2010). . . . .	49
2.4	Description d'un rivet à tête ronde avant et après la pose. Où <b>D</b> est diamètre de la tête du rivet, <b>d</b> est le diamètre nominal de la tige, <b>h</b> est la hauteur de la tête, <b>r</b> le rayon de la tête, <b>l</b> la longueur nominale de la tige et <b>j</b> le jeu radial entre la tige et la surface interne du trou après la pose. . . . .	50
2.5	Dispositions constructives utilisées dans les assemblages rivetés. . . . .	50
2.6	Bilan de dispositions constructives d'assemblages en simple et double recouvrement (Collette, 2014). . . . .	51
2.7	Exemples d'assemblages rivetés soumis à différents types de sollicitations d'après (Dechamps, 1908; Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). . . . .	51
2.8	Exemple d'une opération d'alésage sur l'assemblage de 3 tôles par un technicien d'une équipe RPM (Réparation des Ponts Métalliques) de <i>SNCF Réseau</i> . . . . .	53
2.9	Exemples d'équipes de rivetage en train de travailler. . . . .	53
2.10	Échauffement de quatre rivets dans un four de chantier à 980°C. . . . .	54
2.11	Rivet frappé au sol afin de le débarrasser au mieux de la calamine qui le recouvre. . . . .	55
2.12	Installation de serre-joints avant rivetage sur un assemblage mono-rivet à double recouvrement. . . . .	55
2.13	Séquence de martelage du rivet. . . . .	55
2.14	Exemples d'assemblages mono-rivet en double recouvrement terminés (fer puddlé et acier). . . . .	56
2.15	Exemple de scénarios de ruine possibles pour un assemblage mono-rivet en double recouvrement sollicité en traction (a) : rupture par tension de la tôle centrale (b), rupture du rivet en cisaillement (c) et rupture par pression diamétrale de la tôle centrale (d). . . . .	58
3.1	Présentation du four de puddlage, d'après Garnier (1878). . . . .	63
3.2	Four à puddler manuel (gauche) et four à puddler mécanique, système Danks (droite), d'après Garnier (1878). . . . .	64
3.3	Différentes configurations d'empilement de lopins permettant d'obtenir une poutre « I » par laminage, d'après Twelvetrees (1900). . . . .	65
3.4	Influence du taux de Carbone sur la limite d'élasticité à 0,2%, d'après (Lakhtine, 1971) (gauche) et influence du Manganèse sur les propriétés mécaniques du fer et des aciers, d'après Roberts-Austen (1898) (droite). . . . .	65
3.5	Bilan historique des tests mécaniques, caractérisation de la limite en traction, extrait de Bowman et Piskorowski (2004). . . . .	66
3.6	Influence du diamètre sur la réponse en traction de barres en fer (gauche) et bilan de limites d'élasticité et de ductilité de barres de fer américaines, britanniques et scandinaves (droite), d'après O'Sullivan et Swailes (2009). . . . .	67
3.7	Essais de traction sur un lot de barreaux d'une tôle de Commentry, adapté de Love (1859). . . . .	67
3.8	Exemple d'essais de propagation sur les fers puddlés du Pont Eiffel (a) et du Pont Luiz I (b) au Portugal, d'après De Jesus <i>et al.</i> (2011) . . . . .	68

3.9	Micrographie du fer puddlé du pont Fão, au Portugal, d'après De Jesus <i>et al.</i> (2011) (gauche) et micrographie longitudinale d'un fer puddlé selon Sauveur (1938) (droite). . . . .	69
3.10	Structures fantômes visibles après une attaque au réactif d'Oberhoffer (gauche) et évolution de la teneur en Phosphore au voisinage d'une inclusion traduisant la déphosphoration autour de l'inclusion (droite), d'après Vega <i>et al.</i> (2002). . .	70
3.11	Diagramme de phases binaire Fer - Phosphore, d'après Okamoto (1990) . . . .	71
4.1	Définition de l'angle entre l'axe de sollicitation d'une éprouvette et l'axe du laminage. . . . .	78
4.2	Représentation graphique de la stratégie expérimentale pour la caractérisation des assemblages. . . . .	80
4.3	Le pont sur l'Adour. <i>Photo prise le 3 avril 2013 lors de la visite technique de sélection de pièces à récupérer lors de la démolition.</i> . . . . .	82
4.4	Vue aérienne de la position de l'ancien Pont sur l'Adour. . . . .	83
4.5	Repérage des pièces en fer puddlé à récupérer (Pont sur l'Adour). . . . .	84
4.6	Plan d'une pièce de pont provenant des archives de <i>SNCF Réseau</i> (coupe transversale de l'ouvrage) sur lequel est indiquée une des tôles à récupérer lors de la démolition du pont. . . . .	85
4.7	Repérage des pièces en fer puddlé récupérés pour les travaux de thèse (Pont sur l'Adour) (1/2). . . . .	85
4.8	Repérage des pièces en fer puddlé récupérées dans le cadre de cette thèse (Pont sur l'Adour). Vues latérales du Pont sur l'Adour (2/2). . . . .	86
4.9	Bilan des expériences menées. . . . .	87
5.1	Composition chimique des deux lots d'acier S235 utilisés dans les campagnes expérimentales. Comparaison avec la norme de livraison en vigueur. . . . .	92
5.2	Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour (1864) comparée aux compositions de deux fers puddlés étudiés au laboratoire (1893 et 1897). . . . .	94
5.3	Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour comparée aux compositions des fer puddlés d'une centaine d'échantillons, principalement allemands (Sustainable Bridges, 2007). . . . .	94
5.4	Comparaison entre les compositions chimiques des deux lots d'acier S235 utilisés dans les campagnes expérimentales avec celle du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Mise en évidence de la présence de Phosphore dans ce fer puddlé de 1864. . . . .	95
5.5	Schéma des éprouvettes de traction (International Organization for Standardization, 2009). . . . .	96
5.6	Essais de traction sur éprouvettes en acier S235. . . . .	96
5.7	Courbe de traction monotone pour une éprouvette en acier S235, lot N°1. . . .	97
5.8	Courbe de traction monotone pour une éprouvette en acier S235, lot N°2. . . .	97
5.9	Comparaison des courbes de traction pour les éprouvettes provenant des deux lots d'acier S235 utilisés. . . . .	98
5.10	Micrographie des aciers S235 attaqués au Nital 2%. . . . .	99
5.11	Essais de traction sur éprouvettes en fer puddlé. . . . .	100

5.12	Courbes de traction pour les éprouvettes de section $80\text{mm}^2$ . . . . .	101
5.13	Courbes de traction pour les éprouvettes de section $160\text{mm}^2$ . . . . .	101
5.14	Courbes de traction pour les éprouvettes de section $320\text{mm}^2$ . . . . .	102
5.15	Bilan des courbes de traction pour éprouvettes de section différente. . . . .	103
5.16	Notation utilisée pour les « boîtes à moustache ». . . . .	103
5.17	Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée, les valeurs des médianes sont indiquées. . . . .	104
5.18	Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée comparée aux résultats obtenus par Fairbairn (1850). . . . .	104
5.19	Évolution de l'allongement total sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée. Les valeurs des médianes sont indiquées. . . . .	105
5.20	Évolution de la limite élastique ( $R_p$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée. Les valeurs des médianes sont indiquées. . . . .	105
5.21	Micrographie du fer puddlé du Pont sur l'Adour après attaque au Nital (2 %). Mise en évidence de bandes à grains fins (environ $30\mu\text{m}$ ) et à gros grains (environ $200\mu\text{m}$ ). . . . .	106
5.22	Images prises au Microscope Électronique à Balayage de la plateforme de microscopie PIMM-DRX de l'Université de Bretagne Occidentale. Mise en évidence des faciès de rupture sur le fer puddlé. . . . .	107
5.23	Faciès de rupture provenant des éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour sollicités en traction monotone. . . . .	107
5.24	Mesure du taux de cristallinité sur les faciès de rupture des éprouvettes sollicités en traction monotone. . . . .	108
5.25	Schéma de prélèvement des éprouvettes, exemple des orientations à $45^\circ$ et $90^\circ$ . . . . .	108
5.26	Essais de traction sur éprouvettes en fer puddlé. Mise en évidence de l'influence de l'orientation des inclusions sur les éprouvettes découpées. . . . .	109
5.27	Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 0^\circ$ . . . . .	110
5.28	Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 30^\circ$ . . . . .	110
5.29	Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 45^\circ$ . . . . .	111
5.30	Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 60^\circ$ . . . . .	112
5.31	Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 90^\circ$ . . . . .	112
5.32	Bilan des courbes de traction sur éprouvettes à $\alpha$ variable. . . . .	113
5.33	Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'orientation des inclusions. . . . .	114
5.34	Évolution de l'allongement sous chargement maximale ( $A_{gt}$ ) selon l'orientation des inclusions. . . . .	114
5.35	Évolution de la limite élastique ( $R_p$ ) selon l'orientation des inclusions. . . . .	115
5.36	Comportement en fatigue à grand nombre de cycles pour des éprouvettes en fer puddlé, $R = -1$ , $\alpha = 0^\circ$ . Le symbole « $\circ \rightarrow$ » représente une éprouvette non-rompue. . . . .	117
5.37	Mise en évidence de l'effet de l'orientation des éprouvettes sur le comportement du fer puddlé en fatigue à grand nombre de cycles, $\alpha = 0^\circ$ , $45^\circ$ et $90^\circ$ , $R = -1$ . . . . .	117
5.38	Présentation du montage expérimental pour les essais d'auto-échauffement. . . . .	119
5.39	Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à $\alpha = 0^\circ$ . . . . .	120
5.40	Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à $\alpha = 30^\circ$ . . . . .	120
5.41	Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à $\alpha = 45^\circ$ . . . . .	121

5.42	Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à $\alpha = 60^\circ$ .	121
5.43	Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à $\alpha = 90^\circ$ .	121
5.44	Bilan des essais d'auto-échauffement. Mise en place des courbes moyennes de température pour chaque orientation avec superposition de $\pm 2\sigma$ , où sigma représente l'estimateur non-biaisé de l'écart type.	122
5.45	Préparation d'échantillon de microscopie.	123
5.46	Exemple de reconstitution d'une micrographie à partir de deux images individuelles.	124
5.47	Exemples de populations d'inclusions sur des sections provenant des éprouvettes à $0^\circ$ , $45^\circ$ et $90^\circ$ .	125
5.48	Analyse de la population d'inclusions en fonction de l'angle $\alpha$ .	126
5.49	Observation de stries de fatigue sur des faciès de rupture d'éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour.	128
5.50	Observation simultanée de trois modes de rupture sur un faciès de rupture d'une éprouvette en fer puddlé du Pont sur l'Adour : fragilité (clivage), ductilité (cupules) et fatigue (stries).	128
5.51	Microstructure du fer puddlé du Pont sur l'Adour après attaque au Nital.	129
5.52	Micrographies du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Voisinage d'une grosse inclusion.	130
5.53	Micrographies du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Visualisation des « plis » du fer.	130
5.54	Reconstruction en haute résolution d'une section droite provenant de l'éprouvette FP-MT-S160-03.	131
5.55	Analyse MEB-EDX d'une région comportant une grosse inclusion fracturée, éprouvette FP-MT-S160-03.	132
5.56	Micrographie de zone attaquée au réactif d'Oberhoffer. Fer puddlé du Pont sur l'Adour.	133
6.1	Mise en évidence de la différence entre les mesures de déplacement de traverse (prélevées par la machine de traction) et celles du déplacement local sur une éprouvette (déplacement moyen de la zone d'intérêt).	137
6.2	Définition d'une zone d'intérêt (region of interest ROI) dans l'image de l'objet de l'état initial (à gauche) et dans l'image de l'objet après déformation (à droite) d'après Périé <i>et al.</i> (2002).	138
6.3	Exemple du mouchetis réalisé sur la surface latérale d'un assemblage riveté en acier.	139
6.4	Présentation du dispositif expérimental de mesure de champs déplacement 3D par corrélation d'images.	139
6.5	ROI (region of interest / zone d'intérêt) considérées dans chacun des détails constructifs étudiés.	139
6.6	Exemple d'un jeu radial visible dans un assemblage en fer puddlé du Pont sur l'Adour.	140
6.7	Exemple d'un assemblage montrant un jeu radial variable important entre la tige du rivet et la surface interne des trous.	140

6.8	Expérience proposée par Mathieu et Lavalley (1852) pour déterminer la force à appliquer pour provoquer le glissement dans un assemblage double recouvrement.	141
6.9	Triplures de référence exécutées par l'équipe de rivetage de <i>SNCF Réseau</i> .	142
6.10	Mise en évidence des jeux initiaux sur les triplures de référence.	143
6.11	Différents modes de rupture selon Twelvetrees (1900).	143
6.12	Dimensions des éprouvettes en double recouvrement utilisées dans les campagnes expérimentales.	144
6.13	Dimensions de l'axe à haute limite élastique.	144
6.14	Différents mécanismes de ruine étudiés avec les éprouvettes rivetées, réalisées par l'équipe de rivetage de <i>SNCF Réseau</i> .	145
6.15	Traitement des données obtenus par corrélation d'images pour une plaque percée en acier S235.	146
6.16	Essai de traction sur l'éprouvette A2-ST-PP-14 en acier S235 (lot N°2).	147
6.17	Essai de traction sur l'éprouvette A2-ST-PP-14 en acier S235 (lot N°2).	148
6.18	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-PP-08 en fer puddlé du Pont sur l'Adour.	149
6.19	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-PP-08 en fer puddlé du Pont sur l'Adour.	150
6.20	Traitement des données obtenues par corrélation d'images pour un assemblage à haute limite élastique en acier S235.	150
6.21	Essai de traction sur l'éprouvette A1-ST-AT-12 en acier S235 (lot N°2).	151
6.22	Essai de traction sur l'éprouvette A1-ST-AT-12 en acier S235 (lot N°2).	152
6.23	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AT-19 en fer puddlé du pont sur l'Adour avec tige à haute limite élastique.	153
6.24	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AT-19 en fer puddlé du pont sur l'Adour avec tige à haute limite élastique.	153
6.25	Traitement des données obtenues par corrélation d'images pour un assemblage riveté en acier S235.	154
6.26	Essai de traction sur l'éprouvette rivetée A1-ST-AR-23 en acier S235.	155
6.27	Essai de traction sur l'éprouvette rivetée A1-ST-AR-23 en acier S235.	155
6.28	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AR-08 en fer puddlé et rivetée à chaud.	156
6.29	Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AR-08 en fer puddlé et rivetée à chaud.	156
6.30	Analyse des jeux après rupture des éprouvettes rivetées.	157
6.31	Scénario de fonctionnement proposé par Al-Emrani (2002) pour un assemblage mono-rivet en double recouvrement.	158
6.32	Courbes de traction pour des éprouvettes de type détail constructif simple en acier ( <i>Effort vs. Dep <math>Y_{sup}</math></i> ) : plaques percées (en vert), assemblages avec tige à haute limite élastique (en bleu) et assemblages rivetés (en rouge).	159
6.33	Grandeurs expérimentales lors des premiers trois cycles de charge et de décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20.	160
6.34	Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les trois premiers cycles.	161
6.35	Grandeurs expérimentales lors des cycles 4, 5 et 6 de charge et décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20.	161
6.36	Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les cycles 4, 5 et 6.	162

6.37	Évolution de la raideur sécante en fonction des nombres de cycles appliqués sur des assemblages rivetés en acier. . . . .	162
6.38	Évolution de la raideur sécante en fonction des nombres de cycles appliqués sur des assemblages rivetés en fer puddlé. . . . .	163
6.39	Grandeurs expérimentales lors de cycles incrémentaux de charge et de décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20. . . . .	163
6.40	Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les cycles incrémentaux de charge et de décharge. . . . .	164
6.41	Évolution de la raideur sécante en fonction de l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué sur des assemblages rivetés en acier. . . . .	164
6.42	Évolution de la raideur sécante en fonction de l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué sur des assemblages rivetés en fer puddlé. . . . .	165
7.1	Courbes S-N pour éprouvettes à section pleine et pour éprouvettes percées (et alésées) en fer puddlé du Pont sur l'Adour. Mise en évidence de l'influence de la concentration de contraintes sur le comportement en fatigue d'un détail constructif. . . . .	170
7.2	Courbes S-N pour éprouvettes à section pleine et pour éprouvettes percées (et alésées) en acier S235 (lot N°2). Mise en évidence de l'influence de la concentration de contraintes sur le comportement en fatigue d'un détail constructif. . . . .	171
7.3	Courbes S-N pour éprouvettes percées (et alésées) en fer puddlé du Pont sur l'Adour et en acier S235. Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type. . . . .	171
7.4	Essais de fatigue sur tôles percées. Mise en évidence de l'influence du procédé utilisé, d'après Mang et Bucak (1996); Sustainable Bridges (2007). . . . .	172
7.5	Courbes S-N pour éprouvettes percées et alésées et éprouvettes assemblées en double recouvrement (en acier S235, lot N°1) par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence d'une pression diamétrale. . . . .	173
7.6	Courbes S-N pour éprouvettes percées et alésées (en fer puddlé du Pont sur l'Adour) et éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence d'une pression diamétrale. . . . .	174
7.7	Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type. . . . .	174
7.8	Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique et éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355 et tôles en acier S235, lot N°2). Mise en évidence de l'influence d'un effort de serrage. . . . .	175
7.9	Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique et éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355 et tôles en fer puddlé). Mise en évidence de l'influence d'un effort de serrage. . . . .	176
7.10	Mise en évidence de la dégradation de la peinture sous chargement cyclique pour les éprouvettes en fer puddlé. . . . .	176

---

7.11	Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355). Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type. . . . .	177
7.12	Exemples de rupture en fatigue pour des éprouvettes du type détail constructif.	178
7.13	Courbes S-N pour éprouvettes fabriquées en acier S235. . . . .	178
7.14	Courbes S-N pour éprouvettes fabriquées en fer puddlé. . . . .	179
7.15	Comparaison avec courbes de détail constructifs proposés dans la littérature. .	179
7.16	Comparaison avec courbes de détail constructifs proposés dans la littérature. .	180
7.17	Comparaison de la courbe proposée pour les assemblages rivetés que nous avons étudié ( $\Delta\sigma_C = 100MPa$ , $m = 8$ ) avec les courbes de détails constructifs issues de la littérature (Taras et Greiner, 2010; Comité Européen de Normalisation, 2005). . . . .	180
A.1	Évolution du facteur de concentration de contraintes au bord d'un trou en fonction des paramètres géométriques de la tôle étudiée (Howland). . . . .	193





# Liste des tableaux

0.1	Synthèse des règlements de calcul - Contraintes admissibles. (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). Les valeurs sont présentées en $kg/mm^2$ (unités originales utilisées dans les normes présentées) et $MPa$ (unités utilisées actuellement dans les normes de construction). . . . .	2
1.1	Classification UIC des voies ferrées selon leur volume de trafic . . . . .	13
1.2	Pathologies retrouvées sur les ponts métalliques. . . . .	15
1.3	Pathologies propres aux ponts métalliques rivetés. . . . .	20
2.1	Défauts propres aux ponts métalliques rivetés. . . . .	56
3.1	Composition chimique du réactif cuivrique d'Oberhoffer. . . . .	69
5.1	Influence de composants chimiques sur les propriétés matériau des aciers (Sustainable Bridges, 2007; Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, 1993). . . . .	91
5.2	Composition chimique des deux échantillons d'acier S235, chaque échantillon provient d'un des deux lots utilisés dans les campagnes expérimentales. . . . .	92
5.3	Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. . . . .	93
5.4	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur des éprouvettes provenant des deux lots d'acier S235 utilisés. . . . .	98
5.5	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section $80mm^2$ . . . . .	101
5.6	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section $160mm^2$ . . . . .	102
5.7	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section $320mm^2$ . . . . .	102
5.8	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section $400mm^2$ . . . . .	106

5.9	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 0^\circ$ . . . . .	110
5.10	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 30^\circ$ . . . . .	111
5.11	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 45^\circ$ . . . . .	111
5.12	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 60^\circ$ . . . . .	112
5.13	Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à $\alpha = 90^\circ$ . . . . .	113
5.14	Composition de la zone de traction monotone étudiée par microanalyse EDX. . . . .	131
6.1	Bilan des mesures des jeux initiaux sur les triplures de référence. . . . .	143
6.2	Bilan des déplacements verticaux relatifs à la transition entre la première et la deuxième étape du scénario de fonctionnement proposé pour les assemblages rivetés à chaud. . . . .	157

# Nomenclature

## Abréviations

<i>AFNOR</i>	Association Française de Normalisation
<i>CEN</i>	Comité Européen de Normalisation
<i>CIFRE</i>	Conventions Industrielles de Formation par la Recherche
<i>EC</i>	Eurocode
<i>ECCS</i>	European Convention for Constructional Steelwork
<i>IRDL</i>	Institut de Recherche Dupuy de Lôme
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>JRC</i>	Joint Research Center
<i>LBMS</i>	Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes
<i>MEB</i>	Microscope Électronique à Balayage
<i>PIMM-DRX</i>	Plate-forme d'Imagerie de Mesures en Microscopie et de Diffraction par Rayons X
<i>ROI</i>	Region of Interest (zone d'intérêt)
<i>SB</i>	Sustainable Bridges (projet européen)
<i>SNCF</i>	Société Nationale des Chemins de Fer Français
<i>STRRES</i>	Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Réparations et Renforcement de Structures
<i>SI</i>	Système International d'Unités
<i>UBL</i>	Université Bretagne Loire
<i>UBO</i>	Université de Bretagne Occidentale
<i>UIC</i>	Union Internationale des Chemins de Fer
<i>VER</i>	Volume Élémentaire Représentatif

## Symboles

### Chapitre 1

<i>d</i>	Diamètre
----------	----------

$D$	Endommagement cumulé
$e$	Épaisseur
$f$	Fréquence de sollicitation
$F$	Effort appliqué
$k_{tg}$	Coefficient de concentration de contrainte (appliqué à la contrainte calculée sur la section pleine)
$k_{tn}$	Coefficient de concentration de contrainte (appliqué à la contrainte calculée sur la section nette)
$m$	Coefficient de pente apparente (représentation log-log) d'une courbe de résistance à la fatigue
$M$	Moment appliqué
$N$	Nombre de cycles à rupture
$N_a$	Nombre de cycles dans la phase d'amorçage
$N_{fi}$	Nombre de cycles possibles à une étendue de contrainte $\Delta\sigma_i$
$N_j$	Nombre de cycles appliqués à une étendue de contrainte $\Delta\sigma_j$
$N_p$	Nombre de cycles dans la phase de propagation
$R$	Rapport de charge ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )
$\theta$	Température moyenne
$\bar{\theta}$	Température stabilisée
$\sigma_a$	Amplitude de contrainte (contrainte normale)
$\sigma_D$	Limite d'endurance (en amplitude de contrainte)
$\sigma_m$	Contrainte moyenne (contrainte normale)
$\sigma_{min}$	Contrainte minimale (contrainte normale)
$\sigma_{max}$	Contrainte maximale (contrainte normale)
$\sigma_{nom}$	Contrainte nominale (contrainte normale)
$\sigma_{nette}$	Contrainte nette (contrainte normale)
$\Delta\sigma$	Étendue de contrainte (contrainte normale)
$\Delta\sigma_C$	Valeur de contrainte de référence à la fatigue à $N = 2 \times 10^6$
$\Delta\sigma_{C,0}$	Valeur de contrainte de référence à la fatigue à $N = 2 \times 10^6$ pour $R = 0$
$\Delta\sigma_D$	Limite de fatigue pour les étendues de contrainte d'amplitude constante à un nombre de cycles $N_D$
$\Delta\sigma_L$	Limite de troncature pour des étendues de contrainte à un nombre de cycles $N_L$

## Chapitre 2

$d$	Diamètre nominal (avant la pose) de la tige du rivet
$D$	Diamètre de la tête du rivet
$E$	Épaisseur cumulée des tôles à assembler
$h$	Hauteur de la tête du rivet
$j$	Jeu radial entre la tige et la surface interne du trou (après pose)
$l$	Longueur nominale (avant la pose) de la tige du rivet
$r$	Rayon de la tête du rivet

---

## Chapitre 3

$HV$  Dureté Vickers

## Chapitre 5

$A_{gt}$  Allongement sous chargement maximum  
 $IQR$  Écart interquartile  
 $k$  Coefficient de proportionnalité  
 $L_0$  Longueur initiale de jauge  
 $L_t$  Longueur totale  
 $m_E$  Pente de la zone élastique  
 $Q1$  Premier quartile  
 $Q2$  Deuxième quartile  
 $Q3$  Troisième quartile  
 $R_{eH}$  Limite élastique haute  
 $R_{eL}$  Limite élastique basse  
 $R_m$  Résistance à la traction  
 $R_{p\ 0,075}$  Limite élastique pour un seuil de déformation plastique de 0,075 %  
 $R_{p\ 0,2}$  Limite élastique pour un seuil de déformation plastique de 0,2 %  
 $S_0$  Aire de la section droite  
 $T_{ep}$  Température non corrigée de l'éprouvette  
 $T_{mi}$  Température du mors inférieur  
 $T_{ms}$  Température du mors supérieur  
 $\alpha$  Angle entre l'axe de prélèvement d'une éprouvette et l'axe de laminage  
 $\theta$  Température moyenne corrigée

## Chapitre 6

$d$  Diamètre nominal (avant la pose) du rivet  
 $DepY_{inf}$  Déplacement vertical moyen de la zone inférieure de la tôle centrale  
 $DepY_{inf\ A}$  Déplacement vertical moyen de la zone inférieure de la tôle à gauche de la tôle centrale (dans l'image)  
 $DepY_{inf\ B}$  Déplacement vertical moyen de la zone inférieure de la tôle centrale  
 $DepY_{inf\ C}$  Déplacement vertical moyen de la zone inférieure de la tôle à droite de la tôle centrale (dans l'image)  
 $DepY_{inf\ Rel}$  Déplacement vertical moyen de la zone inférieure de la tôle centrale par rapport au déplacement inférieur moyen des tôles extérieures  
 $DepY_{sup}$  Déplacement vertical moyen de la zone supérieure de la tôle centrale  
 $DepY_{sup\ A}$  Déplacement vertical moyen de la zone supérieure de la tôle à gauche de la tôle centrale (dans l'image)  
 $DepY_{sup\ B}$  Déplacement vertical moyen de la zone supérieure de la tôle centrale  
 $DepY_{sup\ C}$  Déplacement vertical moyen de la zone supérieure de la tôle à droite de la tôle centrale (dans l'image)

$DepY_{sup} Rel$	Déplacement vertical moyen de la zone supérieure de la tôle centrale par rapport au déplacement supérieur moyen des tôles extérieures
$k_{\text{épreuve}}$	Raideur de l'éprouvette
$k_{\text{machine}}$	Raideur de la machine
$k_{AR}$	Raideur « monotone » d'un assemblage riveté
$k_{AT}$	Raideur « monotone » d'un assemblage avec tige à haute limite élastique
$k_{PP}$	Raideur « monotone » d'une plaque percée
$k_{tn}$	Coefficient de concentration de contrainte (appliqué à la contrainte calculée sur la section nette)

## Chapitre 7

$f_{ch}$	Fréquence de sollicitation
$m$	Coefficient de pente apparente (représentation log-log) d'une courbe de résistance à la fatigue
$N$	Nombre de cycles à rupture
$R$	Rapport de charge ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )
$\Delta\sigma$	Étendue de contrainte (contrainte normale)
$\Delta\sigma_C$	Valeur de contrainte de référence à la fatigue à $N = 2 \times 10^6$

# Introduction

*La fin est dans le commencement et cependant on continue.*

---

SAMUEL BECKETT  
Fin de Partie (1957)

Ce mémoire de thèse présente les travaux de recherche réalisés dans le cadre d'une collaboration CIFRE entre la Société Nationale des Chemins de Fer Français et le Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes<sup>1</sup>.

## Contexte et objectif

Comportant plus de 30000 km de voies et plus de 26000 ponts et viaducs, le réseau ferroviaire français est l'un des plus étendus et des plus anciens du continent européen. Une telle infrastructure nécessite une maintenance adaptée visant à garantir l'exploitation en toute sécurité d'un réseau vieillissant sous un trafic toujours en évolution.

Actuellement, les ouvrages d'art ferroviaires modernes sont conçus pour une durée de vie recommandée d'un siècle, sous des normes de construction issues de l'expertise collective de nombreux gestionnaires ferroviaires (Comité Européen de Normalisation, 2005). Néanmoins, beaucoup de ces ouvrages métalliques avec une durée de vie comprise entre 100 et 150 ans (et même au delà) sont toujours en service.

En effet, à l'exception des lignes à grande vitesse, le réseau ferroviaire français a été construit principalement au cours de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle (voir figure 0.1). L'exploitation de ces ponts anciens est toujours possible, malgré la forte évolution du trafic (augmentation des charges, vitesses et fréquence de passage des convois), car les réglementations du XIX<sup>ème</sup> siècle limitaient fortement les contraintes subies dans les éléments des ponts de l'époque (voir table 0.1).

Néanmoins, les valeurs des contraintes admissibles sur les pièces des ponts par rapport à leur capacité réelle n'est pas la seule préoccupation pour ce type de structure. Aujourd'hui, les constatations sur l'endommagement des ponts-rails suite au passage répété du matériel

---

1. Le Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes et le Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne ont fusionné au 1<sup>er</sup> janvier 2016 pour former l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme.



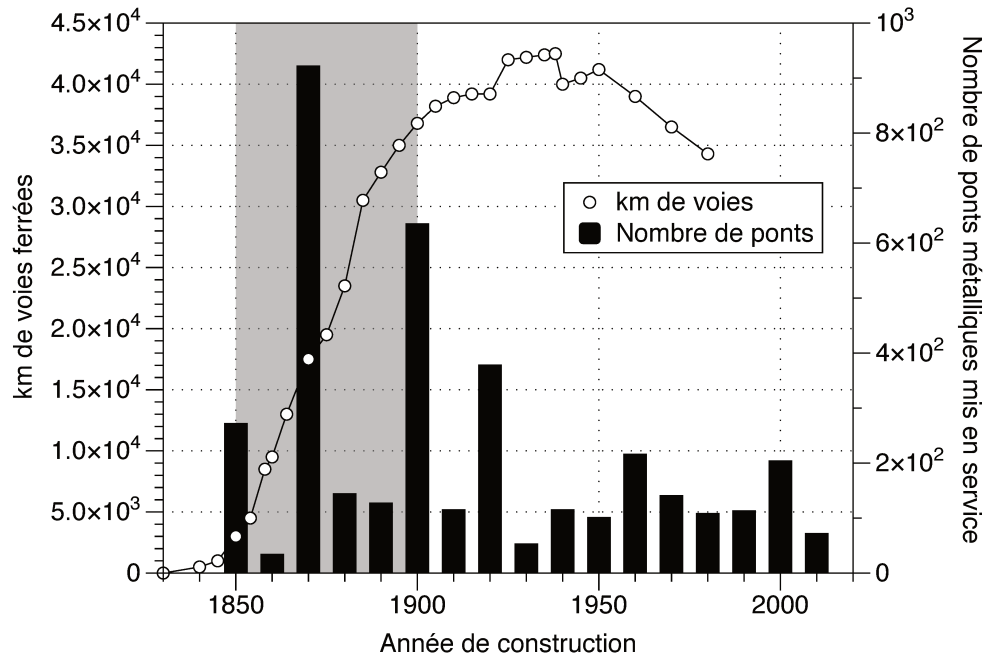


FIGURE 0.1 – Évolution du réseau ferré national français (bilan provenant des rapports internes SNCF Réseau).

TABLE 0.1 – Synthèse des règlements de calcul - Contraintes admissibles. (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). Les valeurs sont présentées en  $kg/mm^2$  (unités originales utilisées dans les normes présentées) et  $MPa$  (unités utilisées actuellement dans les normes de construction).

T : traction, C : compression, TF : traction-flexion, CF : compression-flexion

Contraintes $kg/mm^2$ $MPa$	Fonte				Fer Puddledé	Acier
	T	C	TF	CF	T-C	T-C
<b>Règlement 15/06/1869</b>	1 9,8	5 49	- -	- -	6 58,8	- -
<b>Règlement 09/07/1877</b>	1,5 14,7	5 49	3 29,4	5 49	6 58,8	- -
<b>Règlement 29/08/1891</b>	1,5 14,7	6 58,8	2,5 24,5	6 58,8	6,5 ou 8,5 63,7 ou 83,3	8,5 ou 11,5 83,3 ou 112,7
<b>Règlement 08/01/1915</b>	0 0	6,5 ou 7 63,7 ou 68,6	0 0	6,5 ou 7 63,7 ou 68,6	- -	8 à 13,5 78,4 ou 132,3

roulant (fatigue) sont des plus en plus nombreuses. Ce phénomène de fatigue des matériaux n'a été pris en compte qu'à partir du règlement du 29 août 1891 (Ministère des travaux publics, 1891). La majorité des ouvrages du XIX<sup>ème</sup> siècle, n'a donc pas été dimensionnée en prenant en compte les efforts répétés ou les variations de chargement.

Compte tenu de la variété des types de construction, de l'évolution des matériaux, ainsi que des méthodes employées pour réaliser les assemblages, l'évaluation des ponts métal-

liques anciens reste une opération délicate. En effet, c'est au cours de la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle que s'opère une révolution dans la construction des ponts métalliques. Comme l'illustre la figure 0.2, cette période correspond à une évolution des matériaux et des types de construction. La fonte est progressivement remplacée par le fer puis l'acier (De Bouw *et al.*, 2009) ; les procédés d'assemblage évoluent également (Collette, 2014). La figure 0.2 situe également quelques ponts caractéristiques (le *Iron Bridge*, le *Viaduc de Garabit* et le *Viaduc de Vaur*) ainsi que le pont sur l'Adour, duquel nous avons extrait le matériau étudié dans ces travaux de thèse.

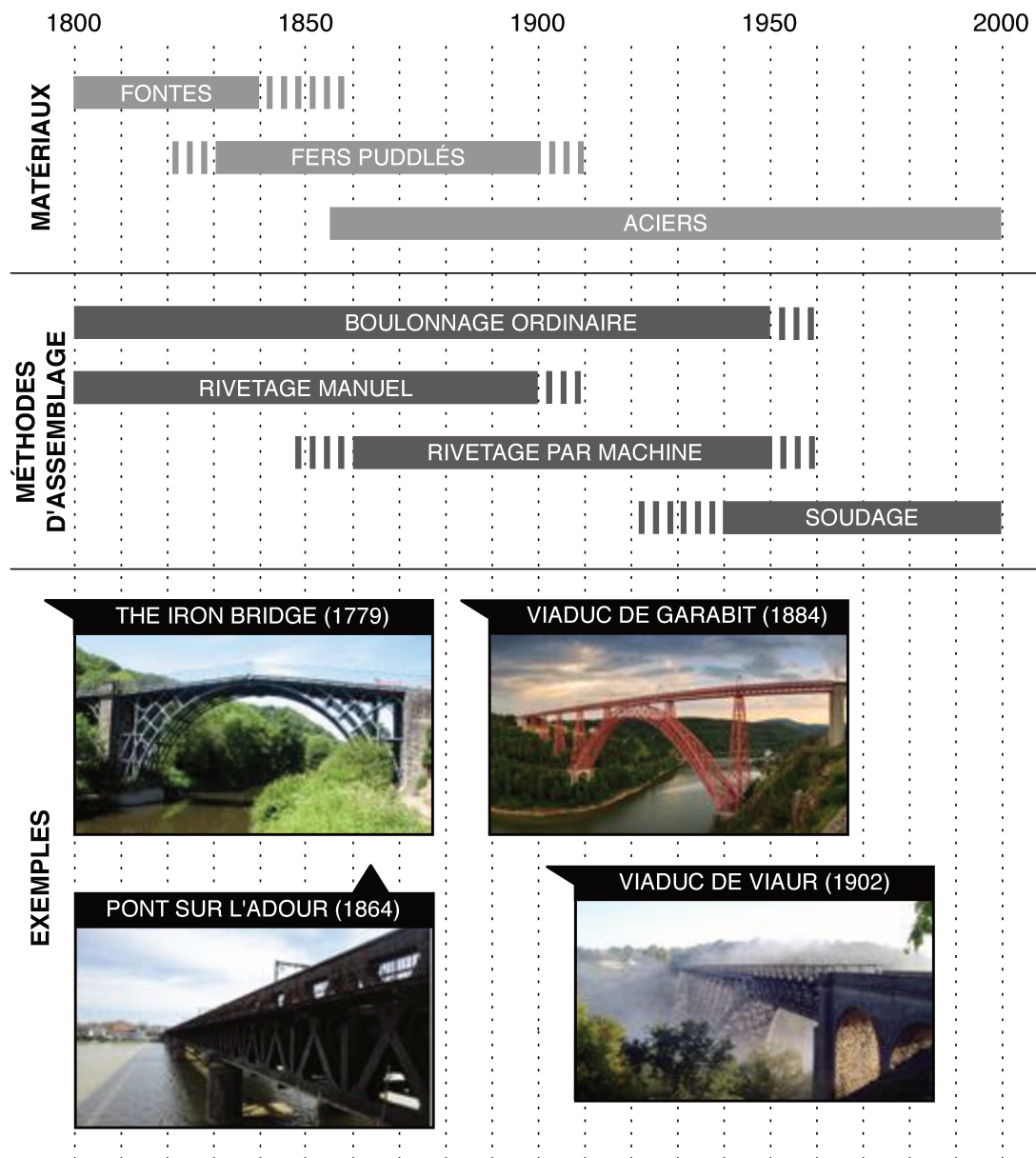


FIGURE 0.2 – Évolution des matériaux et des méthodes d'assemblage utilisés dans la construction des ponts métalliques (De Bouw *et al.*, 2009; Collette, 2014; Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). Exemples de ponts ferroviaires parmi lesquels se trouve le Pont sur l'Adour dont le matériau est étudié dans cette thèse.

La fatigue des ouvrages d'art métalliques anciens n'est pas une problématique propre

au réseau ferroviaire français. Le phénomène est en effet étudié dans d'autres pays européens, tels que par exemple la Suisse (Brühwiler *et al.*, 1990), la Suède (Akesson, 2010), l'Allemagne (Helmerich, 2012), le Portugal (De Jesus *et al.*, 2015) ou l'Italie (Pipinato *et al.*, 2009). Il est également étudié outre-atlantique (DiBattista *et al.*, 1998).

Le remplacement à court terme de la totalité de ce type de ponts (y compris de nombreux monuments historiques) reste une opération coûteuse et d'une grande complexité. Des alternatives visant à augmenter la pérennité de ces ouvrages doivent donc être proposées.

***L'objectif de cette thèse consiste donc à améliorer la connaissance et la compréhension du comportement mécanique (notamment à la fatigue à grand nombre de cycles) des assemblages des anciens ponts métalliques ferroviaires.***

## Portée et limites

Compte tenu du nombre considérable de types d'ouvrages métalliques présents dans le réseau, nous focalisons cette étude uniquement sur les ponts métalliques rivetés, et plus précisément sur ceux construits en fer puddlé.

Parmi les difficultés retrouvées lors de la caractérisation d'un matériau ancien se trouve le fait que son procédé de fabrication (puddlage) n'est plus réalisé de nos jours. Nous avons donc récupéré le fer puddlé nécessaire à la fabrication des éprouvettes de caractérisation à partir d'un pont mis hors service par vétusté. Le pont choisi en accord avec le département des ouvrages d'art de SNCF fut le Pont sur l'Adour, situé à Bayonne et démoli en 2013 (voir figure 0.2). Ce choix a été réalisé en prenant les précautions suivantes :

1. Les tôles de fer récupérées proviennent des parties du pont sélectionnées suite à une étude méticuleuse des rapports de surveillance de l'état de l'ouvrage, afin de garantir un état jugé suffisamment bon du matériau récupéré.
2. La position dans la structure, et donc, le type de chargement subi par les éléments du pont récupérés a été pris en compte afin d'obtenir des tôles ayant subi des chargements sensiblement homogènes (*i.e.* privilégier les éléments sollicités en traction sur ceux sollicités en flexion).

Ce choix est également accompagné des hypothèses suivantes :

1. Nous considérons le Pont sur l'Adour, ainsi que le matériau qui le constitue suffisamment représentatif des ouvrages métalliques ferroviaires rivetés de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.
2. Nous considérons que chaque élément n'est constitué que d'un seul type de fer. Comme nous le verrons plus dans le détail dans le chapitre 3, le terme « fer puddlé » correspond davantage à un groupe de métaux qu'à un matériau unique.
3. Nous considérons que l'histoire de chargement de deux éléments voisins du même type (*e.g.* deux montants voisins de même épaisseur) est sensiblement la même.

Enfin, dans le but d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement d'un assemblage riveté, nous avons proposé une stratégie expérimentale des assemblages mono-rivet en double recouvrement. L'intérêt d'une telle démarche réside dans la possibilité de caractériser plus finement ce type de joint et ainsi d'établir leurs scénarios de fonctionnement.

---

## Méthodologie

Nous proposons ainsi une évaluation du comportement mécanique d'un pont métallique selon trois échelles différentes : celles de l'ouvrage d'art, celle du détail constructif et celle du matériau. Cette distinction a pour but d'évaluer de manière individuelle les verrous scientifiques liés à chacune de ces échelles. Cette démarche, nous permettra ensuite de mieux comprendre le comportement de la structure dans sa globalité.

### Structure du manuscrit

Ce document est divisé en deux parties : la première, intitulée **De l'ouvrage d'art au matériau** est consacrée à une revue bibliographique des travaux concernant la thématique des ponts métalliques anciens. Elle comprend trois chapitres, chacun correspondant à une échelle d'étude :

Nous commençons dans le **Chapitre 1** par un bilan des problématiques liées au vieillissement des réseaux ferroviaires, ainsi qu'aux pathologies retrouvées dans les anciens ouvrages métalliques rivetés. Dans ce premier chapitre nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Quels sont les phénomènes qui ont le plus d'influence sur la durée de vie résiduelle des ponts métalliques rivetés ?
2. Comment sont décrits et caractérisés ces phénomènes dans la littérature ?
3. Comment la variété dans les dispositions constructives sont prises en compte (ou non prises en compte) dans la littérature (notion de détail constructif) ?

Nous décrivons ensuite dans le **Chapitre 2** la méthode d'assemblage par rivetage à chaud, son évolution ainsi que les conséquences du procédé sur le comportement mécanique de la structure. Dans ce chapitre nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Quels sont les scénarios précis de fonctionnement de ce type d'assemblage dans le cadre de l'exploitation ferroviaire ?
2. Quelles caractéristiques propres à ce type d'assemblage sont liées à sa durée de vie résiduelle ?
3. Quels défauts sont retrouvés dans ce type d'assemblage ?
4. Comment ces défauts sont pris en compte (ou non pris en compte) dans l'évaluation générale de l'ouvrage d'art étudié ?

Pour conclure la première partie, le **Chapitre 3** est dédié à l'étude du matériau constituant les ponts ferroviaires anciens, plus particulièrement le fer puddlé ainsi qu'aux méthodes utilisées jusqu'à présent pour sa caractérisation. Ce type de fer est connu dans la littérature pour son comportement mécanique dispersif et anisotrope (Sire *et al.*, 2012b; Sustainable Bridges, 2007). Dans ce chapitre nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Quelles sont les conséquences du procédé de puddlage sur la composition et le comportement mécanique du matériau obtenu ?

2. Quels sont les outils de caractérisation et de description de ce type de matériau (à défauts) trouvés dans la littérature ?

Une fois l'état de l'art établi, une deuxième partie du manuscrit intitulée : **De l'éprouvette au détail constructif** est dédiée aux campagnes expérimentales menées dans le but de mieux comprendre le comportement des assemblages rivetés dans le contexte des applications ferroviaires. Cette deuxième partie est composée de quatre chapitres :

Le **Chapitre 4** où nous présentons dans le détail la stratégie mise en place pour les campagnes expérimentales. Dans ce chapitre nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Comment mettre en évidence l'influence du comportement hétérogène et anisotrope du fer puddlé sur le comportement mécanique d'un assemblage riveté ?
2. Comment mettre en évidence l'influence du procédé de rivetage dans le comportement mécanique d'un assemblage de ce type ?

Nous continuons par le **Chapitre 5** consacré aux expériences menées sur des éprouvettes en acier moderne et en fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Le comportement du matériau sous des sollicitations quasi-statiques et cycliques est étudié. Dans ce chapitre nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Le comportement mécanique du fer puddlé du Pont sur l'Adour (ainsi que sa micro-structure et sa composition chimique) correspond-t-il aux données retrouvées dans la littérature sur d'autres métaux également catalogués en tant que fers puddlés ?
2. Quelle est l'influence des hétérogénéités propres au fer puddlé sur son comportement mécanique ?

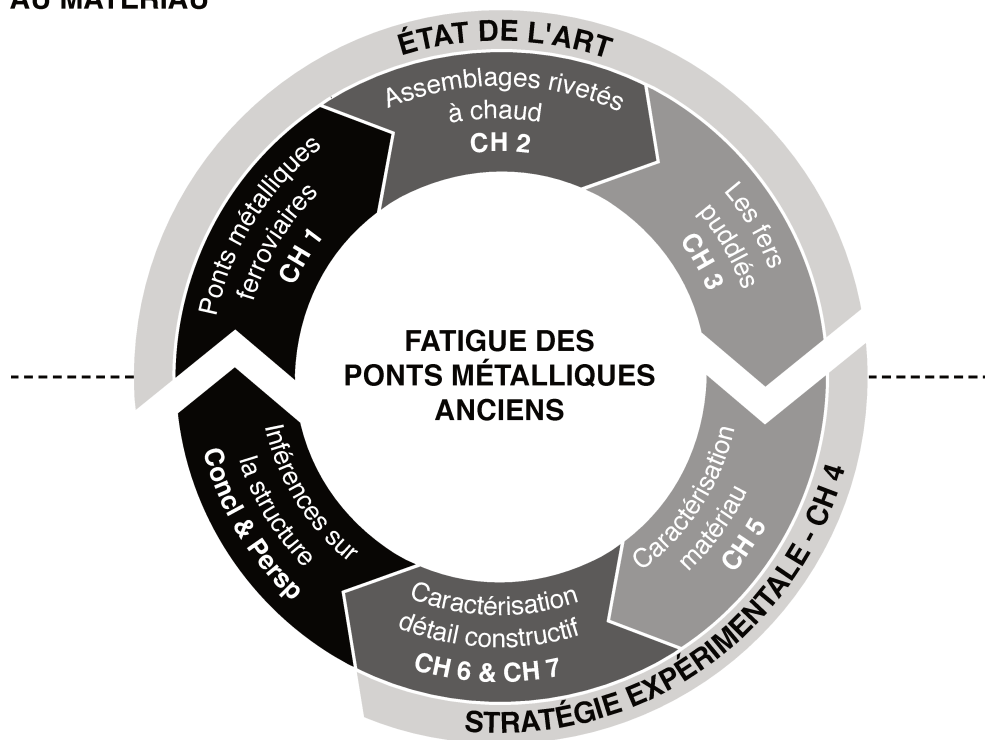
Nous poursuivons le manuscrit par les campagnes de caractérisation mécanique des assemblages rivetés à chaud. Le **Chapitre 6** est dédié à la caractérisation mécanique sous chargements quasi-statiques et le **Chapitre 7** à la caractérisation sous chargements cycliques. Dans ces deux chapitres nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

1. Quels sont les scénarios de fonctionnement (et les mécanismes de ruine) pour les assemblages rivetés à chaud ?
2. Quelle est l'influence du matériau sur le comportement mécanique de ce type d'assemblage ?
3. Quelle est l'influence du procédé de rivetage ?

Ces différentes campagnes expérimentales originales nous permettent de proposer des conclusions pour la caractérisation et maintenance des ouvrages d'art métalliques anciens. Nous terminons ce manuscrit par des perspectives liées à ces travaux de recherche.

La figure 0.3, représente schématiquement la structure de ce manuscrit.

Première partie :  
**DE L'OUVRAGE D'ART  
AU MATÉRIAU**



Déuxième partie :  
**DE L'ÉPROUVETTE  
AU DÉTAIL CONSTRUCTIF**

FIGURE 0.3 – Structure du manuscrit



## PREMIÈRE PARTIE

# DE L'OUVRAGE D'ART AU MATÉRIAU

*There is nothing in machinery, there is nothing in embankments and railways and iron bridges and engineering devices to oblige them to be ugly. Ugliness is the measure of imperfection.*

---

H. G. WELLS  
A Modern Utopia (1905)





# Surveillance et vérification des ouvrages métalliques anciens

*Dans ce premier chapitre, nous présentons la problématique industrielle de ce travail de thèse. Nous décrivons brièvement l'état actuel du parc des ouvrages d'art métalliques ferroviaires français, et nous présentons les questions posées par leur maintenance, et donc, par les pathologies liées à leur vieillissement.*

*Parmi ces pathologies, nous nous focaliserons sur celles provoquées par la fatigue à grand nombre de cycles. Nous décrivons ensuite une partie des outils mis à la disposition des ingénieurs pour la prise en compte de ce phénomène d'endommagement dans le dimensionnement (ou la vérification) des structures.*

*En tant que phénomène masqué et progressif, la fatigue est étudiée dans le domaine des ouvrages d'art ferroviaires par de nombreuses équipes de recherche depuis des décennies. Une compilation bibliographique des campagnes expérimentales en fatigue à l'échelle de la structure est donc proposée. Nous faisons le bilan des principales conclusions et nous proposons de possibles chemins à explorer afin de raffiner les méthodes d'estimation de la durée de vie résiduelle pour ce type de structure.*

## Contenu

---

1.1	Généralités sur les ponts métalliques du réseau ferroviaire français . . . . .	13
1.2	Généralités sur la fatigue des matériaux et des structures . . . . .	21
1.3	Vérification de la tenue à la fatigue des vieux ponts métalliques . . . . .	33
1.4	Bilan . . . . .	43

---



## 1.1 Généralités sur les ponts métalliques du réseau ferroviaire français

Actuellement, parmi les 26000 ponts et viaducs gérés par *SNCF Réseau* 5134 ponts sont métalliques. Ces ouvrages sont classifiés (classement UIC) selon le volume de transit ferroviaire<sup>1</sup> (voir table 1.1) :

- 1477 parmi les groupes 1 à 6.
- 2400 parmi les groupes 7 à 9.
- 1257 sont sur des lignes fermées au trafic.

TABLE 1.1 – Classification UIC des voies ferrées selon leur volume de trafic

GRUPE UIC	VOLUME DU TRAFIC ( $V_t$ ) [ $10^6$ /an/voie]
0	Ligne fermée au trafic
1	$V_t \geq 45$
2	$30 \leq V_t < 45$
3	$18 \leq V_t < 30$
4	$10 \leq V_t < 18$
5	$5 \leq V_t < 10$
6	$2,5 \leq V_t < 5$
7	$1,25 \leq V_t < 2,5$
8	$0,5 \leq V_t < 1,25$
9	$V_t < 0,5$

La figure 1.1 nous renseigne sur les dates de construction de ces ouvrages. Nous estimons qu'environ 55 % des structures métalliques en service (environ 2140 ponts) ont *au moins* une centaine d'années. Ce chiffre est prévu d'augmenter à 58 % (2256 ponts) pour l'année 2020 et à 75 % (2015 ponts) à l'horizon 2050. La nécessité de développer des méthodes de diagnostic sur la *durée de vie résiduelle* de ces ouvrages est donc cruciale.

Les enjeux liés à cette problématique, peuvent être classés de la manière suivante :

- **Sécuritaires** : En tant que responsable du maintien et de l'exploitation du réseau ferroviaire, *SNCF Réseau* doit garantir les déplacements en toute sécurité de plus de 15000 trains de fret et de voyageurs de manière quotidienne.
- **Économiques** : La quantité d'ouvrages à réparer (ou remplacer) étant importante, l'optimisation des calendriers d'intervention (*e. g.* réduction de temps d'interruption du trafic, limitation de la dégradation des ouvrages en attente d'intervention majeure, etc.) peut avoir un impact non négligeable sur le budget dédié à leur maintenance.
- **Culturels** : Des nombreux ouvrages d'art ferroviaires métalliques sont classés Monuments Historiques (*e. g.* Viaduc de Garabit, Viaduc de Busseau, Viaduc de Viaur entre autres). *SNCF Réseau* a la mission de les préserver.

1. Ce classement correspond au taux actuel de passage du matériel roulant. Il ne représente donc pas l'historique ni l'évolution des chargements subis par les ouvrages tout au long de leur exploitation.

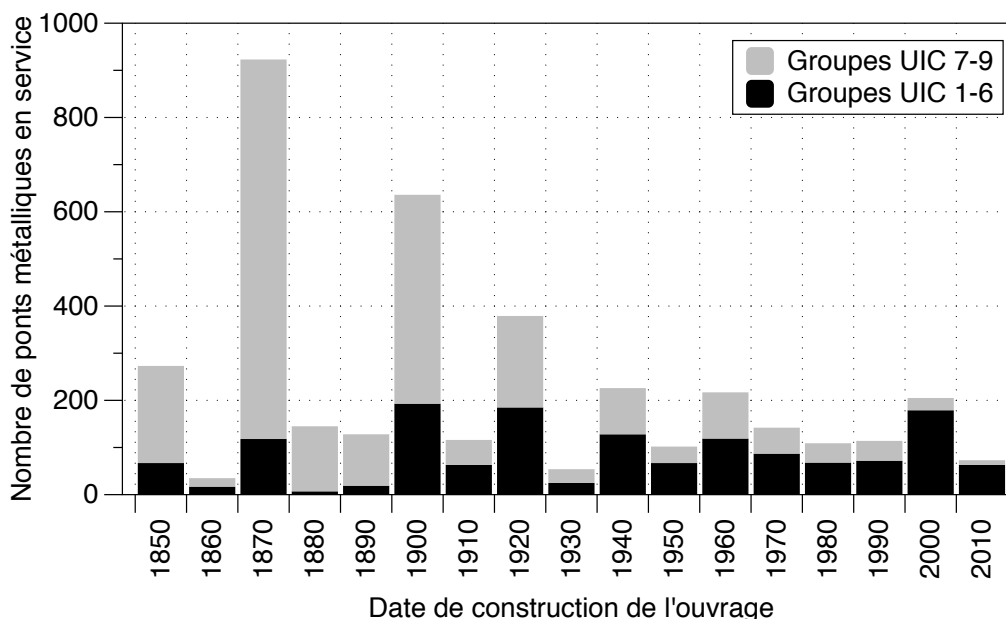


FIGURE 1.1 – Ponts ferroviaires métalliques en service gérés par la SNCF, 2015 (rapports internes SNCF Réseau).

### 1.1.1 Pathologies dans les ouvrages métalliques anciens

Parmi les nombreuses sources de dégradation de l'état de ce type d'ouvrages d'art, nous identifions quatre catégories principales :

- La dégradation liée au **passage répété des convois**. Un trafic qui ne cesse d'augmenter en poids, fréquence et vitesse depuis des décennies.
- L'exposition des structures aux **contraintes naturelles** telles que la pluie et la mer (qui engendrent de la corrosion) ou les tremblements de terre et le vent (qui risquent d'endommager la structure suite aux chargements exceptionnels).
- Les faits liés à **l'exploitation de l'ouvrage**, tel que le transport des matériaux qui augmentent le risque de corrosion (*e. g.* Soufre<sup>2</sup>) ou les accidents de la circulation (*e. g.* heurt subi par la structure suite à un déraillement).
- Des **actes de malveillance** (*e. g.* vandalisme, faits de guerre<sup>3</sup>, etc.).

La table 1.2 fait le bilan des pathologies rencontrées sur les ouvrages métalliques anciens, les méthodes pour les identifier, les causes possibles ainsi que les interventions de réparation à mener<sup>4</sup>.

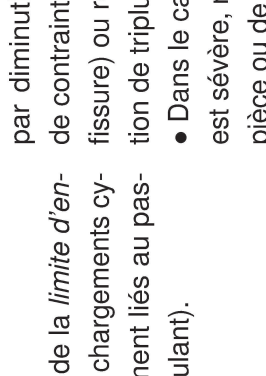
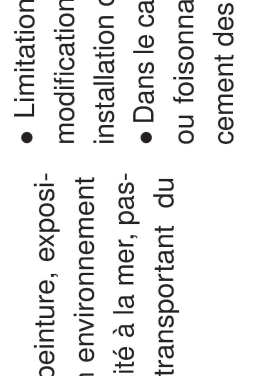
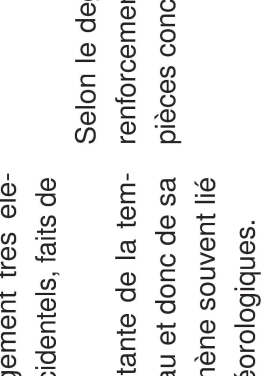
Dans la suite de ce document nous nous focaliserons exclusivement sur les conséquences des chargements mécaniques, en particulier les chargements mécaniques répétés (*fatigue des matériaux et des structures*). Ce phénomène, masqué et progressif et d'autant plus complexe à étudier par son interdépendance aux autres sources possibles de dégradation (*e. g.* fatigue-corrosion).

2. Le Soufre est d'ailleurs responsable d'une corrosion prononcée du côté de la voie ferrée du Pont sur l'Adour à Bayonne. La ligne de Bordeaux à Irun servait en effet, en particulier, au transport de Soufre.

3. Souvent associés aux deux guerres mondiales.

4. Dans le cas où une ou plusieurs de ces pathologies sont présentes sur un même ouvrage au point de compromettre son intégrité structurale, le remplacement total de l'ouvrage est envisagé.

TABLE 1.2 – Pathologies retrouvées sur les ponts métalliques.

PATHOLOGIE	IDENTIFICATION	CAUSES	RÉPARATION
<p><i>Fissures de fatigue</i></p> 	<p>Présence de fissures sur des concentrations géométriques de contraintes (e. g. cordons de soudure, trous de rivets, etc.). L'apparition sur des éléments éloignés des zones de concentration de contraintes reste possible mais rare.</p>	<p>Dépassement local de la <i>limite d'endurance</i> suite à des chargements cycliques (principalement liés au passage du matériel roulant).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrêt de propagation des fissures par diminution de la concentration de contrainte (perçage en pointe de fissure) ou renforcement par installation de triplures.</li> <li>• Dans le cas où l'endommagement est sévère, remplacement total de la pièce ou de l'assemblage concerné.</li> </ul>
<p><i>Corrosion généralisée</i></p> 	<p>Présence de corrosion, altération des dimensions des pièces concernées.</p>	<p>Dégradation de la peinture, exposition prolongée à un environnement corrosif (e.g. proximité à la mer, passage de convois transportant du Soufre, etc.).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitation de la corrosion par la modification des assemblages (e. g. installation de fourrures).</li> <li>• Dans le cas de corrosion creusante ou foisonnante importante, remplacement des pièces concernées.</li> </ul>
<p><i>Rupture fragile</i></p> 	<p>Rupture nette avec déformation limitée des pièces concernées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse de chargement très élevée (e. g. heurts accidentels, faits de guerre, etc.)</li> <li>• Diminution importante de la température du matériau et donc de sa résistance. Phénomène souvent lié aux conditions météorologiques.</li> </ul>	<p>Selon le degré d'endommagement, renforcement ou remplacement des pièces concernées.</p>

### 1.1.2 Les fissures de fatigue dans les ponts métalliques anciens

Les raisons de la haute sensibilité des ouvrages métalliques du réseau français à la fatigue ne se résument pas à leur âge, même si ce paramètre reste d'une grande importance. En plus d'un temps prolongé d'exploitation, ces ouvrages sont aussi propices aux concentrations de contraintes. Ce phénomène est identifié sur les ouvrages métalliques du parc ferroviaire français sous deux formes différentes :

- Les concentrations liées à la **conception** même de l'ouvrage. Par exemple, les découpes des âmes en angle vif ou un espacement important entre entretoises.
- Les concentrations liées aux discontinuités géométriques créées par les **méthodes d'assemblage** utilisées dans les ponts. Pour les structures rivetées (ou boulonnées) ces concentrations se retrouvent autour des trous nécessaires à la mise en place des rivets (ou boulons). Des concentrations de contraintes existent par ailleurs également dans les assemblages soudés<sup>5</sup>.

Ces phénomènes de concentration sont très pénalisants à cause de l'amplification dynamique locale des charges subies par la structure liée à l'absence de ballast (et donc d'amortissement)<sup>6</sup>. Cette configuration est connue sous le nom de *pose de voie directe*.

Malgré l'évolution des méthodes d'identification des fissures sur les structures métalliques<sup>7</sup>, dans le cadre des ouvrages ferroviaires en exploitation, l'inspection visuelle par un expert reste incontournable. Ceci s'explique car la majorité de ces ouvrages d'art ont des conceptions très variées, ils ont été construits dans une période de forte innovation et s'inscrivent, chacun, dans un contexte géographique particulier (*e. g.* franchissement de rivière, route, vallée, etc.). La proposition d'une solution unique valable pour l'identification des fissures de fatigue dans l'ensemble des ouvrages concernés semble donc d'une grande complexité.

En plus d'une conception unique, les conditions d'exploitation liées à l'environnement ne sont pas les mêmes pour chaque pont (*e. g.* environnement corrosif marin, conditions météorologiques sévères, etc.). Dans certains cas, deux ouvrages d'art à géométrie quasi-identique, construits à la même période, et retrouvés sur la même ligne (une même histoire de chargement est donc présumée), ne présentent pas le même niveau d'endommagement ni nécessairement les mêmes pathologies.

Les fissures de fatigue repérées par les experts lors des visites techniques peuvent être classifiées en deux catégories selon le moment de leur apparition :

- Les **fissures anciennes**, c'est à dire, identifiées lors des visites précédentes et qui se trouvent sous surveillance (*i. e.* mesure régulière de longueur et d'ouverture).
- Les **fissures repérées pour la première fois**. Ces dernières restent le cas le plus inquiétant puisqu'elles révèlent la progression de l'endommagement de la structure.

Cependant, il est toujours possible qu'une fissure repérée pour la première fois soit en réalité une avarie ancienne non identifiée précédemment. C'est pourquoi, certains

---

5. Ce procédé ne sera pas étudié dans la suite de ce document.

6. La prise en compte de cette amplification est décrite dans l'Eurocode 3 dédié au calcul des structures en acier (fatigue) (Comité Européen de Normalisation, 2005).

7. Parmi ces technologies nous retrouvons de systèmes basés sur la mesure des signaux acoustiques, thermographiques, des mesures de résistivité ou de déplacements par corrélation d'images, entre autres.

indices relatifs à l'ancienneté de la fissure peuvent être également relevés : par exemple, la présence (ou absence) de rouille ou de peinture au niveau de la fissure (Larsson, 2009).

Selon la gravité de l'avarie, les spécialistes proposeront les procédures de réparation nécessaires (e. g. installation de triplures, remplacement des pièces et dans les cas les plus graves le remplacement de l'ouvrage pourra être envisagé.). Une description plus détaillée de ces procédures est réalisée dans le document de réparation des ouvrages métalliques proposé par le Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES) (2014).

Les fissures provoquées par la fatigue peuvent également être cataloguées par leur localisation dans la structure. En effet, d'après les nombreuses expertises réalisées par *SNCF Réseau* au fil des années, quatre configurations géométriques semblent être particulièrement sensibles au phénomène de fissuration par fatigue<sup>8</sup> :

- Fissures sur les attaches de longerons.
- Fissures sur les membrures supérieures des longerons.
- Fissures sur les attaches de pièces de pont.
- Fissures sur les entretoises des tabliers à poutres jumelles.

En général, quelle que soit la configuration, le point d'initiation de la fissure est une entaille. Cet amorçage peut provenir de congés des cornières ou de cordons de soudure, de zones fortement corrodées ou des trous des rivets (ou boulons).

Compte tenu de l'ampleur des configurations constructives des ouvrages métalliques du parc ferroviaire français, nous nous focaliserons uniquement par la suite sur les ouvrages rivetés. Cette méthode d'assemblage largement utilisée entre 1850 et 1900 correspond à la majorité des ouvrages concernés par le phénomène de fatigue.

### 1.1.3 Pathologie particulières des ouvrages métalliques rivetés

En complément des pathologies générales décrites dans la section 1.1.1, les ouvrages d'art rivetés souffrent de pathologies propres à ce type d'assemblage.

#### 1.1.3.1 La déconsolidation des assemblages

Retrouvée souvent dans le domaine ferroviaire, cette pathologie est mise en évidence lorsqu'un assemblage présente un mouvement relatif visible à l'œil nu entre les pièces qui le constituent. Ceci est observé par la rupture du film de peinture entre les pièces (*i. e.* entre les tôles ou autour des têtes des rivets ou des boulons). La progression de cette pathologie peut être décrite en trois étapes successives (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014) :

1. Rupture du film de peinture.
2. Ressuage d'oxyde.
3. Mouvement relatif perceptible à l'œil nu entre les pièces de l'assemblage avec possible entrée en contact entre la tige du rivet (ou boulon) et la surface interne du trou

---

8. Cette classification fait partie du savoir-faire de *SNCF Réseau* et provient de rapports internes à l'entreprise.



(comblement du jeu). Ceci ne correspondant pas au comportement par adhérence prévu dans ce type d'assemblage.

Les risques liés à la déconsolidation sont nombreux :

- La pression répétée de la tige du rivet (ou boulon) sur la surface interne du trou provoque son ovalisation. Deux scénarios de rupture des tôles constituant l'assemblage se dessinent<sup>9</sup> :
  - la concentration de contrainte dans le sens perpendiculaire à l'axe du chargement appliqué provoque l'apparition d'une fissure (voir figure 1.2).

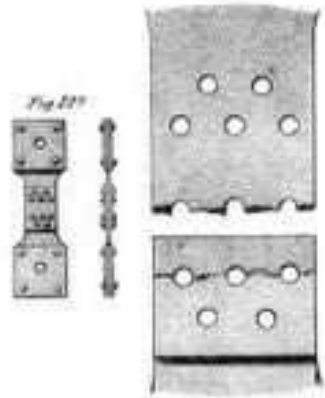


FIGURE 1.2 – Exemple d'une des éprouvettes sollicitées en traction par Fairbairn (1850) lors de ses études sur la résistance des assemblages rivetés.

- la pression diamétrale exercée par la tige du rivet sur la tôle est trop importante et l'arrachement de l'assemblage peut se produire (voir figure 1.3) (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014). Cette configuration concerne également les assemblages boulonnés.

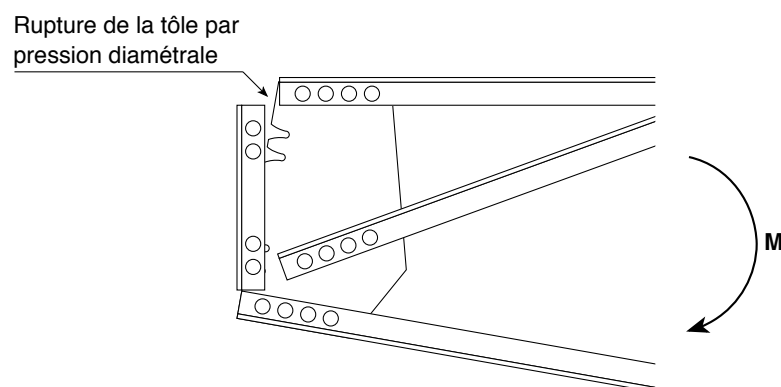


FIGURE 1.3 – Exemple d'arrachement d'un assemblage riveté sur armature suite au dépassement des efforts en pression diamétrale, adapté d'après Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES) (2014).

9. Les scénarios de ruine d'un assemblage riveté seront traités dans le détail dans le chapitre 2.

- La sollicitation cyclique de la tige du rivet en cisaillement entraîne une déformation non acceptable (voir figure 1.4).

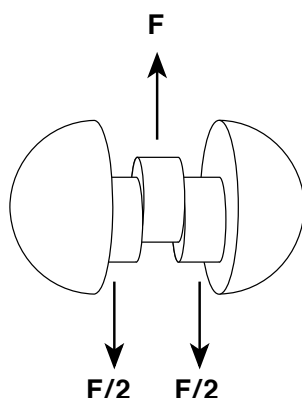


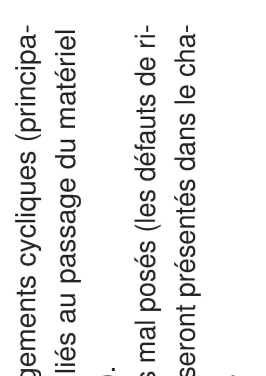
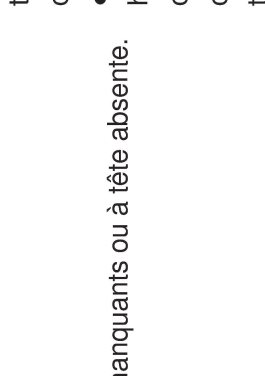
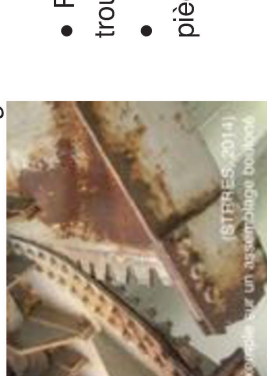
FIGURE 1.4 – Exemple de cisaillement d'un rivet sur un assemblage à double recouvrement.

Les phénomènes de rupture des rivets ou d'arrachement des assemblages n'ont pas comme cause unique la fatigue des matériaux et des structures. Ces pathologies sont en effet également observées sur des ouvrages ayant subi des chargements exceptionnels.

Un bilan des pathologies propres aux assemblages rivetés est proposé de manière synthétique dans la table 1.3.

L'objectif de ce manuscrit étant de se focaliser sur la réponse de ces assemblages aux chargements cycliques (fatigue), nous présenterons par la suite quelques rappels théoriques sur ce phénomène qui interpelle les ingénieurs depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

TABLE 1.3 – Pathologies propres aux ponts métalliques rivetés.

PATHOLOGIE	IDENTIFICATION	CAUSES	RÉPARATION
<p><i>Déconsolidation</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture du film de peinture autour du rivet.</li> <li>• Mouvement relatif entre les pièces de l'assemblage.</li> <li>• Inspection acoustique à l'aide d'un marteau (à l'impact un rivet en bon état produit un son différent à celui d'un rivet déconsolidé).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chargements cycliques (principalement liés au passage du matériel roulant).</li> <li>• Rivets mal posés (les défauts de rivetage seront présentés dans le chapitre 2).</li> </ul>	<p>Selon le degré d'endommagement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplacement des rivets. Selon la géométrie concernée il peut s'agir d'un remplacement par rivets de diamètre supérieur ou par boulons.</li> <li>• Remplacement de l'assemblage dans sa totalité (tôles et cornières concernées).</li> </ul>
<p><i>Rupture des rivets</i></p> 	<p>Rivets manquants ou à tête absente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture suite à une déconsolidation non réparée (cisaillement cyclique de la tige du rivet).</li> <li>• Chargements exceptionnels (e. g. heurts accidentels). Il peut s'agir du cisaillement de la tige ou de l'arrachement de la tête du rivet par traction.</li> </ul>	<p>Remplacements des rivets. Selon la géométrie concernée il peut s'agir d'un remplacement par rivets de diamètre supérieur ou par boulons.</p>
<p><i>Arrachement de l'assemblage</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture des tôles au bord des trous des rivets.</li> <li>• Déplacement significatif des pièces composant l'assemblage.</li> </ul>	<p>Dépassement admissible de la pression diamétrale maximale des tôles concernées.</p>	<p>Dans la majorité des cas l'intégrité structurale est compromise. L'assemblage doit être remplacé dans sa totalité.</p>

## 1.2 Généralités sur la fatigue des matériaux et des structures

Le phénomène de fatigue, est une problématique qui concerne le dimensionnement des pièces et des structures depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, c'est à dire, depuis la croissance de l'ère industrielle. L'industrie ferroviaire a donc toujours été concernée. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet de nombreux travaux depuis la rupture d'un essieu à l'origine de la première catastrophe ferroviaire de France (déraillement sur la ligne Paris-Versailles en 1842 aussi connue comme catastrophe ferroviaire de Meudon) (Rankine, 1843).

Dans un premier temps, nous considérons la *fatigue* en tant que phénomène d'endommagement subi par une pièce (ou une structure) suite aux chargements cycliques. Le danger d'un tel phénomène est que la rupture des pièces en service peut se produire de manière brutale sous des chargements en dessous de la limite élastique.

Également, et pour un chargement quelconque, la *durée de vie* d'une pièce ou d'une structure, correspondra à la période de temps entre la date de l'évaluation de la pièce (ou de la structure) et la date de la fin de vie de service (ruine) estimée à la fatigue. Cette période de temps est directement liée à l'amplitude et au nombre des cycles subis par la pièce (ou la structure) étudiée.

La définition de la *fin de vie* d'une pièce (ou d'une structure) est donc déterminante pour estimer sa *durée de vie*. Cette définition dépendra notamment de la prise en compte (ou non) des deux phases du processus d'endommagement suite aux chargements cycliques :

1. **L'amorçage d'une fissure dite « principale »** : caractérisée par l'apparition et la progression de l'endommagement microscopique produit par les chargements cycliques. Cette phase se termine lorsqu'un défaut macroscopique (fissure) apparaît.
2. **La propagation de la fissure** : une fois que la fissure macroscopique est apparue, des outils supplémentaires tels que la *mécanique de la rupture* sont nécessaires afin de prédire son évolution. Cette phase se termine au moment de la rupture totale.

Deux approches de dimensionnement sont donc utilisées (Hénaff et Morel, 2005) : une quantification plus conservatrice de la *durée de vie* où seule la phase d'amorçage est prise en compte<sup>10</sup>, et une autre, où la phase de propagation est également considérée. Cette deuxième approche doit cependant être nuancée lorsque l'objet d'étude est une pièce unique ou une structure. Dans le premier cas (pièce unique), la rupture de la pièce annonce la *fin de vie*. Dans le deuxième cas (structure), malgré la rupture d'une des pièces constituant l'ensemble (un viaduc par exemple) l'intégrité globale de la structure n'est pas compromise.

### 1.2.1 Historique de l'étude du phénomène de fatigue

La provenance du mot « fatigue » en tant que mécanisme de ruine reste incertaine. Victor Poncelet semble être le premier à décrire la rupture des pièces en service de cette manière en 1839<sup>11</sup>. À l'aide du diagramme temporel de la figure 1.5 nous illustrons très brièvement quelques faits marquants de l'étude de ce phénomène.

---

10. Cette approche part du principe que la phase d'amorçage correspond à 80% - 90% de la période entre l'inspection initiale et la rupture totale.

11. Auparavant, ce type de rupture était associé à la « re-cristallisation » des métaux soumis aux vibrations mécaniques (hypothèse erronée).

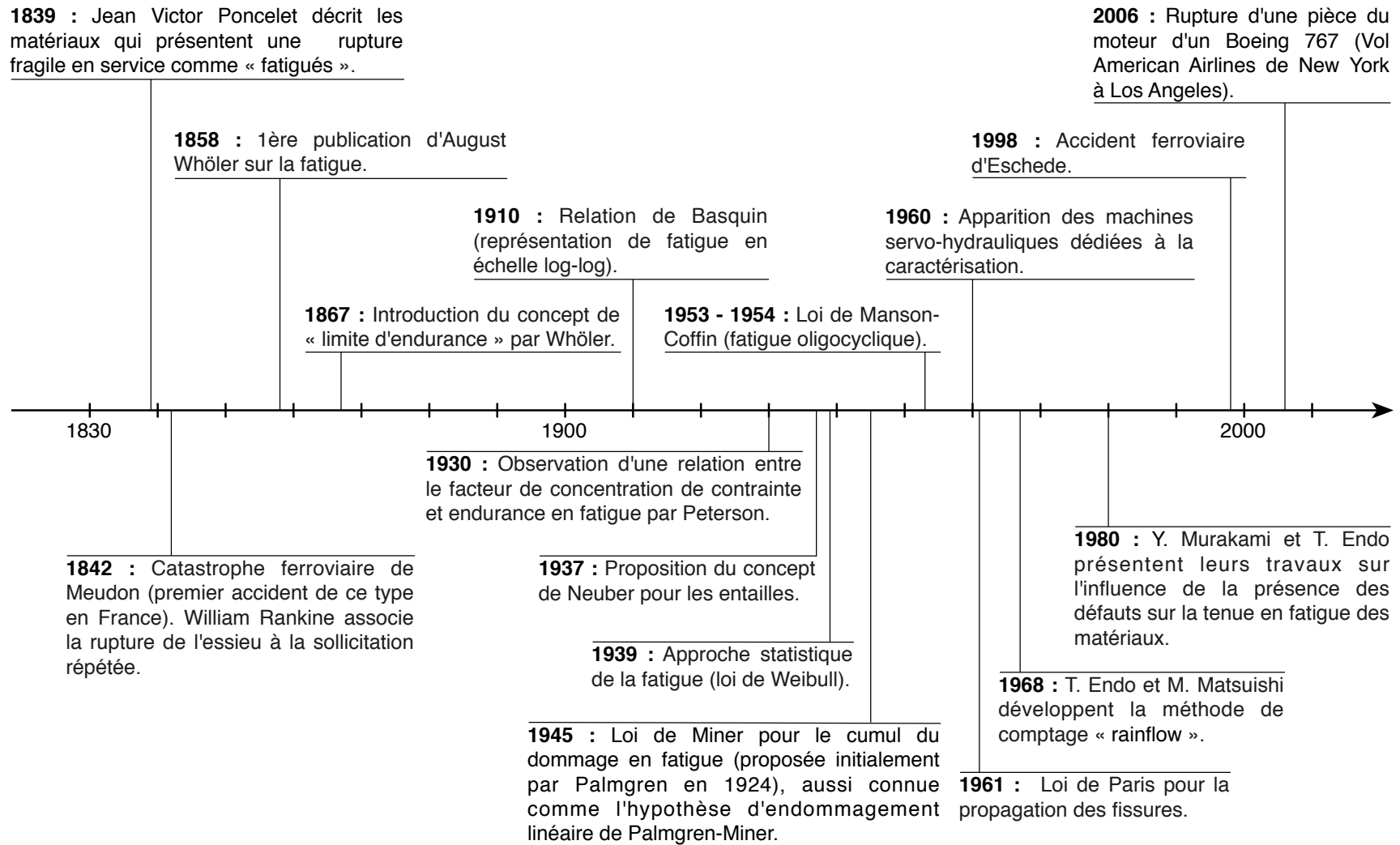


FIGURE 1.5 – Quelques fait marquants dans l'évolution de l'étude du phénomène de fatigue des matériaux et des structures (Moore et Kommers, 1927; Cazaud et Persoz, 1943; Bathias et Pineau, 2008).

### 1.2.2 Caractérisation du phénomène de fatigue

La caractérisation dite « classique » du comportement en fatigue d'une pièce (ou d'une structure) consiste à la soumettre à des chargements cycliques à amplitude constante (voir figure 1.6) jusqu'à sa rupture ; le nombre de cycles correspondant à la ruine est relevé. Cette méthode, souvent appliquée sur un lot comprenant plusieurs dizaines d'éprouvettes, reste longue et coûteuse malgré l'évolution des méthodes expérimentales (notamment dans l'augmentation de la fréquence de sollicitation) (Rabbe *et al.*, 2000).

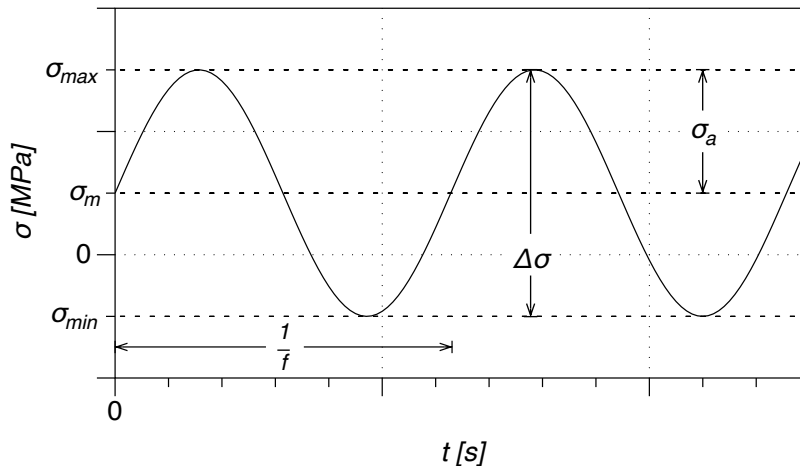


FIGURE 1.6 – Exemple de chargement cyclique sinusoïdal (contrainte normale).  $f$  = fréquence de sollicitation,  $\Delta\sigma$  = étendue de contrainte,  $\sigma_a = \Delta\sigma/2$  = amplitude contrainte,  $\sigma_m$  = contrainte moyenne,  $\sigma_{max}$  = contrainte maximale,  $\sigma_{min}$  = contrainte minimale.

Pour les chargements à amplitude constante, le ratio entre la contrainte minimale  $\sigma_{min}$  et la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  appliquées est connu sous le nom de rapport de charge  $R$  d'une sollicitation. La valeur de ce paramètre nous permet de distinguer quatre modes de sollicitation différents (Bathias et Pineau, 2008) :

- $R = -1$  : Contraintes alternées symétriques en traction-compression.  $\sigma_m = 0$ .
- $-1 \leq R \leq 0$  : Contraintes alternées asymétriques en traction-compression, pour une traction prédominante  $\sigma_m \geq 0$ .
- $R = 0$  : Contraintes de traction en charge et décharge.  $\sigma_m = \sigma_a = \Delta\sigma/2$ .
- $R \geq 1$  : Contraintes ondulées en traction (sans décharge totale ni compression).  $\sigma_m \geq 0$ .

Dans les cas des ouvrages d'art ferroviaires en exploitation, les chargements à l'origine de la fatigue sont rarement à amplitude et fréquence constante. La prise en compte de ses variations sera étudiée dans la section 1.2.3.1.

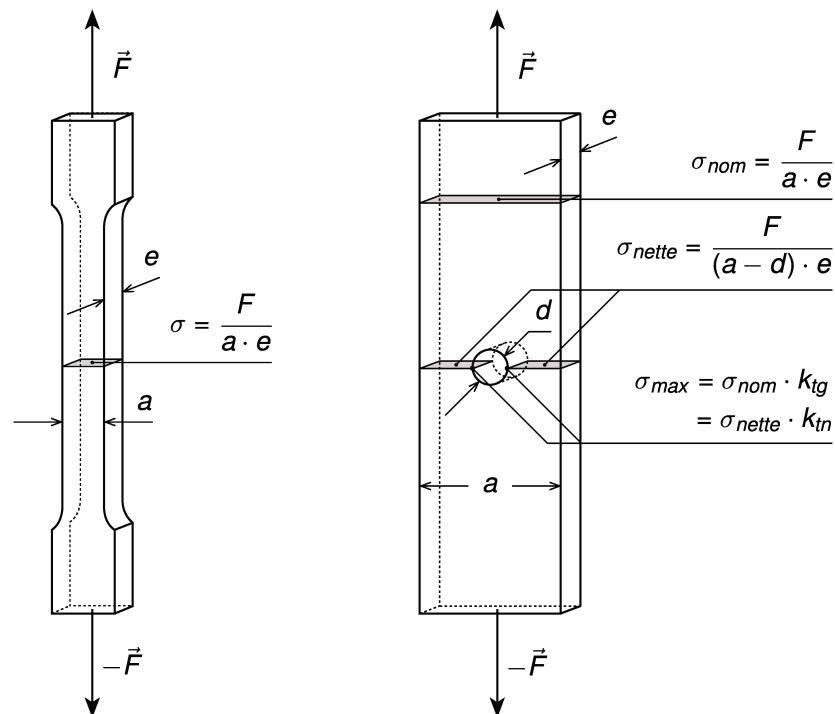
#### 1.2.2.1 Courbes S-N

Pour les chargements à amplitude ( $\sigma_a$ ), rapport de charge ( $R$ ) et fréquence de sollicitation ( $f$ ) constants, la relation entre l'amplitude et la quantité de cycles supportés tout au long de la *durée de vie* de la pièce (ou structure) peut être représentée graphiquement. En général, la contrainte appliquée est sur l'axe des ordonnées et le nombre de cycles écoulés au moment de l'arrêt de l'essai est sur l'axe des abscisses.

L'allure de ces courbes dites « S-N »<sup>12</sup> dépendra notamment de trois éléments :

- **La contrainte représentée**

- **Contrainte calculée** : Selon la pièce (ou structure) sollicitée la distribution des contraintes suite à l'application des efforts cycliques peut être homogène ou hétérogène. Par exemple, dans le cas d'une éprouvette de caractérisation matériau (voir figure 1.7(a)), le calcul de la contrainte à étudier (en traction uni-axiale par exemple) est trivial. Lorsqu'il s'agit d'une pièce à géométrie plus complexe telle qu'une éprouvette percée ou entaillée (voir figure 1.7(b)) la distribution des contraintes n'est plus homogène. Dans ce cas particulier, trois types de contraintes peuvent être représentées sur une courbe de type S-N : la contrainte maximale ( $\sigma_{max}$ ), la contrainte nette ( $\sigma_{nette}$ ), ou la contrainte nominale ( $\sigma_{nom}$ ) (Pilkey, 1997).



(a) Cas d'un éprouvette de caractérisation matériau.

(b) Cas d'une éprouvettes percée (concentration de contraintes). Où  $k_{tg}$  et  $k_{tn}$  correspondent au facteurs de concentration de contrainte pour la section pleine et nette respectivement.

FIGURE 1.7 – Contraintes calculées selon le type de pièce testée.

- **Type de représentation** : Les valeurs de contraintes appliquées peuvent également être représentées selon leur amplitude ( $\sigma_a$ ) ou selon leur étendue ( $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$ ). La première de ces deux représentations est souvent utilisée dans le domaine de la mécanique des matériaux (Hénaff et Morel, 2005; Bathias et Pineau, 2008), la deuxième est plus courante dans le domaine du génie civil (cf. Eurocode Comité Européen de Normalisation (2005)).

12. « Stress-Number of cycles ».

- **Le critère d'arrêt de l'essai** : Telle que nous l'avons décrite en section 1.2, la définition de *fin de vie* n'est pas unique. En effet, lorsqu'il s'agit de la caractérisation du comportement en fatigue des pièces (ou des structures) à géométries complexes (et diverses), nous retrouvons dans la littérature de nombreux protocoles expérimentaux. Le critère de *fin de vie* (et donc de relevé de nombre de cycles écoulé) peut en effet être déterminé l'apparition d'une fissure d'une longueur déterminée ou par la rupture totale de la pièce ou la structure considérée (Al-Emrani, 2002). D'autres possibilités telles qu'une perte de raideur particulière (Brunbauer *et al.*, 2014), le changement de la résistivité de la pièce (Sun, 2004) ou l'apparition d'un point chaud (mesures thermographiques) (Serrano, 2015) peuvent également être utilisées comme critère d'arrêt d'un essai de fatigue.
- **Représentations logarithmiques du phénomène**
  - **Semi-Log** : Cette notation, souvent utilisée dans la littérature en mécanique des matériaux, présente l'axe des ordonnées (contrainte) en échelle linéaire et l'axe des abscisses (nombre cycles) en échelle logarithmique. Les représentations mathématiques pour ce type de courbe sont nombreuses. Parmi les plus utilisées nous retrouvons les expressions de Stromeyer, Palmgren et Weibull, entre autres (Bathias et Pineau, 2008).

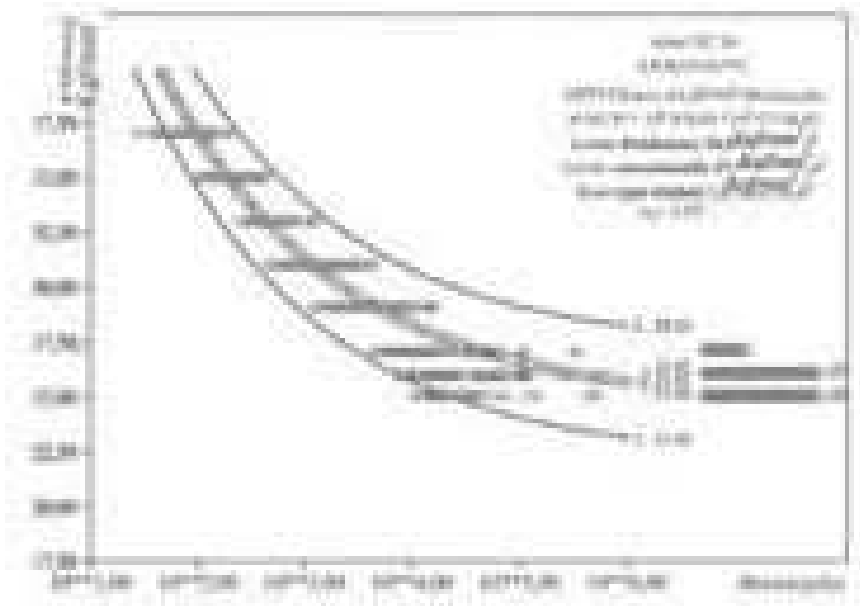


FIGURE 1.8 – Représentation des essais de fatigue classique réalisés sur l'acier XC 10. La courbe de tendance correspond à l'expression donnée par le modèle de Stromeyer (Bathias et Pineau, 2008).

- **Log-Log** : Cette notation, utilisée en général dans le domaine du génie civil (Comité Européen de Normalisation, 2005), montre l'évolution du comportement de la pièce (ou structure) testée à la fatigue à travers des changements de pente (paramètre  $m$ ) et des points de référence (paramètre  $\sigma_c$ ). Ceci permet de simplifier la description du phénomène.



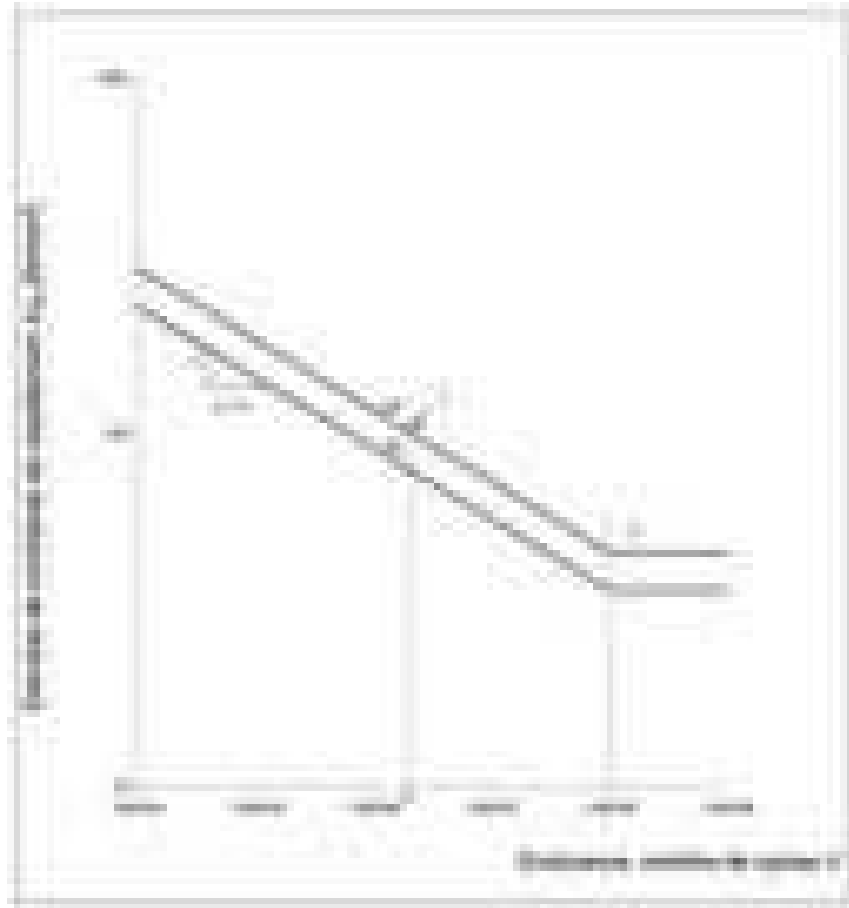


FIGURE 1.9 – Représentation du comportement en fatigue classique sous chargement de cisaillement pour deux catégories de détail constructif. Courbes du type  $(\log \Delta \sigma - \log N)$  (Comité Européen de Normalisation, 2005).

### 1.2.2.2 Domaines du comportement à la fatigue

Le type de comportement d'une éprouvette (matériau ou structure) soumise à des chargements cycliques dépendra également de l'amplitude du chargement subi, notamment par la relation entre le chargement appliqué et la limite élastique du matériau sollicité. La figure suivante montre une courbe de fatigue type en représentation Semi-Log (voir section 1.2.2.1). Dans ce diagramme, trois domaines principaux du phénomène de fatigue sont identifiés :

- La **fatigue plastique oligocyclique** : Dans ce domaine les amplitudes de contrainte subies par l'éprouvette dépassent la limite élastique du matériau qui la compose. La « fissure principale » liée à la ruine de la pièce sollicitée apparaît après un nombre relativement faible de cycles (inférieur à  $10^4$ )<sup>13</sup>.
- La **fatigue à grand nombre de cycles** où, au contraire du cas précédent, les contraintes appliquées sur la pièce restent inférieures à la limite élastique. Dans ce domaine, l'apparition d'une fissure nécessite un nombre important de cycles (entre  $10^4$  et  $10^8$ ).

---

13. les limites en nombre de cycles entre les domaines restent purement arbitraires et se basent sur l'expérience cumulée des nombreuses campagnes expérimentales (Bathias et Pineau, 2008).

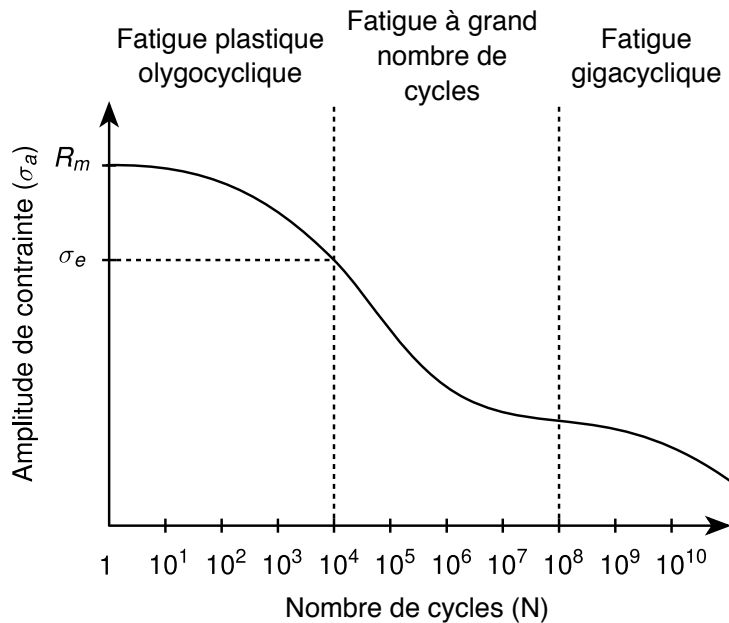


FIGURE 1.10 – Représentation simplifiée d'une courbe S-N. Identification des domaines.

Plus récemment, et en parallèle de l'évolution des méthodes expérimentales (notamment de celles permettant une augmentation de la fréquence de sollicitation), le domaine de la **fatigue à très grand nombre de cycles** ou fatigue gigacyclique (au delà de  $10^8$ ) est également exploré.

### 1.2.2.3 Aspect probabiliste du phénomène de fatigue

Les deux représentations montrées dans les figures 1.8 et 1.9 nous permettent également d'observer la dispersion propre aux essais de caractérisation en fatigue. En effet, nous retrouvons dans la littérature trois familles de sources potentielles de ce comportement (Bathias et Pineau, 2008; Hénaff et Morel, 2005; Rabbe *et al.*, 2000) :

- Les sources de dispersion liées au **matériau** : Ces premières concernent tout particulièrement la microstructure du matériau étudié. En effet, tel que montré par Nadot (2007), Ezanno (2011) et extensivement par Murakami (2002) la présence des défauts<sup>14</sup> dans le matériau jouera un rôle déterminant dans son comportement en fatigue. Dans le cas de notre étude nous nous focaliserons sur le rôle des inclusions non-métalliques dans le comportement du fer puddlé (sujet traité dans les chapitres 3 et 5).
- Les sources de dispersion **internes à l'éprouvette** : Il s'agit des paramètres tels que la géométrie de l'éprouvette (possibles concentrations de contraintes (Pilkey, 1997)), ainsi que des méthodes utilisées dans sa mise en forme (*e. g.* laminage) ou dans leur finition (*e. g.* perçage, polissage, etc.)<sup>15</sup>. Dans le cadre de notre étude nous cherchons à comprendre le comportement en fatigue des structures. Il est donc nécessaire de prendre en compte leur méthodes de fabrication (ce sujet est traité dans le chapitre 4).

14. Par « défaut » nous faisons référence aux micro-fissures, porosités ou inclusions.

15. Ces dernières sont connues pour engendrer des phénomènes d'écrouissage (Rabbe *et al.*, 2000).

- Les sources de dispersion **externes à l'éprouvette** : Ces dernières font référence aux incertitudes liées à la mise en place du dispositif expérimental (e. g. calibration des instruments et des moyens de sollicitation), aux conditions de l'environnement (e. g. température ou humidité de la salle d'essais) et aux paramètres de la sollicitation mécanique appliquée. Des travaux extensifs sur ce dernier aspect qui inclut l'influence de la *contrainte moyenne* ainsi que le type le chargement appliqué (e. g. traction-compression, flexion rotative, etc.) sont proposés par Bathias et Pineau (2008), Hénaff et Morel (2005) et Lemaitre *et al.* (2009).

Compte tenu du caractère dispersif du phénomène, il s'avère nécessaire d'aborder la problématique de la caractérisation à la fatigue d'un point de vue probabiliste. Selon Hénaff et Morel (2005) la durée de vie (nombre de cycles à rupture) d'un échantillon d'éprouvettes testées sur des paliers de chargement constant suivra une distribution log-normale, la distribution de l'amplitude (ou étendue) de contrainte appliquées selon un nombre de cycles de chargement donné suivra une distribution normale. Ce comportement est illustré à l'aide de la figure suivante.

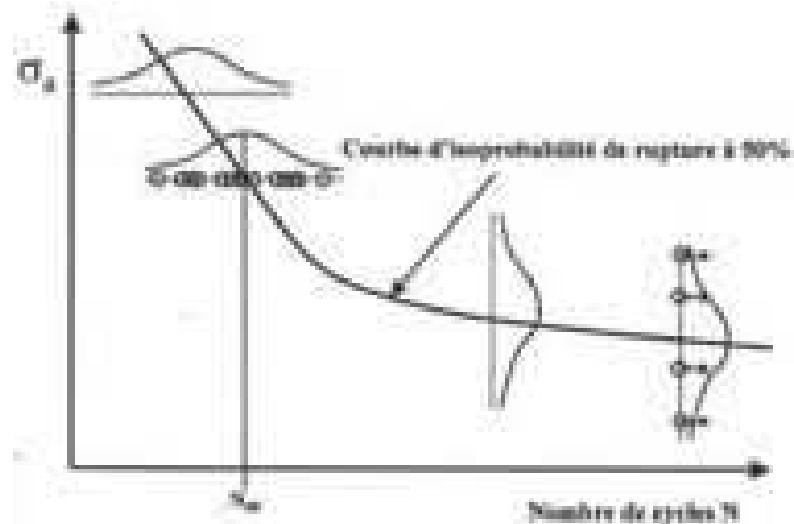


FIGURE 1.11 – Schéma simplifié d'une courbe de fatigue (isoprobabilité de rupture de 50%) en représentation Semi-Log (Hénaff et Morel, 2005).

La description précise des méthodes de construction de ces courbes (e. g. méthode de l'escalier, méthode de probis, méthode d'itération, entre autres.) ne sera pas traité dans ce document (voir les ouvrages de Bathias et Pineau (2008), Hénaff et Morel (2005) et Rabbe *et al.* (2000)).

#### 1.2.2.4 Notion de limite d'endurance

En complément des trois domaines décrits dans la section 1.2.2.2, le comportement en fatigue d'une pièce (ou structure) sollicitée cycliquement peut être décrit à l'aide de sa limite d'endurance (ou limite en fatigue). Nous retrouvons dans la littérature, et selon le type de matériau étudié deux types de définition pour ce paramètre :

- La **limite endurance conventionnelle** à « X » nombre ce cycles (ou endurance limitée) : cette limite est systématiquement associée à un nombre de cycles donné

(souvent  $10^6$ ,  $2 \times 10^6$  ou  $10^7$  cycles) et correspond à une valeur de contrainte (en amplitude ou étendue selon le cas) en dessous de laquelle le risque de rupture est nul.

- La **limite endurance illimitée** : Cette limite à longtermes été considérée comme une limite de sécurité au delà de laquelle les chargements cycliques ne pouvaient pas conduire à la rupture de la pièce (ou structure) testée. Cette limite est associée au comportement asymptotique observé sur certaines courbes S-N (notamment pour les aciers aux alentours de  $10^6$  à  $10^7$  cycles). Néanmoins, ce comportement n'est pas visible pour tous les métaux tels que certains alliages d'aluminium ou lorsque certains phénomènes sont couplés à la fatigue tels que la fatigue-corrosion Bathias et Pineau (2008). C'est notamment sur ce dernier type de matériaux à comportement non asymptotique que l'étude de la fatigue gygaciclique, définie lors de la section 1.2.2.2, s'avère particulièrement utile.

Les deux types de limite d'endurance sont illustrés à l'aide de la figure suivante :

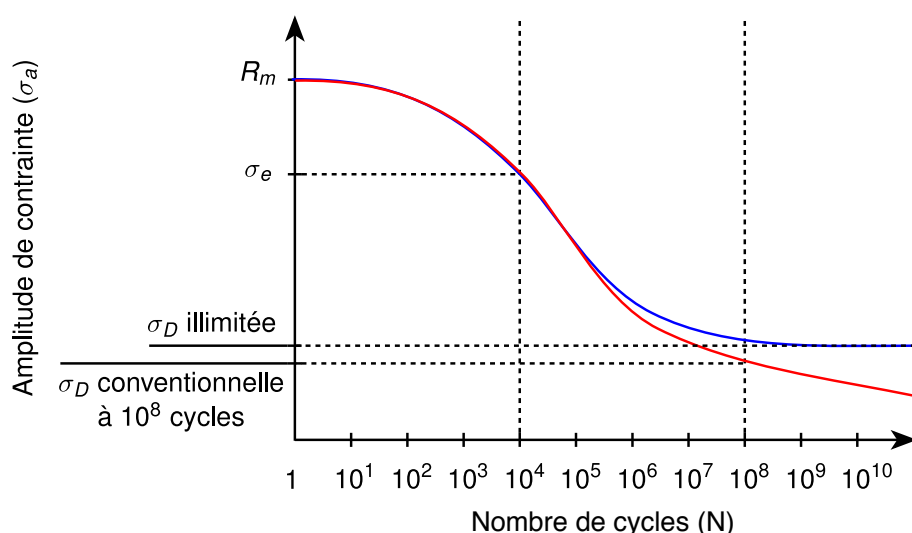


FIGURE 1.12 – Représentation simplifiée des courbes de fatigue pour deux type de matériaux : un acier à comportement asymptotique (en bleu) et un alliage métallique au comportement non-asymptotique (en rouge).

### 1.2.2.5 À la recherche d'une caractérisation rapide des propriétés en fatigue : utilisation des mesures d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques

La caractérisation dite « classique » du comportement en fatigue reste longue et coûteuse malgré l'évolution des méthodes expérimentales (notamment l'augmentation de la fréquence de sollicitation). Ainsi, une méthode alternative de caractérisation rapide telle que l'auto-échauffement a été mise en œuvre suite aux observations expérimentales de Stromeyer (1914). En effet, ce dernier a montré, à travers un dispositif de mesure de température différentiel, qu'une éprouvette sollicitée cycliquement (en flexion rotative) voyait sa température augmenter. La figure 1.13 montre le montage expérimental utilisé.

L'idée générale de cette méthode est d'appliquer plusieurs paliers de sollicitations cycliques (figure 1.14(a)) à une éprouvette et de mesurer sa température au cours de chaque chargement (figure 1.14(b)). La relation entre l'amplitude du chargement (figure

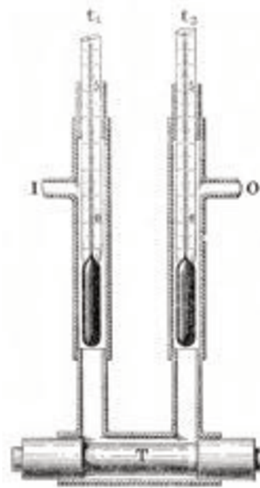
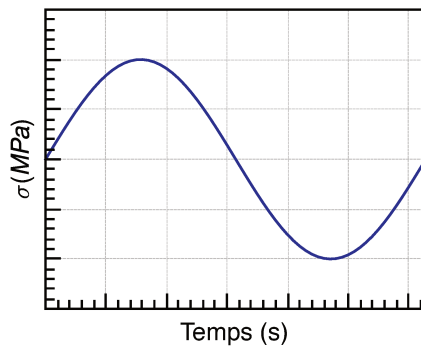
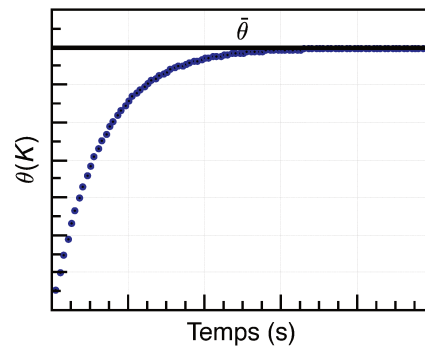


FIGURE 1.13 – Dispositif de mesure de température différentiel pour une éprouvette sollicitée en flexion rotative Stromeyer (1914).

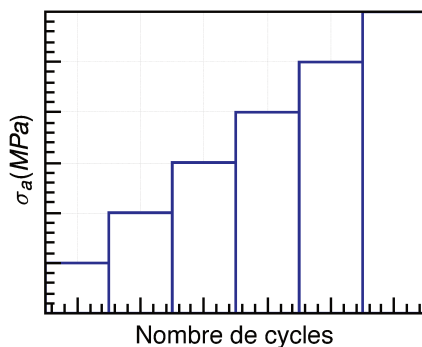
1.14(c)) et la température stabilisée atteinte par l'éprouvette nous permet de tracer la courbe dite d'auto-échauffement (figure 1.14(d)). En utilisant la méthode empirique proposée par Luong (1995) nous pouvons déterminer la limite d'endurance moyenne par l'intersection entre l'asymptote associée aux premiers points de la courbe et celle associée aux derniers.



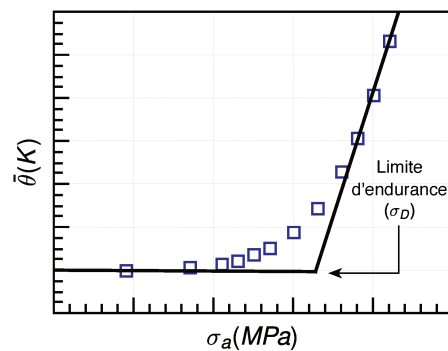
(a) Chargement cyclique appliqué.



(b) Évolution de la température de l'éprouvette soumise au chargement cyclique.



(c) Évolution de l'amplitude de contrainte appliquée pendant l'essai.



(d) Courbe d'auto-échauffement construite et dépouillée suivant la procédure décrite par Luong (1995).

FIGURE 1.14 – Méthode de caractérisation par auto-échauffement.

Cette méthode, essentiellement empirique, repose sur l'hypothèse de l'apparition pro-

gressive de micro-plasticité en tant que phénomène dissipatif à l'origine de l'augmentation de la température des éprouvettes sollicitées. Ayant prouvé sa répétabilité et son efficacité lors de son application sur de nombreuses nuances d'aciers modernes (Munier, 2012; Doudard, 2004) (voir figure 1.15), la méthode a été cependant mise en échec sur d'autres matériaux. Ainsi les travaux sur des alliages d'aluminium réalisés par Krapez et Pacou (2002) et Mabru et Chrysochoos (2001), n'ont pas permis d'appliquer la méthode pour déterminer la limite d'endurance moyenne de ces matériaux. La figure 1.16 montre un exemple des mesures thermométriques prises sur un alliage d'aluminium 2024 pour lesquelles les courbes d'auto-échauffement ne peuvent pas être associées aux limites d'endurance obtenues de manière classique.

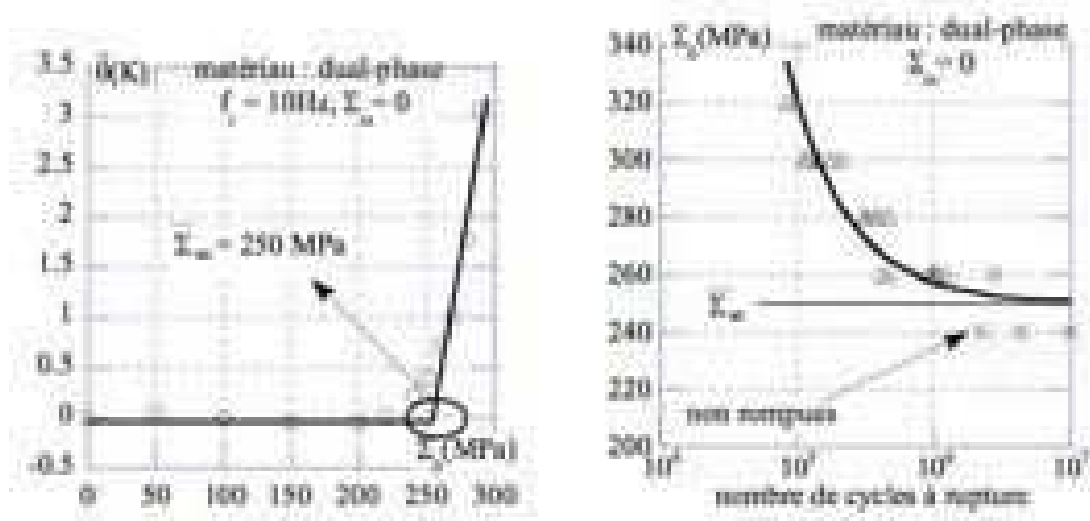


FIGURE 1.15 – Méthode empirique de dépouillement des essais d'échauffement (à gauche) et comparaison avec les essais classiques de fatigue (à droite) pour la nuance DP60. (Doudard, 2004).

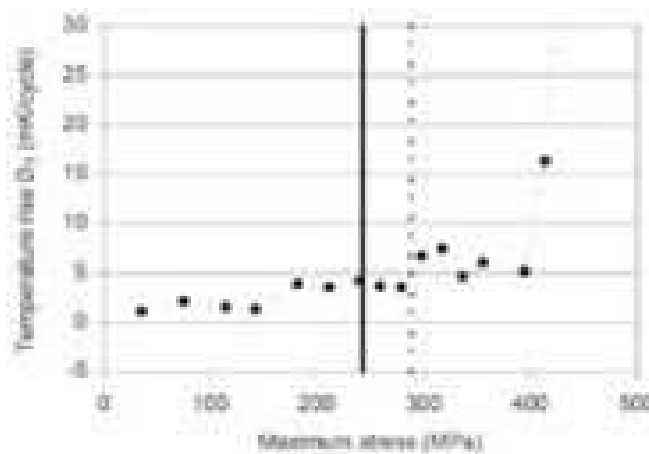


FIGURE 1.16 – Mesures thermométriques sur un alliage d'aluminium 2024, le trait pointillé correspond à la limite d'endurance à  $10^5$  et le trait plein à  $10^6$  (Krapez et Pacou, 2002).

Cette méthode de caractérisation rapide, prometteuse pour les aciers modernes homogènes, n'a pas fait l'objet d'études appliquées aux fers puddlés, matériaux riches en inclusions métalliques.

### 1.2.3 Modélisation du phénomène de fatigue

Les méthodes de caractérisation classique du comportement en fatigue (construction des courbes S-N) ne font pas de distinction entre la phase d'amorçage d'une fissure et celle de sa propagation.

En effet, l'importance d'une des phases par rapport à l'autre dépendra du type et de l'amplitude de la sollicitation appliquée, de la géométrie de la pièce étudiée et même des conditions de l'environnement (*i. e.* température et humidité). Le ratio entre les deux phases dépendra également du critère d'apparition de fissure adopté (*e. g.* taille de fissure critique choisie). Ce critère sera dépendant des méthodes d'observation disponibles (Bathias et Pineau, 2008).

Néanmoins, une relation entre le ratio  $N_a/N_p$  (Nombre de cycles dans la phase d'amorçage / Nombre de cycles dans la phase de propagation) et l'amplitude du chargement appliqué peut être établie<sup>16</sup>. Cette relation est illustrée à l'aide du schéma suivant :

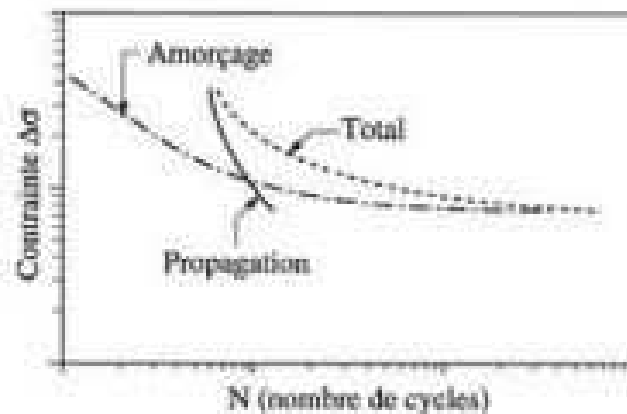


FIGURE 1.17 – Représentation schématique des phases d'amorçage et de propagation dans la durée de vie totale d'une pièce selon l'amplitude de chargement appliquée (Bathias et Pineau, 2008).

Lorsqu'il s'agit de décrire le comportement en fatigue d'une pièce ou d'une structure sollicitée, les outils de modélisation sont nombreux. Les expressions de Wöhler, Basquin, Palmgren ou Weibull sont souvent utilisées dans la représentation mathématique des courbes S-N. Lorsqu'il s'agit de la phase de propagation la mécanique de la rupture et notamment la loi de Paris sont utilisées (Bathias et Pineau, 2008; Hénaff et Morel, 2005).

Dans le cadre particulier du calcul de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage d'art, la stratégie la plus couramment utilisée et celle de l'hypothèse d'endommagement linéaire de Palmgren-Miner.

#### 1.2.3.1 Estimation de l'endommagement par la règle de Palmgren-Miner

Proposée initialement par Palmgren (en 1924) et ensuite reprise par Miner (1945), cette méthode énonce que l'endommagement à une certaine étendue de contrainte est

<sup>16</sup> Un autre effet à prendre en compte, et également énoncé par Bathias et Pineau (2008), est la diminution du ratio  $N_a/N_p$  lorsqu'une concentration des contraintes (une entaille par exemple) est présente.

proportionnel aux nombre de cycles appliqués<sup>17</sup>. Elle est très utilisée dans l'industrie par sa simplicité, y compris dans le cadre de dimensionnement et vérification des ouvrages d'art ferroviaires. Elle est représentée par l'expression suivante :

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} = D \quad (1.1)$$

Où la résistance  $N_{fi}$  à une étendue constante de contrainte  $\Delta\sigma_i$  révèle le nombre de cycles possibles avant la rupture et la prise en compte de l'endommagement des  $N_i$  cycles à une étendue donnée  $\Delta\sigma_i$  se fait par le calcul du ratio entre  $N_i$  et  $N_{fi}$ . La fin de vie théorique est atteinte lorsque l'endommagement cumulé  $D$  est égal à 1. La valeur de  $N_i$  pour chaque étendue de chargement est donnée par une courbe S-N correspondant à la pièce (ou structure) étudiée.

Du point de vu pratique, cette expression permet de créer un lien entre les caractéristiques en fatigue obtenues de manière expérimentale pour une pièce donnée à étendues de chargement constantes et la réalité de sa mise en service sous chargements à étendue variable. Néanmoins, elle présente un inconvénient important, elle ne prend pas en compte la séquence des chargements appliqués et donc l'influence négative que celle ci peut avoir dans le comportement en fatigue (Lemaitre *et al.*, 2009; Weber, 1999). Ceci peut s'avérer particulièrement problématique lorsque la durée de vie théorique risque d'être surestimée pour certaines séquences de chargement (Lemaitre *et al.*, 2009; Bathias et Pineau, 2008).

Par la suite, nous ferons le point sur l'utilisation des outils décrits auparavant dans l'estimation de l'endommagement par fatigue pour les ouvrages d'art métalliques anciens.

## 1.3 Vérification de la tenue à la fatigue des vieux ponts métalliques

Dans l'étude de la fatigue des ponts métalliques anciens quatre caractéristiques principales sont à prendre en compte :

- **Le type de construction** : La période de plus forte évolution du réseau était également un moment de forte innovation dans le domaine du génie civil, les configurations des ouvrages présentes dans le réseau sont en effet nombreuses : les ponts en arc, les ponts à poutre sous rail (dont divers types de treillis), les ponts à poutres latérales supérieures (ou inférieures) avec *pièces de pont* et *longerons* et les ponts à poutres jumelles.
- **Le matériau** : Trois groupes de métaux ont été utilisés dans la construction des ouvrages d'art : les fontes, les fers et les aciers. L'évolution de l'utilisation de ces matériaux dans la construction monumentale est représentée schématiquement dans la figure 0.2.
- **La méthode d'assemblage** : En parallèle des matériaux, des méthodes d'assemblage adaptées ont été utilisées entre la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle et le

17. D'autres lois de cumul non-linéaires sont également disponibles dans la littérature (e. g. Loi de Lemaitre-Chaboche) (Lemaitre *et al.*, 2009; Weber, 1999). Elles sont néanmoins moins utilisées dans l'industrie à cause de leur complexité.



début du XX<sup>ème</sup> siècle. En effet, nous retrouvons dans les ouvrages du réseau : des assemblages boulonnés, des assemblages rivetés à chaud et des éléments soudés. L'évolution de ces méthodes d'assemblage dans la construction monumentale est également présentée dans la figure 0.2.

- **L'histoire de chargement** : Parmi tous les aspects cités, celui-ci reste le moins maîtrisé. En effet, l'historique de passage des convois sur les ouvrages d'art les plus anciens depuis leur mise en service est souvent incomplet. Les intensités des chargements enregistrées sont également très incertaines (e. g. modélisation du matériel roulant : poids réel, utilisation des charges ponctuelles ou réparties, etc.).

La problématique du comportement en fatigue des ponts métalliques anciens est très vaste. Nous nous intéresserons, dans ce document, uniquement à l'étude des structures rivetées. Ces dernières, principalement construites à partir de 1850, représentent la majorité des ouvrages d'art métalliques dépassant cent ans de service.

Lorsqu'il s'agit de la vérification du comportement mécanique de ce type de pont, une procédure est mise en place afin de garantir l'exploitation en toute sécurité de l'ouvrage concerné. Cette procédure, illustrée dans la figure 1.18, comprend trois étapes :

1. La collecte des informations concernant les détails de construction de l'ouvrage (*i. e.* type de pont, matériaux, etc.).
2. La collecte des informations concernant la circulation (*i. e.* historique de chargement).
3. La proposition d'un modèle de calcul à partir duquel les comportements sous chargements statiques et cycliques seront estimés et l'endommagement cumulé calculé.

Par la suite nous traiterons uniquement la troisième partie du processus où le modèle numérique est proposé et l'endommagement cumulé suite aux chargements cycliques est estimé. À cause de la complexité géométrique de ce type de structure (quantité importante d'éléments et souvent dans des configurations variées), les modèles éléments finis utilisés aux bureaux d'études sont proposés dans la plupart des cas par des éléments de type poutre (en plus de l'utilisation éventuelle des éléments de type plaque représentant la raideur du plâtelage).

Comme montré par Kiss et Dunai (2000), d'autres modèles numériques plus complexes peuvent être utilisés dans le calcul de l'état des contraintes au niveau des points critiques de la structure (ces derniers étant dans la majorité des cas les plus affectés par la fatigue). Ceci permet en effet de rapprocher les estimations aux chargements réellement subis par la structure.

Parmi les difficultés retrouvées dans l'utilisation des modélisations traditionnelles de type poutre (et éventuellement plaque) nous retrouvons l'absence de la prise en compte des contraintes due aux défauts géométriques (voir section 1.1.2) ainsi que des interactions fines entre les éléments des assemblages. Néanmoins, développer un modèle plus détaillé de l'ouvrage entier n'est pas une solution viable compte tenu de l'augmentation du temps de calcul. Comme alternative, des modèles mixtes peuvent être mis en place<sup>18</sup> (voir figure 1.19). Les résultats obtenus lors de l'implémentation de ce type de modèle montrent en effet une amélioration dans l'estimation des déformations au niveau de certains détails constructifs (voir figure 1.20).

---

18. Il s'agit des modèles 3D en éléments poutre en complément des détails constructifs critiques en éléments plaque.

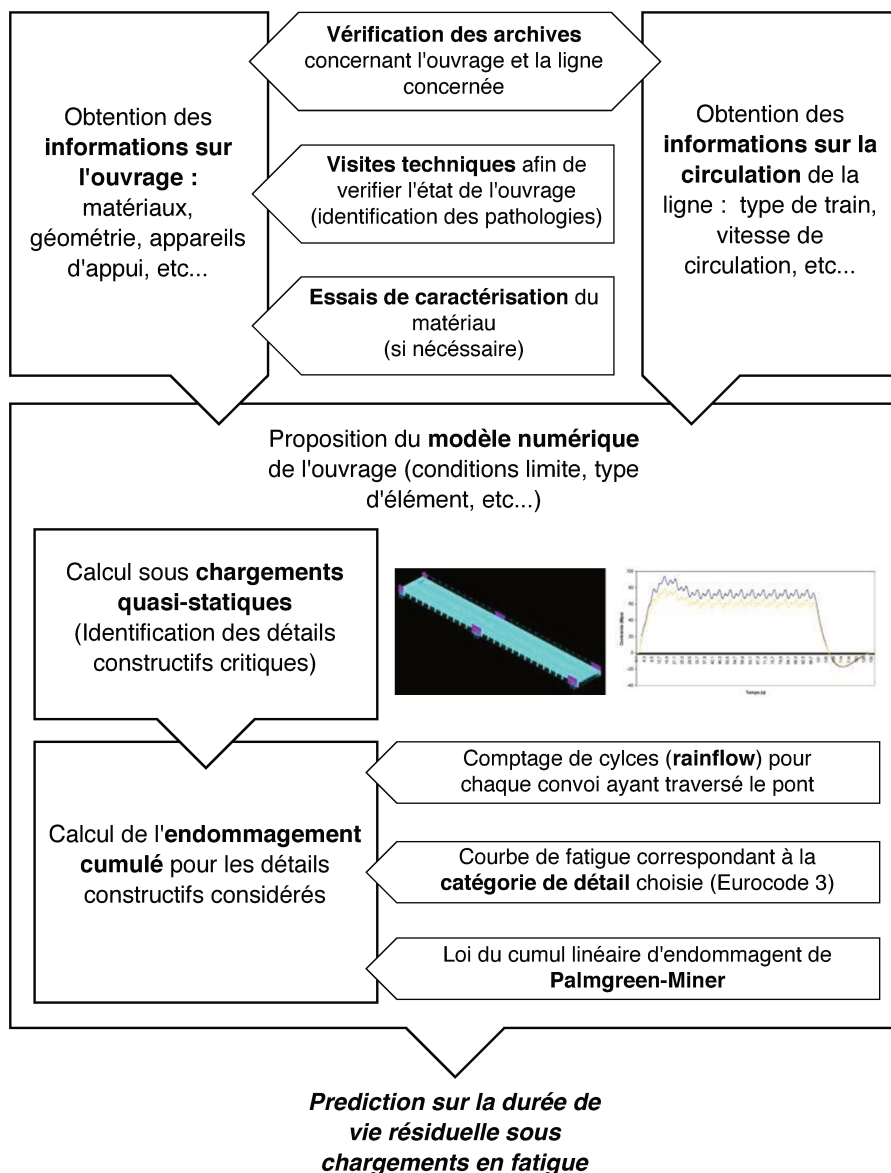


FIGURE 1.18 – Diagramme simplifié de la procédure de vérification d'un ouvrage métallique ancien aux chargements en fatigue.

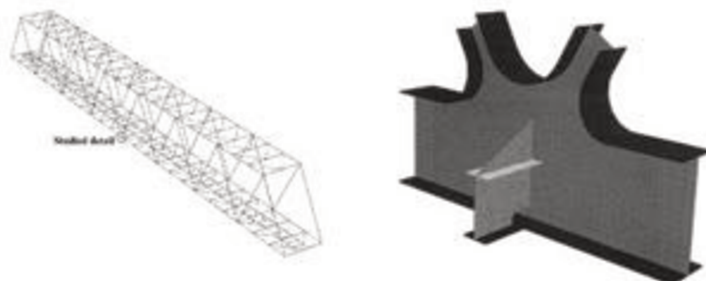


FIGURE 1.19 – Modèle à plusieurs niveaux proposé par Kiss et Dunai (2000) (étude sur le pont Ozd Banreve en Hongrie).

Une fois le chargement subi par l'ouvrage établi pour chaque passage d'un train (en utilisant les convois de chargement représentatif du passage des trains sur la ligné étudiée,

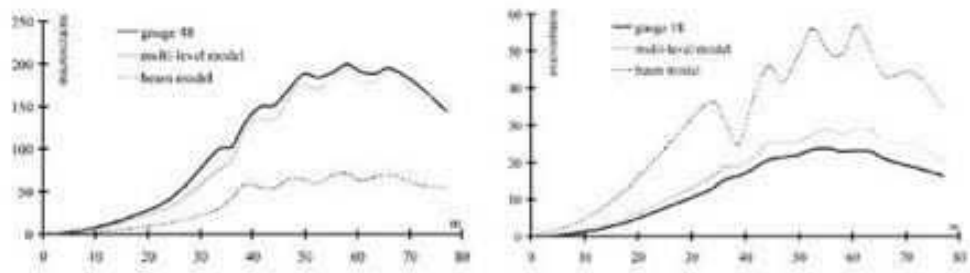


FIGURE 1.20 – Mesures de déformation pour les membrures supérieure (à gauche) et inférieure (à droite) pour un élément du pont Ozd Banreve (Hongrie). Comparaison des modèles et des mesures expérimentales par jauges (Kiss et Dunai, 2000).

voir figure 1.21<sup>19</sup>) une méthode de comptage de cycles, telle que la méthode rainflow (Association française de normalisation (AFNOR), 1993) peut être utilisée pour établir le nombre et l’amplitude des cycles vus par la structure depuis sa date de mise en service.

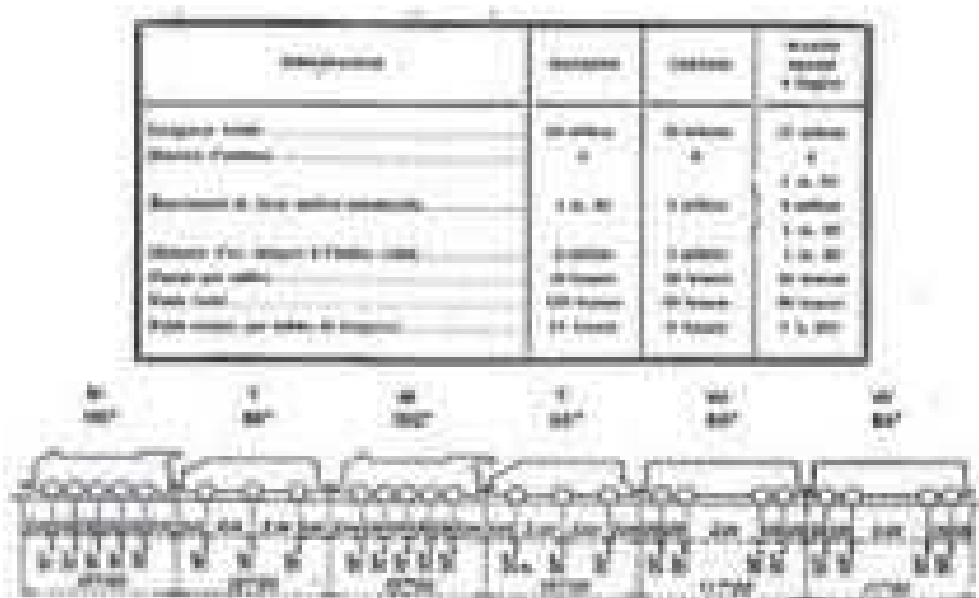


FIGURE 1.21 – Exemple du convoi de référence utilisé dans la norme de 1927 (Ministère des travaux publics, 1927)

Avec cette information il reste à choisir dans la norme concernée (dans notre cas l’Eurocode 3 NF EN 1993-1-9 (Comité Européen de Normalisation, 2005)) la courbe de fatigue associée à la catégorie de détail constructif correspondant et ainsi calculer l’endommagement cumulé. La notion de « catégorie de détail constructif » ainsi que son applicabilité aux assemblages rivetés anciens font l’objet de la section suivante.

### 1.3.1 Disposition constructive et notion de catégorie de détail

Depuis la prise en compte des chargements alternatifs pour la première fois dans la Circulaire du ministre des travaux publiques aux préfets du 29 août 1891 (Ministère des travaux publics), les normes de construction d’ouvrages d’art ont évolué en parallèle de la croissance du réseau ferroviaire (voir figure 1.22).

19. Selon le cas, et en particulier l’ancienneté de l’ouvrage, plusieurs convois de référence seront utilisés.

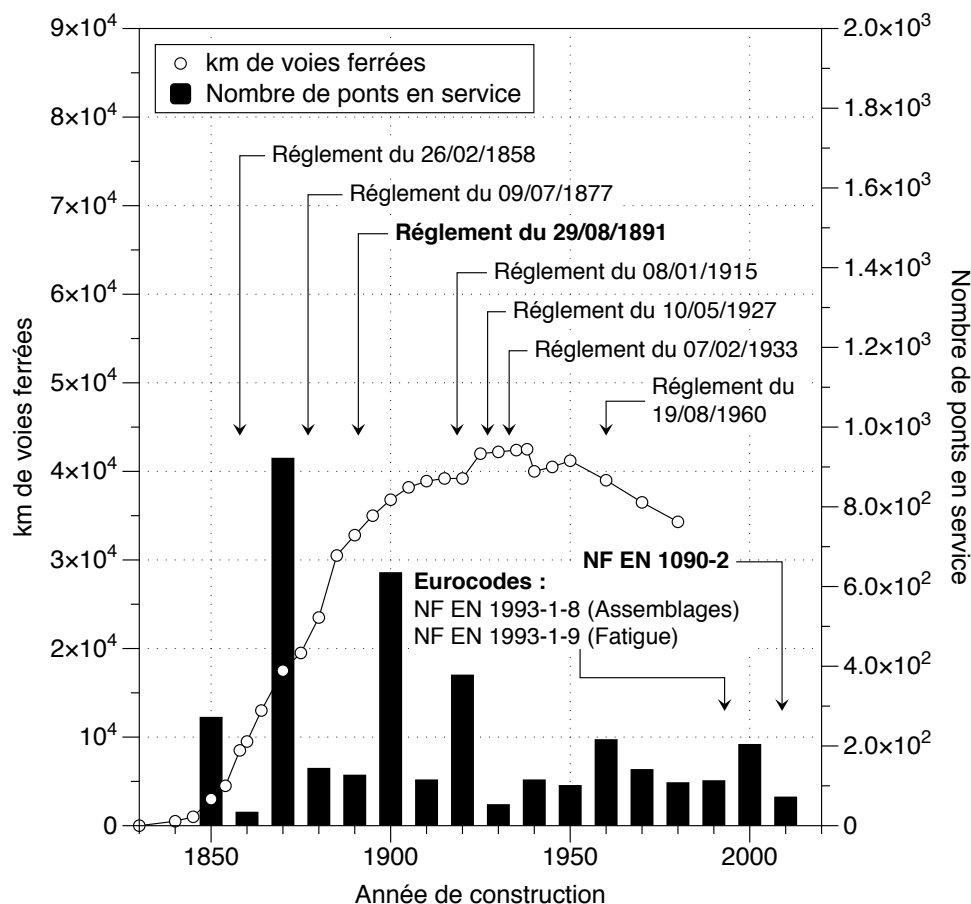


FIGURE 1.22 – Évolution du réseau ferré national français (bilan provenant des rapports internes SNCF Réseau) et de normes de construction qui les concernent.

Actuellement, les Eurocodes sont les normes européennes de conception et dimensionnement des ouvrages d'art et bâtiments utilisées dans l'industrie ferroviaire française. Par leur caractère récent (par rapport à la vie du patrimoine existant en France) ces normes sont adaptées à la construction des ouvrages d'art modernes. Ceci n'est pas forcément le cas pour la vérification des ouvrages d'art anciens qui font l'objet de cette étude.

En effet, lorsqu'il s'agit d'évaluer l'endommagement par fatigue d'une structure métallique, l'Eurocode 3 - NF EN 1993-1-9 (Comité Européen de Normalisation, 2005) ne propose pas des courbes S-N du comportement en fatigue pour les dispositions constructives retrouvées dans les ponts métalliques rivetés. Au contraire, ce catalogue regroupe un ensemble de configurations d'assemblage (principalement soudées) correspondant à une des « courbes type » ou « catégories de détail » proposées dans la figure 1.23.

Ces catégories de détail font référence à la valeur de la *résistance de référence à la fatigue* (dans ce cas l'endurance à  $2 \times 10^6$  cycles) en MPa noté  $\Delta\sigma_C$ . La limite en fatigue en chargement constant (condition de fonctionnement très rarement retrouvée dans la réalité) à  $5 \times 10^6$  cycles est notée  $\Delta\sigma_D$  et la limite à  $1 \times 10^8$  cycles (sous laquelle aucun endommagement ne sera pris en compte) est noté  $\Delta\sigma_L$ .

Les assemblages rivetés n'étant pas compris dans le catalogue, de nombreuses études

20. Les courbes de fatigue montrées dans cette figure ne prennent pas compte du rapport de charge  $R$  (ratio entre la valeur maximale et la valeur minimale du chargement cyclique).

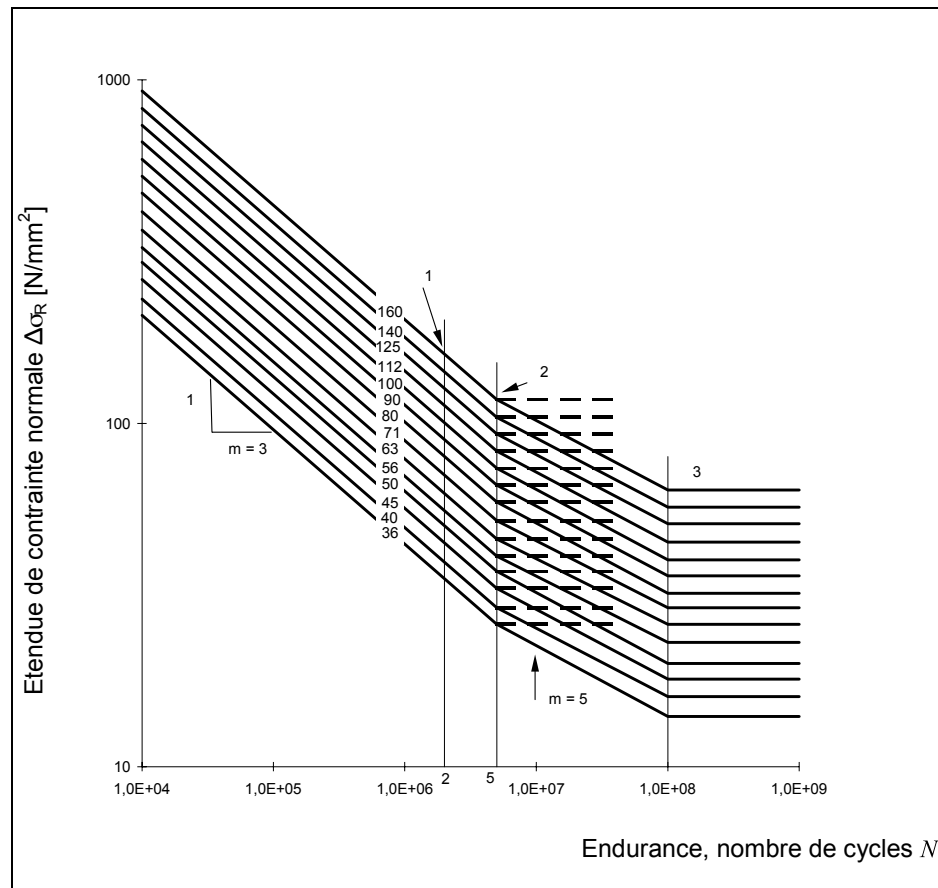


FIGURE 1.23 – Courbes de résistance à la fatigue proposées dans l'Eurocode 3 (Comité Européen de Normalisation, 2005).<sup>20</sup>

telles que celles proposées par Al-Emrani (2002), Brühwiler *et al.* (1990) et DiBattista *et al.* (1998) proposent une validation expérimentale de l'utilisation de certaines courbes de fatigue de l'Eurocode 3 (NF EN 1993-1-9 :2005) pour les assemblages rivetés anciens. Parmi les courbes les plus souvent associées aux détails constructifs rivetés, nous retrouvons les catégories de détail C60, C71, C80 et C90.

Dans le but de proposer une méthode générale d'évaluation des ponts métalliques anciens, la communauté européenne a proposé le projet « Sustainable Bridges » dans le cadre de coopération JRC<sup>21</sup>-ECCS<sup>22</sup> afin de faire évoluer l'Eurocode 3 et de l'adapter aux besoins soulevés par le vieillissement des réseaux ferroviaires du continent.

Parmi les nombreuses informations retrouvées dans le rapport D4.6 de ce projet européen (Sustainable Bridges, 2007), la compilation des essais de fatigue classique réalisée par les auteurs semble justifier l'utilisation de la courbe du **détail constructif C71** pour l'estimation (conservatrice) du comportement en fatigue des détails d'assemblage dans les structures rivetées (pas forcément en fer puddlé). En effet, dans la section dédiée à la résistance à la fatigue des ponts métalliques, les auteurs présentent les résultats trouvés dans la littérature pour les ouvrages rivetés en faisant la distinction entre les essais réalisés à l'échelle structurale (échelle 1 : 1) et ceux réalisés à des échelles réduites. La figure 1.24

21. Joint Research Center (centre commun de recherche de l'union européenne).

22. Convention européenne des constructions métalliques (european convention for constructional steel-work).

(issue du rapport original) montre la relation entre les courbes du détail C71 et C63 et les résultats obtenus lors des campagnes de fatigue classique en flexion à quatre points pour des *poutres à âme pleine* et pour les *poutres à treillis*<sup>23</sup>.

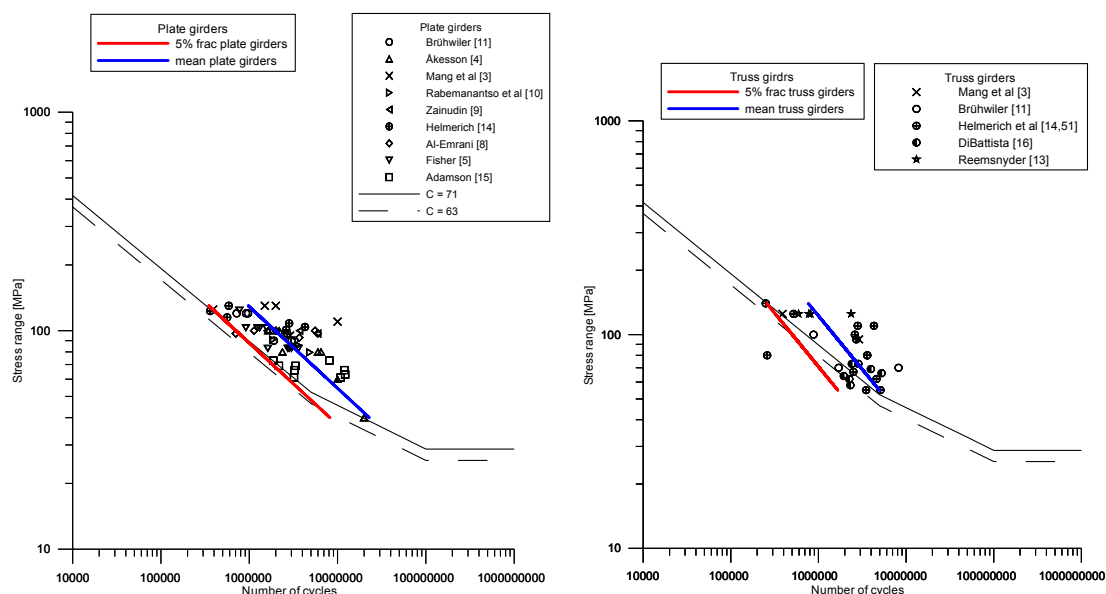


FIGURE 1.24 – Essais de fatigue classique pour poutres à âme pleine (à gauche) et poutres à treillis (à droite). Comparaison avec les courbes de fatigue des détails C71 (trait continu) et C63 (trait pointillé).

Dans les deux cas montrés dans les figures précédentes, les résultats sont évalués en fonction de l'état de corrosion des pièces sollicitées (en éliminant les données provenant des pièces particulièrement endommagées) et en fonction des chargements supérieurs à 130 MPa, jugés peu réalistes par les auteurs de l'étude. Également, et en suivant les indications proposées par l'Eurocode (Comité Européen de Normalisation, 2005), l'exploitation des résultats pour la détermination de la catégorie du détail, suit un niveau de confiance de 75% avec une probabilité de dépassement de 95% pour  $\log N$ <sup>24</sup>.

Le principales conclusions de cette étude peuvent être résumées de la manière suivante :

- La plupart des études indique un phénomène d'accommodation dans les assemblages rivetés. Au moment de la propagation des fissures dans la structure, les autres composants de l'assemblage ont tendance à compenser le phénomène en produisant une relaxation des contraintes autour de la zone fissurée.
- la corrosion de l'assemblage a sans doute un effet négatif sur la fatigue des poutres en produisant des réductions de sections utiles et des concentrations des contraintes.
- La préparation des tôles avant assemblage (poinçonnage ou perçage) et les caractéristiques mécaniques du matériau qui constituent l'assemblage semblent avoir peu d'influence sur le comportement en fatigue des assemblages rivetés.

23. L'utilisation des essais à grande échelle est justifiée par le besoin de prendre en compte l'influence des imperfections dans les assemblages (variabilité dans les paramètres de l'opération de rivetage, variabilité des contraintes résiduelles induites, etc.).

24. C'est à dire, 95% des résultats sont au-dessus de la courbe de fatigue utilisée.

- La résistance en fatigue des *poutres à âmes pleines* peut être évaluée en utilisant la courbe C71. Pour les *poutres à treillis*, l'utilisation de la catégorie C63 est recommandée (voir figure 1.24).

Les conclusions du projet « Sustainable Bridges » restent pertinentes du point de vue d'une solution générale aux difficultés rencontrées lors de la caractérisation des détails constructifs d'un pont métallique ancien. Par contre, et comme indiqué par Taras et Greiner (2010) (voir figure 1.25), cette approche présente certains inconvénients :

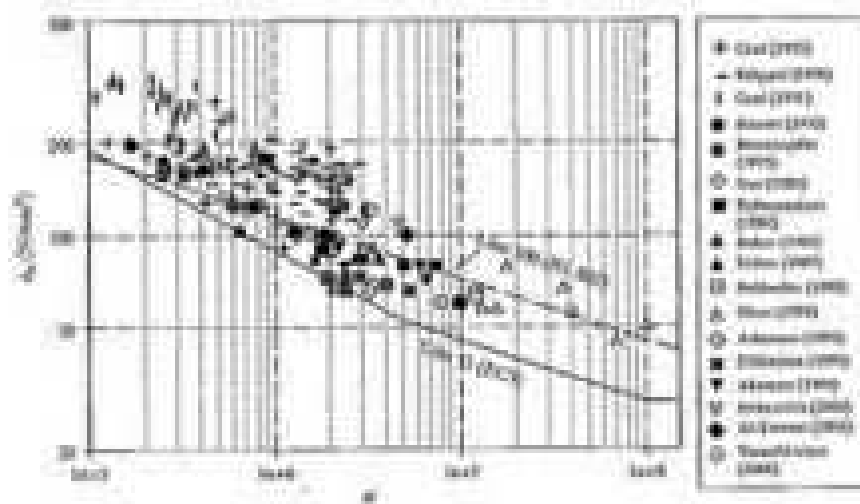


FIGURE 1.25 – Représentation graphique du bilan des résultats des essais de fatigue trouvés dans la littérature (Taras et Greiner, 2010)

- La courbe C71 est proposée comme limite inférieure, et donc conservatrice pour le comportement en fatigue des assemblages rivetés.
- La corrélation entre la courbe proposée dans l'Eurocode 3 (Comité Européen de Normalisation, 2005) et les données expérimentales se dégrade dans la zone correspondant à des très grands nombres de cycles (au delà de  $2 \times 10^6$  cycles). Dans le cadre de notre étude c'est ce domaine de la courbe qui s'avère important pour le calcul de l'endommagement cumulé des ponts métalliques anciens.
- L'utilisation d'une même courbe de comportement en fatigue pour tout type d'assemblage riveté n'est ni réaliste ni acceptable. En effet, l'endurance de certains assemblages est sous-estimée.
- Les courbes souvent associées dans la littérature aux assemblages rivetés (Kühn *et al.*, 2008; Al-Emrani, 2002; Brühwiler *et al.*, 1990; DiBattista *et al.*, 1998) ont été développées pour les détails structurels soudés (contraintes résiduelles importantes). Pour ce type de composant, il est généralement accepté le peu d'influence que peut avoir le rapport de charge  $R$  sur le comportement en fatigue (Taras et Greiner, 2010). Ceci n'est pas forcément le cas pour les assemblages rivetés.
- La fatigue est un phénomène dispersif (voir section 1.2.2.3). Comparer sur un même graphique des résultats provenant de pièces différentes, obtenues des ouvrages différents (et donc matériaux et histoire de chargement différents), étudiées sous des protocoles expérimentaux différents peut limiter la pertinence d'une étude statistique sur l'ensemble des résultats. Cependant, il est nécessaire de signaler que ce type de

comparaison est souvent réalisée dans un contexte où l'information spécifique sur un type particulier d'assemblage est rare.

En conclusion, la courbe C71 est une borne inférieure générale pour une grande majorité des résultats trouvés dans la littérature. Ceci n'implique pas qu'elle soit la meilleure ni la plus précise. C'est pourquoi Taras et Greiner (2010) proposent une nouvelle classification selon le type de sollicitation (présence ou non de cisaillement), la géométrie (voir figure 1.26) et finalement le rapport de charge.

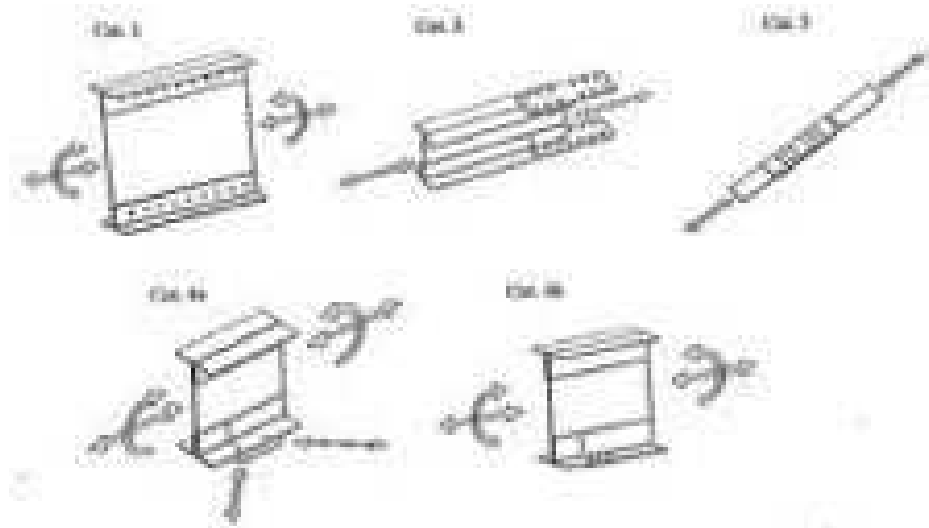


FIGURE 1.26 – Catégories de détail constructif proposées par Taras et Greiner (2010).

Deux aspects de cette nouvelle classification méritent d'être soulignés :

- la normalisation des résultats par rapport à leur rapport de charge (figure 1.27) :

$$\Delta\sigma_C(R) = f(R) \cdot \Delta\sigma_{C,0} \quad (1.2)$$

Où  $\Delta\sigma_{C,0}$  est la valeur de l'étendue du chargement pour une sollicitation à rapport de charge  $R=0$ ,  $\Delta\sigma_C(R)$  l'étendue de chargement pour un rapport de charge arbitraire et  $f(R)$  est défini par la table suivante :

Wrought iron and mild steel of before 1900	
$R < 0,0$ / $R \geq -1,0$	$R \geq 0,0$
$f(R) = \frac{1-R}{1-0,70 \times R}$	$f(R) = \frac{1-R}{1-0,75 \times R}$
Mild steel post-1900, St37, St48, St52, etc.	
$R < 0,0$ / $R \geq -1,0$	$R \geq 0,0$
$f(R) = \frac{1-R}{1-0,40 \times R}$	$f(R) = \frac{1-R}{1-0,60 \times R}$

FIGURE 1.27 – Expressions de normalisation des amplitudes de contrainte en fonction du rapport de charge et du matériau (Taras et Greiner, 2010).

- l'effet d'histoire n'est pas pris en compte. C'est-à-dire que les conditions initiales en chargement des éprouvettes ne sont pas prises en compte dans la comparaison des résultats.



## 1. SURVEILLANCE ET VÉRIFICATION DES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

Les résultats provenant de cette classification sont présentés dans la figure 1.28. Ils montrent notamment que l'utilisation de la courbe du détail constructif C71 sous-estime la tenue à la fatigue de certains assemblages.

Classe	Exemple de détail	Description	Notes
C100		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 100 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 100 mm.
C90		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 80 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 80 mm.
C80		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 60 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 60 mm.
C71		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 40 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 40 mm.
C60		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 20 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 20 mm.
C50		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 10 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 10 mm.
C40		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 5 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 5 mm.
C30		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 2 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 2 mm.
C20		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 1 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 1 mm.
C10		Assemblage boulonné à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 0,5 mm.	Classe de détail pour les assemblages boulonnés à travers une épave de flange de diamètre supérieur à 0,5 mm.

FIGURE 1.28 – Classement des détails constructifs selon les courbes de fatigue proposées dans l'Eurocode 3 (Taras et Greiner, 2010).

## 1.4 Bilan

La problématique liée à la maintenance des ponts métalliques anciens dans le domaine ferroviaire est généralisée et complexe. Celle-ci concerne les pays influencés par le « boom ferroviaire » du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, notamment ceux du continent européen.

L'évolution du matériel roulant (poids et vitesse des trains) ainsi que le temps de service de ces structures (environ un siècle) interrogent sur le comportement des ponts métalliques anciens et sur leur durée de vie résiduelle. Parmi les nombreuses **difficultés** associées à cette problématique nous retrouvons :

- La caractérisation par essais de fatigue classique est lente et coûteuse. C'est pourquoi, la quantité d'éprouvettes testées est souvent limitée.
- La fatigue est un phénomène dispersif, masqué et progressif dépendant de nombreux paramètres (procédés de fabrication, environnement, etc.).
- Pendant la période de construction des ouvrages (deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> et début du XIX<sup>ème</sup> siècle) l'édification de structures métalliques a connu une diversité importante dans les matériaux de construction (fers puddlés, aciers).
- L'histoire précise des chargements subis par les structures, ainsi que les faits de guerre (et les réparations associées), ne sont pas forcément documentés dans leur totalité pour la plupart des ouvrages.
- Le calcul du cumul de l'endommagement linéaire dû aux chargements cycliques (comptage « rainflow » puis Loi de Miner) est discutable par la non prise en compte de l'ordre dans la séquence des chargements et l'incertitude de leurs valeurs (modélisation et historique).
- La plupart des études se concentre sur la caractérisation des détails constructifs afin de les associer aux courbes de comportement en fatigue trouvées dans les normes modernes de construction (e.g. Eurocodes). Cette approche reste discutable car elle implique un comportement très similaire (voire identique) entre assemblages rivetés sous différentes configurations géométriques et types de sollicitation.
- Aucune norme n'existe pour ces types d'essai. En effet, chaque équipe de recherche utilise des protocoles expérimentaux très variés. C'est pourquoi, réaliser une étude comparative s'avère difficile.
  - Type de chargement : uniaxial, multiaxial ou flexion rotative.
  - Rapport de charge ( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ ) : 0, -1, 0.1, etc.
  - Provenance de l'échantillon : poutres principales, longerons, pièces de pont, etc.
  - Configuration géométrique des éprouvettes.
  - Type de matériau : fers puddlés ou aciers.
- La simplification des courbes S-N relatives aux assemblages rivetés nous permet d'établir des courbes de comportement conservatrices qui, même si elles sont intéressantes du point de vue du calcul de l'endommagement, peuvent sous-estimer l'endurance des certaines configurations géométriques.



# Le rivetage à chaud : une méthode d'assemblage employée dans les ouvrages métalliques anciens

*À la fin du chapitre précédent nous nous sommes intéressés aux dispositions constructives rencontrées dans les assemblages rivetés. Dans ce chapitre, nous décrivons les principes d'exécution d'un assemblage de ce type, ainsi que ses mécanismes de fonctionnement et de ruine.*

## Contenu

---

2.1	Généralités sur les assemblages rivetés dans le contexte ferroviaire . . . . .	47
2.2	Scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté . . . . .	57
2.3	Bilan . . . . .	59

---



## 2.1 Généralités sur les assemblages rivetés dans le contexte ferroviaire

Le rivetage à chaud est une méthode d'assemblage permanente qui a été très utilisée dans la construction des ponts métalliques dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Les figures suivantes montrent quelques exemples d'ouvrages d'art remarquables construits avec cette technique. Le pont Britannia (1850 - 1970<sup>1</sup>) construit par Robert Stephenson sur les conseils de William Fairbairn et Eaton Hodgkinson est présenté figure 2.1(a) ; le Viaduc de Garabit (1884 - ) construit par Gustave Eiffel et conçu par Léon Boyer avec la participation de Maurice Koechlin et Emile Nouguier apparait dans la figure 2.1(b). D'autres exemples tel que le Viaduc de Vaur (1902 - ) et le Viaduc de Busseau (1864 - ) sont présentés sur les figures 2.1(c) et 2.1(d) respectivement. Ces structures sont le témoignage de l'innovation et de la créativité exprimées par les ingénieurs de l'époque.



(a) Le pont Britannia à Bangor au Pays de Galles (construction originale).



(b) Le viaduc de Garabit dans le Cantal.



(c) Le Viaduc de Vaur en Aveyron.



(d) Le Viaduc de Busseau dans la Creuse.

FIGURE 2.1 – Exemples de ponts ferroviaires rivetés.

L'apparition du soudage, nouvelle technique d'assemblage particulièrement bien adaptée aux aciers, a marqué le déclin du rivetage jusqu'à sa disparition. En effet, le rivetage à chaud n'est utilisé aujourd'hui que pour des travaux de réparation sur des ouvrages d'art anciens (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014).

Un assemblage riveté est constitué d'au moins deux pièces (*e. g.* tôles, cornières, etc.) et un ou plusieurs rivets censés les solidariser et ainsi garantir la transmission des efforts

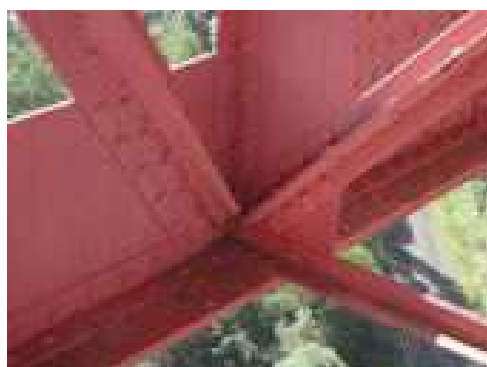
1. Cette date correspond à la destruction de la structure originale suite à un incendie. En effet, le pont Britannia existe actuellement sous forme d'un pont en arc en acier. Uniquement les piles d'origine ont été conservées.

## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

entre elles. Des exemples montrant la diversité des assemblages rivetés dans le domaine des ponts métalliques ferroviaires sont montrés dans la figure 2.2.



(a) Assemblage sous semelle inférieure de pièce de pont.



(b) Assemblage de treillis sur montant de poutre principale.



(c) Liaison pièce de pont - longeron.



(d) Assemblage d'une équerre par cornières.

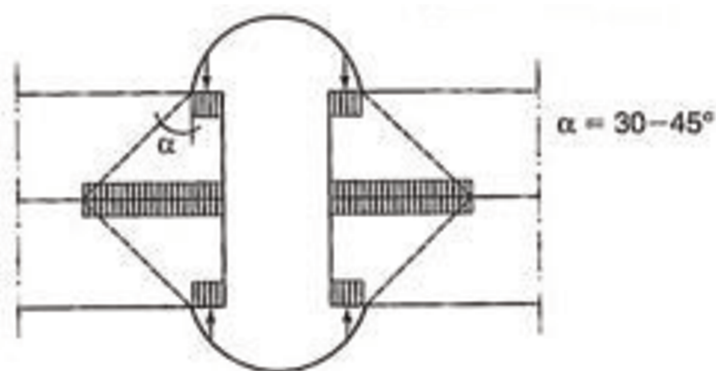
FIGURE 2.2 – Exemples d'assemblages rivetés retrouvés sur le Viaduc de Garabit.

Le principe de fonctionnement d'un assemblage riveté à chaud peut être simplifié de la manière suivante : une fois les pièces à assembler perforées, un rivet à une température élevée<sup>2</sup> (afin de faciliter sa mise en forme) est introduit à travers des trous et forgé afin d'acquérir sa géométrie finale. **Le retrait du rivet suite au refroidissement après la pose comprime les pièces assemblées l'une contre l'autre provoquant de l'adhérence entre elles.** L'effort appliqué par le rivet sur les tôles (opposé en sens et identique en norme à celui appliqué par les tôles sur le rivet) est connu comme *effort de serrage*. L'adhérence entre les pièces assemblées permet la transmission des efforts. La figure 2.3, montre le modèle de distribution proposé par Akesson (2010) pour les contraintes liées au serrage à proximité d'un rivet.

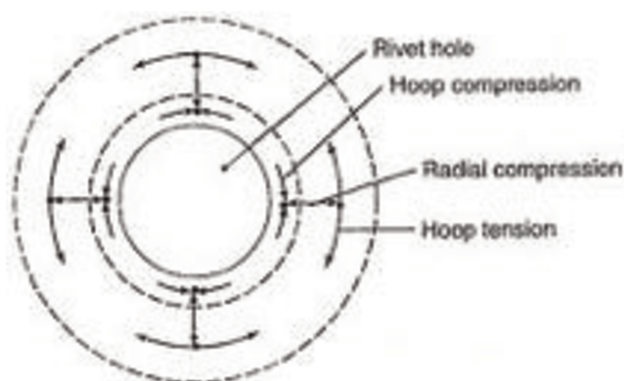
Des craintes concernant le comportement des assemblages rivetés sous chargements cycliques sont soulevées dès la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (Ministère des travaux publics, 1891). En effet, tel qu'énoncé par Buchetti (1898), les ingénieurs des constructions métalliques craignaient :

« Que sous l'action des efforts alternatifs et des vibrations qu'occasionnait le passage des trains, les rivets ne soient desserrés et ne prennent du jeu dans leurs trous ».

2. Entre 950°C et 1100°C pour les rivets en acier (Collette, 2014).



(a) Distribution des contraintes de compression à travers l'épaisseur des plaques serrées par le rivet.



(b) Distribution des contraintes circonférentielles à proximité du trou du rivet dues aux efforts de serrage du rivet.

FIGURE 2.3 – Distribution des contraintes de serrage à proximité d'un rivet (Akesson, 2010).

Buchetti conclut qu'au moment de la publication de son oeuvre (en 1898), aucun pont n'a été mis hors service suite à un tel desserrage et que malgré la présence de cette pathologie sur certaines structures, le desserrage est observé uniquement de manière locale sur des rivets mal posés (défauts que nous étudierons dans la section 2.1.5).

Le rôle des chargements cycliques dans la dégradation des caractéristiques mécaniques d'un assemblage riveté sera traité dans le chapitre 7.

### 2.1.1 Le rivet

Le rivet est la pièce de fixation mécanique dans un assemblage riveté. Sa géométrie étant modifiée de manière significative après son installation, nous montrons à l'aide de la figure 2.4 les parties et les dimensions caractéristiques d'un rivet avant et après sa pose.

Avant installation, on appelle rivet l'ensemble constitué par la tige et sa *première tête* (formée en usine) (voir figure 2.4(a)). La *deuxième tête* est formée en atelier ou sur le site de construction lors de la réalisation de l'assemblage (voir figure 2.4(b)). Dans la construction des ouvrages d'art ferroviaires, ce sont les rivets à tête ronde qui sont utilisés<sup>3</sup>.

3. D'autres géométries de rivets existent. Par exemple, les rivets à tête fraisée ou les rivets aveugles. Ceux-ci ne seront pas traités dans ce manuscrit.



## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

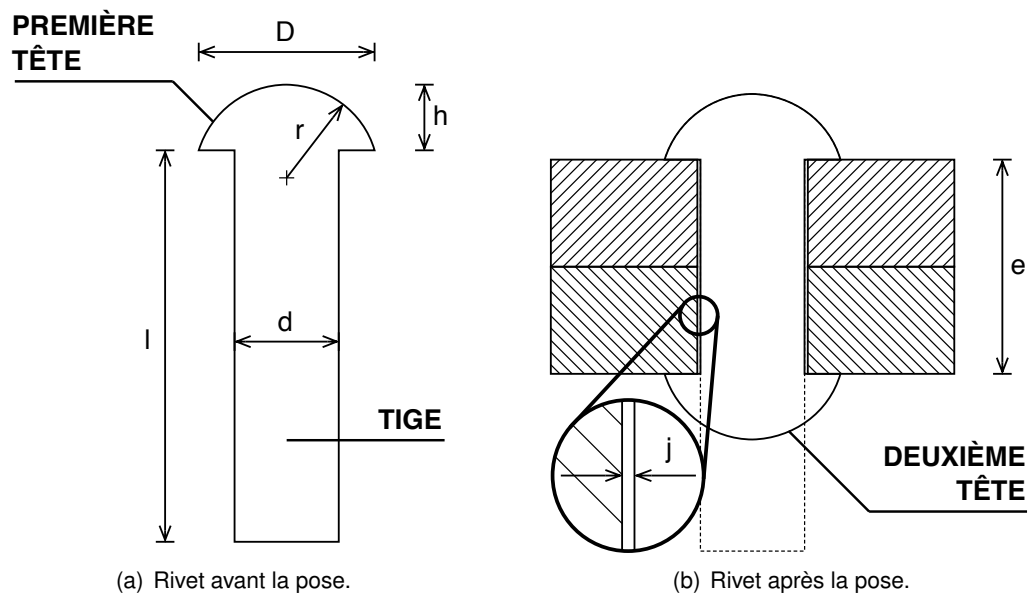


FIGURE 2.4 – Description d'un rivet à tête ronde avant et après la pose. Où  $D$  est diamètre de la tête du rivet,  $d$  est le diamètre nominal de la tige,  $h$  est la hauteur de la tête,  $r$  le rayon de la tête,  $l$  la longueur nominale de la tige et  $j$  le jeu radial entre la tige et la surface interne du trou après la pose.

La géométrie des rivets, leurs méthodes de production, les dispositions constructives des assemblages rivetés ainsi que les instructions d'exécution de ces assemblages ont évolué au fil des années. Le but de ce chapitre étant de donner uniquement les principes de fonctionnement de ce type d'assemblage, nous suggérons au lecteur les travaux de Collette (2014) pour un bilan historique de l'évolution de cette technique d'assemblage.

Les détails du procédé, ainsi que ses variantes, sont décrits dans la section suivante.

### 2.1.2 Types de joints

Selon leur application, les rivures comptent de nombreuses configurations géométriques. Dans le domaine de la construction des ouvrages métalliques ferroviaires nous retrouvons trois types d'assemblage (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014) : l'assemblage bout à bout par couvre joint (voir figure 2.5(a)), l'assemblage d'angle par cornière (voir figure 2.5(b)) et l'assemblage de semelles par superposition (voir figure 2.5(c)).

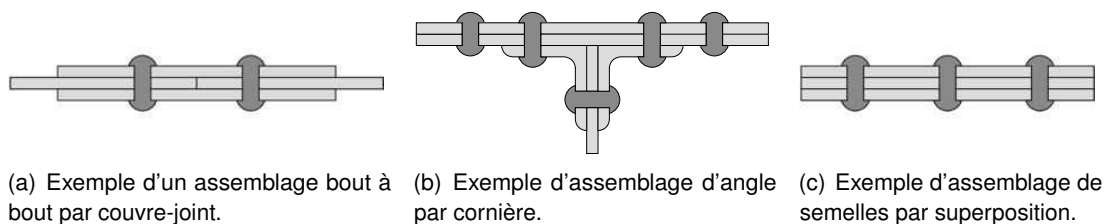


FIGURE 2.5 – Dispositions constructives utilisées dans les assemblages rivetés.

De plus, les assemblages bout à bout et par superposition peuvent être à leur tour

classés en simple et en double recouvrement et selon le nombre de rivets utilisés (Collette, 2014) (voir figure 2.6)).

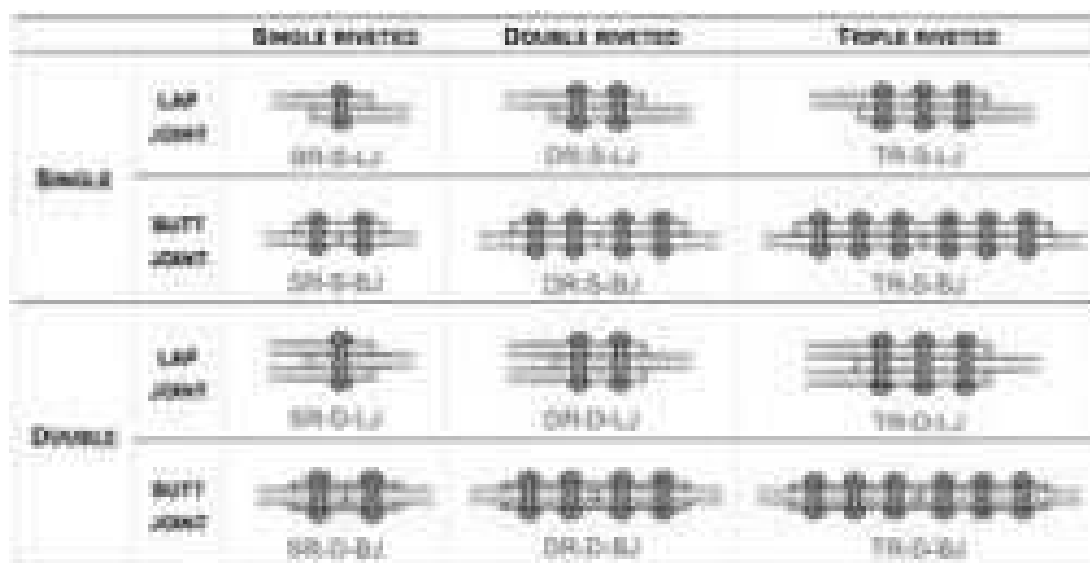
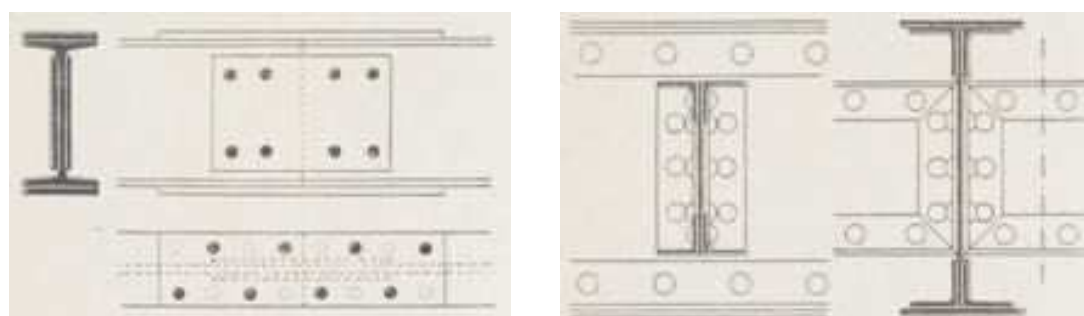


FIGURE 2.6 – Bilan de dispositions constructives d'assemblages en simple et double recouvrement (Collette, 2014).

Selon le cas d'étude, un assemblage riveté peut être sollicité par des **efforts perpendiculaires à l'axe du rivet** (voir figure 2.7(a)), par des **efforts parallèles à l'axe du rivet** (voir figure 2.7(b)) et par des **efforts inclinés sur le plan du joint** (Association française de normalisation (AFNOR), 1978).



(a) Assemblage de continuité d'une poutre.

(b) Assemblage de type pièce de pont-longeron.

FIGURE 2.7 – Exemples d'assemblages rivetés soumis à différents types de sollicitations d'après (Dechamps, 1908; Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014).

### 2.1.3 Description du procédé de rivetage

Depuis les campagnes expérimentales réalisées par Fairbairn (1850) jusqu'aux normes actuelles d'exécution des assemblages rivetés (Association française de normalisation (AFNOR), 2011), les conditions nécessaires à la « bonne réalisation » d'un assemblage riveté sont systématiquement considérées d'une grande importance afin de garantir son bon fonctionnement.

En effet, un bilan des paramètres susceptibles d'influencer la qualité d'un assemblage riveté à chaud est présenté ci-après :

- La température de chauffe du rivet.
- La température de pose du rivet.
- La limite élastique du matériau du rivet.
- L'état de surface des tôles à assembler.
- La durée (et le type<sup>4</sup>) de la pression exercée sur le rivet pendant le rivetage.
- Le procédé utilisé dans la perforation des pièces à assembler (perçage ou poinçonnage).
- La forme de la tête du rivet.

Par la suite, nous proposons dans les sections 2.1.3.1 et 2.1.3.2 un rappel des conditions spécifiques nécessaires à la réalisation d'un assemblage riveté selon la norme européenne NF EN 1090 - 2 (Association française de normalisation (AFNOR), 2011). Les recommandations apportées dans le guide de réparation des ouvrages d'art métalliques du Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES) (2014) sont également prises en compte. Nous abordons ainsi les deux étapes principales d'une opération de rivetage : la préparation des pièces à assembler et l'installation du rivet.

### 2.1.3.1 Préparation des pièces à assembler (suivant la norme NF EN 1090 - 2)

Avant toute installation du rivet certaines opérations sont nécessaires à la préparation des pièces à assembler.

- **Traitement des surfaces** : L'état de surface des pièces à assembler doit être approprié. En effet, **les assemblages rivetés font partie des assemblages qui travaillent par adhérence**, le coefficient de frottement entre les surfaces en contact direct joue donc un rôle déterminant dans le comportement du joint. Ces surfaces doivent être nettoyées, désoxydées et décalaminées dans la mesure du possible. Dans certains cas, les surfaces concernées pourront également faire l'objet d'une protection contre la corrosion.
- **Perforation des pièces à assembler** : Les trous nécessaires à l'installation des rivets peuvent être réalisés par poinçonnage (avec alésage obligatoire) ou par perçage avec foret. **Le diamètre nominal des trous doit être supérieur de 1 mm à celui des rivets**<sup>5</sup>. Dans le cas des trous réalisés par perçage, le diamètre des trous du côté de la débouchure doit être entre 3 et 4 mm inférieur au diamètre nominale du trou final. Le jeu entre la tige du rivet et la surface interne du trou étant limité à 1 mm (au diamètre), l'alésage en bloc des pièces à assembler reste recommandé afin de limiter toute excentricité issue du perçage initial des pièces, voir l'exemple de la figure 2.8.

Les nombreuses précautions menées lors de la perforation des pièces sont sensées limiter l'écrouissage du matériau autour des trous notamment pour éviter l'apparition des fissures.

---

4. Selon l'outil de rivetage utilisé, la mise en forme de la deuxième tête du rivet peut être par chocs successifs ou par presse.

5. Ceci est valable pour n'importe quel diamètre de rivet.

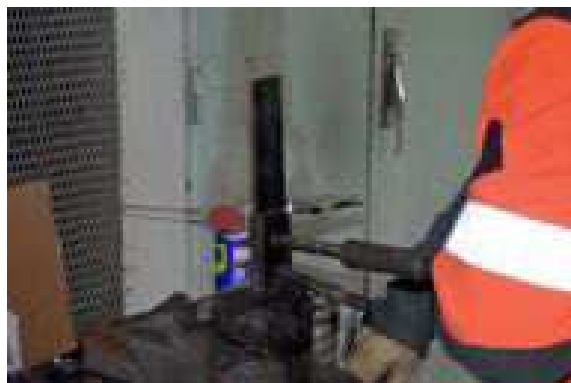
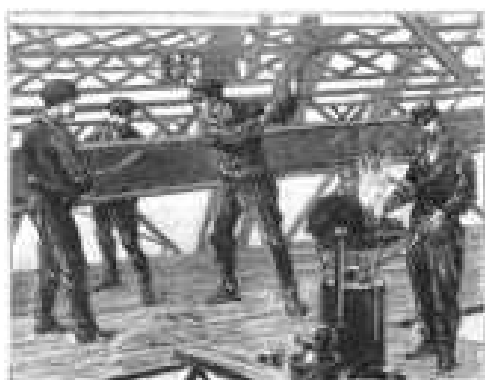


FIGURE 2.8 – Exemple d'une opération d'alésage sur l'assemblage de 3 tôles par un technicien d'une équipe RPM (Réparation des Ponts Métalliques) de SNCF Réseau.

### 2.1.3.2 Installation du rivet (suivant la norme NF EN 1090 - 2)

Le rivetage à chaud est un procédé complexe qui nécessite plusieurs travailleurs en simultané lorsqu'il est réalisé manuellement ou par marteau pneumatique sur chantier. L'équipe de rivetage a donc besoin d'être composée par un minimum de trois personnes (voir figure 2.9).



(a) Représentation d'une équipe de rivetage pendant la construction de la tour Eiffel (Tissandier, 1889).



(b) Équipe de réparation des ponts métalliques (RPM) de SNCF Réseau lors de la réalisation des éprouvettes utilisées dans ce projet de recherche.

FIGURE 2.9 – Exemples d'équipes de rivetage en train de travailler.

- **Le chauffeur** : Chargé de garantir la bonne température des rivets à la sortie du four et dans la majorité de cas de mettre le rivet à disposition du riveur.
- **Le teneur de contre-bouterolle** : Chargé de maintenir en position le *tas* (ou *contre-bouterolle*) sur laquelle reposait la première tête du rivet à installer.
- **Le riveur** : Chargé de frapper le rivet à l'aide d'un marteau et d'une *bouterolle* afin de donner la forme finale au rivet. Cet ouvrier spécialisé est dans la majorité de cas l'ouvrier le plus qualifié dans l'équipe de rivetage.

Dans le cas où, pour des raisons pratiques, le four se trouve à une certaine distance du riveur, un autre travailleur (le **passer de rivet**) est chargé de déplacer le rivet entre le four et le trou le plus rapidement possible (ceci afin de limiter son refroidissement).

## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

Avant la mise au four des rivets, leur longueur est ajustée selon l'épaisseur cumulée des tôles à assembler, la norme NF EN 1090 - 2 précise à ce sujet :

« Chaque rivet doit avoir une longueur suffisante pour obtenir une tête de dimensions uniformes, un remplissage intégral du trou et pour éviter l'empreinte superficielle de la bouterolle sur les faces extérieures des éléments. »

Malgré l'absence d'une spécification précise de la longueur de la tige à utiliser, la relation suivante est utilisée dans la pratique par les spécialistes de la réparation des ouvrages<sup>6,7</sup> :

$$l = 1,1 \cdot E + 1,5 \cdot d \quad (2.1)$$

Où  $l$  est la longueur de la tige avant la pose,  $d$  est le diamètre de la tige du rivet et  $E$  correspond à l'épaisseur cumulée des tôles à assembler. Par exemple si trois tôles d'une épaisseur individuelle de  $10\text{mm}$  doivent être assemblées à l'aide d'un rivet de  $20\text{mm}$  de diamètre, la tige du rivet doit avoir une longueur de  $63\text{mm}$ .

Afin de présenter les étapes de l'installation d'un rivet, nous proposons d'illustrer le processus par des photographies prises lors de la réalisation des éprouvettes dont la caractérisation mécanique fait l'objet des chapitres 6 et 7.

Comme le présente la figure 2.10, une fois les rivets découpés à la longueur nécessaire, il sont introduits dans un four adapté à une température d'environ  $980^\circ\text{C}$ . Lorsque le rivet est chauffé de manière uniforme sur toute sa longueur<sup>8</sup>, la calamine formée en surface suite à l'échauffement est enlevée en frappant le rivet sur une surface dure (voir figure 2.11). Dans le cas où un rivet est rejeté par le riveur à cause d'une température trop basse celui-ci ne pourra pas être réchauffé et réutilisé.



FIGURE 2.10 – Échauffement de quatre rivets dans un four de chantier à  $980^\circ\text{C}$ .

Dans le cas des assemblages à plusieurs rivets des mesures temporaires de serrage doivent être mises en place (notamment par des boulons provisoires). Un boulon tous les deux trous est le minimum recommandé et un boulon par trou est recommandé dans le cas de pièces fortement sollicitées, le rivetage devant également commencer au centre du

6. Cette règle est issue de la norme NF E27 - 156 qui est aujourd'hui remplacée par la norme NF E25 - 726.

7. Selon le cas étudié, et si nécessaire, la longueur calculée à partir de cette expression peut être ajustée suite à la réalisation d'un assemblage de test.

8. La validation de la température du rivet est menée dans la plupart des cas par inspection visuelle (e. g. un rivet en acier à la température appropriée est couleur « rouge cerise »). Les rivets particulièrement longs ont donc besoin d'une attention particulière.



FIGURE 2.11 – Rivet frappé au sol afin de le débarrasser au mieux de la calamine qui le recouvre.

groupe des rivets. Lorsque les pièces à solidariser doivent être assemblées par un seul rivet, des mesures alternatives de serrage temporaire doivent être envisagées (un serre-joint par exemple, voir figure 2.12).



FIGURE 2.12 – Installation de serre-joints avant rivetage sur un assemblage mono-rivet à double recouvrement.

Une fois le rivet mis en place dans le trou, la pression de l'outil doit être maintenue sur le rivet jusqu'à un refroidissement suffisant (noircissement de la tête) (voir figure 2.13).



FIGURE 2.13 – Séquence de martelage du rivet.

Une dernière inspection visuelle est menée une fois l'assemblage terminé (voir figure

## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

2.14). Le contact entre les pièces doit être satisfaisant, la tête du rivet doit être correctement formée, et l'excentricité des têtes par rapport à l'axe de la tige ne doit pas dépasser 0,15 fois le diamètre nominal du trou du rivet.



FIGURE 2.14 – Exemples d'assemblages mono-rivet en double recouvrement terminés (fer puddlé et acier).

### 2.1.4 Évolution du procédé : du rivetage manuel au marteau pneumatique

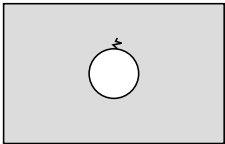
Concernant les outils de rivetage à chaud, différentes techniques ont été utilisées au fil des années. Une transition entre le *rivetage manuel* et le *rivetage à la machine* (*rivetage pneumatique* et *rivetage hydraulique*) a été constatée à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (voir figure 0.2) (Collette, 2014). Ces deux dernières méthodes (pneumatique et hydraulique) ont gagné en popularité dans la construction monumentale car elles permettaient une meilleure adhérence entre les pièces assemblées et une meilleure répétabilité de l'opération. D'ailleurs Dechamps (1908) cite dans ses travaux sur les principes de la construction des charpentes métalliques une des recommandations réalisées à ce sujet par la Commission des ponts du Danube :

« Le rivetage devra être fait exclusivement à la machine, aussi bien à l'atelier que sur le chantier. »

### 2.1.5 Défauts observés dans les assemblages rivetés

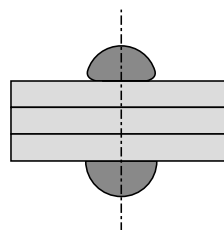
Nous présentons à l'aide du tableau 2.1 les défauts observés lors de l'exécution du procédé de rivetage (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014; Collette *et al.*, 2014).

TABLE 2.1 – Défauts propres aux ponts métalliques rivetés.

DÉFAUTS	ILLUSTRATION
<p><b>Apparition des fissures au bord des trous</b></p> <p>Suite à une pression excessive, des fissures peuvent apparaître lors du perçage ou de l'alésage des tôles à assembler. Selon la configuration constructive, et après validation par calcul, les trous peuvent être ré-alésés à un diamètre supérieur (le rivet devra avoir un diamètre supérieur également).</p>	

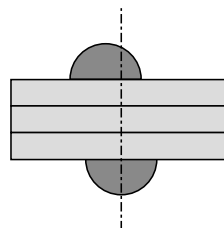
### ***Tête mal fermée***

Quantité de matière insuffisante pour la formation de la seconde tête ; celle-ci étant trop petite, le contact entre la base de la tête et la tôle est insuffisant (mauvaise transmission de l'effort de serrage). La dégradation par corrosion risque d'être accélérée (infiltration d'eau entre les pièces). De plus, l'outil de rivetage risque de frapper (et endommager) la surface d'une des pièces en train d'être assemblée. Ceci peut se produire également lorsque le rivet n'est pas suffisamment chaud pour être installé.



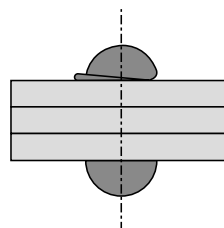
### ***Excentricité marquée entre le centre de la deuxième tête du rivet et l'axe de sa tige***

Ce décalage produit une mauvaise transmission de l'effort de serrage.



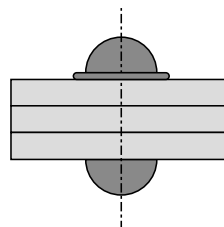
### ***Tête mal formée***

Souvent causé par une manipulation incorrecte de l'outil de rivetage, ce défaut provoque une répartition irrégulière de l'effort de serrage, le risque de corrosion est également plus important.



### ***Collerette autour de la seconde tête du rivet***

Produite à cause d'une tige de rivet trop longue, ce « défaut » est purement esthétique.



## 2.2 Scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté

Une fois les conditions d'exécution des assemblages rivetés établies dans les sections précédentes, nous nous focalisons par la suite sur les scénarios de fonctionnement (et de ruine) observés pour ce type d'assemblage.

Par leur rôle essentiel dans la construction monumentale, notamment dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>9</sup>, le comportement mécanique des assemblages rivetés à chaud a été très étudié. En effet, des nombreuses études expérimentales ont été réalisées depuis 1850 à ce sujet par exemple celles de Fairbairn (1850), Morin (1857), Barba (1875), Considère (1886) et Frémont (1906).

C'est à partir des nombreuses campagnes expérimentales que trois modes de rupture ont été établis pour ce type de joint : le **rupture en tension des tôles** qui composent le

9. Le rivetage à chaud a été également largement utilisé dans l'industrie navale et la chaudronnerie en général.



## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

joint (voir figure 2.15(b)), le **cisaillement du rivet** (voir figure 2.15(c)) et la **rupture de la tôle par pression diamétrale exercée par la tige du rivet** (voir figure 2.15(d)).

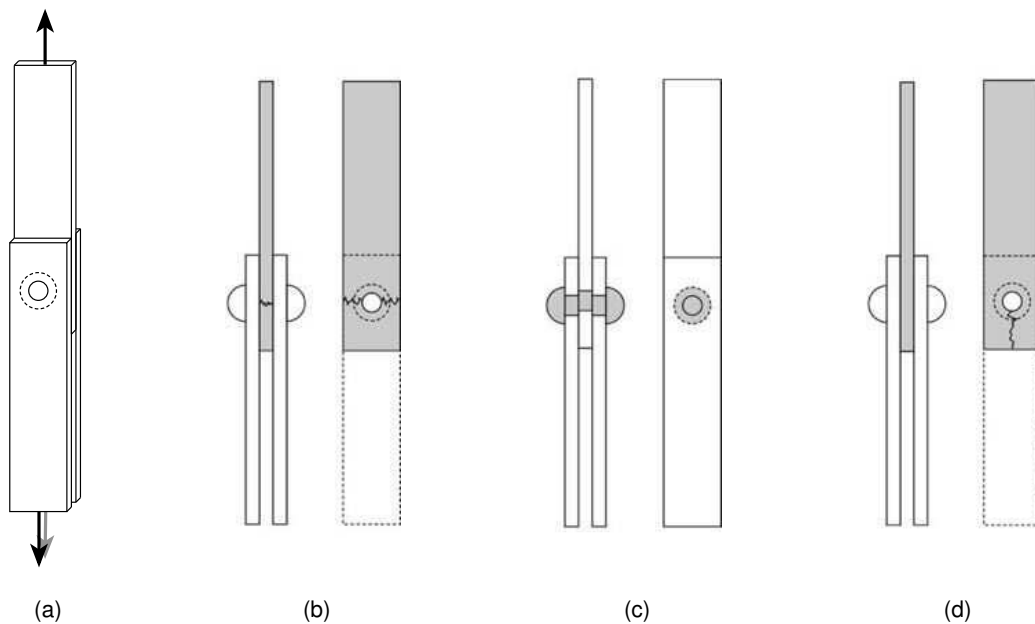


FIGURE 2.15 – Exemple de scénarios de ruine possibles pour un assemblage mono-rivet en double recouvrement sollicité en traction (a) : rupture par tension de la tôle centrale (b), rupture du rivet en cisaillement (c) et rupture par pression diamétrale de la tôle centrale (d).

Sachant que c'est le retrait du rivet lors du refroidissement qui permet le serrage d'un assemblage, il est attendu qu'un jeu entre le rivet et la surface interne du trou existe (ceci a été proposé précédemment dans la figure 2.4(b) lors de la description des paramètres géométriques d'un rivet). **L'assemblage riveté fonctionne donc initialement par adhérence.** Ce principe de fonctionnement amplement accepté et notamment décrit par Frémont (1906), Considère (1886) et Dechamps (1908) entre autres à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle est absent aujourd'hui des normes de construction actuelles telles que les recommandations du Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES) (2014) et la norme suisse de maintenance des structures porteuses en acier (Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2011) où le trou du rivet est estimé « complètement comblé » après la pose du rivet. En fait, l'hypothèse du fonctionnement d'un assemblage riveté directement en cisaillement depuis le moment de sa pose correspond au pire scénario possible, selon Dechamps (1908) :

« Pour les calculs, on se place dans l'hypothèse la plus défavorable, en faisant abstraction du frottement en *ne comptant que sur la résistance des rivets au cisaillement.* »

Cette hypothèse du scénario de fonctionnement par cisaillement provient en effet de la supposition qu'une fois que le frottement d'un assemblage riveté est vaincu, suite aux vibrations ou un chargement exceptionnel, les tôles glisseront l'une sur l'autre et seuls les rivets (maintenant sollicités en cisaillement) feront opposition aux efforts extérieurs auquel l'assemblage est soumis (Dechamps, 1908). Les raisons de négliger le comportement en adhérence sont également liées à une incertitude (Akeesson, 2010) : le processus de

rivetage à chaud ne garantit pas un effort de serrage contrôlé. De plus, d'un rivet à l'autre l'effort de serrage ne sera pas identique (celui-ci étant dépendant de nombreux facteurs cités en 2.1.3). Compte tenu que l'effort ultime de l'assemblage sera nécessairement fonction de la résistance des tôles qui les composent (tension et pression diamétrale) ainsi que de la résistance du rivet au cisaillement, le fait de ne pas tenir compte du comportement en adhérence de l'assemblage est compréhensible. Néanmoins, une interrogation se pose lorsque l'endommagement observé sur les structures rivetées est lié aux chargements en fatigue (et donc largement en dessous de l'effort ultime prévu pour l'assemblage lors de sa conception). En effet, l'existence d'un certain contact initial entre les tôles et les rivets lors de la fabrication de l'assemblage peut être négligeable dans l'estimation de sa résistance ultime. Mais ceci n'est pas le cas lorsque les sollicitations sont répétées ; des phénomènes tels que le matage peuvent se produire sur la surface interne du trou du rivet ainsi que sur sa tige.

Les campagnes expérimentales menées au cours de ces travaux de thèse et consignées dans la deuxième partie de ce manuscrit visent ainsi à affiner la compréhension du comportement d'un assemblage riveté. L'objectif est donc d'améliorer les connaissances que permettront ultérieurement d'optimiser les techniques de calcul de l'endommagement des assemblages sujets à des chargements cycliques.

## 2.3 Bilan

Le comportement mécanique des assemblages rivetés est complexe et sensible à de nombreux paramètres. Depuis plus de 160 ans, et l'apparition de la charpente métallique dans les ouvrages d'art ferroviaires, de nombreux travaux ont été menés pour comprendre leur comportement.

- D'après ces études expérimentales trois scénarios de ruine sont possibles pour les assemblages rivetés :
  - La rupture des tôles suite à des charges dépassant leur limite à la traction (voir figure 2.15(b)).
  - La rupture du rivet suite aux chargements en cisaillement dépassant la résistance du rivet cet type de chargement (voir figure 2.15(c)).
  - La rupture de la tôle par dépassement de sa limite à la pression diamétrale (voir figure 2.15(d)).
- Bien que dimensionnés sous des scénarios de fonctionnement pessimistes, les assemblages rivetés transmettent des efforts initialement par adhérence. Celle-ci dépend de l'effort de serrage exercé par le rivet sur les tôles ainsi que de l'état (et le nombre) de surfaces en contact.
- L'hypothèse du comblement total du trou lors de la pose du rivet est en effet cohérente dans le cadre d'un dimensionnement au chargement ultime supporté par l'assemblage. Néanmoins, compte tenu des charges bien inférieures subies par l'ouvrage et susceptibles d'être responsables de l'endommagement par fatigue, la question se pose sur la nécessité de prendre en compte tous les scénarios de fonctionnement de l'assemblage (de l'adhérence en passant par le glissement et jusqu'au contact entre la tige du rivet et la surface du trou).

## 2. LE RIVETAGE À CHAUD : UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE EMPLOYÉE DANS LES OUVRAGES MÉTALLIQUES ANCIENS

---

Nous considérons donc que la recherche d'une estimation plus précise des mécanismes d'endommagement présents sur les assemblages des ouvrages métalliques anciens passe par la compréhension affinée de ces possibles scénarios de fonctionnement (ceci fera l'objet de la deuxième partie de ce manuscrit).

Dans le chapitre suivant nous évaluons les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les ponts métalliques anciens. Nous nous intéressons principalement au fer puddlé dont la micro-structure caractéristique est hétérogène par la présence des inclusions non-métalliques.

# Le fer puddlé : matériau utilisé dans les ponts métalliques anciens

*Les deux premiers chapitres de ce manuscrit ont porté sur la problématique industrielle de la maintenance des ouvrages métalliques assemblés par rivetage à chaud. Au cours de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, les fers puddlés ont été particulièrement utilisés dans la construction des ponts métalliques ferroviaires.*

*Ce troisième chapitre présente ainsi cette famille de métaux, depuis le procédé d'élaboration jusqu'aux caractéristiques mécaniques et la métallurgie. Les données de la littérature sur ces propriétés nous conduiront à proposer une série de campagnes expérimentales visant à enrichir ces connaissances.*

## Contenu

---

3.1	Présentation du procédé de puddlage . . . . .	63
3.2	Caractérisation mécanique des fers puddlés . . . . .	66
3.3	Métallurgie des fers puddlés . . . . .	69
3.4	Bilan . . . . .	71

---



### 3.1 Présentation du procédé de puddlage

D'après Sauveur (1938), le fer puddlé<sup>1</sup> doit son nom au four dans lequel il est généralement obtenu. Le terme puddlage provient du verbe anglais *to puddle* qui signifie brasser ; il est effectué dans un four<sup>2</sup> afin d'affiner de la fonte. Durant l'opération d'affinage, la fonte est brassée énergiquement en présence d'oxydants qui la décarburent par formation de monoxyde et de dioxyde de Carbone.

Un exemple de four de puddlage est présenté dans la vue en coupe longitudinale de la figure 3.1. Cette figure montre les principaux constituants de ce four, également décrits dans (Fairbairn, 1861) :

- La grille qui supporte le combustible.
- La sole qui reçoit la fonte à brasser. Celle-ci est surmontée d'une ouverture qui permet également au puddleur de charger la fonte.
- La cheminée qui permet l'évacuation des gaz.

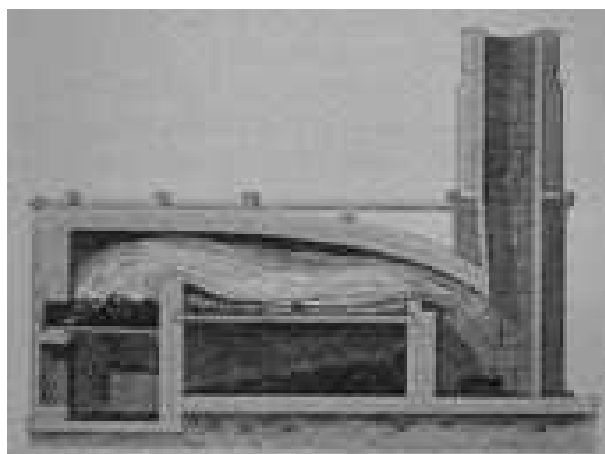


FIGURE 3.1 – Présentation du four de puddlage, d'après Garnier (1878).

L'utilisation de ce type de four pour l'affinage du fer date du brevet de Henry Cort en 1784. Mais ce n'est qu'à partir de 1825-1830 que les résultats devinrent satisfaisants (Gruner, 1878). En effet, la sole du four de Cort était recouverte de brique et de sable qui formait un laitier de silicates de fer réduisant sensiblement la production de fer et augmentant son prix de revient. A partir de 1825-1830, la sole fut recouverte de scories<sup>3</sup> comme agent oxydant (Gruner, 1878). Bowman et Piskorowski (2004) attribuent cette proposition à Joseph Hall en 1830. Compte tenu de la pénibilité du métier de puddleur, les fours à puddler évoluèrent également en proposant des solutions de brassage mécanique, voir figure 3.2.

Après avoir atteint une température suffisante, l'**affinage** de la fonte au réverbère est composée de deux opérations : le **puddlage** et le **corroyage**. Durant le brassage énergique de la fonte, les éléments d'addition (autres que le Carbone) qui la composent sont également éliminés : le Silicium, le Manganèse et le Phosphore passent en effet dans

1. Le fer puddlé est nommé *wrought iron*, *puddle iron* ou *puddled iron* en langue anglaise (Sauveur, 1938).

2. Ce four est appelé four à réverbère ou four de puddlage.

3. Scorie : résidu solide provenant de la réduction de minerais métalliques et de l'affinage des métaux.

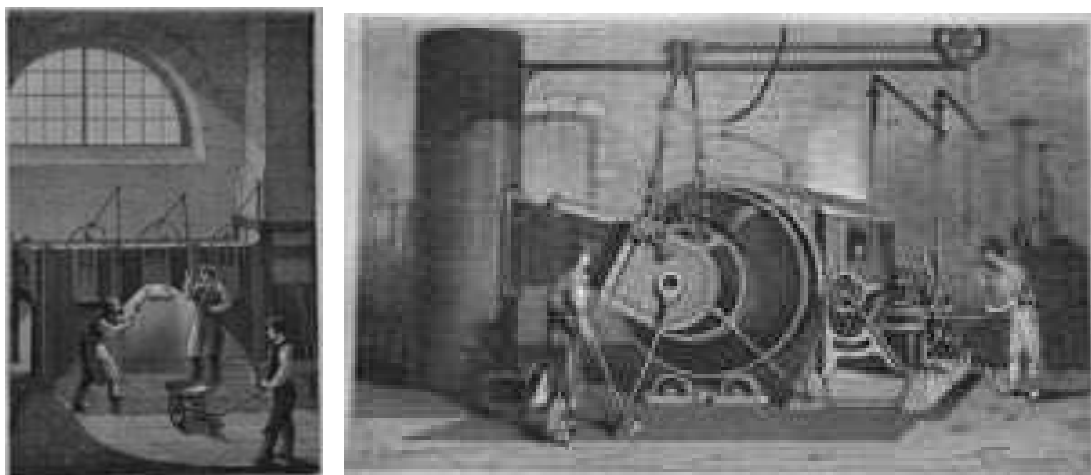


FIGURE 3.2 – Four à puddler manuel (gauche) et four à puddler mécanique, système Danks (droite), d'après Garnier (1878).

les scories, le Soufre est éliminé sous forme d'acide sulfureux (Gruner, 1878)<sup>4</sup>. A mesure que le fer s'épure, il devient moins fusible ce qui conduit à élever la température du four pour poursuivre le brassage. La masse ferreuse ramollie résultante est ensuite divisée en loupes. Ces loupes sont cinglées par pression ou percussion afin d'expulser la majeure partie des scories. Enfin, les lopins passent au corroyage pour éliminer les particules qui n'ont pu être expulsées par le **cinglage**. Le corroyage consiste généralement en une chauffe à haute température qui permet d'éliminer les scories restantes, devenues liquides.

Les lopins sont ensuite assemblés avant de passer au **laminage** qui leur donnera leur forme finale (barre, cornière, plat, poutre de section quelconque). La figure 3.3 montre différentes configurations permettant d'obtenir une poutre « I ». Ce type de poutre peut aussi être obtenu par rivetage de plaques et de cornières. C'est cette configuration qui fut largement utilisée dans la construction des ponts métalliques.

Puisqu'il est mis en forme dans le but d'obtenir des produits finis, le fer puddlé fait ainsi partie de la famille des **fers forgés**. Le laminage conférant une direction privilégiée au produit, la microstructure du fer puddlé a donc également une direction privilégiée. Le résidu des scories restantes emprisonnées dans le fer forme ainsi des inclusions allongées dans le sens du laminage.

La composition chimique de la fonte étant liée à la qualité du fer obtenu (De Bouw *et al.*, 2009), et les fers puddlés n'ayant pas été complètement débarrassés de leurs impuretés (ils n'ont de plus pas tous reçu les mêmes opérations de cinglage, de laminage et de chauffage), la composition et la microstructure des fers puddlés est donc très variable d'un fer à un autre. La connaissance du taux d'impuretés présentes dans les fers puddlés est donc essentielle pour apprécier leur qualité.

Comme le montre la figure 3.4, une très faible variation de Carbone modifie considérablement la limite d'élasticité du fer (Lakhtine, 1971). Ce point est très important dans le cas des fers puddlés très peu riches en Carbone, ce qui implique une grande diversité de caractéristiques mécaniques pour cette famille de métaux. Le Manganèse produit éga-

4. Cette élimination dépend de la composition de la fonte, notamment en Phosphore, Soufre et Manganèse ; les caractéristiques mécaniques du fer issu du brassage et des opérations de cinglage et de laminage sont dépendantes de cette composition (De Bouw *et al.*, 2009).

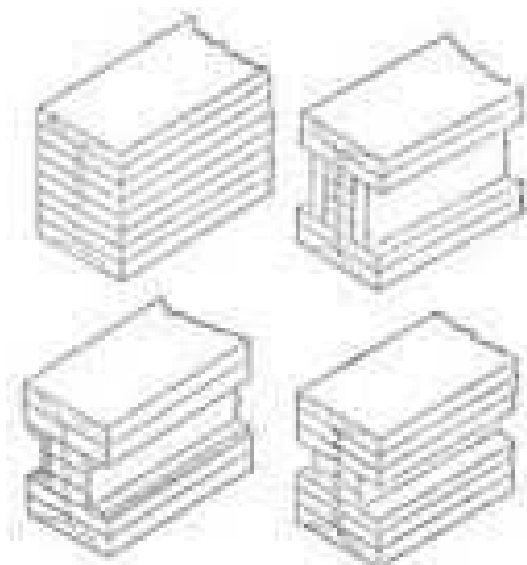


FIGURE 3.3 – Différentes configurations d'empilement de lopins permettant d'obtenir une poutre « I » par laminage, d'après Twelvetrees (1900).

lement une augmentation des résistances caractéristiques du fer et des aciers (aucune précision n'est néanmoins apportée sur le type de résistance considérée dans dans le texte de Roberts-Austen (1898)).

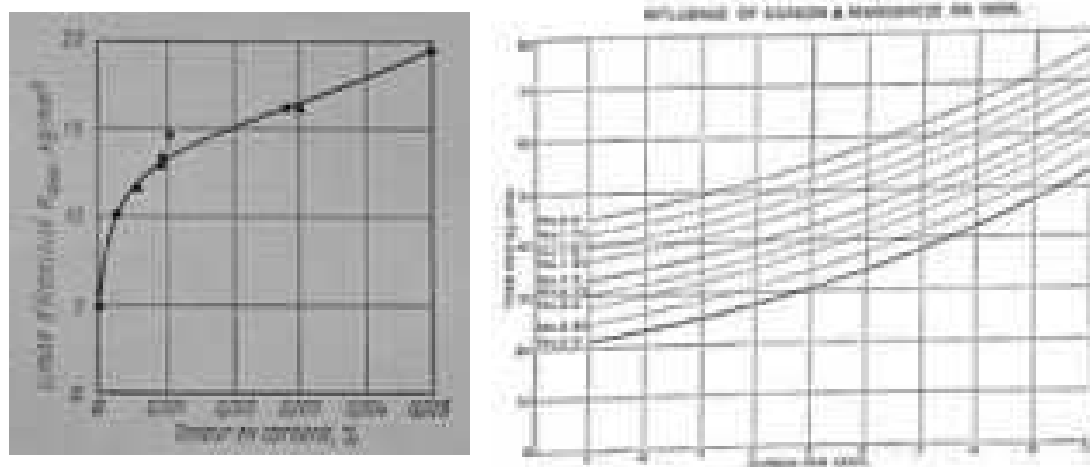


FIGURE 3.4 – Influence du taux de Carbone sur la limite d'élasticité à 0,2%, d'après (Lakhtine, 1971) (gauche) et influence du Manganèse sur les propriétés mécaniques du fer et des aciers, d'après Roberts-Austen (1898) (droite).

Le Phosphore augmente quant à lui la limite d'élasticité et la charge de rupture mais diminue considérablement la plasticité et la ductilité. Dans les aciers bas Carbone, le Phosphore sert également à accroître la tenue à la corrosion atmosphérique (Lakhtine, 1971).

La présence dans les fers puddlés des scories non éliminées et l'opération de laminage succédant au puddlage confère à ces matériaux des propriétés naturelles d'hétérogénéité et d'anisotropie. L'étude de la caractérisation mécanique des fers puddlés est traitée dans le paragraphe suivant.



## 3.2 Caractérisation mécanique des fers puddlés

### 3.2.1 Caractérisation sous chargement monotone

Les données historiques sur la caractérisation des fers puddlés sous chargement monotone sont très nombreuses. O'Sullivan et Swailes (2009); Bowman et Piskorowski (2004) proposent par exemple des bilans de nombreux essais depuis les premières expériences de Fairbairn et de Kirkaldy. Deux directions de chargement sont répertoriées dans ces bilans : celle du laminage et la direction perpendiculaire. La figure 3.5 présente par exemple un bilan (1882 échantillons testés) sur la limite en traction de barres en fer sollicitées dans le sens du laminage.

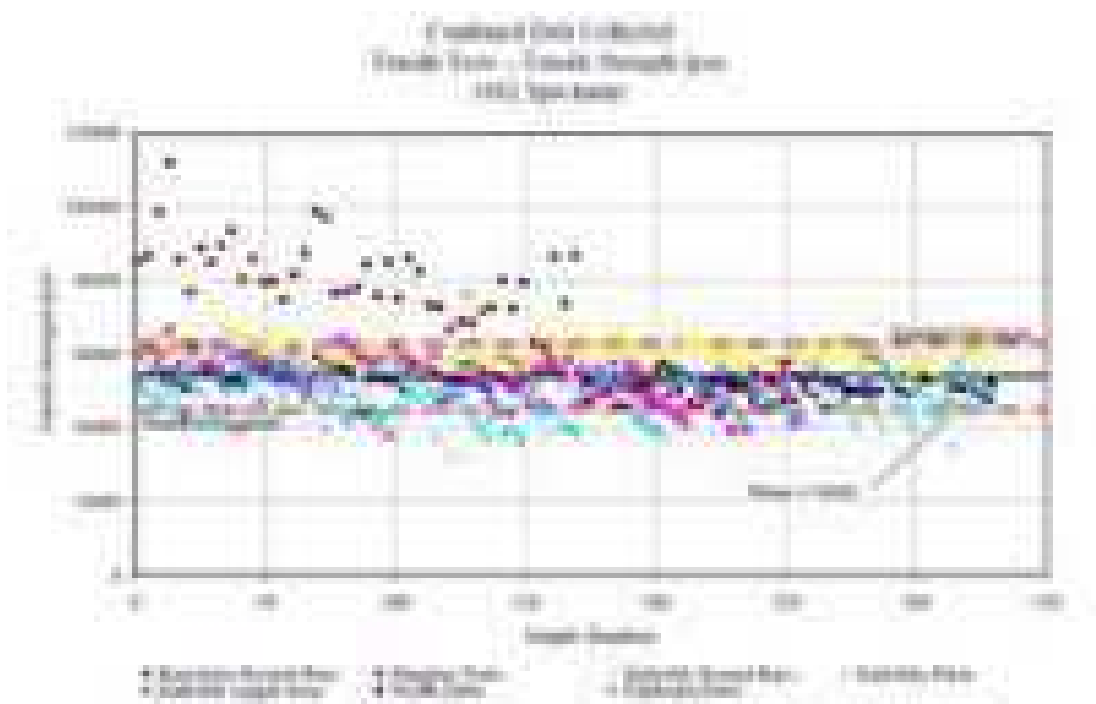


FIGURE 3.5 – Bilan historique des tests mécaniques, caractérisation de la limite en traction, extrait de Bowman et Piskorowski (2004).

La moyenne des données de limite en traction ( $R_m$ ) est de  $54000\text{psi}$ , c'est à dire  $372,3\text{MPa}$  (l'écart type calculé étant de  $9000\text{psi}$  soit  $62\text{MPa}$ , ce qui vaut  $16,71\%$  de la valeur moyenne). On remarque que les données issues des fers scandinaves (données de Styffe) sont au dessus de la moyenne proposée ; les fers suédois étaient en effet connus pour être d'excellente qualité (Fairbairn, 1861; O'Sullivan et Swailes, 2009). Même si ce type de bilan permet de connaître des ordres de grandeurs intéressants pour l'estimation de la résistance des fers, l'analyse comparative de ces données est cependant délicate. En effet, les informations sur les conditions expérimentales sont manquantes, dimensions des éprouvettes et vitesse de sollicitation notamment.

Le diamètre (ou les dimensions de la section droite d'une éprouvette) est en effet lié au nombre d'étapes successives de laminage qui écrouissent le matériau. Ainsi, comme le présente la figure 3.6, la limite élastique de barres en fer est fortement dépendante du diamètre de la barre testée. Il en résulte des propriétés très diverses montrées sur la figure de droite reliant limite élastique et allongement à rupture.

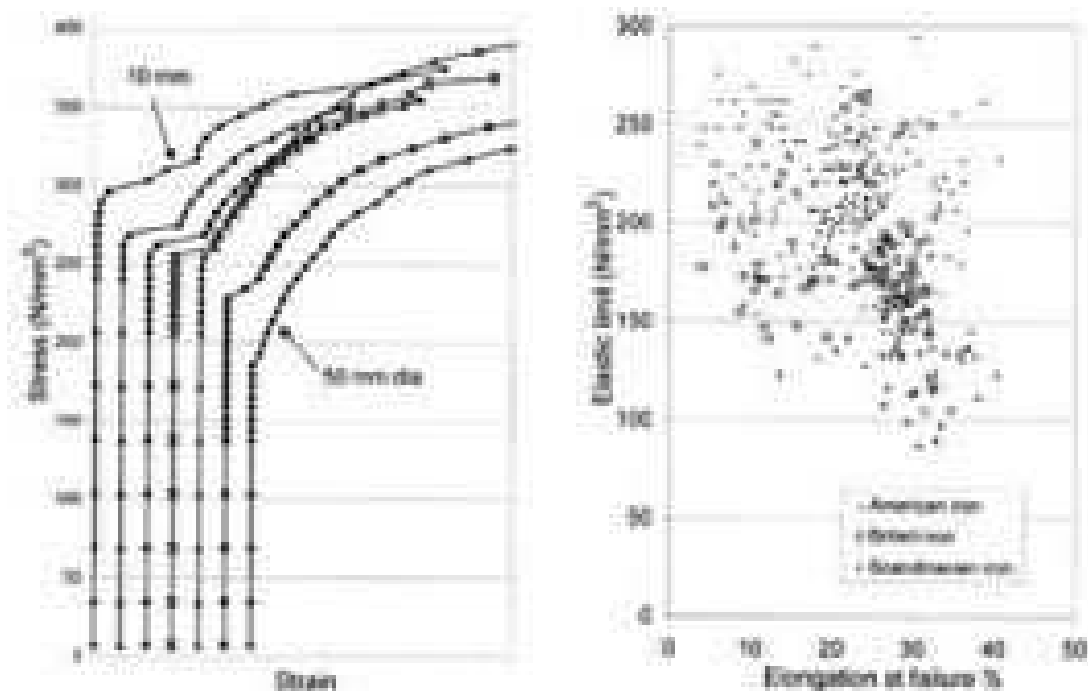


FIGURE 3.6 – Influence du diamètre sur la réponse en traction de barres en fer (gauche) et bilan de limites d'élasticité et de ductilité de barres de fer américaines, britanniques et scandinaves (droite), d'après O'Sullivan et Swailes (2009).

Ces bilans ne montrent pas la dispersion des caractéristiques au sein d'un même lot. Love (1859) dresse par exemple le bilan de tests menés sur les tôles de Commentry, dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire. Pour chaque lot, deux à six essais de traction sont menés. La moyenne de la charge qui provoque la rupture est relevée. La troisième série d'expériences (6 essais) sur les barreaux marqués N°1 et sollicités dans le sens du laminage donne les résultats présentés dans la figure 3.7.

N° de lot des essais	DÉSIGNATION	CHARGE de rupture		OBSERVATIONS
		par cm de section	à la rupture	
16	2 <sup>e</sup> série d'expériences sur des barreaux en tôle de Commentry portant la charge de fatigue N° 1, tous parallèlement aux fibres.	2118	2114	Ces deux sont les mêmes, toutes supérieures.
17		2082		La tôle était défectueuse.
18		2100		Le parallélisme était mauvais.
19		2086		idem.
20		2220		idem.
21		2192		idem.

FIGURE 3.7 – Essais de traction sur un lot de barreaux d'une tôle de Commentry, adapté de Love (1859).

Cet exemple est intéressant car Love compare les différents lots à partir de la valeur moyenne. Pourtant, la valeur la plus faible est importante pour le dimensionnement des structures. De même, l'information sur l'écart entre les valeurs extrêmes permet d'avoir une donnée statistique complémentaire.

Par les différentes étapes du procédé de puddlage, par la composition variable de ces métaux, les caractéristiques mécaniques monotones des fers puddlés sont dispersives. Mais pour être comparables et exploitables, ces données doivent être complétées d'une

part par les conditions expérimentales et d'autre part par une analyse statistique des écarts mesurés.

### 3.2.2 Caractérisation sous chargement cyclique

La littérature du XIX<sup>ème</sup> propose beaucoup moins de données sur le comportement en fatigue des fers puddlés. Moore et Kommers (1927) précisent les résultats des essais de Wöhler sur des fers forgés, mais les nombres de cycles à rupture ne sont pas précisés, ni le nombre d'éprouvettes testées. Ces données ne sont pas exploitables.

Depuis les années 2000, des essais de caractérisation en fatigue des fers puddlés viennent compléter les données sur la fatigue des assemblages rivetés (De Jesus *et al.*, 2011; Sustainable Bridges, 2007; Gallegos Mayorga *et al.*, 2013). Deux types d'approche sont considérés : l'amorçage des fissures de fatigue ou la propagation de ces fissures. Quelle que soit l'approche, la dispersion des résultats est très importante. La figure 3.8 montre par exemple les résultats de deux campagnes de caractérisation de la propagation de fissures dans des fers puddlés portugais et les lois de Paris associées. Étant donné que les fers puddlés peuvent être considérés comme des matériaux comportant des défauts initiaux (la matrice de fer peut être considérée comme fissurée par la présence des résidus de scories), l'étude de la propagation de la fissure introduite dans une éprouvette de type CT explique la très grande dispersion observée. L'exploitation de ces résultats est donc difficile ; nous notons de plus que ceux-ci sont également très différents d'un fer puddlé à un autre.

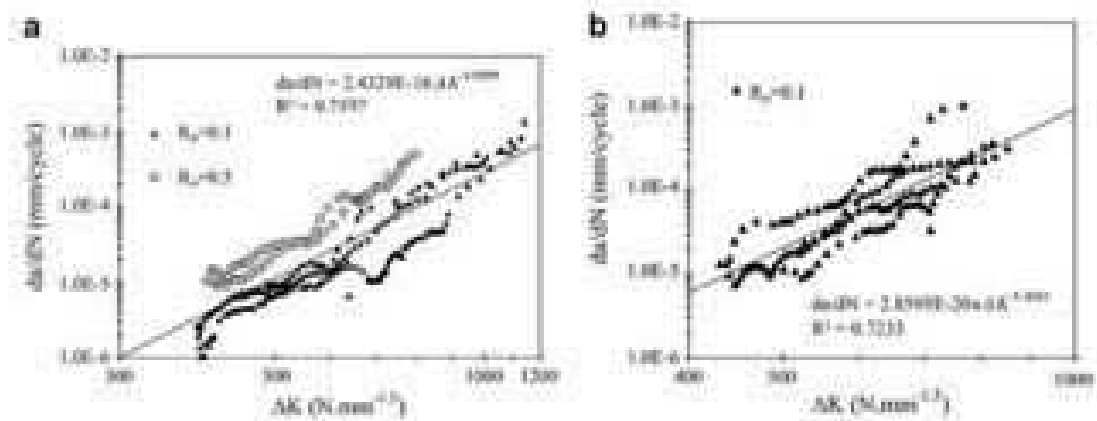


FIGURE 3.8 – Exemple d'essais de propagation sur les fers puddlés du Pont Eiffel (a) et du Pont Luiz I (b) au Portugal, d'après De Jesus *et al.* (2011)

Comme précisé en section 1.2, la période d'amorçage d'une fissure peut représenter jusqu'à 80% de la durée de vie totale d'une pièce (les 20% restants représentent la phase de propagation). La caractérisation sous chargements cycliques des fers puddlés doit donc porter également sur la phase d'amorçage, même si les ouvrages d'art ont déjà plus de 100 ans de service. Le rivetage, qui écrase les tôles constituant les assemblages, peut modifier le comportement mécanique des fers puddlés. L'influence d'un rivet posé à chaud (effet structure) doit donc être étudiée pour comprendre le comportement en fatigue des fers puddlés présents sur les ouvrages d'art métalliques anciens.

### 3.3 Métallurgie des fers puddlés

La dispersion des résultats de caractérisation mécanique (chargements monotones et cycliques) s'explique par la présence des inclusions non métalliques au sein de la matrice de fer. La figure 3.9 présente deux exemples de micrographie de fers puddlés ; l'orientation des inclusions traduit la direction de laminage. Ces deux exemples montrent une population d'inclusions très diverse et une taille de grains variable ; la métallurgie des fers inclusionnaires pouvant être retrouvée dans Sauveur (1938); Guillot et Fluzin (1987); Gordon (1997); De Jesus *et al.* (2011); Sire *et al.* (2012a); McCowan *et al.* (2011).

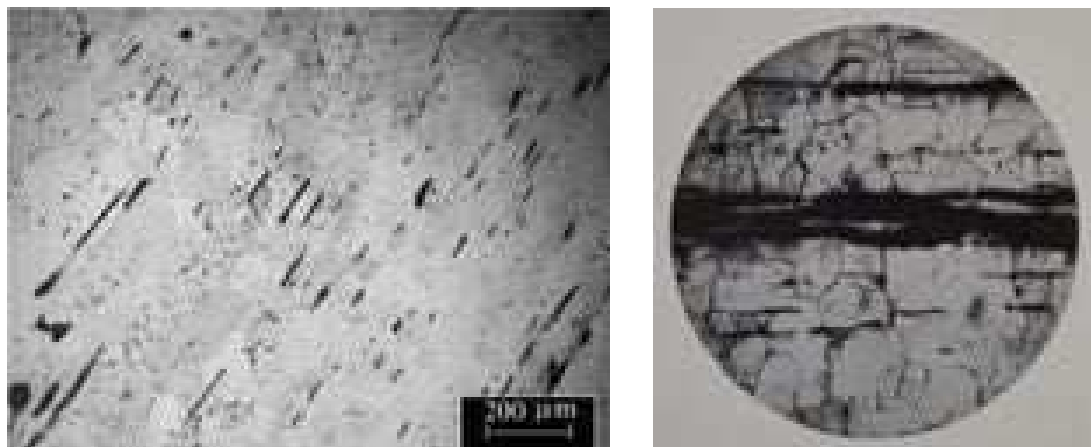


FIGURE 3.9 – Micrographie du fer puddlé du pont Fão, au Portugal, d'après De Jesus *et al.* (2011) (gauche) et micrographie longitudinale d'un fer puddlé selon Sauveur (1938) (droite).

L'hétérogénéité macroscopique due à la présence de ces inclusions est complétée par une hétérogénéité microscopique liée à la répartition de certains éléments d'addition, notamment le Phosphore. Une attaque au réactif d'Oberhoffer dont la composition chimique est présentée dans la table 3.1 permet en effet de révéler la distribution non homogène du Phosphore dans le fer puddlé. Des « structures fantômes » peuvent être observées dans les spécimens pour lesquels il existe des zones où les teneurs moyennes en Phosphore sont comprises entre 700 et 5000 ppm (Vega *et al.*, 2002). La figure 3.10 montre un exemple de ces « structures fantômes » sur un fer inclusionnaire ; leur géométrie particulière est liée à la présence des inclusions. Les zones sombres correspondent aux régions les moins riches en Phosphore. L'exemple de la figure 3.10 montre une déphosphoration nette autour des inclusions. L'utilisation du réactif d'Oberhoffer pour montrer une déphosphoration autour des inclusions des fers anciens a également été étudiée dans Dillmann et Balasubramaniam (2001), Vega *et al.* (2002), L'Héritier *et al.* (2005), Balasubramaniam (2008), Sire *et al.* (2012a) et Thiele et Hosek (2015).

TABLE 3.1 – Composition chimique du réactif cuivrique d'Oberhoffer.

FeCl <sub>3</sub>	CuCl <sub>2</sub>	SnCl <sub>2</sub>	HCl	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	H <sub>2</sub> O
30 g	1 g	0,5 g	50 mL	500 mL	500 mL

Vega *et al.* (2002) proposent une explication de la formation de ces structures à partir du diagramme d'équilibre fer - Phosphore présenté dans la figure 3.11. Pour une teneur

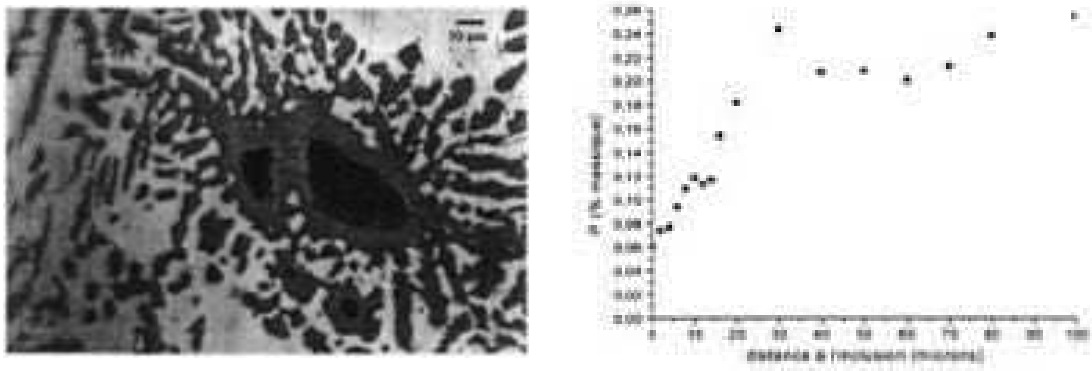


FIGURE 3.10 – Structures fantômes visibles après une attaque au réactif d'Oberhoffer (gauche) et évolution de la teneur en Phosphore au voisinage d'une inclusion traduisant la déphosphoration autour de l'inclusion (droite), d'après Vega et al. (2002).

en Phosphore donnée, il existe un domaine à haute température où coexistent l'austénite  $\gamma - Fe$  et la ferrite  $\alpha - Fe$  (ce domaine comprend la température de puddlage). Or, la limite de solubilité du Phosphore dans l'austénite est plus faible que dans la ferrite. Par conséquent, si le matériau est maintenu suffisamment longtemps dans ce domaine, des régions à faible teneur en Phosphore correspondant à l'austénite vont apparaître ainsi que des régions à forte teneur en Phosphore correspondant à la ferrite. Lorsque le fer est refroidit assez rapidement (à l'air ou à l'eau), le Phosphore n'a pas le temps de diffuser dans le fer dont la microstructure redevient entièrement ferritique et les variations de concentration en Phosphore demeurent. Elles apparaissent sous forme de régions sous la forme d'aiguilles dont les contours, selon les spécimens considérés sont plus ou moins bien définis en fonction de la vitesse du refroidissement et de la populations d'inclusions. La présence de ces structures fantômes traduit donc un refroidissement assez rapide du fer puddlé.

Comme décrit précédemment, le Phosphore modifie les caractéristiques mécaniques du fer en augmentant les capacités de résistance mais en diminuant la ductilité. O'Sullivan et Swailes (2009) montrent ainsi une énergie absorbée plus faible lors d'un essai de résilience (Izod) lorsque le taux de Phosphore est élevé. Une distribution hétérogène du Phosphore dans la matrice de fer confère également des propriétés micro-mécaniques différentes. Thiele et Hosek (2015) analysent la dureté Vickers en fonction du taux de Phosphore. Dans le cas des lames d'épées médiévales en fer phosphoreux, ils montrent une relation linéaire entre dureté et taux de Phosphore de la forme  $HV = (110.1 + (119.8 \cdot P)) \pm 15.7$ . La dureté augmente donc avec le taux de Phosphore. Cependant, les auteurs précisent que cette formule n'est pas valide en présence d'arsenic et de Carbone ni en présence de structures fantômes. A partir de mesures de micro-dureté sur un fer puddlé de 1883, le constat est identique ; nous trouvons une dureté moyenne de 273 HV pour la zone riche en Phosphore (claire) et de 232 HV pour la zone foncée (pauvre en Phosphore). La dureté moyenne de la zone claire est 17.6 % plus élevée par rapport à la dureté moyenne de la zone foncée<sup>5</sup> (Gallegos Mayorga, 2012). Mais cette analyse s'avère cependant très discutable car la présence d'éléments « durs » (les inclusions) cachés sous l'indenteur peut altérer les mesures (fonction de l'épaisseur de ferrite à l'endroit considéré). Cette analyse est donc dépendante du fer puddlé étudié et ne peut donc pas être généralisée.

5. Les résultats correspondent au protocole utilisé par le constructeur de l'équipement (CSM)

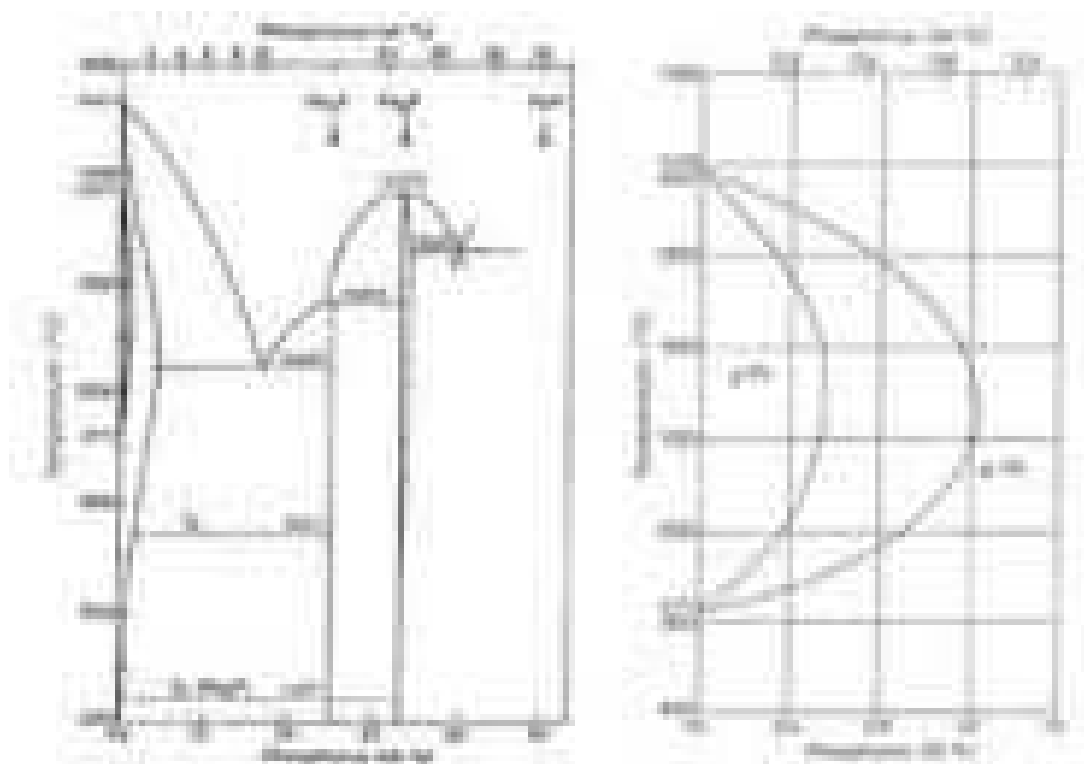


FIGURE 3.11 – Diagramme de phases binaire Fer - Phosphore, d'après Okamoto (1990)

La métallurgie des fers puddlés montre une population d'inclusions variée, orientée dans le sens du laminage. Ces inclusions permettent d'expliquer la dispersion relevée dans la caractérisation mécanique de ces métaux inclusionnaires. Cependant, aucun lien entre la population d'inclusions et les propriétés des fers puddlés n'a été établi.

### 3.4 Bilan

La littérature fournit une base de données intéressante sur les propriétés mécaniques des fers puddlés, notamment sous chargement monotone. Ces données sont cependant à prendre avec précaution lorsque les conditions expérimentales sont absentes (dimensions des éprouvettes, nombre d'éprouvettes testées, vitesse de sollicitation en quasi-statique, fréquence et nombre de cycle à rupture en fatigue ...).

L'anisotropie des fers puddlés n'est par ailleurs pas étudiée. Pourtant, les éléments de ponts ne sont pas tous, en tout point, sollicités uniquement selon une direction. La diversité de ces matériaux est également non prise en compte : par leur fabrication, les fers puddlés sont tous différents et leurs caractéristiques sont sans doute liées à la population des inclusions. Cette population doit être étudiée.

Dans le chapitre 5 dédié à la caractérisation des fers puddlés, nous présenterons donc des campagnes visant à améliorer les connaissances du comportement mécanique de fers puddlés : analyse de l'hétérogénéité en faisant varier le volume des éprouvettes et analyse de l'anisotrope, sous chargements monotones et cycliques.



DEUXIÈME PARTIE

**DE L'ÉPROUVETTE AU DÉTAIL  
CONSTRUCTIF**

*L'expérience est la source unique de la vérité.*

---

HENRI POINCARÉ





## Stratégie expérimentale

*Dans la première partie de ce document (chapitres 1, 2 et 3), un état de l'art sur l'évaluation de la durée de vie résiduelle des ponts métalliques anciens à la fatigue, ainsi que celle de leurs composants (assemblages et matériaux) a été proposée.*

*Dans la suite de ce mémoire (chapitres 4, 5, 6 et 7), la stratégie expérimentale que nous avons menée est décrite et les résultats présentés. Cette deuxième partie présente une approche originale partant de l'échelle microscopique (le matériau) vers l'échelle macroscopique (celle de l'assemblage) à travers des études comparatives. La démarche mise en œuvre vise en effet à déterminer les propriétés mécaniques du matériau dans un premier temps, pour ensuite comprendre le comportement mécanique de la structure.*

*Ce quatrième chapitre dresse ainsi le bilan de toutes les expériences de caractérisation mécanique menées.*

### Contenu

---

4.1	Objectifs . . . . .	77
4.2	Présentation des matériaux étudiés . . . . .	81
4.3	Bilan . . . . .	86

---



## 4.1 Objectifs

Malgré les nombreux travaux menés sur le comportement mécanique des assemblages rivetés (voir chapitres 1 et 2), la description des interactions entre les composants de l'assemblage peut être affinée. En effet, la problématique de la durée de vie résiduelle des ouvrages d'art métalliques est en général traitée dans le domaine du génie civil où l'échelle d'étude est souvent supérieure à celle du rivet.

Néanmoins, nous portons un intérêt particulier à l'interaction entre tôles et rivets dans ces travaux de recherche pour les raisons suivantes :

- Le lieu d'installation d'un rivet est l'une des zones les plus susceptibles à l'apparition des fissures par fatigue (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014).
- La performance mécanique d'un assemblage riveté est sensible à un nombre important de paramètres (§2.1.3). Une compréhension raffinée des mécanismes de fonctionnement de l'assemblage peut nous permettre de hiérarchiser l'impact de ces paramètres dans le comportement global du joint.
- Malgré l'identification depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle du jeu radial entre la surface interne du trou et la tige du rivet (et donc du fonctionnement initial par adhérence de ce type d'assemblage), la transmission des efforts par adhérence est souvent négligée dans les procédures de dimensionnement (et validation) de ce type d'assemblage. En effet, une stratégie basée sur le « pire scénario possible de fonctionnement » (où le jeu est comblé) est souvent privilégiée (§2.2). Cette stratégie conservatrice a comme conséquence une sous-estimation de la durée de vie de certains assemblages (Taras et Greiner, 2010).
- La non prise en compte du comportement en adhérence s'avère particulièrement problématique pour des niveaux d'effort associés à l'apparition des fissures de fatigue (passages successifs du matériel roulant). En effet, ces efforts restent bien inférieurs à la résistance ultime de l'assemblage (Akesson, 2010).
- La diversité constructive des assemblages rivetés (dispositions géométriques et matériaux utilisés) complexifie une analyse comparative entre les études expérimentales trouvées dans la littérature (§1.3.1).

Notre stratégie expérimentale est donc basée sur la compréhension fine des mécanismes de fonctionnement (et de ruine) des assemblages rivetés à travers des études comparatives. Plus précisément, l'influence de deux familles de paramètres sur le comportement du joint est étudié : les paramètres liés aux **matériaux qui constituent les pièces de l'assemblage** et ceux liés au **procédé de rivetage** en lui même.

### 4.1.1 Identification des caractéristiques des matériaux

La détermination des caractéristiques mécaniques d'un matériau (*e. g.* raideur, limite élastique en traction, etc.) part du principe que l'éprouvette utilisée lors des expériences de caractérisation est suffisamment représentative. Cette notion de *volume élémentaire représentatif (VER)* est en effet au coeur de la problématique de la caractérisation des matériaux hétérogènes. Selon Lemaitre *et al.* (2009) :

« Par élément de volume au sens de la mécanique des milieux continus, il faut entendre un volume suffisamment petit pour que les dérivées partielles intervenant dans les équations aient un sens et suffisamment important par rapport aux hétérogénéités de la matière. »

La taille du volume étudié nécessite donc d'être aussi petite que possible et aussi grande que nécessaire. C'est pourquoi, dans le cadre de notre étude, nous nous confrontons à une problématique scientifique complexe lorsqu'il s'agit de déterminer les propriétés mécaniques des fers puddlés. En effet, leur microstructure hétérogène rend la détermination d'un VER particulièrement difficile. Cette difficulté est d'autant plus importante lorsque le phénomène à caractériser est l'endommagement par fatigue à grand nombre de cycles. Ce phénomène, masqué, progressif, et dispersif (§1.2.2) est en effet particulièrement sensible à la taille du volume testé<sup>1</sup> (Bathias et Pineau, 2008).

Afin d'analyser l'influence des caractéristiques matériau dans le comportement des détails constructifs simples (assemblages mono-rivet), nous proposons une étude expérimentale comparative entre deux matériaux utilisés dans la construction monumentale métallique : l'acier S235 (homogène et isotrope) et un fer puddlé ancien (hétérogène, anisotrope et fragile). Une description plus détaillée de ces matériaux est proposée en §4.2.

Ainsi, les campagnes de caractérisation matériau se sont focalisées, particulièrement dans le cas du fer puddlé, dans l'analyse de :

- l'influence du **volume** testé (variations dans la géométrie de l'éprouvette).
- l'influence de la **direction de chargement** par rapport à la **direction du laminage** (variations dans l'orientation du prélèvement de l'éprouvette). L'angle entre l'axe de laminage et l'axe de sollicitation sera appelé par la suite  $\alpha$  (voir figure 4.1).

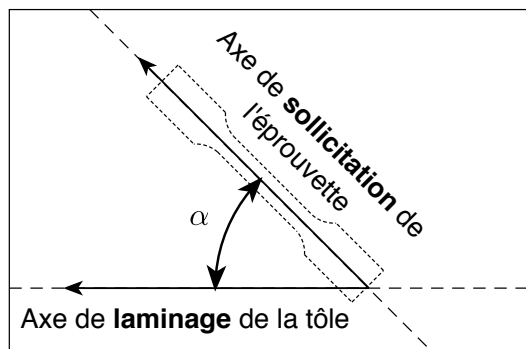


FIGURE 4.1 – Définition de l'angle entre l'axe de sollicitation d'une éprouvette et l'axe du laminage.

Dans le cas particulier de la caractérisation en fatigue à grand nombre de cycles, les essais de caractérisation étant longs et coûteux, nous avons également testé une méthode dite « rapide » pour la détermination de la limite d'endurance moyenne. Cette méthode

---

1. En effet, lorsque le volume sollicité augmente, la probabilité d'apparition d'un défaut capable de provoquer l'amorçage d'une fissure de fatigue augmente également.

qui consiste à mesurer l'auto-échauffement de l'éprouvette sous sollicitations cycliques à amplitude progressive, a été décrite dans la section 1.2.2.5.

L'utilisation de deux métaux différents dans la fabrication des éprouvettes, d'abord sur des éprouvettes de caractérisation matériau classiques<sup>2</sup> a aussi été poursuivie dans le cadre de la caractérisation des détails constructifs simples (chapitres 6 et 7) où les éprouvettes de type mini-structure ont été fabriquées en acier S235 et en fer puddlé par les équipes de réparation des ponts métalliques (RPM) de *SNCF Réseau*.

#### 4.1.2 Dissociation des mécanismes de transmission d'effort dans un assemblage riveté

De manière analogue à l'étude de l'influence des paramètres matériau sur le comportement mécanique de l'assemblage, nous cherchons à identifier le rôle joué par la procédure de rivetage dans le comportement du joint à l'aide d'une étude comparative. **Il s'agit donc de comprendre l'influence des paramètres du procédé dans les scénarios de fonctionnement et de ruine de l'assemblage sous chargements quasi-statiques et cycliques en traction.** Ceci se traduit par la fabrication d'éprouvettes de type détail constructif (simple) conçues afin de mettre en évidence :

- le rôle du perçage-alésage (concentration des contraintes et plasticité localisée au bord du trou).
- la présence (ou absence) de l'effort de serrage, et donc par conséquence, de l'adhérence (ou l'absence de l'adhérence) entre les tôles.
- la présence (ou absence) du contact entre la tige du rivet et la surface interne du trou. Ce contact entraîne le chargement en cisaillement du rivet et l'application d'une pression diamétrale sur la surface interne du trou.

Afin d'isoler les mécanismes, nous avons donc réalisé des expériences de caractérisation sur quatre types d'éprouvettes :

- Plaque percée et alésée.
- Plaque à section nette équivalente.
- Assemblage en double recouvrement lié par un rivet installé à chaud.
- Assemblage en double recouvrement lié par un axe épaulé à très haute limite élastique (écrou au contact).

L'ensemble de la stratégie expérimentale pour la caractérisation des détails constructifs simples est représentée graphiquement dans la figure 4.2

---

2. Ces essais connus comme « homogènes » cherchent à garantir un état uniforme des grandeurs physiques mesurées directement ou indirectement lors de l'expérience (*e. g.* contraintes, déformations, etc.). Il s'agit de faciliter la mesure et l'interprétation des grandeurs qui sont utilisées dans la formulation de modèles de comportement.

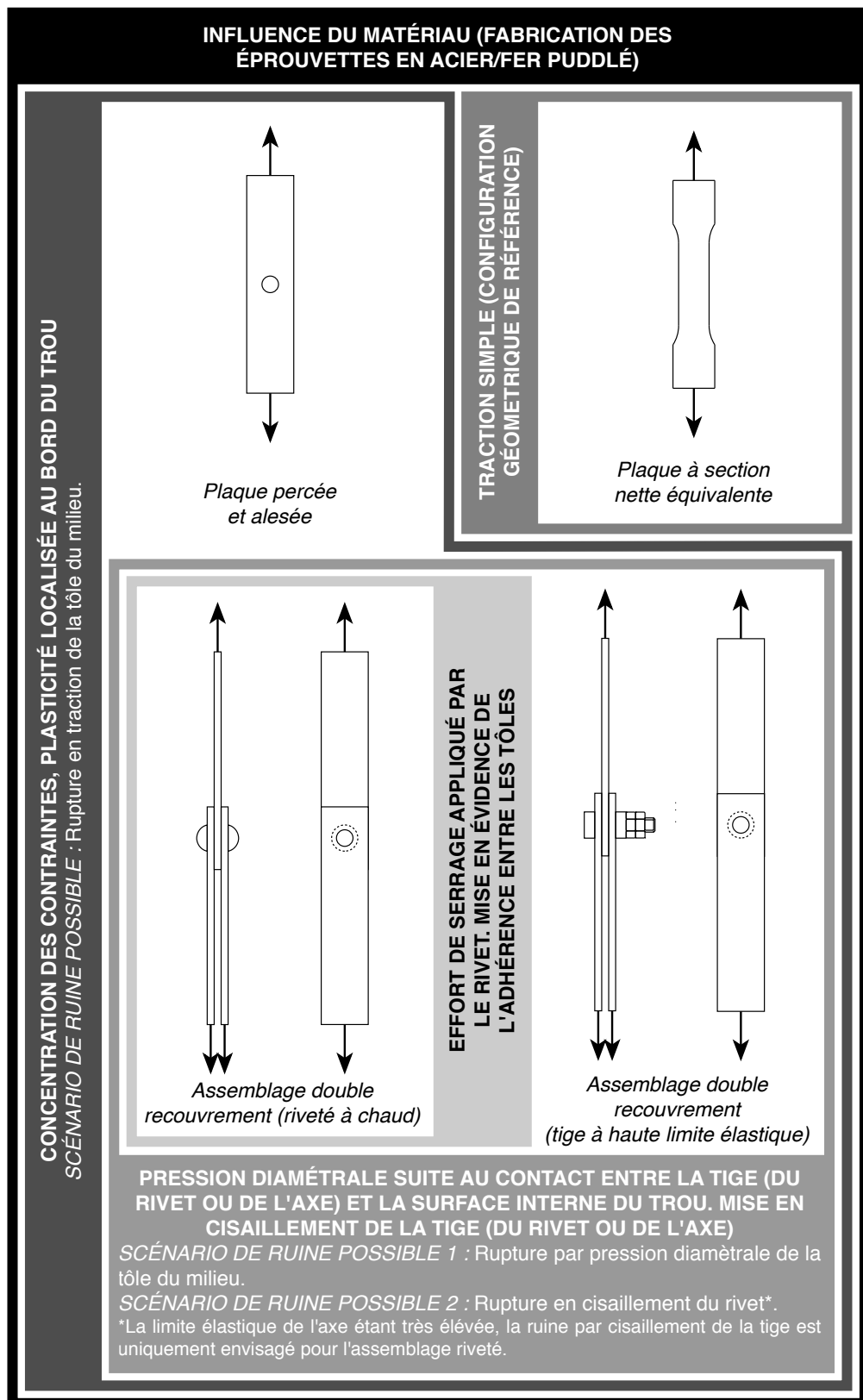


FIGURE 4.2 – Représentation graphique de la stratégie expérimentale pour la caractérisation des assemblages.

### 4.1.3 Identification des mécanismes selon le type de chargement considéré

La compréhension du comportement mécanique des assemblages rivetés (y compris des scénarios de ruine) nécessite l'observation des grandeurs mécaniques des éprouvettes<sup>3</sup> sous des conditions de chargement différentes :

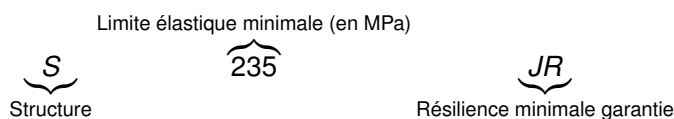
- **Chargements quasi-statiques** : Ce type de sollicitation nous permet d'observer (entre autres) la réponse des éprouvettes à un chargement progressif jusqu'à rupture (*e. g.* essai de traction monotone). À la différence des sollicitations cycliques<sup>4</sup>, ce type de sollicitation se prête bien à l'observation fine des déplacements relatifs des pièces d'un même assemblage.
- **Chargements cycliques** : Ce type de sollicitation nous permet d'observer la réponse des éprouvettes à l'endommagement par fatigue (le temps d'essai étant inversement proportionnel à la fréquence de sollicitation). En général, l'amplitude des efforts est bien inférieure à celle des efforts appliqués en configuration quasi-statique.

## 4.2 Présentation des matériaux étudiés

Dans le but d'établir le rôle des propriétés des matériaux dans le comportement mécanique d'un assemblage riveté. Nous avons étudié deux métaux : un acier S235 et un fer puddlé provenant d'une structure ancienne. Cette sélection correspond au besoin d'avoir un **matériau métallique de référence** : l'acier S235, et un **matériau résultant des techniques de puddlage utilisées dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup>** : le fer puddlé utilisé dans la construction du pont sur l'Adour (Bayonne).

### 4.2.1 Acier S235 JR

Cette nuance d'acier a été choisie par son utilisation répandue dans l'industrie de la construction. Sa désignation correspond aux critères suivants :



Nous avons donc travaillé avec un acier de construction métallique avec une limite élastique minimale de 235 MPa et une énergie de rupture minimale de 27J à température ambiante (20°C). Deux lots de cet acier ont été utilisés.

### 4.2.2 Fer puddlé provenant du pont sur l'Adour (Bayonne)

À la différence des aciers modernes de construction (*e.g.* S235, S275, S355, S450 entre autres), le fer puddlé n'est plus produit à l'échelle industrielle de nos jours. Le puddlage,

3. Les quatre grandeurs mesurables classiques de la mécanique sont les déplacements, les efforts, le temps et la température. Les essais sous chargements quasi-statiques seront considérés comme indépendants de la température. (Lemaitre *et al.*, 2009).

4. Par cycliques nous faisons référence aux chargements mécaniques avec une fréquence de sollicitation de plusieurs dizaines de Hz.



procédé d'obtention de ce type de fer, a été abandonné depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle (voir chapitre 3).

L'appel à un fournisseur étant impossible, la caractérisation des fers puddlés actuellement est dans la majorité de cas abordé à partir de la récupération des pièces provenant de structures anciennes. Nous observons cette méthodologie dans les études proposées par De Jesus *et al.* (2010) et Sustainable Bridges (2007) entre autres.

En ce qui concerne ce mémoire, toutes les éprouvettes fabriquées en fer puddlé l'ont été à partir de tôles provenant de l'ancien **Pont sur l'Adour** (voir figure 4.3).



FIGURE 4.3 – Le pont sur l'Adour. Photo prise le 3 avril 2013 lors de la visite technique de sélection de pièces à récupérer lors de la démolition.

Cet ouvrage d'art, situé à Bayonne (Pyrénées-Atlantiques) (voir figure 4.4), a été construit entre 1862 et 1864. Composé de cinq travées, il avait une longueur totale d'environ 275m. La ligne de Bordeaux à Irun (2 voies ferrées électrifiées à 1500 V, circulées à 80 km/h, UIC 4), ainsi que la rue Gustave Eiffel (6 m de largeur) franchissaient la rivière Adour et l'avenue du Capitaine Resplandy (départementale n°52) grâce à cette structure. Ce pont a été démolé en mai 2013.

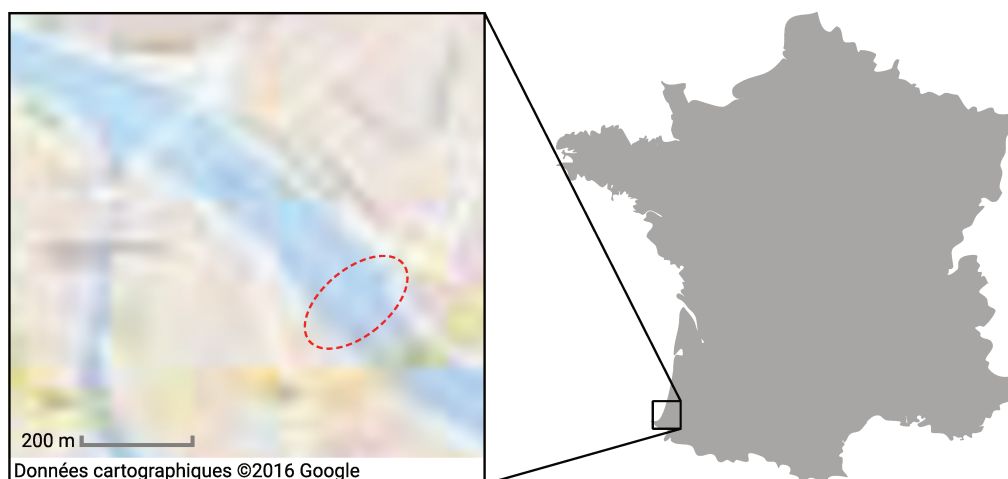


FIGURE 4.4 – Vue aérienne de la position de l'ancien Pont sur l'Adour.

### Caractéristiques constructives du Pont sur l'Adour

- Portées : 46,64 m + 3 x 59,52 m + 46,64 m.
- Poutres principales de 5,50 m de hauteur, 14,56 m d'entraxe, treillis en croix de St-André, membrures inférieures et supérieures doubles.
- Pièces de pont de 14,56 m de portée et 2,50 m de hauteur ; treillis composé de rails Brunel (200 mm x 70 mm). Elles ont été renforcées par l'adjonction d'une âme pleine assemblée par rivetage sur les membrures et soudage discontinu sur les rails Brunel.
- Longérons sous voies et chaussée de 4,00 m de portée. Les longérons sous voies ont une hauteur de 500 mm et sont constitués d'une âme de 10 mm, de cornières membrures supérieures de 90 mm x 90 mm x 9 mm et de cornières membrures inférieures de 110 mm x 110 mm x 12 mm. Au droit des pièces de pont, une continuité entre longérons était assurée par un plat de 160 mm x 18 mm fixé sur les membrures inférieures et par un auget d'attache de voie en membrure supérieure.
- Les appareils d'appui sont fixes sur les piles (colonnes en fonte) et mobiles sur les culées.

L'utilisation d'un matériau provenant d'un ouvrage d'art existant soulève notamment trois types d'incertitudes :

- Celles liées à l'état de préservation du métal, exposé pendant des décennies aux agressions de l'environnement.
- Celles associées à la méconnaissance de l'histoire de chargement de l'ouvrage, et donc, de l'endommagement que ce dernier a pu produire sur le matériau.
- Celles concernant la distribution de l'endommagement sur une même pièce suite aux chargements vécus par l'ouvrage. Les pièces ayant subi des chargements homogènes, traction simple par exemple, seront privilégiées à celles ayant subi des chargements de flexion.

#### 4. STRATÉGIE EXPÉRIMENTALE

---

Elle présente aussi deux avantages :

- L'obtention d'un matériau fabriqué sous les standards et les procédés du XIX<sup>ème</sup> siècle.
- L'accès à une quantité importante de matériau pour mener à bien les expériences de caractérisation.

Dans le but de maîtriser au mieux les sources d'incertitude, une étude minutieuse de l'état du pont a été réalisée à l'aide des rapports internes d'inspection de l'ouvrage. Ces derniers ont été établis de façon périodique suite aux visites des experts de la maintenance des ouvrages métalliques de *SNCF Réseau*. Une classification de l'état des éléments du pont basée sur les rapports techniques ainsi que sur les observations *in situ* a été faite afin de récupérer les pièces en meilleur état. Cette procédure de classification prend en compte les pathologies rencontrés lors des visites d'inspection de l'ouvrage. Elles nous permettent très bien de connaître l'état des éléments sélectionnés dans le cadre de cette thèse.

En plus des considérations précédentes, la récupération de matériau provenant d'un pont devant être démolie implique également certaines contraintes :

- Le plan de démolition ayant été défini auparavant, certaines zones de la structure seront plus ou moins accessibles.
- La découpe de pièces destinées aux travaux de recherche reste un travail additionnel à celui prévu initialement pour la démolition de l'ouvrage. Il est donc nécessaire que ces tâches supplémentaires soient le moins perturbatrices possibles.

Une fois toutes les conditions respectées nous avons, dans le cas particulier des tôles appartenant à un montant par exemple (figures 4.5(a) et 4.5(b)), uniquement accès à la partie supérieure du montant (figure 4.6).



FIGURE 4.5 – Repérage des pièces en fer puddlé à récupérer (Pont sur l'Adour).

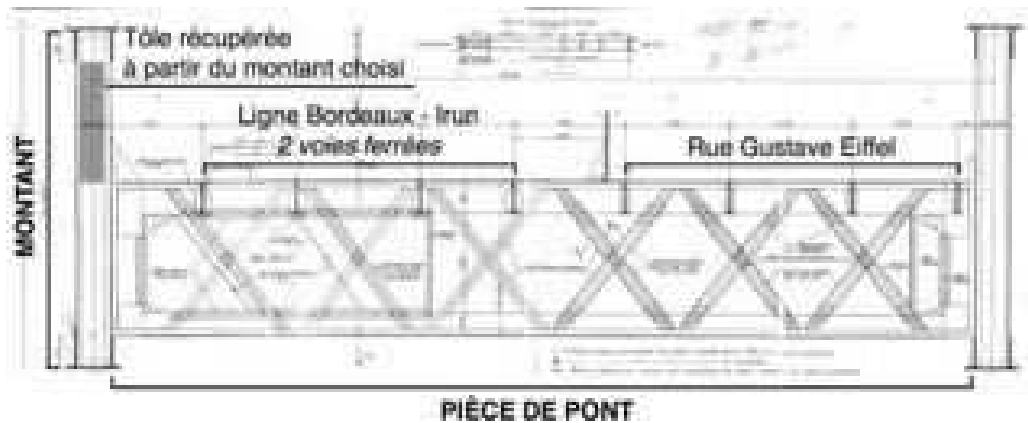
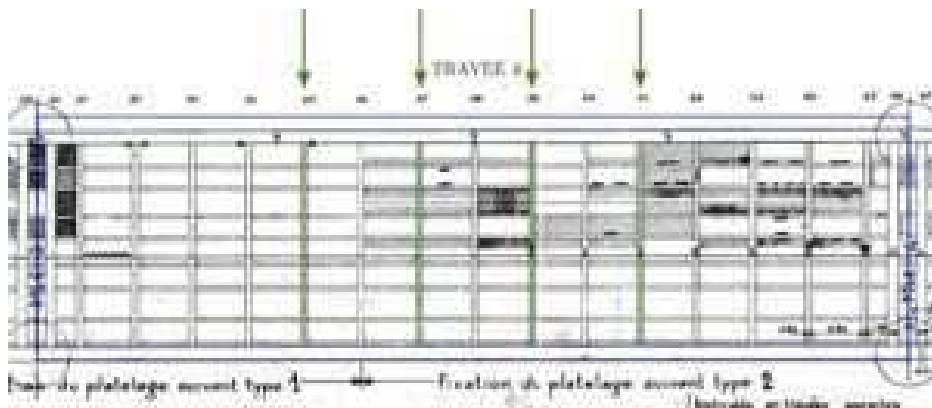
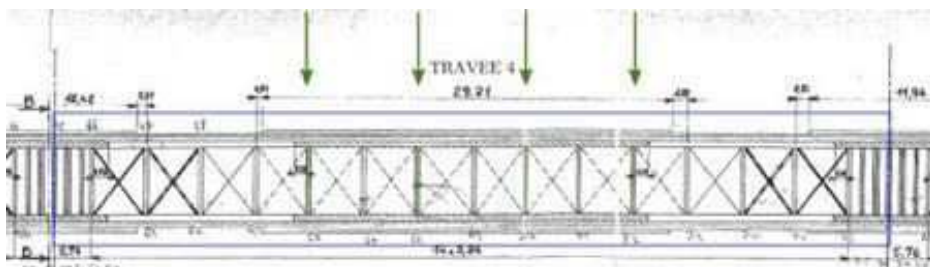


FIGURE 4.6 – Plan d'une pièce de pont provenant des archives de SNCF Réseau (coupe transversale de l'ouvrage) sur lequel est indiquée une des tôles à récupérer lors de la démolition du pont.

Une fois les pièces évaluées selon les informations trouvées dans les archives, la structure a été visitée et les montants et diagonales à récupérer ont été identifiées (voir figures 4.7 et 4.8). Au total, 8 demi-montants et 4 diagonales ont été récupérés. Ces éléments, prédécoupés sur le chantier, ont ensuite été découpés soigneusement au laboratoire afin de désolidariser les âmes et les cornières. C'est à partir de ces âmes que les éprouvettes des campagnes de caractérisation ont été fabriquées.



(a) Pièces de ponts sélectionnées avant démolition pour le travail de cette thèse. Vue de dessous du Pont sur l'Adour.



(b) Montants sélectionnés avant démolition pour le travail de cette thèse. Vue latérale du Pont sur l'Adour.

FIGURE 4.7 – Repérage des pièces en fer puddlé récupérés pour les travaux de thèse (Pont sur l'Adour) (1/2).



(a) Diagonales sélectionnées avant la démolition de l'ouvrage (côté voies ferrées).



(b) Diagonales sélectionnées avant la démolition de l'ouvrage (côté route).

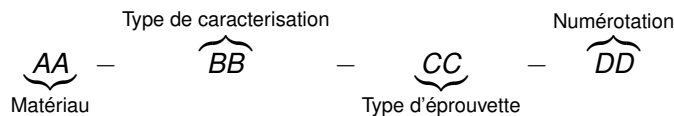
FIGURE 4.8 – Repérage des pièces en fer puddlé récupérées dans le cadre de cette thèse (Pont sur l'Adour). Vues latérales du Pont sur l'Adour (2/2).

### 4.3 Bilan

La note suivante présente la notation spécifique utilisée dans la suite du document pour l'ensemble des éprouvettes. La table montrée en figure 4.9 dresse le bilan des éprouvettes testées et met en évidence les phénomènes qui seront observés.

#### Notation des éprouvettes

Par la suite, nous ferons référence aux éprouvettes testées dans nos campagnes expérimentales à l'aide de la convention suivante :



**Exemple 1** : l'éprouvette **FP-MT-S80-01**, correspond à une éprouvette fabriquée en **Fer Puddledé (FP)**, de type caractérisation **Matériau** en **Traction (MT)**, avec une section utile de  $80\text{mm}^2$  (**S80**). Parmi le groupe d'éprouvettes testées, pour configuration donnée, elle est la N° 1 (**01**).

**Exemple 2** : l'éprouvette **A1-ST-RD-03**, correspond à une éprouvette fabriquée en **Acier S235JR** (lot N° 1) (**A1**), de type caractérisation **Structure** (détail constructif) en **Traction (ST)**. Il s'agit d'un assemblage **Riveté** en **Double recouvrement (RD)**. Parmi le groupe d'éprouvettes à configuration identique testées, elle est la N° 3.

La notation utilisée pour chaque configuration expérimentale sera rappelée lors de la présentation des résultats dans les chapitres 5, 6 et 7.

Matériau	Configuration	Expérience menée	Phénomènes observés
Acier (A)	Caractérisation matériau (M)	Sollicitation en traction monotone (T)	Vérification des caractéristiques données par le fournisseur
		Sollicitation cyclique à amplitude de chargement constant (fatigue classique) (F)	Caractérisation en fatigue du matériau de référence (acier moderne).
		Observation par microscopie optique	Caractérisation géométrique de la population des défauts (taille des grains).
		Spéctrométrie d'émission optique	Identification des composants chimiques.
	Caractérisation structure (detail constructif). Voir figure 4.2. (S)	Sollicitation en traction monotone (T)	Identification de l'influence du procédé de rivetage dans les mécanismes de fonctionnement et de ruine d'un assemblage.
		Sollicitation en traction en charge-décharge (CC et CP)	
Sollicitation cyclique à amplitude de chargement constant (fatigue classique) (F)			
Fer Puddlé (FP)	Caractérisation matériau (M)	Sollicitation en traction monotone (T)	Influence du volume sollicité
			Influence de la présence et l'orientation des inclusions non-métalliques.
		Sollicitation cyclique à amplitude de chargement constant (fatigue classique) (F)	Influence de la présence et l'orientation des inclusions non-métalliques.
		Sollicitation cyclique à paliers progressifs (caractérisation rapide par auto-échauffement) (A)	Pertinence de la méthode rapide de caractérisation par auto-échauffement sur un matériau à défauts comme le fer puddlé
		Dosage de CO <sub>2</sub> et SO <sub>2</sub> par détection infrarouge	Identification des composants chimiques.
		Spéctrométrie d'émission plasma	
		Observation par sonde EDX	Identification qualitative de la distribution des composants chimiques
		Observation par microscopie optique	Caractérisation géométrique de la population des défauts
	Observation par microscopie électronique à balayage	Identification des mécanismes de rupture au sein du matériau	
	Caractérisation structure (detail constructif). Voir figure 4.2. (S)	Sollicitation en traction monotone (T)	Identification de l'influence du procédé de rivetage dans les mécanismes de fonctionnement et de ruine d'un assemblage.
Sollicitation en traction en charge-décharge (CC et CP)			
Sollicitation cyclique à amplitude de chargement constant (fatigue classique) (F)			

FIGURE 4.9 – Bilan des expériences menées.



## Caractérisation des fers puddlés

*Le chapitre précédent présente une vision globale de la stratégie expérimentale : dès caractéristiques du matériau vers le comportement de détails constructifs simples.*

*Dans ce cinquième chapitre nous présentons les configurations expérimentales, les résultats et l'analyse des expériences de caractérisation des matériaux. Des analyses chimiques, des essais de caractérisation mécanique (sous chargement quasi-statique et en fatigue à grand nombre de cycles) ainsi que des observations microscopiques ont été réalisés sur des éprouvettes fabriquées en fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour.*

### Contenu

---

5.1	Caractérisation chimique . . . . .	91
5.2	Caractérisation mécanique . . . . .	95
5.3	Caractérisation microscopique . . . . .	129
5.4	Conclusion . . . . .	133

---





Afin de présenter les résultats des campagnes expérimentales, ces dernières ont été séparées en trois catégories différentes : les expériences de **caractérisation chimique**, celles de **caractérisation mécanique** et finalement celles de **caractérisation microscopique**. Dans chacune de ces catégories, les configurations expérimentales utilisées sont décrites, les résultats consignés et, selon le cas, une analyse comparative entre les matériaux étudiés est proposée.

## 5.1 Caractérisation chimique

### 5.1.1 Identification des compositions chimiques

Le comportement mécanique des matériaux de construction est étroitement lié à la présence de certains éléments d'addition. En effet, l'influence du dosage des éléments tels que le Carbone (C), le Phosphore (P) et le Soufre (S) sur la performance mécanique des aciers a été amplement étudiée par le passé et peut être résumée à l'aide du tableau suivant :

TABLE 5.1 – Influence de composants chimiques sur les propriétés matériau des aciers (Sustainable Bridges, 2007; Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, 1993).

Propriété matériau	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	N
Résistance à la traction	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+
Limite élastique	+	+	+	+		+	+	+		
Allongement	–	–	–	–		+	–	–	–	–
Dureté	+	+	+	+		+	+	+	+	
Trempabilité	+	+	+			+	+	+		
Résilience	–	–	+	–	–	–	+	–		–
Soudabilité à l'arc	–	–	+	–	–	–		+	–	–
Résistance thermique	+	+		+	–	+	+	+		
Résistance à la corrosion		+		+	–	+	+	+		

+ = L'influence de l'élément sur la propriété est positive.

– = L'influence de l'élément sur la propriété est négative.

L'identification des composants chimiques des matériaux étudiés nous permet notamment, dans le cas de l'acier, de vérifier certaines conditions de fabrication à respecter par le fournisseur selon les normes en vigueur. Dans le cas du fer puddlé ancien, sa composition sera comparée aux informations retrouvées dans la littérature.

#### 5.1.1.1 Vérification de la composition chimique de l'acier S235 (matériau de référence)

Dans les campagnes expérimentales deux lots d'acier S235 ont été utilisés. La composition du premier lot a été vérifiée par spectrométrie d'émission optique (Instrument ARL 4460) (manipulation réalisée par le laboratoire de Matériaux Métalliques et Surfaces du CETIM à Nantes). La composition du deuxième lot a été mise à disposition par le fournisseur.

## 5. CARACTÉRISATION DES FERS PUDDLÉS

Les résultats des analyses sont présentés dans la table 5.2 et dans la figure 5.1 en regard des spécifications données dans la norme *NF EN 10025-2 pour les produits laminés à chaud en aciers de construction*<sup>1</sup> (Association française de normalisation (AFNOR), 2005) sur laquelle est basée la documentation technique de réception de livraison de ce type d'acier par *SNCF Réseau*. Tel que montré dans la figure 5.1, toutes les valeurs maximales établies par la norme sont respectées.

TABLE 5.2 – Composition chimique des deux échantillons d'acier S235, chaque échantillon provient d'un des deux lots utilisés dans les campagnes expérimentales.

Élément	Acier S235 (1)	Acier S235 (2)	Valeur max. (NF EN 10025-2)
Carbone (C) %	0,170	0,102	0,190
Manganèse (Mn) %	0,480	0,833	1,500
Silicium (Si) %	0,013	0,195	-
Soufre (S) %	0,012	0,012	0,045
Phosphore (P) %	0,021	0,009	0,045
Nickel (Ni) %	0,017	0,012	-
Chrome (Cr) %	0,028	0,019	-
Molybdène (Mo) %	≤ 0,005	≤ 0,005	-
Cuivre (Cu) %	0,036	0,023	0,600
Aluminium (Al) %	0,036	0,039	-
Azote (N) %	≤ 0,008	≤ 0,008	0,014
Fer (Fe) %	Cplmt à 100%	Cplmt à 100%	-

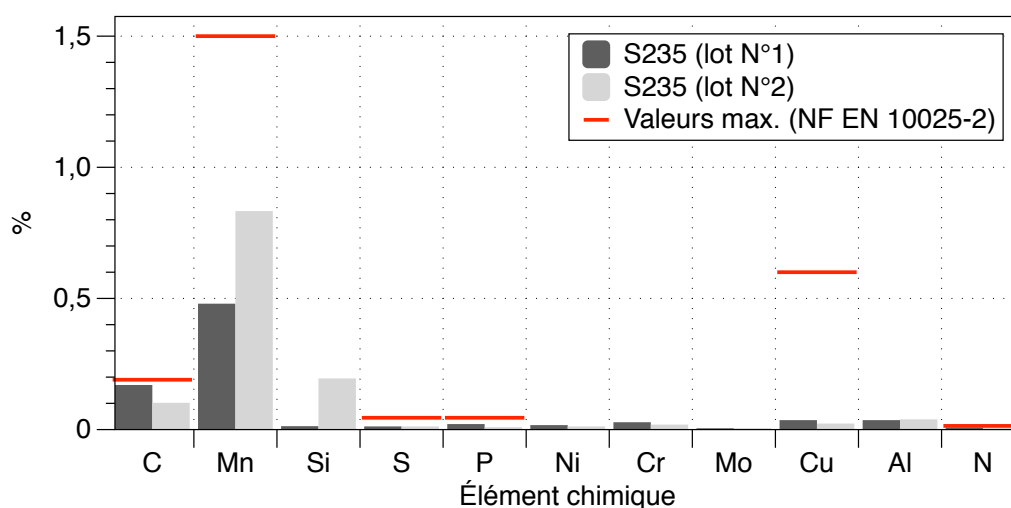


FIGURE 5.1 – Composition chimique des deux lots d'acier S235 utilisés dans les campagnes expérimentales. Comparaison avec la norme de livraison en vigueur.

Cependant, les dosages de Carbone (C), Manganèse (Mn) et Silicium (Si) étant différents pour les deux lots d'acier, une différence de microstructure et de comportement mécanique est attendue.

1. Les valeurs données correspondent aux pourcentages maximaux admis pour une analyse sur produit d'épaisseur nominale ≤ 16 mm. L'épaisseur nominale des tôles utilisées dans cette étude est de 8 mm.

### 5.1.1.2 Identification de la composition chimique du fer puddlé ancien provenant du Pont sur l'Adour (1864)

Compte-tenu du caractère fortement hétérogène des fers puddlés, souligné dans le chapitre 3, trois échantillons du fer provenant du Pont sur l'Adour ont été analysés. Cette analyse chimique a été réalisée de la manière suivante : les teneurs en Carbone et en Soufre ont été déterminées par combustion de l'échantillon sous courant d'Oxygène suivi du dosage du  $CO_2$  et du  $SO_2$  formés par détection infra-rouge (Appareil EMIA-920V2). Les autres éléments ont été analysés par spectrométrie d'émission plasma après mise en solution des copeaux prélevés (Instrument Spectro ARCOS). Cette manipulation a été réalisée par le laboratoire de Matériaux Métalliques et Surfaces du *CETIM* à Nantes. Les résultats de l'analyse sont présentés dans la table 5.3, la valeur moyenne pour chacun des éléments est également proposée<sup>2</sup>.

TABLE 5.3 – Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour.

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Moyenne
Carbone (C) %	0,018	0,010	≤ 0,008	0,012
Manganèse (Mn) %	0,010	0,011	0,013	0,011
Silicium (Si) %	0,200	0,220	0,270	0,230
Soufre (S) %	0,042	0,058	0,061	0,054
Phosphore (P) %	0,300	0,380	0,420	0,367
Nickel (Ni) %	0,053	0,051	0,044	0,049
Chrome (Cr) %	≤ 0,030	≤ 0,030	0,037	0,032
Molybdène (Mo) %	0,006	0,006	0,007	0,006
Cuivre (Cu) %	0,018	0,016	0,016	0,017
Aluminium (Al) %	0,015	0,017	0,019	0,017
Arsenic (As) %	0,067	0,061	0,062	0,063
Niobium (Nb) %	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010	0,010
Titane (Ti) %	0,010	0,011	0,014	0,012
Vanadium (V) %	0,034	0,030	0,060	0,041
Fer (Fe) %	Cplmt à 100%	Cplmt à 100%	Cplmt à 100%	Cplmt à 100%

Dans la figure 5.2 nous proposons une première comparaison du fer provenant du Pont sur l'Adour (mis en service en 1864) avec deux autres fers puddlés étudiés au laboratoire provenant de deux ponts métalliques construits en France et mis en service en 1893 et 1897. Leur composition est en effet très similaire. Le niveau de Silicium (Si) est supérieur pour le fer utilisé dans nos campagnes expérimentales ; les trois fers présentent en revanche des dosages similaires en Carbone (C), Soufre (S) et en Phosphore (P).

La comparaison de la composition du fer du Pont sur l'Adour avec la base de données mise à disposition dans les rapports du projet européen *Sustainable Bridges* (2007)<sup>3</sup> nous

2. Lorsque l'un des pourcentages est noté en tant qu'inférieur ou égale à X. La valeur X est prise en compte dans le calcul de la valeur moyenne.

3. Cette base de données est principalement constituée d'échantillons analysés et catalogués en tant que « fers puddlés », provenant principalement de ponts allemands construits en fin de XIX<sup>ème</sup> siècle.

## 5. CARACTÉRISATION DES FERS PUDDLÉS

permet d'observer la diversité rencontrée dans les compositions des fers puddlés (voir figure 5.3). En particulier, les taux de Manganèse et de Phosphore atteignent des pourcentages élevés (de l'ordre de 0,5 %) dans cette base de données.

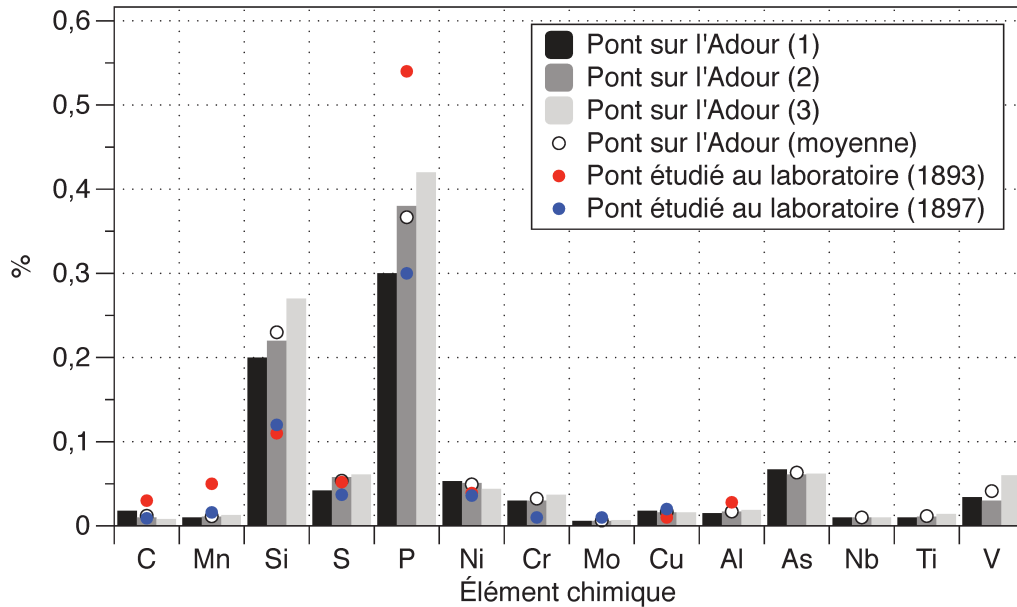


FIGURE 5.2 – Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour (1864) comparée aux compositions de deux fers puddlés étudiés au laboratoire (1893 et 1897).

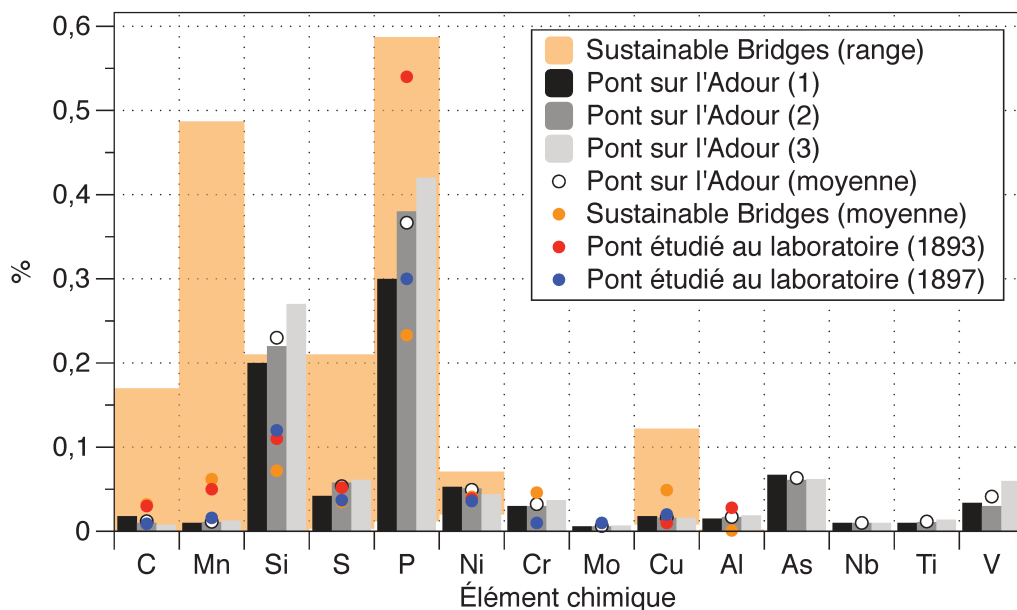


FIGURE 5.3 – Composition chimique de trois échantillons de fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour comparée aux compositions des fer puddlés d'une certaine d'échantillons, principalement allemands (Sustainable Bridges, 2007).

### 5.1.1.3 Analyse comparative

La comparaison des compositions chimiques de l'acier S235 et celui du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour, nous montre des différences très marquées (et attendues) entre les deux types de matériaux. Les taux de Carbone (C) et de Manganèse (Mn) sont beaucoup plus importants dans le cas de l'acier. Le fer, en revanche, est beaucoup plus riche en Soufre (S) et Phosphore (P) (voir figure 5.4). Comme précisé dans le chapitre 3, ces éléments, résidus des scories utilisées pour la fabrication du fer puddlé, sont habituellement rencontrés dans la composition de ces métaux.

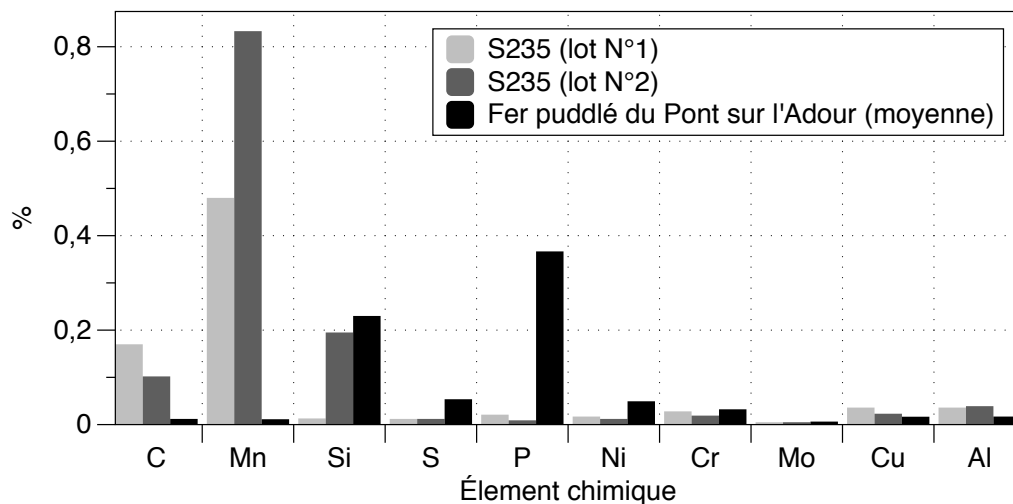


FIGURE 5.4 – Comparaison entre les compositions chimiques des deux lots d'acier S235 utilisés dans les campagnes expérimentales avec celle du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Mise en évidence de la présence de Phosphore dans ce fer puddlé de 1864.

## 5.2 Caractérisation mécanique

Une fois l'identification des compositions chimiques des métaux étudiés vérifiées, nous avons mis en place des campagnes de caractérisation sous chargements quasi-statiques monotones et sous chargements cycliques.

### 5.2.1 Essais sous chargements quasi-statiques en traction monotone

La caractérisation mécanique de l'acier S235<sup>4</sup> et du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour est effectuée à partir des éprouvettes de caractérisation matériau respectant les consignes de la norme internationale ISO 6892-1 (International Organization for Standardization, 2009) (voir figure 5.5). En suivant la recommandation de la norme pour les éprouvettes en acier, la longueur de l'éprouvette ( $L_0$ ) est liée à sa section droite ( $S_0$ ) par la relation suivante :

$$L_0 = k\sqrt{S_0} ; \text{ où } k = 5,65 \quad (5.1)$$

4. Cette caractérisation est nécessaire dans le cas des aciers S235 afin d'identifier leur domaine élastique en traction préalable à la caractérisation des assemblages.

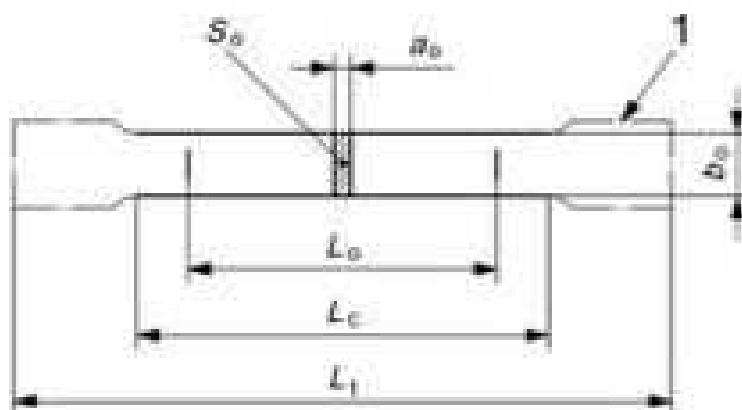
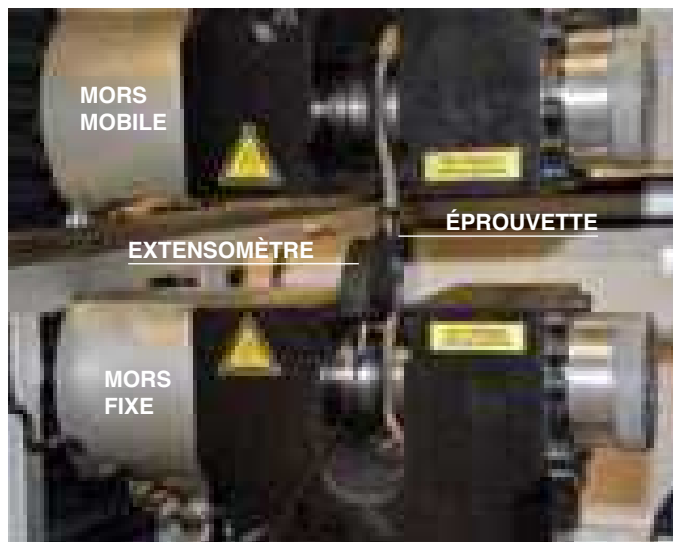


FIGURE 5.5 – Schéma des éprouvettes de traction (International Organization for Standardization, 2009).

### 5.2.1.1 Identification des caractéristiques de l'acier S235 (matériau de référence)

Compte tenu des résultats différents des analyses chimiques, des éprouvettes de caractérisation ont été découpées pour les deux lots d'acier. Ces découpes ont été réalisées sur la machine de découpe jet d'eau de l'IUT de Brest. Ces éprouvettes ont été dessinées suivant la norme ISO 6892-1 avec une aire de section transversale ( $S_0$ ) de  $80\text{mm}^2$  (voir figure 5.6(a)). Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle INSTRON® 5585 et les déformations mesurées à l'aide d'un extensomètre INSTRON® dont la longueur de jauge est de  $50\text{mm}$  (voir figure 5.6(b)). Les essais ont été pilotés en déplacement de traverse à une vitesse de  $0,5\text{mm}/\text{min}$ .



(a) Types d'éprouvettes de caractérisation matérielles. (b) Montage expérimental utilisé pour les essais de traction sur éprouvettes en acier.

FIGURE 5.6 – Essais de traction sur éprouvettes en acier S235.

Les courbes de traction des éprouvettes sollicitées sont montrées dans les figures 5.7 et 5.8. Un bilan des résultats est proposé dans la table 5.4.

### Notation des éprouvettes

Les éprouvettes de caractérisation matériau en traction fabriquées en acier S235 suivent l'appellation suivante :

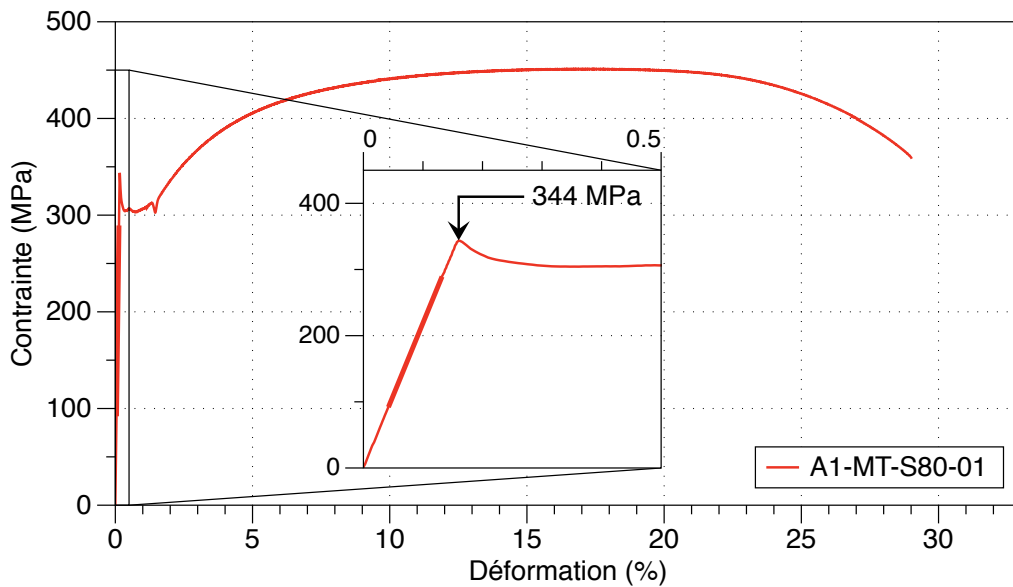
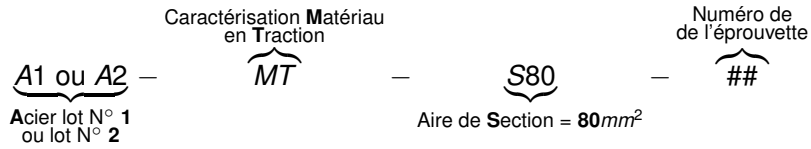


FIGURE 5.7 – Courbe de traction monotone pour une éprouvette en acier S235, lot N° 1.

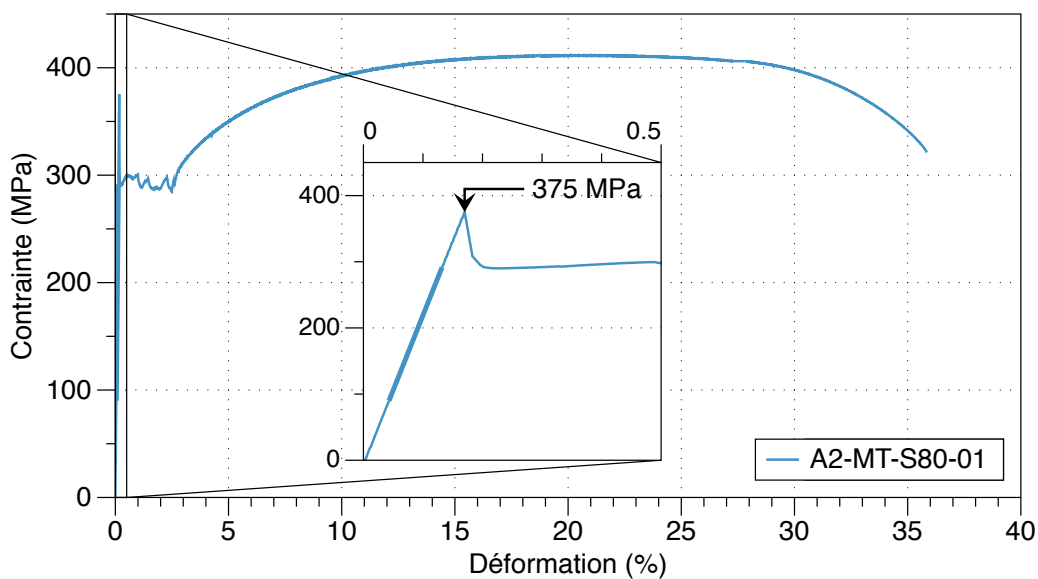


FIGURE 5.8 – Courbe de traction monotone pour une éprouvette en acier S235, lot N° 2.



TABLE 5.4 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur des éprouvettes provenant des deux lots d'acier S235 utilisés.

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{eH}$ (MPa)	$R_{eL}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
A1-MT-S80-01	219,30	344,00	305,00	451,17	14,40
A2-MT-S80-01	226,40	375,00	295,00	411,48	20,69

Comme nous pouvons l'observer à l'aide la figure 5.9, le comportement des aciers provenant des deux lots sont différents. Cependant, la limite élastique minimale de 235 MPa est largement respectée pour les deux aciers. Dans les deux cas, les aciers montrent un plateau plastique mais les limites élastiques hautes ( $R_{eH}$ ) et basses ( $R_{eL}$ ) sont différentes. De même, la résistance à la traction ( $R_m$ ) et l'allongement correspondant à  $R_m$  ( $A_{gt}$ ) ont des valeurs différentes. L'écart est de 40MPa pour  $R_m$  et de 6% pour  $A_{gt}$ . Les valeurs des pentes de la zone élastique de la courbe ( $m_E$ ) sont en revanche très proches<sup>5</sup>. Ces informations nous seront particulièrement utiles dans la planification des campagnes expérimentales sur détails constructifs (chapitres 6 et 7).

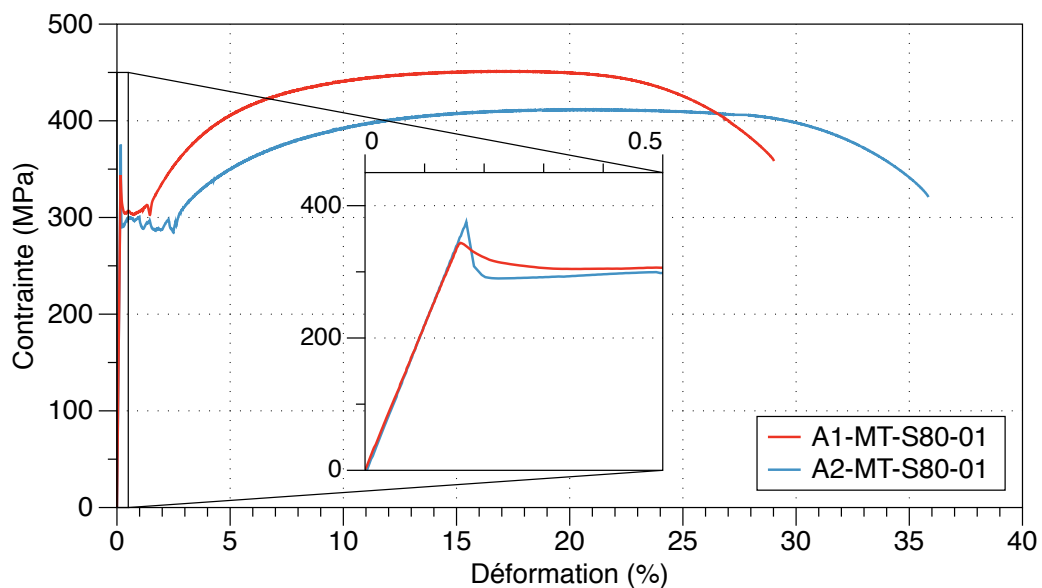


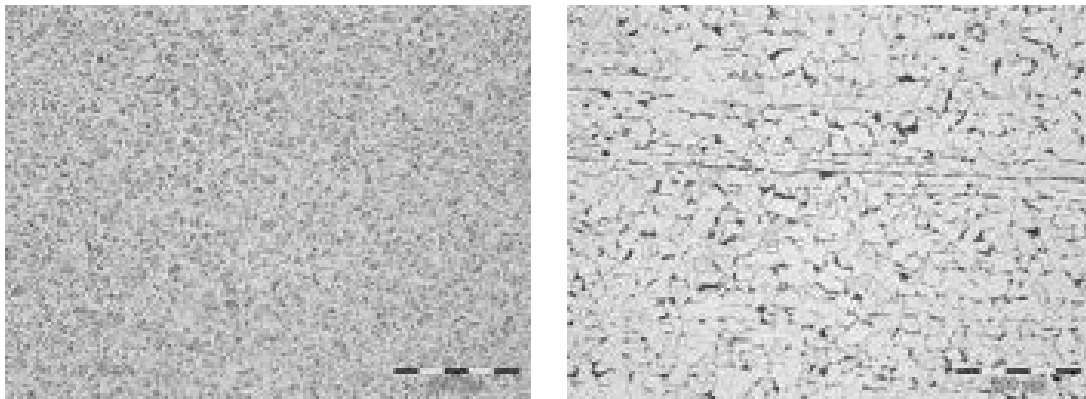
FIGURE 5.9 – Comparaison des courbes de traction pour les éprouvettes provenant des deux lots d'acier S235 utilisés.

Ces caractéristiques différentes proviennent de la microstructure des aciers, en lien avec la composition chimique. Le pic correspondant à  $R_{eH}$  correspond au « déblochage » des dislocations au niveau des atomes d'insertion (comme le Carbone) ou en substitution (comme le Manganèse) (Col et Colombié, 2010; Constant *et al.*, 1992). Le lot N°2 étant plus riche en Manganèse, la contrainte à appliquer pour atteindre la limite d'écoulement ( $R_{eH}$ ) est donc plus élevée. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la vitesse de

5. Comme précisé dans la norme ISO 6892-1 (International Organization for Standardization, 2009), la pente de la zone élastique d'une courbe contrainte-déformation peut ne pas représenter le module d'Young (ou module d'élasticité). La valeur de la pente sera d'autant plus proche au vrai module d'Young du matériau sous condition optimales (mesure moyenne de la déformation à l'aide de deux extensomètres de haute résolution, alignement parfait de l'éprouvette sollicitée, etc.).

traction est élevée (Col et Colombié, 2010). Pour ces essais, une vitesse de déplacement de traverse de  $0,5\text{mm}/\text{min}$  utilisée, correspond aux recommandations de la norme ISO 6803-1 (International Organization for Standardization, 2009).

L'acier du lot  $N^{\circ}1$  est sensiblement plus riche en Carbone que celui du lot  $N^{\circ}2$ , les contraintes caractéristiques du premier lot sont donc plus élevées que le second ( $R_{eL}$  et  $R_m$  notamment) (Constant *et al.*, 1992). La microstructure de l'acier du premier lot montre ainsi d'avantage de perlite et des grains plus fins qui expliquent également des caractéristiques élevées (les dislocations ont d'avantage du chemin à parcourir). La figure 5.10 montre la microstructure des deux aciers S235 testés.



(a) Micrographie de l'acier S235, lot  $N^{\circ} 1$ .

(b) Micrographie de l'acier S235, lot  $N^{\circ} 2$ .

FIGURE 5.10 – Micrographie des aciers S235 attaqués au Nital 2%.

La figure 5.10(b) montre des bandes de laminage que nous observons pas sur la figure 5.10(a) correspondant au premier lot. Nous n'avons pas d'information sur un éventuel traitement thermique de ce premier lot.

Compte tenu des caractéristiques mécaniques différentes nous avons assuré la traçabilité de chacune des tôles provenant des deux lots. Dans le cas des éprouvettes de type détail constructif, étudiées dans les chapitres 6 et 7, tous les éléments d'un même assemblage proviennent du même lot. Le lot utilisé dans la fabrication de chacune des éprouvettes sera précisé explicitement dans la notation utilisée.

### 5.2.1.2 Identification de l'influence du volume sollicité sur le comportement mécanique du fer puddlé

À la différence de l'acier S235, et tel que montré dans l'état de l'art présenté dans le chapitre 3 nous avons identifié deux caractéristiques micro-structurales propres aux fers puddlés qui rendent leur caractérisation mécanique particulièrement difficile :

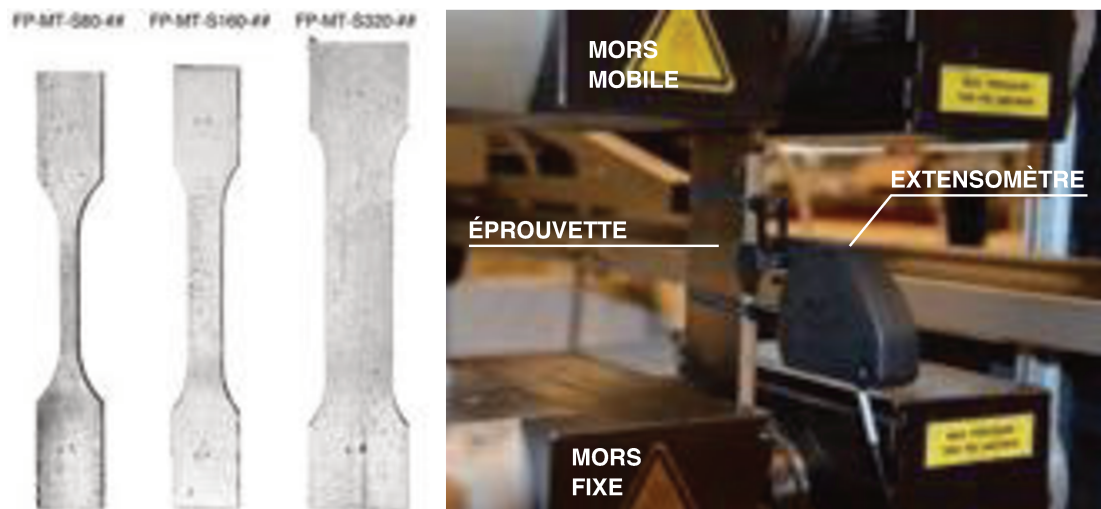
- La présence d'inclusions non-métalliques.
- La taille variable des grains de fer.

Ces inclusions pouvant atteindre des tailles millimétriques, la taille du volume sollicité peut avoir une influence non négligeable dans la détermination des caractéristiques matériau. Nous avons donc réalisé des essais de traction monotone en faisant varier la section droite des éprouvettes. Nous avons ainsi pu analyser le comportement d'éprouvettes ayant des sections droites égales à  $80\text{mm}^2$ ,  $160\text{mm}^2$  et  $320\text{mm}^2$  (voir figure 5.11(a)). Pour chaque

## 5. CARACTÉRISATION DES FERS PUDDLÉS

section étudiée, cinq éprouvettes ont été testées. Dans cette campagne expérimentale, dédiée uniquement à l'analyse de l'hétérogénéité du matériau, seules des éprouvettes prélevées dans le sens du laminage (et donc des inclusions) ont été utilisées<sup>6</sup>. Les éprouvettes ont été découpées et usinées selon la même méthode que celle décrite précédemment.

Les essais ont été réalisés sur la même machine d'essai universelle INSTRON<sup>®</sup> 5585, et les déformations ont été mesurées à l'aide d'un extensomètre INSTRON<sup>®</sup> dont la longueur de jauge est de 50mm (voir figure 5.11(b)). Les essais ont été pilotés en déplacement de traverse à une vitesse de 0,5mm/min.

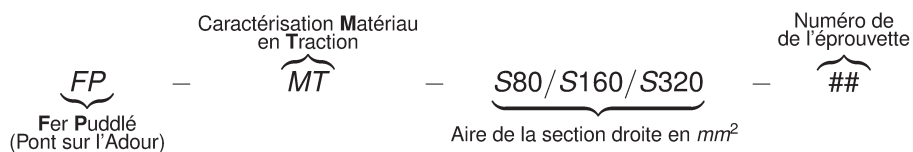


(a) Types d'éprouvettes de caractérisation (b) Montage expérimental utilisé pour les essais de traction sur matériau (fer puddlé) testées en traction monotone. éprouvette en fer puddlé.

FIGURE 5.11 – Essais de traction sur éprouvettes en fer puddlé.

### Notation des éprouvettes

Les éprouvettes de caractérisation matériau fabriquées en fer puddlé suivent l'appellation suivante :



Les résultats des essais de traction monotone sont illustrés dans la figure 5.12 et le tableau 5.5 pour les éprouvettes à une section de 80 mm<sup>2</sup>. La figure 5.13 et le tableau 5.6 montrent les résultats pour les éprouvettes à une section de 160 mm<sup>2</sup>. Les résultats pour les éprouvettes de section 320 mm<sup>2</sup> sont représentés dans la figure 5.14 et le tableau 5.7. Afin d'analyser l'éventuelle influence du seuil de déformation plastique associé à la détermination de la limite élastique, deux valeurs conventionnelles seront systématiquement

6. Ceci implique que l'angle  $\alpha$  défini dans la section 4.1.1 (angle entre l'axe de sollicitation de l'éprouvette et celui du laminage) est nul.

proposées : à 0,075% et à 0,2% de déformation permanente<sup>7</sup>. Nous tenons à préciser que l'écart type proposé dans les tableaux de ce mémoire correspond à l'estimateur non-biaisé de l'écart-type d'une distribution.

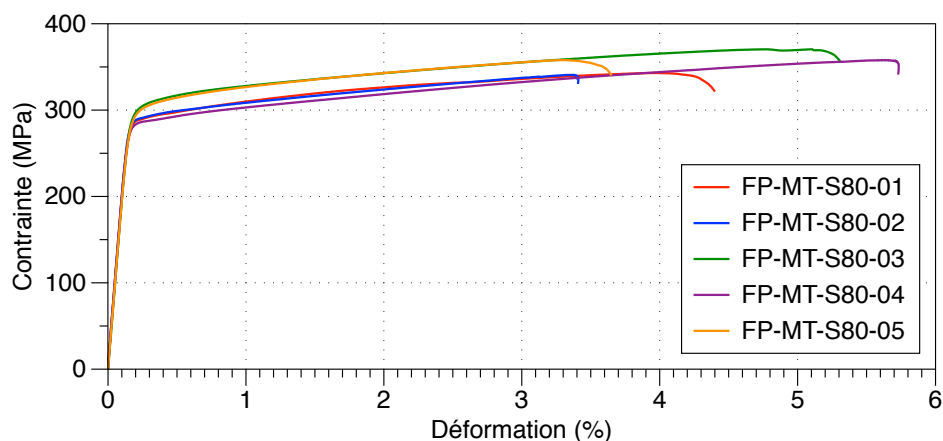


FIGURE 5.12 – Courbes de traction pour les éprouvettes de section 80mm<sup>2</sup>.

TABLE 5.5 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section 80mm<sup>2</sup>.

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-S80-01	195,53	293,62	288,22	343,01	3,96
FP-MT-S80-02	198,24	294,76	289,49	340,80	3,37
FP-MT-S80-03	195,84	311,43	302,14	370,46	5,11
FP-MT-S80-04	195,42	288,70	284,97	357,88	5,63
FP-MT-S80-05	194,13	308,67	298,72	357,96	3,29
<b>Minimum</b>	194,13	288,70	284,97	340,80	3,29
<b>Maximum</b>	198,24	311,43	302,14	370,46	5,63
<b>Moyenne</b>	195,83	299,44	292,71	354,02	4,27
<b>Écart Type</b>	1,50	10,00	7,34	12,21	1,05

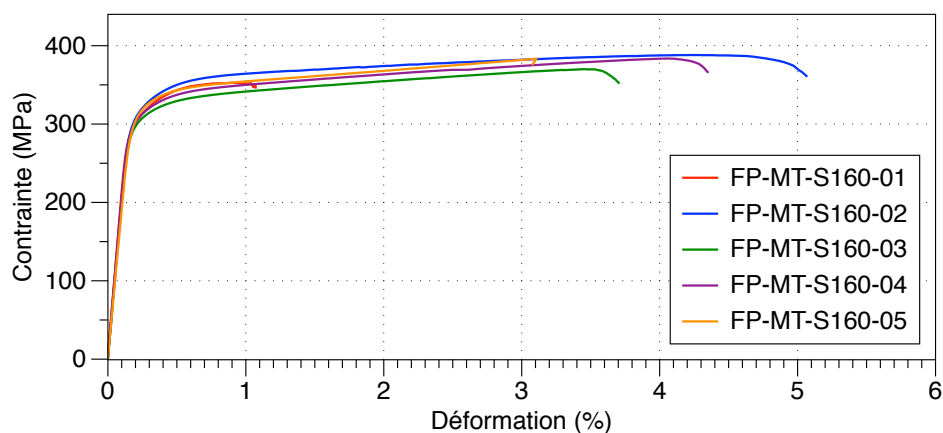
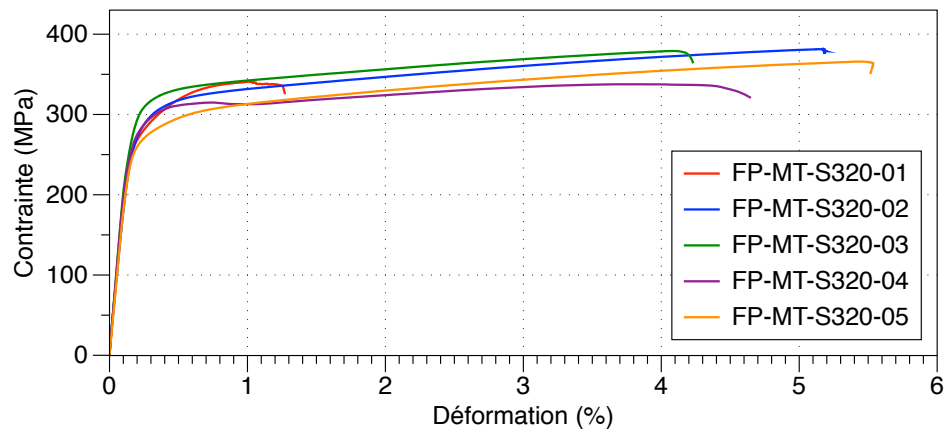


FIGURE 5.13 – Courbes de traction pour les éprouvettes de section 160mm<sup>2</sup>.

7. Les courbes de traction ne présentant pas de palier plastique marqué sur les fers puddlés, la limite d'écoulement  $R_{eH}$  (véritable limite d'élasticité) ne peut pas être déterminée.

TABLE 5.6 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section 160mm<sup>2</sup>.

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-S160-01	209,42	330,14	306,99	352,82	0,91
FP-MT-S160-02	205,23	337,52	314,78	388,11	4,26
FP-MT-S160-03	201,96	320,14	302,34	370,07	3,45
FP-MT-S160-04	201,57	326,91	308,31	383,67	4,06
FP-MT-S160-05	188,84	335,12	316,19	383,27	3,10
<b>Minimum</b>	188,84	320,14	302,34	352,82	0,91
<b>Maximum</b>	209,42	337,52	316,19	388,11	4,26
<b>Moyenne</b>	201,40	329,97	309,72	375,59	3,16
<b>Écart Type</b>	7,70	6,88	5,73	14,40	1,34

FIGURE 5.14 – Courbes de traction pour les éprouvettes de section 320mm<sup>2</sup>.TABLE 5.7 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section 320mm<sup>2</sup>.

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-S320-01	180,93	301,64	274,93	341,01	1,03
FP-MT-S320-02	169,14	308,37	285,23	381,37	5,15
FP-MT-S320-03	203,13	323,04	302,87	379,11	4,08
FP-MT-S320-04	194,68	302,71	279,28	337,63	3,72
FP-MT-S320-05	175,39	283,95	265,43	365,92	5,42
<b>Minimum</b>	169,14	283,95	265,43	337,63	1,03
<b>Maximum</b>	203,13	323,04	302,87	381,37	5,42
<b>Moyenne</b>	184,65	303,94	281,55	361,01	3,88
<b>Écart Type</b>	13,98	14,06	13,94	20,69	1,75

Un bilan des expériences présentées dans les figures 5.12, 5.13 et 5.14 est proposé dans la figure 5.15. Cette représentation, ainsi que celles qui le précèdent, nous permettent d'observer la dispersion très importante des résultats.

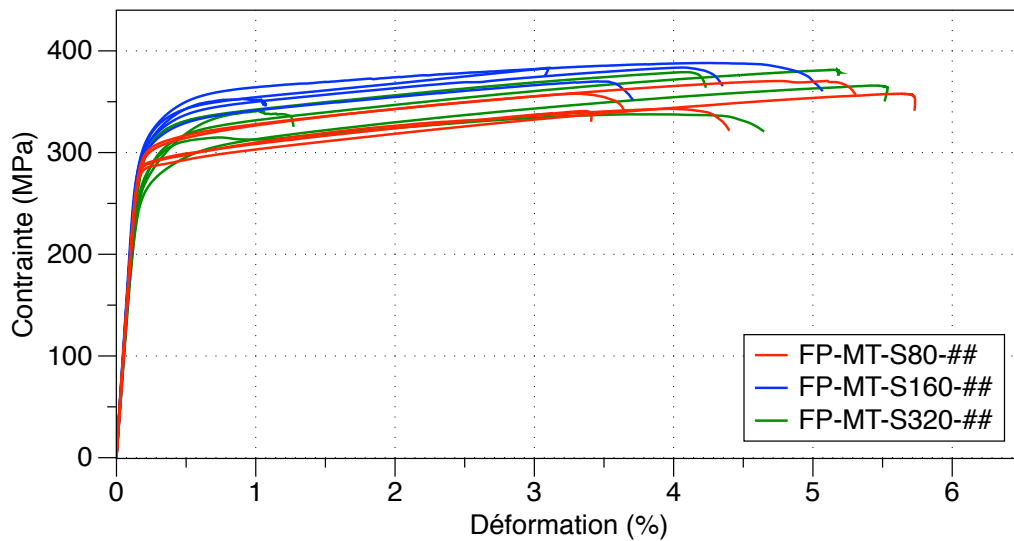


FIGURE 5.15 – Bilan des courbes de traction pour éprouvettes de section différente.

Dans le but de quantifier la distribution des paramètres matériau estimés lors des expériences sans pour autant assumer une distribution quelconque, nous proposons une représentation de l'évolution des propriétés mécaniques par rapport à l'aire de la section droite de l'éprouvette à l'aide de diagrammes de type « boîtes à moustaches ». La figure 5.16 explique l'interprétation de ce type de diagramme.

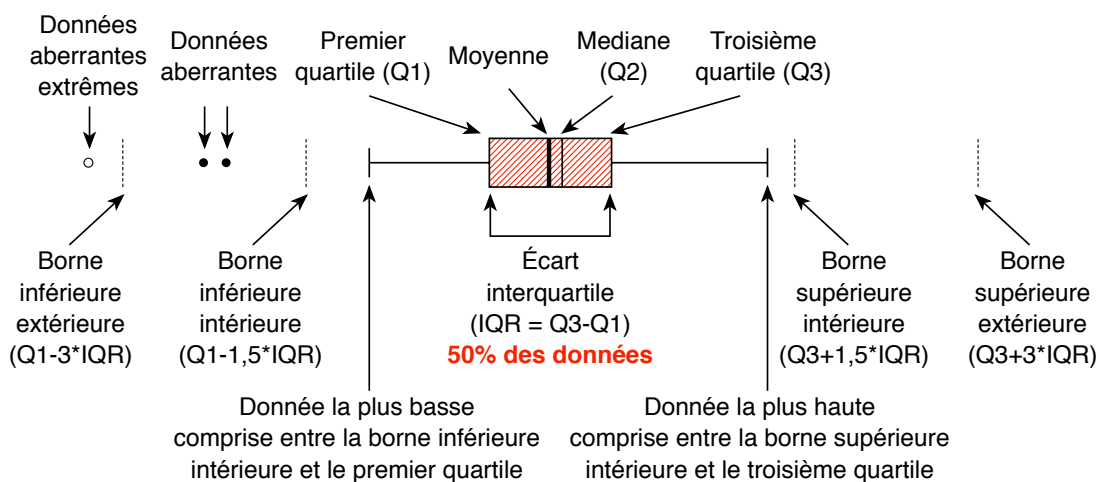


FIGURE 5.16 – Notation utilisée pour les « boîtes à moustache ».

Cette représentation nous permet, malgré une quantité réduite d'éprouvettes, d'observer une tendance dans l'évolution de certaines caractéristiques matériau selon le volume sollicité. De plus, la visualisation simultanée de leurs valeurs médianes et moyennes, permet d'observer un possible biais (statistique) dans la distribution des données expérimentales. Nous avons décidé de nous focaliser sur trois paramètres en particulier : la résistance à la traction ( $R_m$ ) (figure 5.17), l'allongement total sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) (figure 5.19) et la limite élastique ( $R_p$ ) (figure 5.20).

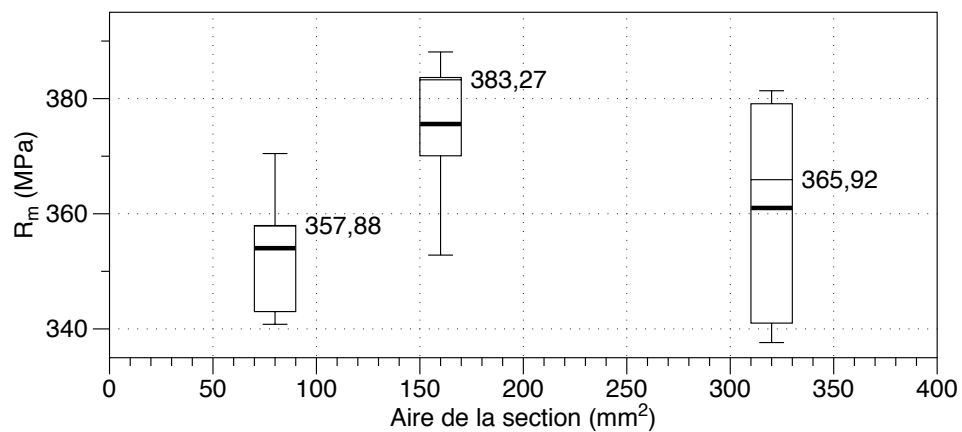


FIGURE 5.17 – Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée, les valeurs des médianes sont indiquées.

Cette première représentation, montrée dans la figure 5.17, met en évidence principalement deux aspects de nos résultats sur la résistance à la traction : les valeurs obtenues sont très dispersives et les distributions (selon la section) se superposent sur certaines valeurs de contrainte. À ce stade, nous ne pouvons pas affirmer qu'il existe une influence claire de l'aire de la section étudiée sur la résistance à la traction pour le fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour. Lorsque nous comparons les valeurs de  $R_m$  retrouvées dans notre campagne expérimentale à celles de la littérature (voir figure 5.18), nous retrouvons à nouveau une dispersion importante et des valeurs proches de nos résultats. Ces comparaisons sont cependant à nuancer puisque les conditions précises des essais menées par Fairbairn en 1838 sont sans doute très différentes de celles des essais de nos jours. De même, la compilation de données historiques par Bowman et Piskorowski (2004) sur 1882 éprouvettes montre une valeur moyenne de  $R_m$  égale à 372 MPa (54000 psi) ce qui reste proche des moyennes obtenues dans cette campagne expérimentale quelque soit la section considérée.

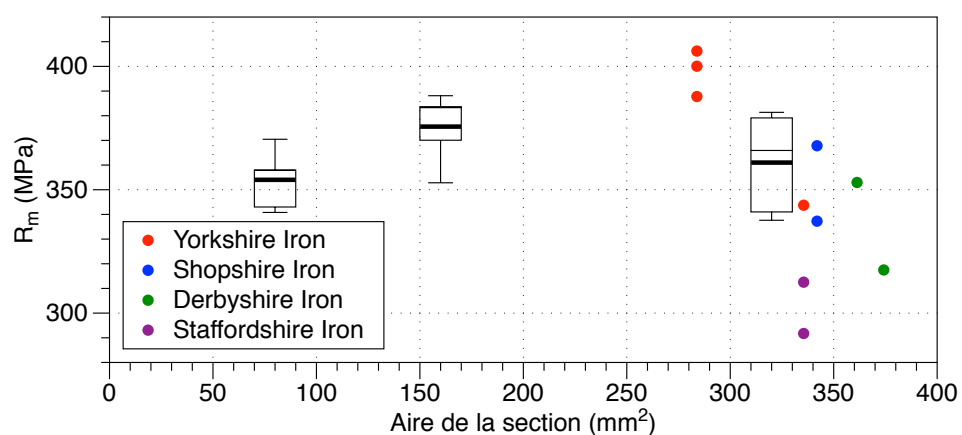


FIGURE 5.18 – Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée comparée aux résultats obtenus par Fairbairn (1850).

L'interprétation des valeurs d'allongement est également délicate. En effet, la présence des nombreux défauts dans le fer puddlé provoque souvent des ruptures hors extensomètre

(toujours dans la longueur utile de l'éprouvette). C'est pourquoi nous préférons l'allongement total sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) en tant que caractéristique matériau à suivre. Tel que montré dans la figure 5.19, nous ne pouvons pas non plus dans ce cas identifier l'influence de l'aire de la section de l'éprouvette sur  $A_{gt}$ . Ces résultats soulignent cependant la fragilité du matériau testé,  $A_{gt}$  étant voisin de 4% quelle que soit la section considérée.

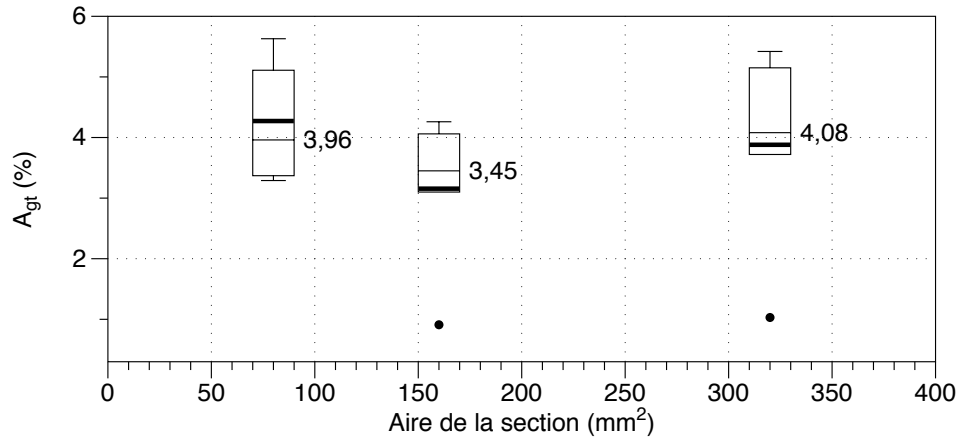


FIGURE 5.19 – Évolution de l'allongement total sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée. Les valeurs des médianes sont indiquées.

Lorsque nous étudions l'évolution des limites élastiques ( $R_p$ ) sous deux critères différents (0,2% et 0,075% de déformation plastique) (figure 5.20) le constat est le même que celui pour  $R_m$  et  $A_{gt}$ . En plus d'observer une dispersion importante des résultats, ceux-ci ne montrent pas une influence flagrante de l'aire de la section de l'éprouvette sur l'estimation de la limite élastique du fer puddlé testé. On observe que la tendance est très similaire pour  $R_{p0,075}$  et  $R_{p0,2}$ . De plus, les écarts entre les valeurs relevées sont sensiblement plus faibles pour la limite élastique que pour  $R_m$  (écart inter-quartile IQR de l'ordre de 10 MPa pour  $R_p$  et en moyenne égale à 20 MPa pour  $R_m$ ). Ces valeurs des limites élastiques sont par ailleurs dans la fourchette haute des données de la littérature sur les fers puddlés (O'Sullivan et Swailes, 2009).

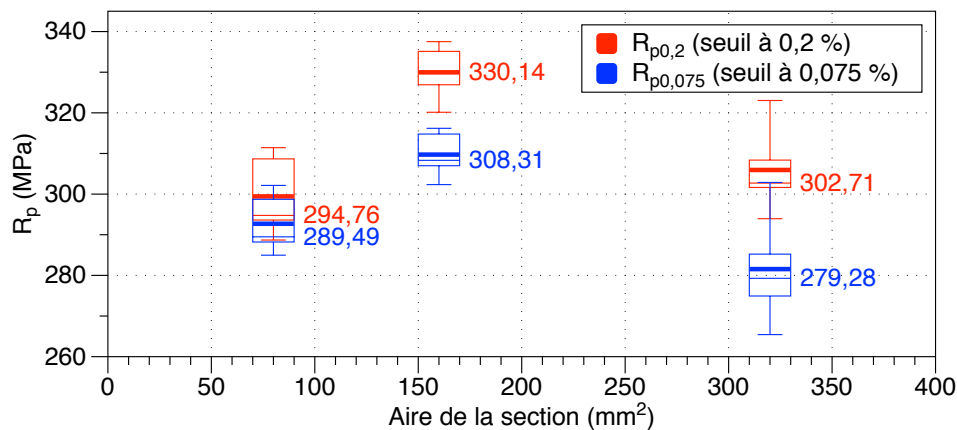


FIGURE 5.20 – Évolution de la limite élastique ( $R_p$ ) selon l'aire de la section droite de l'éprouvette testée. Les valeurs des médianes sont indiquées.



**En conclusion, la section de l'éprouvette sollicitée ne semble pas être influente sur les caractéristiques sous chargement monotone pour le fer puddlé étudié.**

Nous avons validé cette observation expérimentale en complétant la campagne par trois essais sur des éprouvettes dont l'aire de la section droite était de  $400\text{mm}^2$ . Pour ces éprouvettes nous relevons les valeurs consignées dans la table 5.8.

TABLE 5.8 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé de section  $400\text{mm}^2$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-S400-01	212,44	354,00	337,00	374,13	1,095
FP-MT-S400-02	208,29	354,00	327,00	405,99	3,377
FP-MT-S400-03	156,12	333,00	304,00	418,21	5,988
<b>Minimum</b>	156,12	333,00	304,00	374,13	1,10
<b>Maximum</b>	212,44	354,00	337,00	418,21	5,99
<b>Moyenne</b>	192,28	347,00	322,67	399,44	3,49
<b>Écart Type</b>	31,39	12,12	16,92	22,76	2,45

L'ensemble des éprouvettes ayant été prélevées sur la même tôle, nous avons pu observer une différence marquée des faciès de rupture, en lien avec la microstructure du fer puddlé étudié. La micrographie suivante montre en effet une taille de grains très variable. Cette caractéristique issue du procédé de puddlage confère au matériau des capacités de ductilité variables (mobilité des dislocations) au sein d'une même éprouvette.

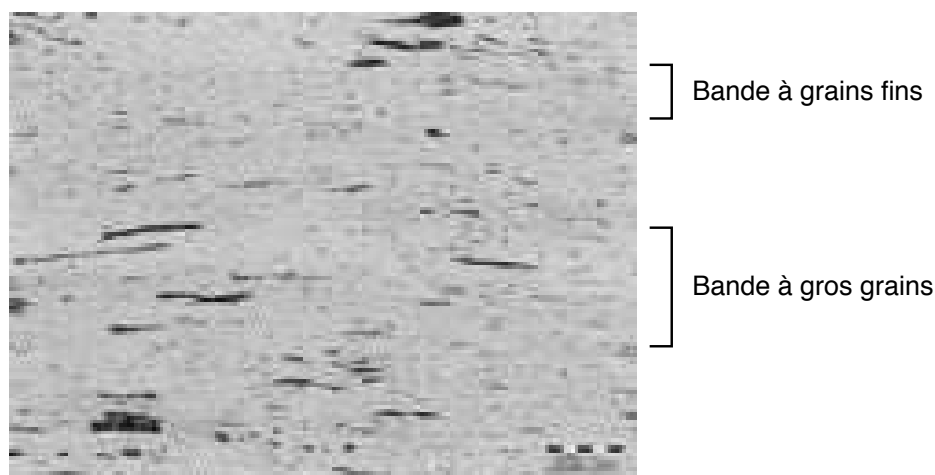
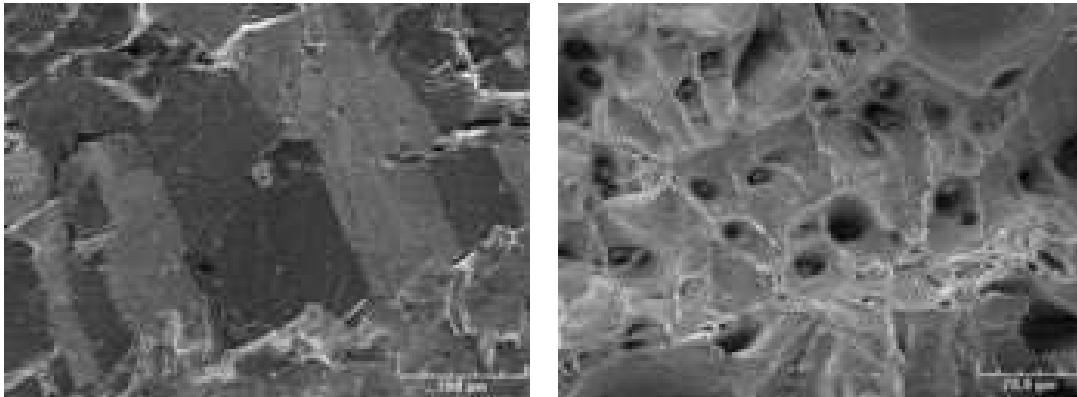


FIGURE 5.21 – Micrographie du fer puddlé du Pont sur l'Adour après attaque au Nital (2 %). Mise en évidence de bandes à grains fins (environ  $30\mu\text{m}$ ) et à gros grains (environ  $200\mu\text{m}$ ).

Des faciès complexes caractérisent ainsi la rupture des fers puddlés en traction. En effet, certains d'entre eux montrent des ruptures typiquement fragiles (rupture intragranulaire : la présence d'inclusions diminue la cohésion aux joints de grains) et d'autres ont des cupules de ductilité, voir figure 5.22(a) et figure 5.22(b) respectivement.

Ces ruptures fragiles sont cristallines et facilement identifiables à l'œil nu. Nous avons donc mesuré le taux de « cristallinité » pour analyser la dépendance potentielle de cette caractéristique avec les propriétés mécaniques précédemment relevées (notamment  $A_{gt}$ ).

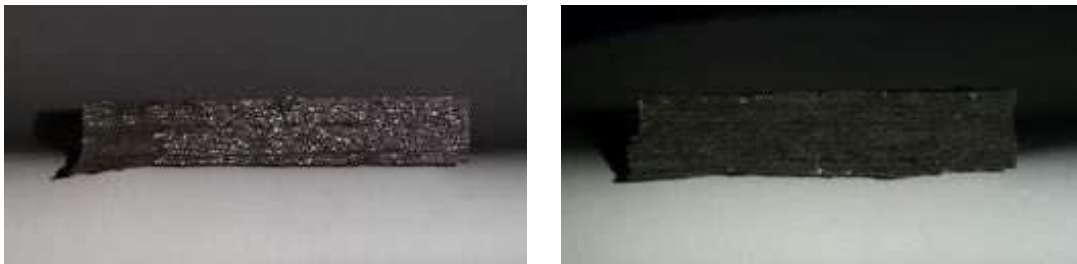
La figure 5.23 montre un faciès fragile (gauche) et un faciès ductile (droite) qui correspondent aux éprouvettes FP-MT-S400-02 et FP-MT-S320-05.



(a) Mise en évidence d'une zone à rupture fragile intragranulaire sur un faciès de rupture d'une éprouvette en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

(b) Mise en évidence de cupules de ductilité sur un faciès de rupture d'une éprouvette en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

FIGURE 5.22 – Images prises au Microscope Électronique à Balayage de la plateforme de microscopie PIMM-DRX de l'Université de Bretagne Occidentale. Mise en évidence des faciès de rupture sur le fer puddlé.



(a) Faciès avec une « cristallinité » de 85 % (FP-MT-S400-02).

(b) Faciès avec une « cristallinité » de 3 % (FP-MT-S320-05).

FIGURE 5.23 – Faciès de rupture provenant des éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour sollicités en traction monotone.

Le taux de « cristallinité » a été mesuré à l'aide d'une application Python permettant, par seuillage, de séparer les zones les plus opaques des zones cristallines. L'ensemble des résultats est présenté sur la figure 5.24.

Nous n'avons pas observé de corrélation entre ce taux et les caractéristiques mécaniques. Cependant, cette analyse souligne la complexité de ce matériau, qui est non seulement hétérogène par la présence d'inclusions, mais qui est aussi différent selon sa position sur une même tôle.

La récupération d'une quantité de matière en bon état constitue une des difficultés les plus contraignantes dans l'utilisation du matériau provenant d'une structure ancienne. En effet, malgré la récupération d'une quantité non négligeable de pièces provenant du Pont sur l'Adour (8 demi-montants et 4 diagonales), l'environnement, le transport et les méthodes de découpage sur le chantier de démolition réduisent considérablement la quantité de tôles en fer puddlé exploitable. Ceci implique la recherche d'un équilibre délicat entre quantité

## 5. CARACTÉRISATION DES FERS PUDDLÉS

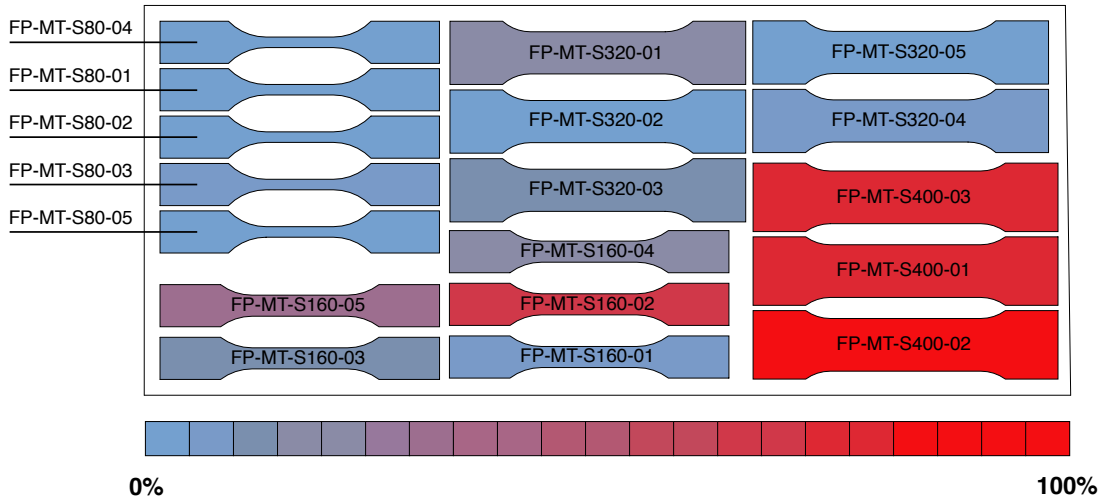


FIGURE 5.24 – Mesure du taux de cristallinité sur les faciès de rupture des éprouvettes sollicitées en traction monotone.

d'éprouvettes (et donc de résultats expérimentaux) et représentativité de chacune de ses éprouvettes vis-à-vis du comportement mécanique étudié.

### 5.2.1.3 Identification de l'influence de l'orientation des inclusions non-métalliques sur le comportement mécanique du fer puddlé

Dans la section précédente nous avons étudié l'influence de l'aire de la section droite sur des éprouvettes prélevées uniquement dans le sens du laminage des tôles récupérées. Néanmoins, et grâce aux travaux des ingénieurs de l'époque, par exemple Fairbairn (1850) et Kirkaldy (1862), nous savons que le laminage réalisé lors de la fabrication des tôles en fer puddlé a un impact sur son comportement en traction. Cependant, à notre connaissance, uniquement des essais de traction sur des éprouvettes prélevées dans le sens du laminage et perpendiculaires à celui-ci ont été réalisés.

Nous proposons, dans la suite de notre campagne expérimentale, d'étudier l'anisotropie du matériau à l'aide d'éprouvettes prélevées sous cinq orientations différentes :  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport à la direction du laminage (voir figure 5.25).

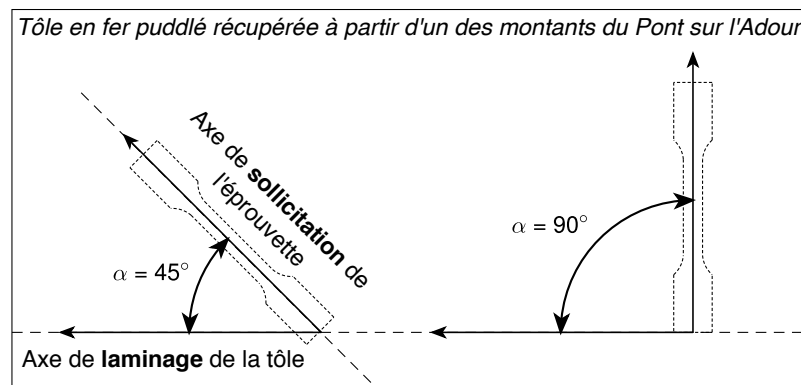
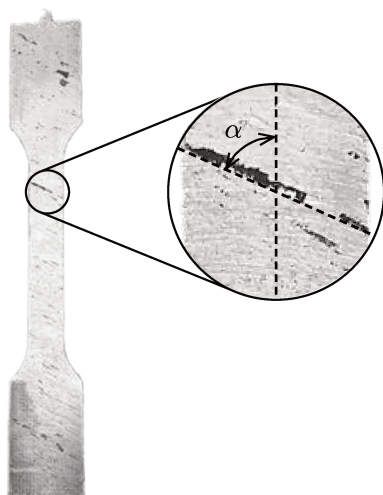


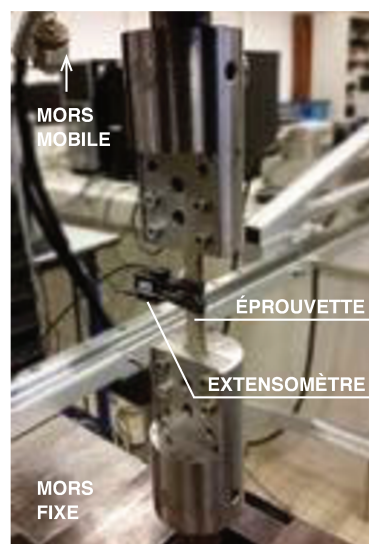
FIGURE 5.25 – Schéma de prélèvement des éprouvettes, exemple des orientations à  $45^\circ$  et  $90^\circ$ .

Suite aux résultats de la section 5.2.1.2, et dans l'objectif de maximiser la quantité

d'éprouvettes fabriquées, nous avons découpé des éprouvettes de traction avec une aire de section droite de  $50\text{mm}^2$  (toujours en suivant les conditions proposées dans la norme ISO 6892-1) (voir figure 5.26(a)). Trois éprouvettes ont été testées pour chaque orientation<sup>8</sup>. La machine d'essai universelle INSTRON<sup>®</sup> 5585 et un extensomètre INSTRON<sup>®</sup> avec une longueur de jauge de  $10\text{mm}$  ont été utilisés (voir figure 5.26(b)). Les essais ont été pilotés en déplacement de traverse à une vitesse de  $0,5\text{mm}/\text{min}$ .



(a) Types d'éprouvettes de caractérisation matériau (fer puddlé) testées en traction monotone, dans cet exemple,  $\alpha = 60^\circ$ .

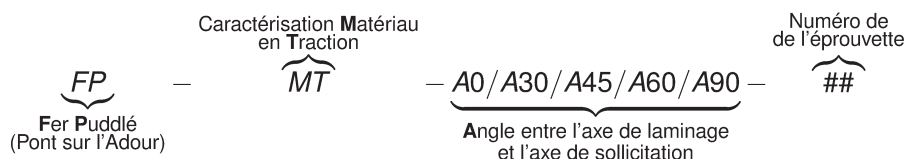


(b) Montage expérimental utilisé pour les essais de traction sur éprouvette en fer puddlé.

FIGURE 5.26 – Essais de traction sur éprouvettes en fer puddlé. Mise en évidence de l'influence de l'orientation des inclusions sur les éprouvettes découpées.

### Notation des éprouvettes

Les éprouvettes de caractérisation matériau fabriquées en fer puddlé suivent l'appellation suivante :



Par la suite, nous présentons les courbes de traction monotones obtenues pour chacune des éprouvettes ainsi que les valeurs de la pente de la zone élastique de la courbe ( $m_E$ ), la limite élastique estimée pour un seuil de déformation plastique de  $0,2\%$  ( $R_{p,0,2}$ ) et pour un seuil à  $0,075\%$  ( $R_{p,0,075}$ )<sup>9</sup>, la résistance à la traction ( $R_m$ ) et l'allongement sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ). Ces représentations nous permettent en effet de mettre en évidence la grande diversité de comportements mécaniques des éprouvettes en fer provenant d'une même tôle.

8. Compte tenu des campagnes expérimentales menées, la quantité de matériau à disposition, ne permettant pas de découper davantage d'éprouvettes par orientation.

9. Nous n'avons pas observé de seuil d'écoulement ( $R_{eH}$ ) pour l'ensemble des éprouvettes testées.

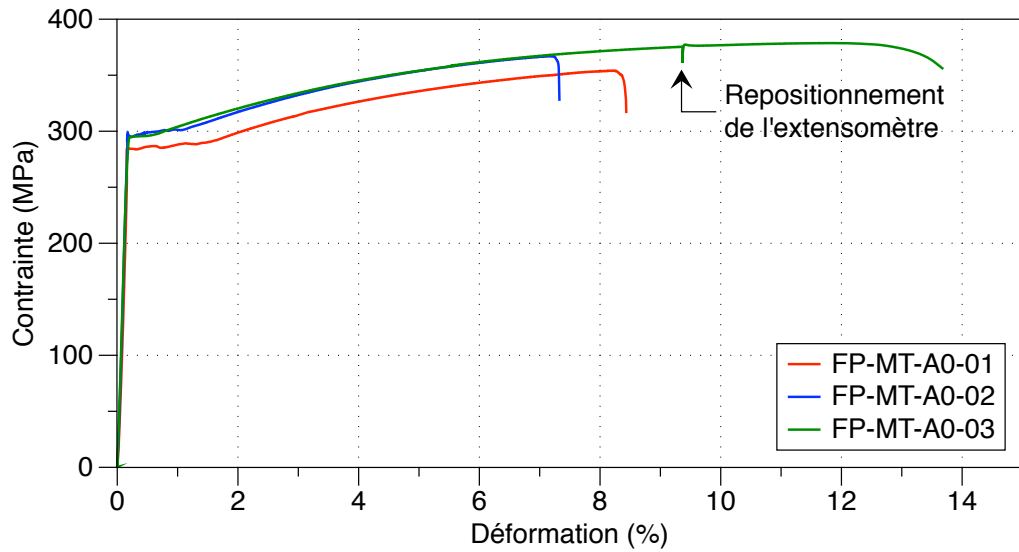


FIGURE 5.27 – Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 0^\circ$

TABLE 5.9 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 0^\circ$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-A0-01	173,73	284,20	284,20	354,11	8,22
FP-MT-A0-02	187,45	297,00	294,75	366,99	7,19
FP-MT-A0-03	182,67	295,50	295,00	378,72	11,62
<b>Minimum</b>	173,73	284,20	284,20	354,11	7,19
<b>Maximum</b>	187,45	297,00	295,00	378,72	11,62
<b>Moyenne</b>	181,28	292,23	291,32	366,61	9,01
<b>Écart Type</b>	6,96	7,00	6,16	12,31	2,32

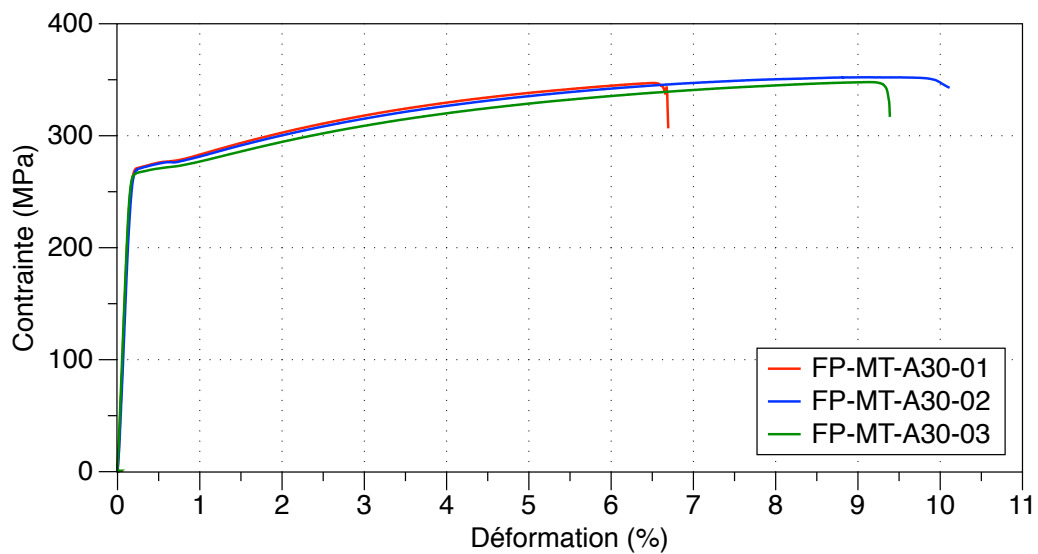
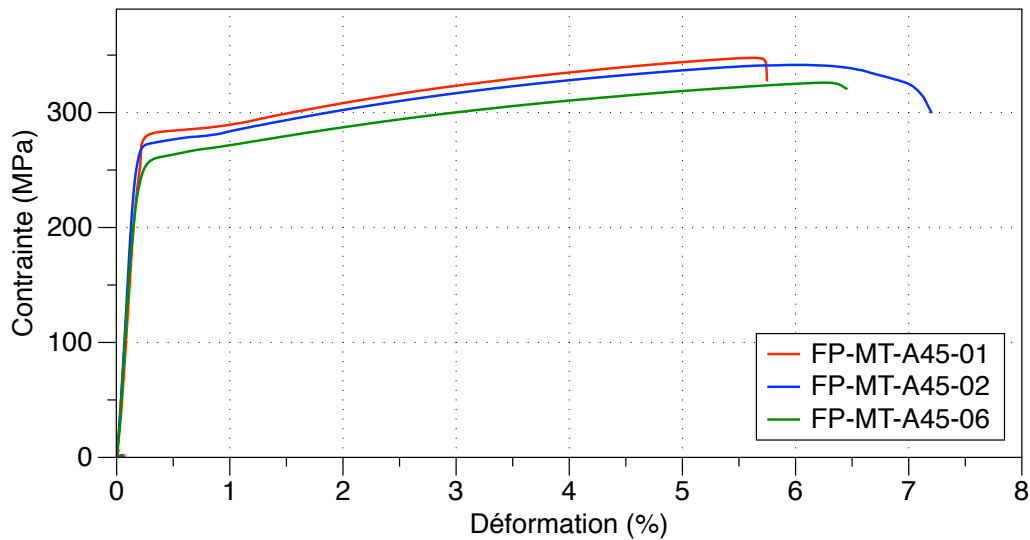


FIGURE 5.28 – Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 30^\circ$

TABLE 5.10 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 30^\circ$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-A30-01	187,19	273,20	270,50	347,14	6,49
FP-MT-A30-02	173,83	272,50	269,50	352,28	9,13
FP-MT-A30-03	183,19	268,70	266,00	347,95	9,12
<b>Minimum</b>	173,83	268,70	266,00	347,14	6,49
<b>Maximum</b>	187,19	273,20	270,50	352,28	9,13
<b>Moyenne</b>	181,40	271,47	268,67	349,12	8,25
<b>Écart Type</b>	6,86	2,42	2,36	2,76	1,52

FIGURE 5.29 – Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 45^\circ$ TABLE 5.11 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 45^\circ$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_{p\ 0,2}$ (MPa)	$R_{p\ 0,075}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-A45-01	151,01	283,30	279,30	347,66	5,59
FP-MT-A45-02	172,94	274,30	270,20	341,53	5,94
FP-MT-A45-06	146,81	261,00	252,00	326,07	6,23
<b>Minimum</b>	146,81	261,00	252,00	326,07	5,59
<b>Maximum</b>	172,94	283,30	279,30	347,66	6,23
<b>Moyenne</b>	156,92	272,87	267,17	338,42	5,92
<b>Écart Type</b>	14,03	11,22	13,90	11,13	0,32

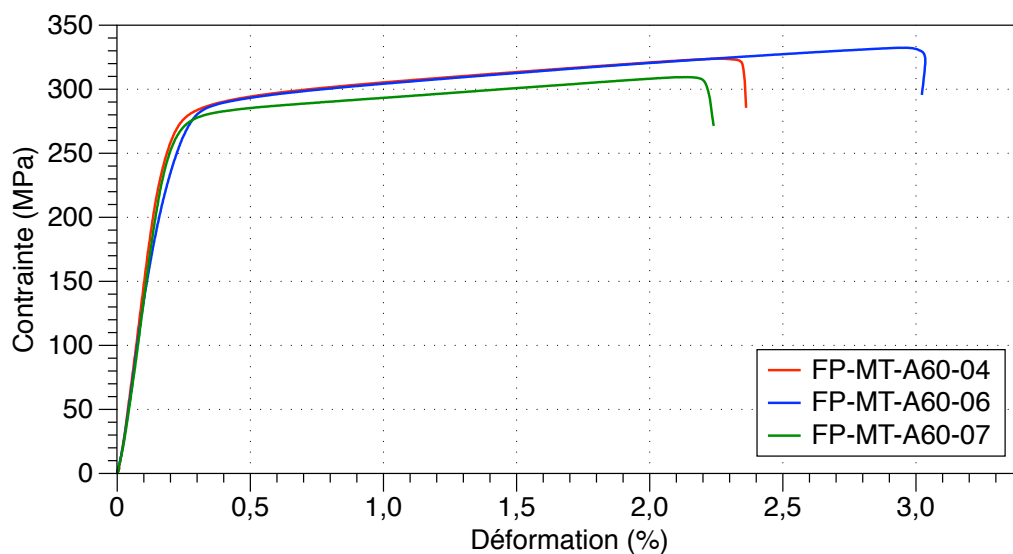


FIGURE 5.30 – Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 60^\circ$

TABLE 5.12 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 60^\circ$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_p$ 0,2 (MPa)	$R_p$ 0,075 (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-A60-04	161,01	289,00	276,00	323,89	2,27
FP-MT-A60-06	135,07	290,20	275,00	332,42	2,96
FP-MT-A60-07	154,38	282,40	271,00	309,44	2,13
<b>Minimum</b>	135,07	282,40	271,00	309,44	2,13
<b>Maximum</b>	161,01	290,20	276,00	332,42	2,96
<b>Moyenne</b>	150,15	287,20	274,00	321,92	2,45
<b>Écart Type</b>	13,48	4,20	2,65	11,62	0,44

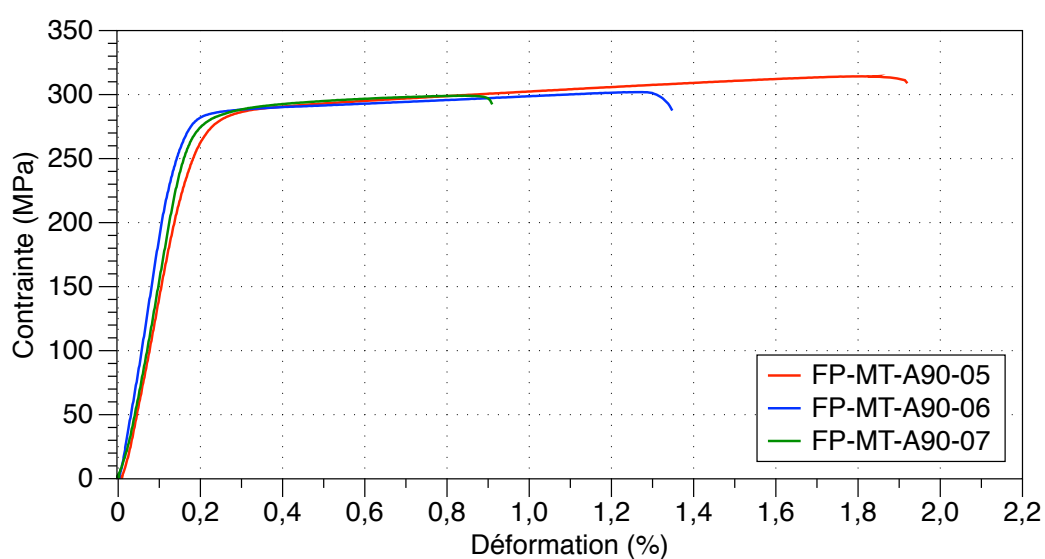
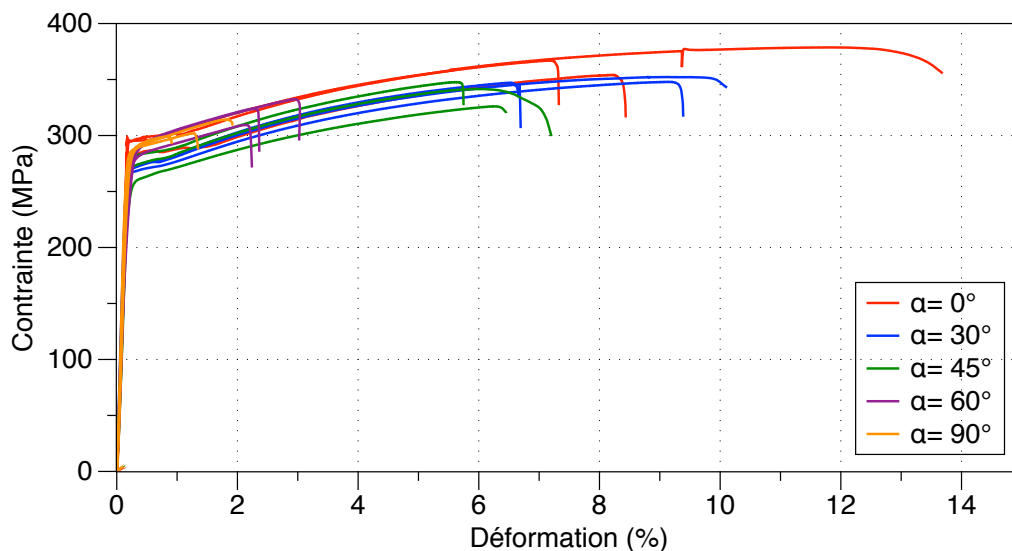


FIGURE 5.31 – Courbes de traction pour les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 90^\circ$

TABLE 5.13 – Bilan des résultats des essais de traction monotone sur les éprouvettes en fer puddlé à  $\alpha = 90^\circ$ .

Éprouvette	$m_E$ (GPa)	$R_p$ 0,2 (MPa)	$R_p$ 0,075 (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
FP-MT-A90-05	167,15	290,00	278,50	314,32	1,82
FP-MT-A90-06	203,29	289,00	284,00	301,93	1,27
FP-MT-A90-07	180,59	291,00	281,50	299,15	0,83
<b>Minimum</b>	135,07	282,40	271,00	309,44	2,13
<b>Maximum</b>	161,01	290,20	276,00	332,42	2,96
<b>Moyenne</b>	150,15	287,20	274,00	321,92	2,45
<b>Écart Type</b>	13,48	4,20	2,65	11,62	0,44

Un bilan des toutes les expériences menées est proposé dans la figure 5.32. Cette représentation, ainsi que celles qui le précèdent, nous permettent d'observer la dispersion des résultats, ainsi que l'influence de l'orientation des inclusions sur la résistance à la traction et principalement sur l'allongement.

FIGURE 5.32 – Bilan des courbes de traction sur éprouvettes à  $\alpha$  variable.

Nous présentons par la suite, l'évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ), l'allongement sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) et la limite élastique ( $R_p$ ) selon l'orientation des inclusions des éprouvettes.

Malgré le nombre très restreint d'éprouvettes, nous observons une relation nette entre la résistance à la traction ( $R_m$ ) et le sens du prélèvement des éprouvettes ( $\alpha$ ) (voir figure 5.33). Cette différence importante entre les orientations  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est en effet retrouvée sur des autres fers puddlés dans la littérature (Kirkaldy, 1862). En effet, comme le souligne la figure 5.33,  $R_m$  diminue fortement en fonction de  $\alpha$ . Ainsi, la limite à la traction atteint une valeur moyenne de  $367\text{MPa}$  pour  $\alpha = 0^\circ$  et chute à  $322\text{MPa}$  pour  $\alpha = 90^\circ$ <sup>10</sup>. Comme le montre également la figure 5.33,  $R_m$  évolue quasiment linéairement par rapport à  $\alpha$ .

10. Les données obtenues pour  $\alpha = 0^\circ$  et une section d'éprouvette de  $50\text{mm}^2$  correspondent bien à celles analysées précédemment (étude de l'effet de volume, §5.2.1.2.)



Nous observons en effet la bonne correspondance d'une droite obtenue par minimisation au sens des moindres carrés sur les valeurs moyennes de la résistance à la traction selon l'orientation des inclusions. Le coefficient de corrélation étant égal à 0,988 pour le fer puddlé étudié et pour un nombre restreint d'éprouvettes testées.

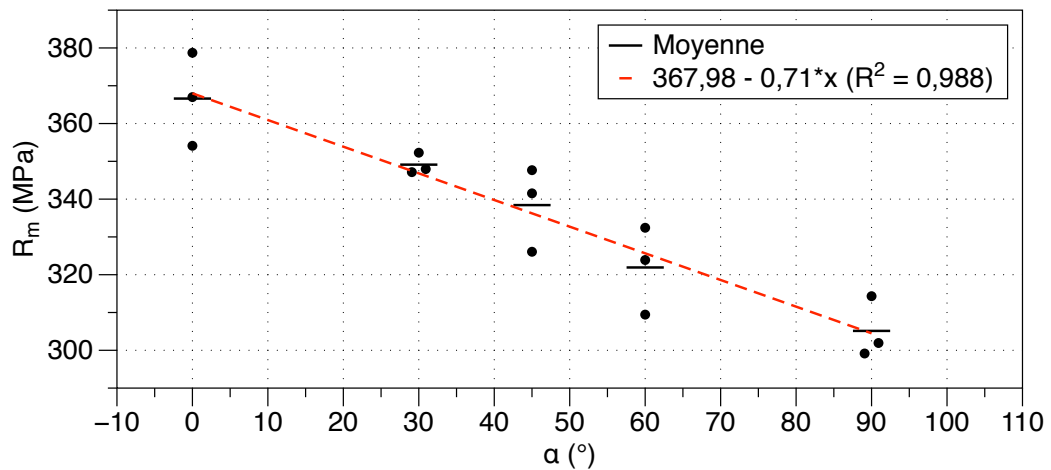


FIGURE 5.33 – Évolution de la résistance à la traction ( $R_m$ ) selon l'orientation des inclusions.

Dans le cas de l'allongement sous chargement maximal ( $A_{gt}$ ) l'influence de l'orientation des inclusions et particulièrement importante. Le graphique de la figure 5.34 montre deux types de comportement. Le premier concerne les orientations inférieures à  $45^\circ$  où la dispersion des résultats est importante. En effet, la valeur de l'estimateur non-biaisé de l'écart type est plus élevée pour les éprouvettes à  $0^\circ$  et  $30^\circ$  (2,32% et 1,52% respectivement), l'allongement sous chargement maximal est voisin de 8%. Le second comportement correspond aux orientations de  $60^\circ$  et  $90^\circ$  (ce dernier étant les sens de sollicitation perpendiculaire à celui des inclusions/laminage). Dans ces cas, la dispersion est plus faible (estimateur non biaisé de l'écart type de 0,44% et 0,50% respectivement) et la fragilité nettement mise en évidence.

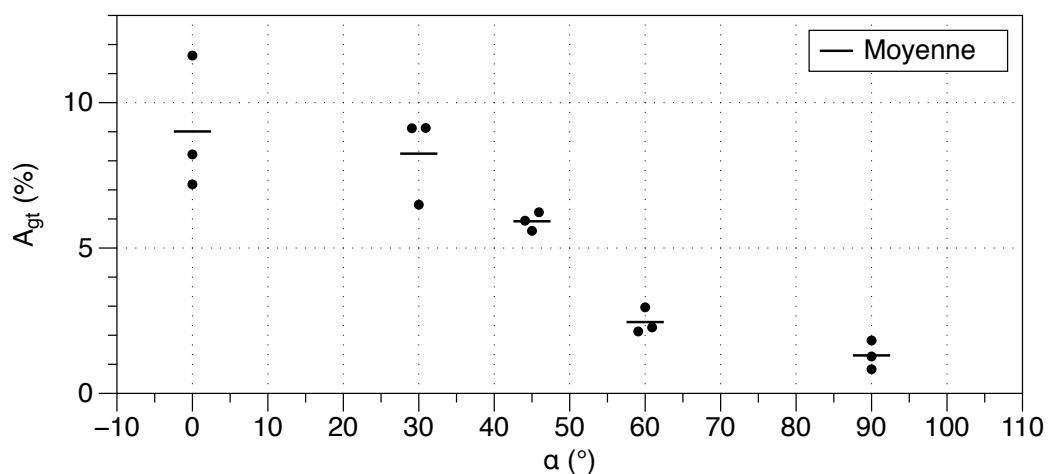


FIGURE 5.34 – Évolution de l'allongement sous chargement maximale ( $A_{gt}$ ) selon l'orientation des inclusions.

Ce résultat montre une influence forte de la population des inclusions sur le compor-

tement mécanique du fer puddlé étudié. C'est pourquoi, nous avons réalisé une étude microscopique visant leur caractérisation qui sera présentée dans le détail dans la section 5.3 de ce chapitre.

À la différence des deux autres paramètres étudiés précédemment, la limite élastique ( $R_p$ ) ne semble pas être dépendante de la direction de la sollicitation, quel que soit le seuil de déformation plastique choisi. La dispersion des résultats est ici plus importante pour une orientation de  $45^\circ$  (voir figure 5.35).

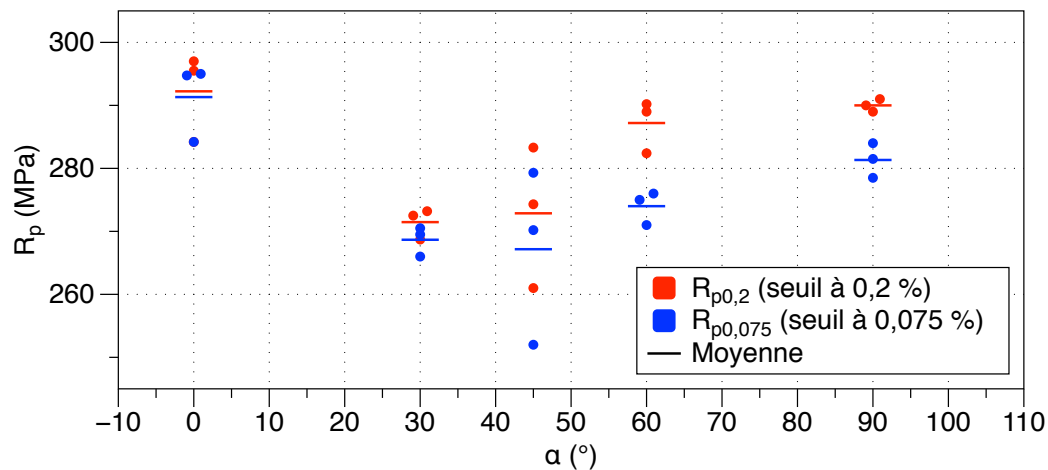


FIGURE 5.35 – Évolution de la limite élastique ( $R_p$ ) selon l'orientation des inclusions.

À partir des expériences précédentes, nous concluons que les caractéristiques du fer puddlé étudié sous chargement monotone sont très dispersives.

Cette variation très importante des caractéristiques propre aux fers puddlés est en effet soulignée depuis les premières recherches sur leur comportement mécanique au XIX<sup>ème</sup> siècle. Ceci a été souligné par S. Hughes dans un de ses papiers sur le comportement des poutres métalliques publié en 1858 (Kirkaldy, 1862) :

« There is probably no branch of experimental inquiry in which more varying and discordant results have been attained than in that which seeks to determine the absolute strength of wrought-iron subjected to a tensile strain, or to the action of a weight applied to tear it asunder. »

### Bilan

Cette campagne de caractérisation monotone sur le fer puddlé du Pont sur l'Adour nous a permis de mettre en évidence :

- Un matériau hétérogène par la présence d'inclusions non métalliques.
- Des caractéristiques micro-structurales différentes sur une même tôle.
- Un matériau fragile ( $A_{gt}$  inférieur à 10 %).
- Des caractéristiques mécaniques très dispersives malgré le nombre restreint d'éprouvettes testées.
- La nécessité d'ajouter à la valeur moyenne des résultats l'information sur la dispersion (valeurs extrêmes notamment) pour une utilisation de ces données en bureau d'études.

- Une indépendance des caractéristiques mécaniques avec l'aire de la section droite considérée.

Les fers puddlés constituant les assemblages rivetés des pont anciens sont également sollicités en fatigue. Ce point fait l'objet de la section suivante.

### 5.2.2 Essais sous chargements cycliques à amplitude de contrainte constante

Après la caractérisation sous chargements quasi-statiques, nous avons étudié le comportement du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour à Bayonne à la fatigue. Car bien qu'une caractérisation en traction monotone nous permet d'observer la réponse du matériau à des charges « mortes », le cadre de notre étude (l'exploitation d'ouvrages d'art métalliques dans l'industrie ferroviaire) nécessite la compréhension du comportement du fer puddlé lorsqu'il est soumis à des chargements cycliques.

#### 5.2.2.1 Essais de fatigue classique sur des éprouvettes prélevées dans les sens du laminage

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous avons fait le bilan des nombreux paramètres intervenant sur le comportement en fatigue d'une éprouvette soumise aux chargements cycliques. Nous avons noté, que même dans le cas des matériaux homogènes, les expériences en fatigue sont toujours associées à une dispersion propre au phénomène. La caractérisation de cette dispersion, difficile à maîtriser et objet de nombreuses recherches, nécessite la mise en place des campagnes expérimentales particulièrement longues (plusieurs semaines, voire des mois), très coûteuses (utilisation privative d'une machine d'essais, fabrication des nombreuses éprouvettes, etc.). Ces problématiques propres à la caractérisation en fatigue sont d'autant plus présentes dans notre problématique de recherche où nous visons l'identification des caractéristiques en fatigue d'un matériau à défauts, hétérogène, anisotrope, dont les propriétés sous chargements monotones sont déjà très dispersives et dont la quantité de matière à disposition est limitée.

Nous avons donc commencé la campagne de caractérisation en fatigue du fer puddlé provenant du Pont sur l'Adour pour un nombre maximal de  $2 \times 10^6$  cycles. Les essais étant réalisés à une fréquence de sollicitation de 20Hz, la durée maximale pour un essai (la construction d'une courbe en nécessite des plusieurs) était de 27.8 heures (temps de mise en place de l'expérience non compris), le rapport de charge pour ces essais est de  $R = -1$ . Une machine de traction-torsion-compression quatre colonnes (TEMA Concept) avec une cellule d'effort de  $\pm 100kN$  a été utilisée en tant que moyen de sollicitation. Les résultats de ces expériences sont montrés dans la figure 5.36 pour une direction de sollicitation correspondant à la direction de laminage.

Malgré le nombre restreint d'éprouvettes une tendance claire est observée. Celle-ci est représentée à l'aide d'une loi de puissance suivant la forme  $A \cdot N^{(-1/m)}$  où  $m$  est le paramètre associé à la pente apparente de la courbe de fatigue (représentation log-log ou semilog, voir §1.2.2.1) et  $N$  le nombre de cycles à rupture. Le coefficient  $m$  est dans ce cas égal à 3,5 pour ce premier ensemble de données. Cette valeur reste cohérente avec les informations retrouvées dans la littérature qui situe ce paramètre entre 3,5 et 6 (Sustainable Bridges, 2007).

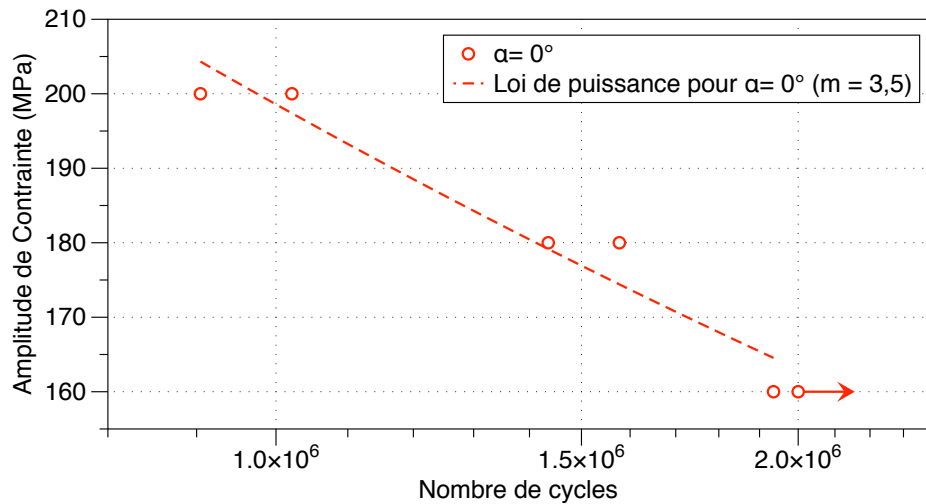


FIGURE 5.36 – Comportement en fatigue à grand nombre de cycles pour des éprouvettes en fer puddlé,  $R = -1$ ,  $\alpha = 0^\circ$ . Le symbole «  $\circ \rightarrow$  » représente une éprouvette non-rompue.

Les données de la littérature sont peu nombreuses sur la caractérisation en fatigue des fers puddlés (voir chapitre 3). L'étude de l'anisotropie sous sollicitations cycliques apporte donc une information importante dans la compréhension du comportement des fers puddlés. Comme pour les essais sous chargements quasi-statiques, nous avons comparé les courbes de fatigue pour  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$ . Ces résultats mettent en évidence, malgré un nombre restreint d'éprouvettes, des comportements très différents pour les deux orientations étudiées. Les deux courbes de fatigue construites à partir de 5 éprouvettes sont présentées dans la figure 5.37. Nous avons ajouté également 3 points obtenus pour  $\alpha = 45^\circ$  qui participent à montrer l'influence négative de l'augmentation de  $\alpha$  sur la résistance à la fatigue du fer puddlé du Pont sur l'Adour.

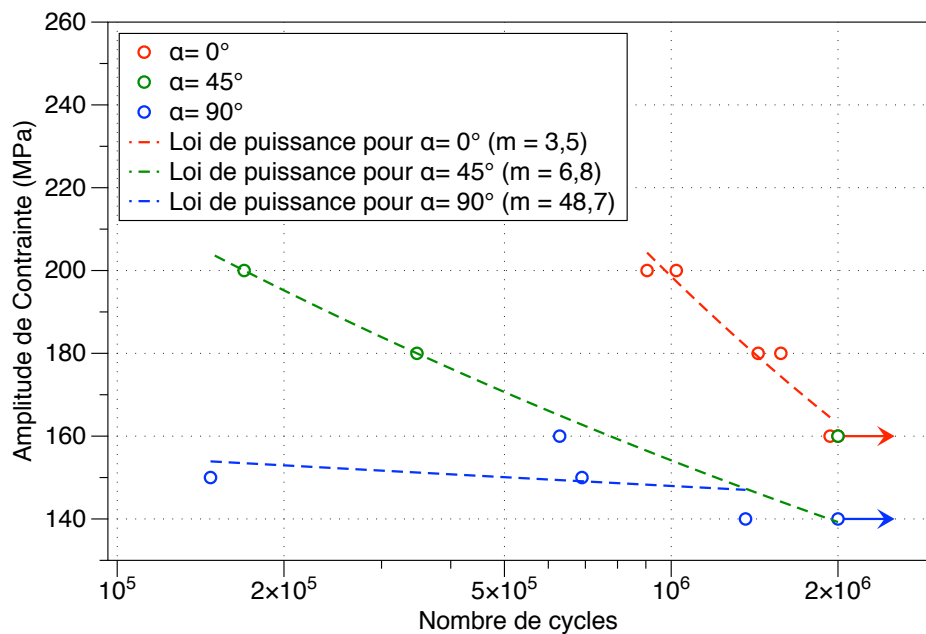


FIGURE 5.37 – Mise en évidence de l'effet de l'orientation des éprouvettes sur le comportement du fer puddlé en fatigue à grand nombre de cycles,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ,  $R = -1$ .

Pour une direction de sollicitation perpendiculaire à celle des inclusions, le coefficient de la loi puissance est très élevé ( $m=48,7$ ). Cette caractéristique souligne à nouveau la dispersion liée à la fragilité du matériau (et donc à sa microstructure). En effet, à une amplitude de contrainte donnée, le fer est dans ce cas susceptible de rompre sous une large gamme de nombre de cycles. L'analyse fine de la population des inclusions est donc nécessaire pour comprendre pourquoi certaines éprouvettes cèdent en fatigue sous un nombre de cycles faible alors que d'autres atteignent  $2 \times 10^6$  et résistent.

Cette figure 5.37 pose aussi la question de l'existence même d'une limite d'endurance « illimitée » pour ce type de matériau (pas de comportement asymptotique évident, au moins jusqu'à  $2 \times 10^6$ ). Comme souligné par Murakami (2002), la détermination d'une limite d'endurance (cas de la fatigue à grand nombre de cycles) s'avère délicate pour les matériaux à défauts. Des campagnes expérimentales complémentaires doivent cependant être effectuées pour des très grands nombres de cycles ( $> 2 \times 10^6$ ) afin d'apporter une contribution à cette question.

### 5.2.3 Essais sous chargements cycliques par palier progressifs de contrainte (mesure de l'auto-échauffement)

Compte-tenu de l'amplification majeure du temps nécessaire à la caractérisation en fatigue classique des fers puddlés, et vu le nombre important de paramètres supplémentaires à prendre en compte (hétérogénéité, effet de volume, anisotropie), nous avons envisagé une méthode de caractérisation dite rapide des propriétés en fatigue. Cette méthode, basée sur la mesure de l'auto-échauffement sous sollicitations cycliques a été présentée dans le chapitre 1 (§1.2.2.5).

Cette méthode est basée sur l'hypothèse de l'apparition progressive de la microplasticité en tant que phénomène (dissipatif) d'endommagement lors des chargements cycliques (fatigue) (Munier, 2012).

L'idée générale de la méthode est d'appliquer plusieurs paliers de sollicitations cycliques à une éprouvette et de mesurer l'évolution de sa température au cours de chaque chargement (cette température doit attendre un niveau stable au bout de quelques milliers de cycles). La relation entre l'amplitude du chargement et la température stabilisée atteinte par l'éprouvette nous permet de tracer la courbe dite « d'auto-échauffement ». En utilisant la méthode empirique décrite par Munier (2012) nous pouvons interpréter cette courbe et ainsi déterminer la limite d'endurance moyenne du matériau.

Cependant, l'application d'une telle méthode sur un matériau à défauts tel que le fer puddlé soulève une interrogation : quels sont les mécanismes responsables de la dissipation ? En effet, les concentrations de contraintes dans la matrice de fer autour des inclusions non-métalliques perturbent-elles les mesures de température sous sollicitations cycliques ? Engendrent-elles une dissipation supplémentaire ? Dans ce cas, la détermination empirique de la limite d'endurance à partir du comportement asymptotique de la courbe d'auto-échauffement est-elle pertinente ?

Les essais d'auto-échauffement étant relativement courts (environ une heure et demie par éprouvette), nous proposons d'analyser l'anisotropie du matériau sous chargements cycliques par cette méthode.

Les résultats des essais d'auto-échauffement sont présentés pour chacune des orienta-

tions choisies ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ ) dans les figures 5.39 à 5.43. Un bilan est proposé dans la figure 5.44. Ces essais concernent des éprouvettes de section  $50\text{mm}^2$  ( $5 \times 10\text{mm}^2$ ) (identiques à celles utilisées dans la caractérisation en traction monotone, figure 5.26(a)) sollicités à une fréquence de  $20\text{Hz}$  pour un rapport de charge  $R = -1$ . La même machine de traction-torsion-compression quatre colonnes (TEMA Concept) avec une cellule d'effort de  $\pm 100\text{kN}$  a été utilisée en tant que moyen de sollicitation. La température a été relevée à l'aide de trois thermocouples de type T (précision  $0,1\text{ K}$ ). Un thermocouple est installé sur l'éprouvette, les autres deux sur les mors supérieur et inférieur de la machine respectivement (voir figure 5.38). La température moyenne corrigée de l'éprouvette ( $\theta$ ) est obtenue par l'expression suivante :

$$\theta = T_{ep} - \frac{T_{ms} + T_{mi}}{2} \quad (5.2)$$

Où  $T_{ep}$  est la température de l'éprouvette  $T_{ms}$  la température du mors supérieur et  $T_{mi}$  la température du mors inférieur. L'intérêt d'un tel montage réside dans la prise en compte de l'évolution de la différence de température entre les mors de la machine lors de son fonctionnement. En effet, la température du mors inférieur (mobile) aura tendance à augmenter (principalement en début d'essai) car celui-ci est lié au vérin où l'huile circule. Cette configuration expérimentale à trois thermocouples permet donc de prendre en compte le comportement thermique des mors (Munier, 2012).

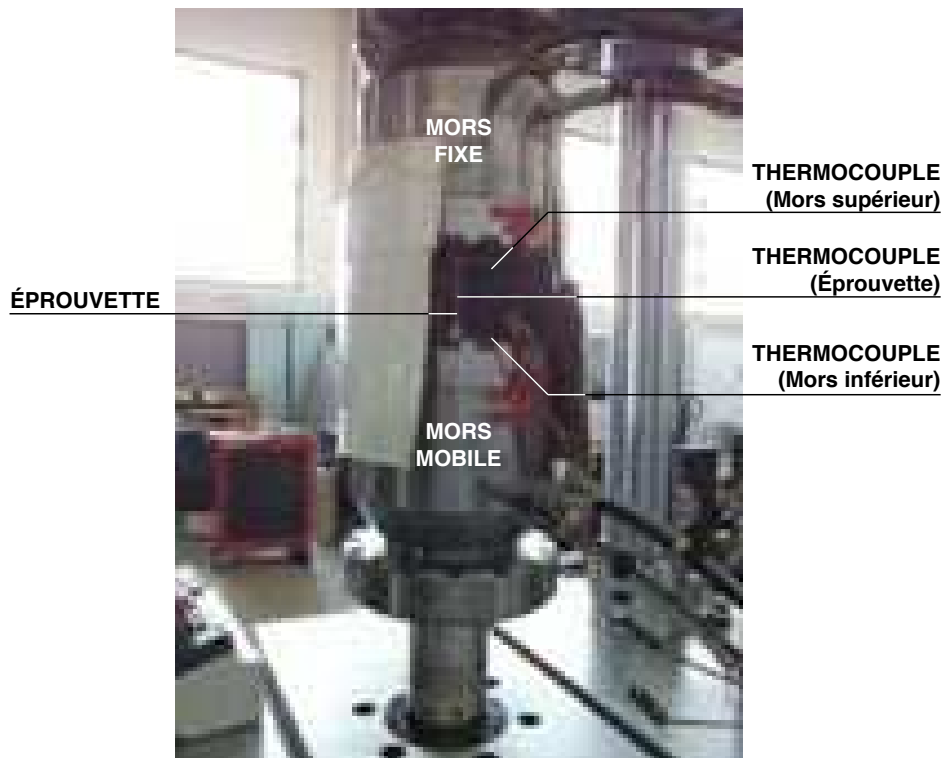
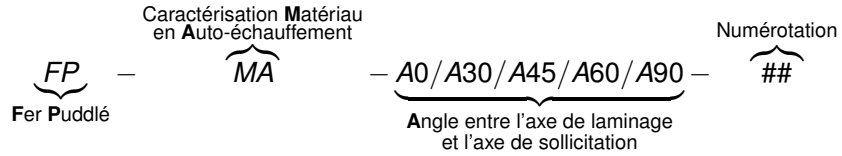


FIGURE 5.38 – Présentation du montage expérimental pour les essais d'auto-échauffement.

**Notation des éprouvettes**

Les éprouvettes de caractérisation matériau fabriquées en fer puddlé suivent l'appellation suivante :



La température  $\Delta\bar{\theta}$  représentée dans les courbes d'auto-échauffement suivantes correspond à la différence entre la température moyenne stable de l'éprouvette ( $\bar{\theta}$ ) atteinte par au bout de 6000 cycles (5 minutes de sollicitation) pour chaque palier de chargement ( $\sigma_a$ ) et la température moyenne de l'éprouvette 5 minutes après la fin du palier de sollicitation (état d'équilibre au repos).

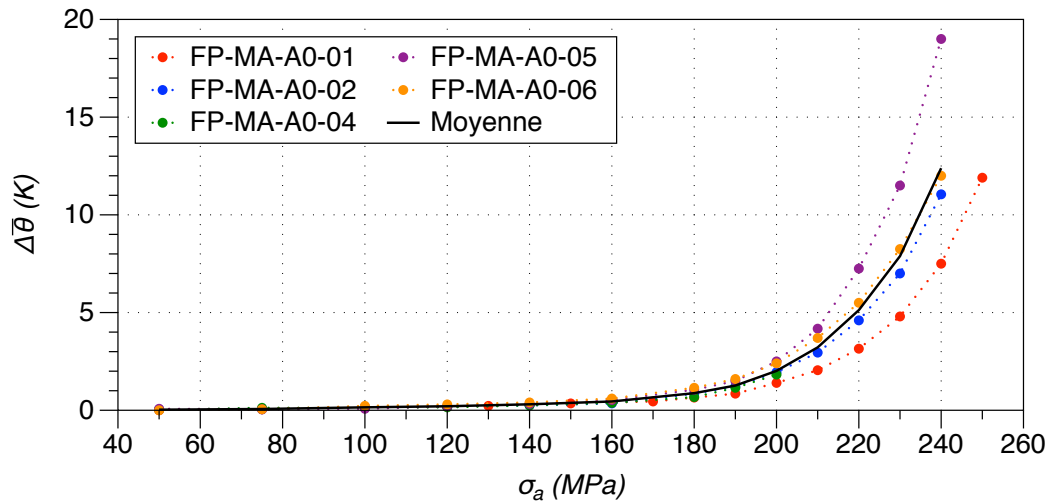


FIGURE 5.39 – Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à  $\alpha = 0^\circ$ .

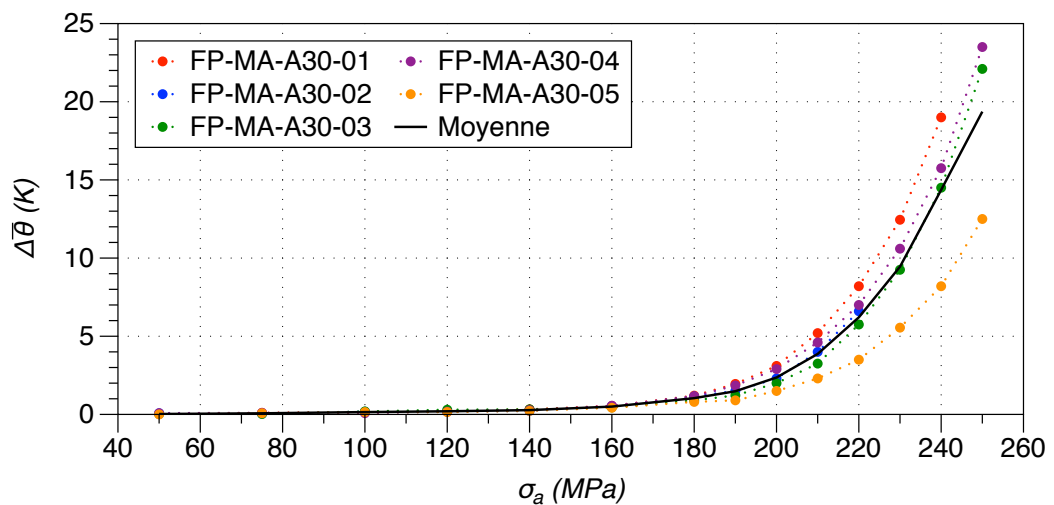
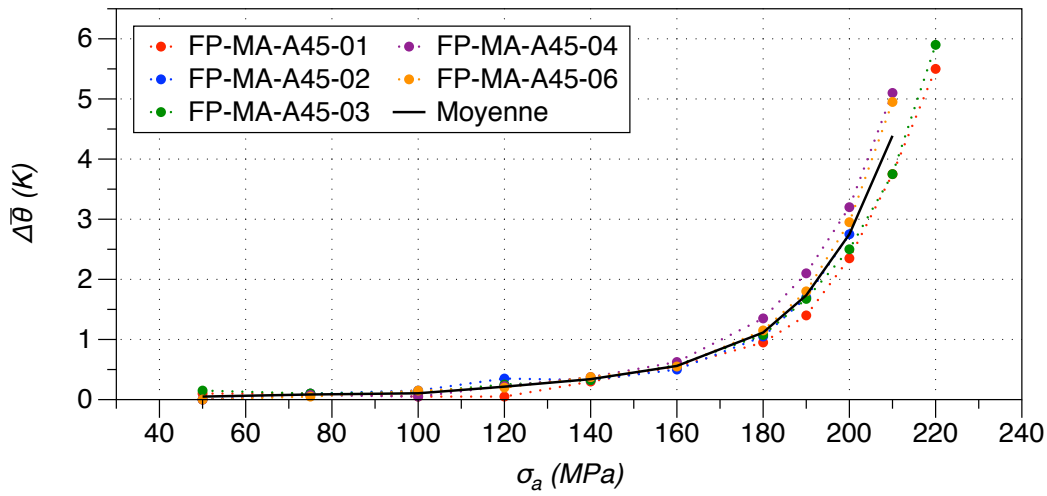
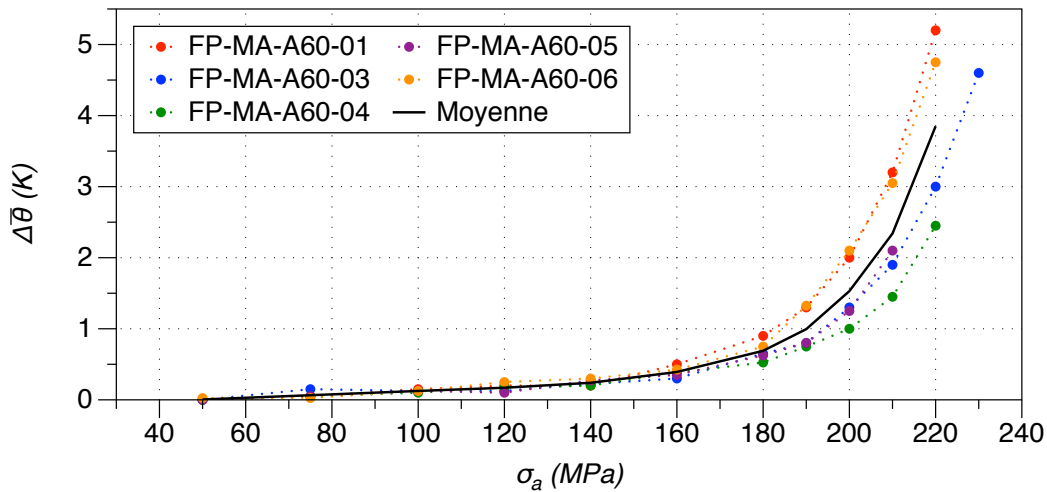
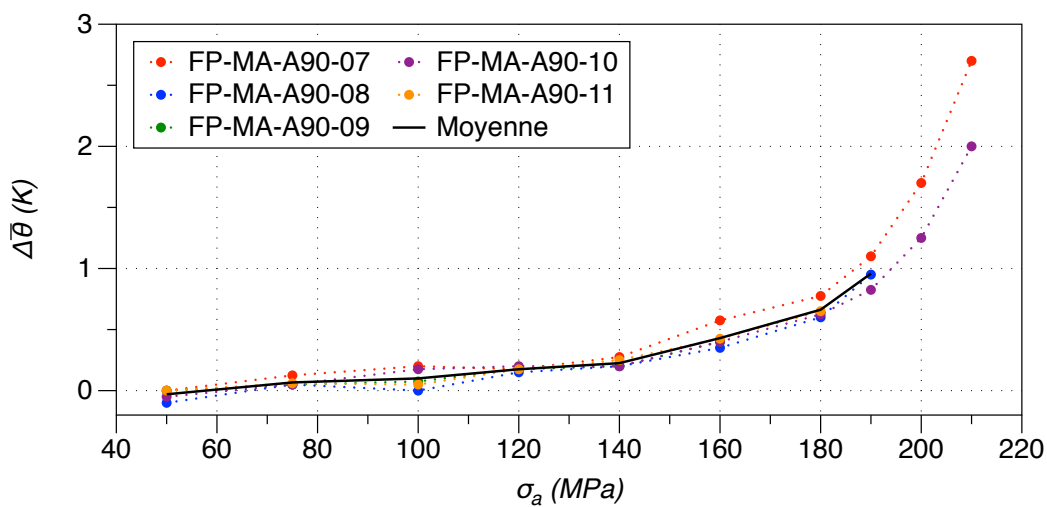


FIGURE 5.40 – Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à  $\alpha = 30^\circ$ .

FIGURE 5.41 – Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à  $\alpha = 45^\circ$ .FIGURE 5.42 – Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à  $\alpha = 60^\circ$ .FIGURE 5.43 – Essais d'auto-échauffement pour les éprouvettes à  $\alpha = 90^\circ$ .



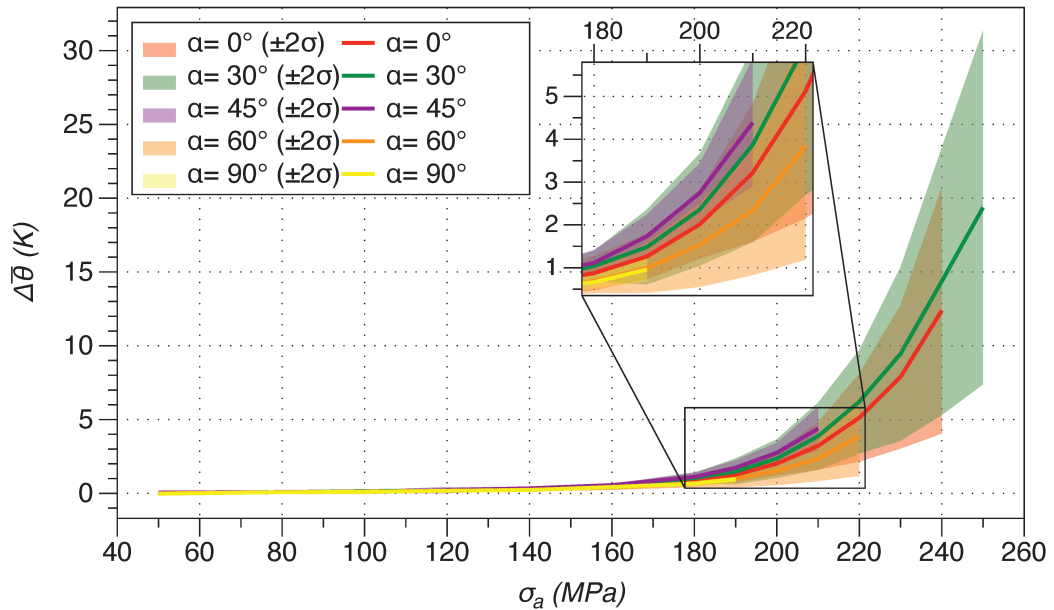


FIGURE 5.44 – Bilan des essais d'auto-échauffement. Mise en place des courbes moyennes de température pour chaque orientation avec superposition de  $\pm 2\sigma$ , où  $\sigma$  représente l'estimateur non-biaisé de l'écart type.

Ces résultats montrent, comme les propriétés sous chargement monotone, une réponse dispersive, quelle que soit l'orientation des inclusions. Alors que pour les métaux homogènes, la réponse est répétable (Munier, 2012), celle-ci ne l'est pas du tout pour un matériau à défauts tel que le fer puddlé. La superposition de  $\pm 2\sigma$  (où  $\sigma$  représente l'estimateur non biaisé de l'écart type) aux courbes moyennes (figure 5.44) montre bien la très grande dispersion de la température mesurée, quel que soit  $\alpha$ .

Nous observons également que les températures stabilisées maximales atteintes sont beaucoup plus élevées pour les valeurs faibles de  $\alpha$  (elles dépassent les 10K pour  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 30^\circ$ ) que pour les orientations supérieures ou égales à  $45^\circ$  (quelques K seulement). La méthode d'auto-échauffement permet donc d'identifier des comportements différents en fonction de l'angle  $\alpha$ .

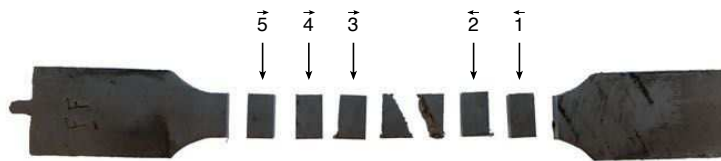
Cependant, l'interprétation des courbes est délicate car aucune des courbes tracées (quelque soit  $\alpha$ ) ne montre un comportement asymptotique (caractéristique essentielle dans la mise en place du protocole de dépouillement proposée par Luong (1995)). Nous ne pouvons donc pas déterminer la limite d'endurance moyenne du matériau en appliquant cette méthode. Par ailleurs, les mesures de température étant très proches les unes des autres pour des faibles amplitudes de contrainte (avant rupture des éprouvettes à  $\alpha$  élevé), il est impossible de distinguer les contributions individuelles des éventuels mécanismes influençant l'endommagement de l'éprouvette sous sollicitations cycliques (*e. g.* micro-plasticité au sein de la matrice de fer vs. micro-plasticité induite par les singularités à proximité des inclusions).

L'analyse des courbes moyennes d'auto-échauffement pour chaque orientation permet néanmoins de faire une observation importante : plus la valeur de  $\alpha$  est élevée, plus basse est l'amplitude maximale atteinte (courbes tronquées). Il est donc possible que la dissipation des éprouvettes (représentée à l'aide des courbes d'auto-échauffement) puisse

nous donner des informations sur la population des inclusions pour chaque éprouvette testée.

Dans le but de montrer le lien entre les courbes d'auto-échauffement et la population d'inclusions de chaque éprouvette, nous avons développé une application Python dédiée à l'analyse géométrique de cette population.

Pour cela, chaque éprouvette rompue a été découpée dans le but de récupérer cinq sections<sup>11</sup>. Chacune des sections a été polie afin d'être observée au microscope optique. la figure 5.45 présente l'exemple d'une éprouvette rompue puis découpée avec l'enrobage dédié au polissage (papier au carbure de Silicium jusqu'au grade 4000).



(a) Exemple de découpe d'une éprouvette rompue.



(b) Échantillon pour étude microscopique.

FIGURE 5.45 – Préparation d'échantillon de microscopie.

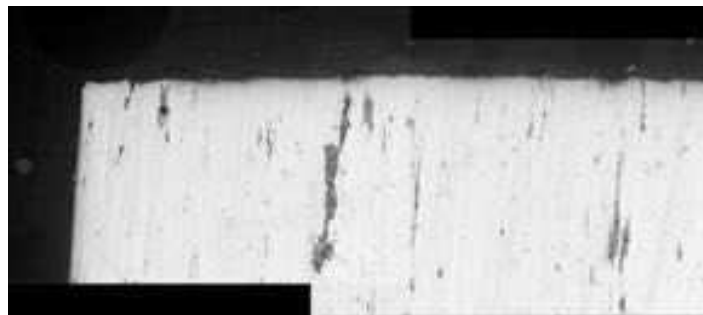
Chaque section a été photographiée par microscopie optique afin d'avoir une résolution suffisante (l'aire des inclusions les plus petites mesurées étant de  $6\mu m^2$ ). Entre 40 et 44 photographies ont été nécessaires dans la reconstruction de chacune des sections droites observées. C'est à dire qu'entre 200 et 220 photographies ont été prises par chacune des éprouvettes analysées. Le développement d'une application *ad hoc* permettant l'assemblage automatique des photographies a été nécessaire. Cette assemblage se fait en trois étapes : les points caractéristiques communs entre les images sont identifiés dans un premier temps. Ensuite, la transformation géométrique 2D nécessaire est calculée (matrices de rotation et translation). Finalement, la matrice de transformation est appliquée à l'image concernée et une nouvelle image est reconstituée. Le principe de fonctionnement de cette application est montré à l'aide d'un exemple dans la figure 5.46.

L'application Python permet par ailleurs de s'adapter à tout type de photographie (micro ou macroscopique). Elle est donc utilisable pour d'autres fers puddlés, y compris ceux dont les inclusions sont de taille centimétrique (ce qui apparait lors du « soudage » de deux lopins de fer).

11. A priori, la dissipation thermique relevée au cours des essais s'effectue en tout point de la zone utile de l'éprouvette.



(a) Identification des points caractéristiques communs entre les deux images (identification des vecteurs position)



(b) Application de la matrice de transformation géométrique et reconstitution de l'image

FIGURE 5.46 – Exemple de reconstitution d'une micrographie à partir de deux images individuelles.

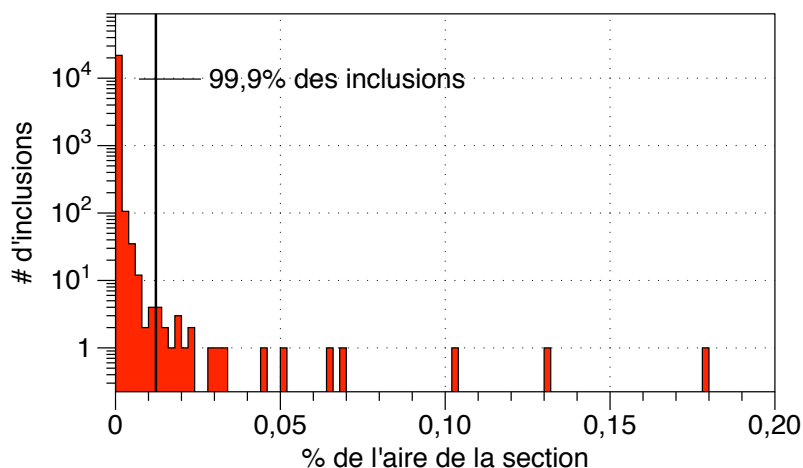
Une fois les photographies assemblées, il est possible de procéder au comptage des inclusions pour connaître la population d'inclusions pour chacune des sections étudiées. Trois exemples sont présentés dans la figure 5.47 : les figures 5.47(a) et 5.47(b) correspondent à la quatrième section de l'éprouvette FP-MA-A0-05, l'exemple des figures 5.47(c) et 5.47(d) correspond à la cinquième section de l'éprouvette FP-MA-A45-03 et l'exemple des figures 5.47(e) et 5.47(f) correspond à la troisième section de l'éprouvette FP-MA-A90-07.

Ces trois exemples montrent des populations différentes, avec davantage de « grosses » inclusions pour les éprouvettes à  $\alpha$  élevé. Notons que pour toutes les sections analysées la grande majorité des inclusions (99,9%) correspond à des aires très petites ( $< 0,01\%$  de l'aire totale de la section droite).

Afin de relier la population d'inclusions au comportement du fer puddlé sous sollicitations cycliques, toutes les sections découpées et polies ont été analysées (cinq par orientation). L'ensemble des résultats est reporté dans les diagrammes de la figure 5.48. Le diagramme de la figure 5.48(a) montre que la moyenne de l'aire cumulée de la totalité des inclusions reste quasiment constante quelque soit la valeur de  $\alpha$ . Ce résultat pourrait expliquer la dissipation thermique semblable, quelque soit  $\alpha$  mesurée pour les plus faibles niveaux de contrainte. En effet, jusqu'à  $\sigma_a = 190\text{MPa}$  (voir figure 5.44) toutes les températures mesurées sont comprises entre 0,5K et 1,5K. Pour ces contraintes, la dissipation thermique peut être attribuée à de multiples mécanismes dissipatifs concurrents au sein de l'éprouvette (l'apparition progressive de la micro-plasticité au sein de la matrice et celle induite par les singularités autour des inclusions). Au delà de cette amplitude de contrainte les courbes d'auto-échauffement sont incomplètes, mettant en évidence la fragilité des éprouvettes aux valeurs de  $\alpha$  les plus élevées.



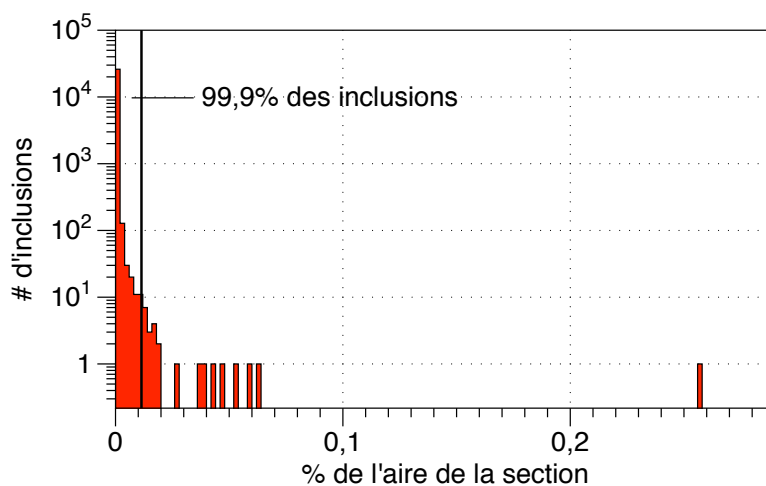
(a) Quatrième section de FP-MA-A0-05.



(b) Histogramme (non normalisé) de la population des inclusions de la quatrième section de FP-MA-A0-05.



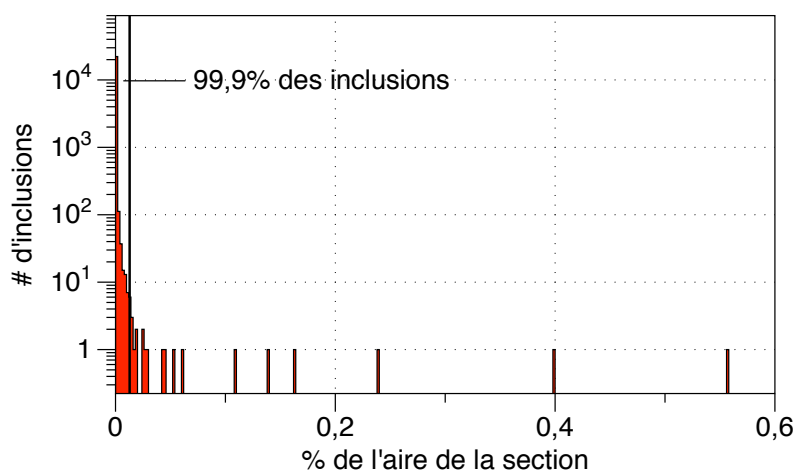
(c) Cinquième section de FP-MA-A45-03.



(d) Histogramme (non normalisé) de la population des inclusions de la cinquième section de FP-MA-A45-03.



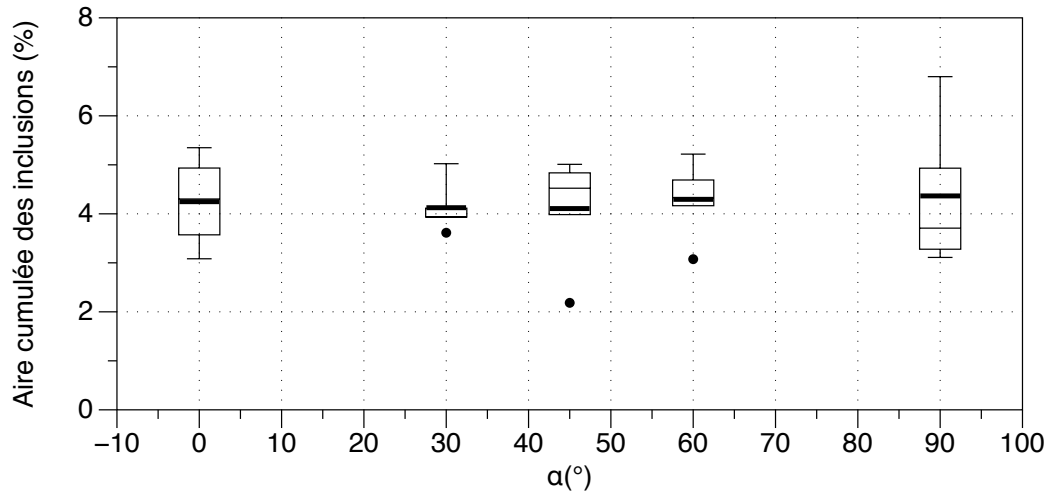
(e) Troisième section de FP-MA-A90-07.



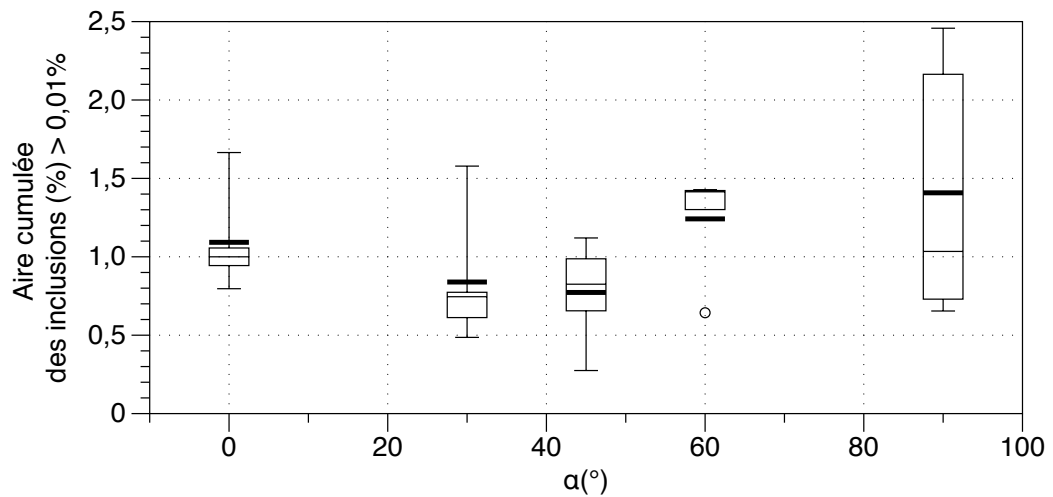
(f) Histogramme (non normalisé) de la population des inclusions de la troisième section de FP-MA-A90-07.

FIGURE 5.47 – Exemples de populations d'inclusions sur des sections provenant des éprouvettes à 0°, 45° et 90°.

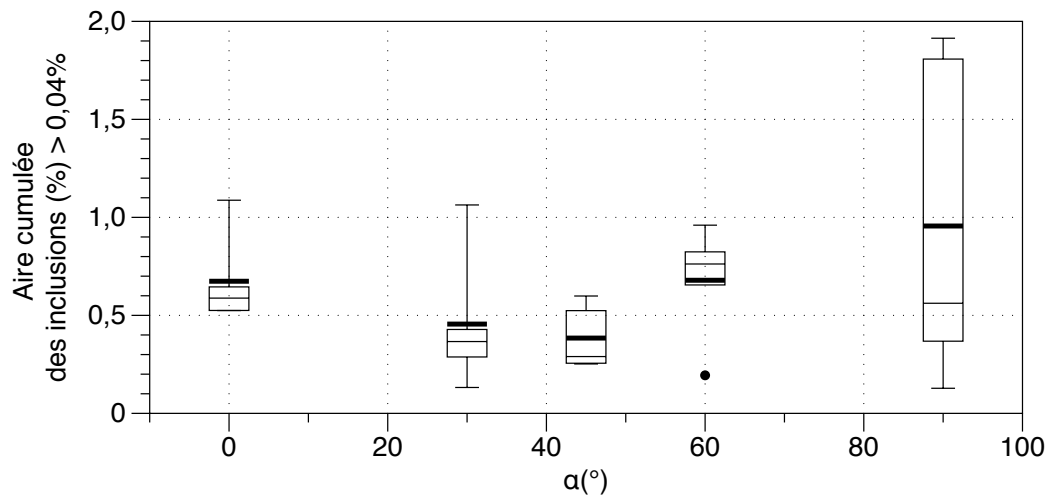
## 5. CARACTÉRISATION DES FERS PUDDLÉS



(a) Aire cumulée des inclusions (% de l'aire totale de la section droite) selon l'orientation de prélèvement de l'éprouvette ( $\alpha$ ).



(b) Aire cumulée des inclusions à aire individuelle  $> 0,01\%$  (% de l'aire totale de la section droite) selon l'orientation de prélèvement de l'éprouvette ( $\alpha$ ).



(c) Aire cumulée des inclusions à aire individuelle  $> 0,04\%$  (% de l'aire totale de la section droite) selon l'orientation de prélèvement de l'éprouvette ( $\alpha$ ).

FIGURE 5.48 – Analyse de la population d'inclusions en fonction de l'angle  $\alpha$ .

La fragilité est ainsi identifiée par la présence de « grosses » inclusions (Gallegos Mayorga *et al.*, 2015). Ces dernières réduisent l'aire de la section droite transmettant l'effort et provoquent des concentrations de contraintes. Les figures 5.48(b) et 5.48(c) montrent également la difficulté de définition d'une « taille seuil » susceptible de fragiliser de manière critique le matériau (ceci étant sans doute dépendant de la taille de l'éprouvette concernée). Nous observons néanmoins que pour les inclusions à aire individuelle supérieur à 0,01% de l'aire totale de la section étudiée (c'est à dire  $5000\mu m^2$  environ), l'aire cumulée est plus importante pour les éprouvettes à plus forte valeurs de  $\alpha$ . Cette tendance est d'autant plus marquée pour le cas des inclusions à aire individuelle supérieur à 0,04%. Mais il suffit d'une seule inclusion de très grande taille pour causer une rupture fragile. Une telle inclusion peut ne pas être répertoriée dans les distributions analysées compte tenu de la quantité de surfaces observées par éprouvette. Cela rend l'interprétation des données difficiles.

Cependant, nous pouvons conclure que plus élevée est la valeur de  $\alpha$  plus l'éprouvette observée est susceptible d'être riche en inclusions de plus grosse taille, et donc, plus susceptible de rompre à des niveaux de dissipations faibles (ces niveaux sont liés à des bas niveaux de contraintes de sollicitation). Ceci explique que les courbes sont d'autant plus incomplètes que la valeur de  $\alpha$  est élevée.

La population d'inclusions, et en particulier celle des grosses inclusions, est donc responsable de la non-applicabilité de la méthode d'auto-échauffement au fer puddlé du Pont sur l'Adour. Cette conclusion corrobore les difficultés rencontrées dans l'application de la méthode pour d'autres matériaux à défauts (acier forgé 25MnCRSIVB6) (Pessard, 2009; Pessard *et al.*, 2011).

Cependant, même si cette méthode de caractérisation ne permet pas d'identifier la limite d'endurance moyenne pour le fer puddlé du Pont sur l'Adour en fonction du paramètre  $\alpha$ , elle montre que pour ce type de fer, des phénomènes dissipatifs sont présents quand un chargement cyclique lui est appliqué. Dans le cas où l'apparition de micro plasticité est responsable de la dissipation observée lors des essais d'auto-échauffement, des stries de fatigue doivent être visibles lors de l'inspection des faciès de rupture.

Lors de l'observation des faciès de rupture au MEB nous avons en effet pu identifier des stries de fatigue, notamment à proximité des inclusions de plus petite taille. La figure 5.49 montre deux exemples des stries de fatigue observées.

Le deuxième exemple (figure 5.49(b)) souligne par ailleurs la complexité des faciès de rupture sous sollicitations cycliques des fers puddlés. Cette image montre en effet trois modes de rupture rencontrés dans les métaux (figure 5.50) :

- La rupture ductile, mise en évidence par les cupules de ductilité.
- La rupture fragile par clivage.
- La fatigue mise en évidence par les stries caractéristiques.

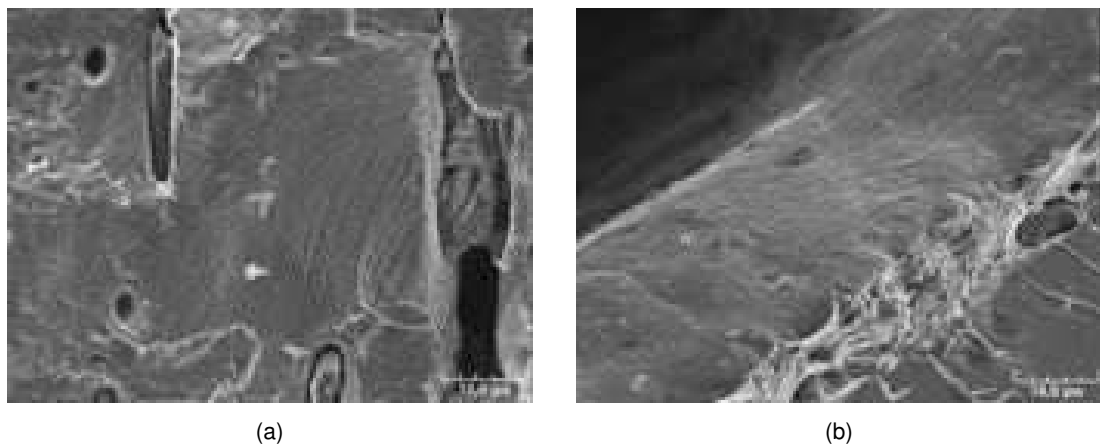


FIGURE 5.49 – Observation de stries de fatigue sur des faciès de rupture d'éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

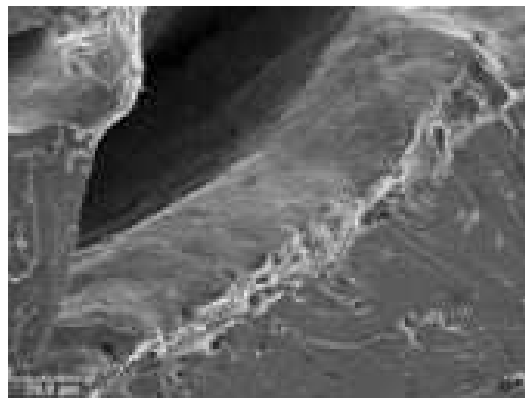


FIGURE 5.50 – Observation simultanée de trois modes de rupture sur un faciès de rupture d'une éprouvette en fer puddlé du Pont sur l'Adour : fragilité (clivage), ductilité (cupules) et fatigue (stries).

### Bilan

Les essais de caractérisation sous sollicitations cycliques du fer puddlé du Pont sur l'Adour mettent en évidence les points suivants :

- Concernant la caractérisation dite « classique » :  
Ce type de caractérisation du comportement en fatigue a été mise en place pour des éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour prélevées suivant trois orientations différentes  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$  et  $90^\circ$ . Ces expériences montrent un comportement très dispersif est particulièrement anisotrope pour les amplitudes de contrainte les plus faibles. Dans les domaines de grand nombre de cycles, cette différence est moins marquée.
- Concernant la caractérisation dite « rapide » :  
Bien que très utile pour la caractérisation rapide des matériaux homogènes, la méthode reste moins efficace lors de son application à des matériaux hétérogènes tels que les fers puddlés. Les expériences que nous avons menées (voir figures 5.44 et 5.48) nous permettent de faire les observations suivantes :

- Le changement dans la ductilité du fer (lié à l'orientation des inclusions non-métalliques) est à la source de la troncature des courbes d'auto-échauffement dans lesquelles le comportement asymptotique, nécessaire pour l'identification de la limite d'endurance par la méthode empirique décrite en §1.2.2.5, est absent.
- Cette fragilité présente pour les éprouvettes à valeurs de  $\alpha$  plus élevées est associée à la présence d'inclusions de grande taille dans la section utile de l'éprouvette.

## 5.3 Caractérisation microscopique

### 5.3.1 Différentes tailles et formes d'inclusions, microscopie optique

Nous avons montré que les caractéristiques mécaniques des fers puddlés étaient très dispersives. Cette dispersion traduit l'hétérogénéité du matériau, caractérisé par la population d'inclusions non-métalliques. Comme l'analyse de cette population le montre (figure 5.47), les petites inclusions sont très nombreuses ; certaines inclusions, de taille millimétrique, sont responsables de la fragilité du métal.

Comme le montre la figure 5.51, les inclusions sont allongées dans le sens du laminage. Les petites inclusions sont présentes à la fois au niveau des joints de grains et dans les grains de fer. Celles-ci participent à la dissipation thermique observée sous chargement cyclique (observation de stries de fatigue, voir figure 5.49).

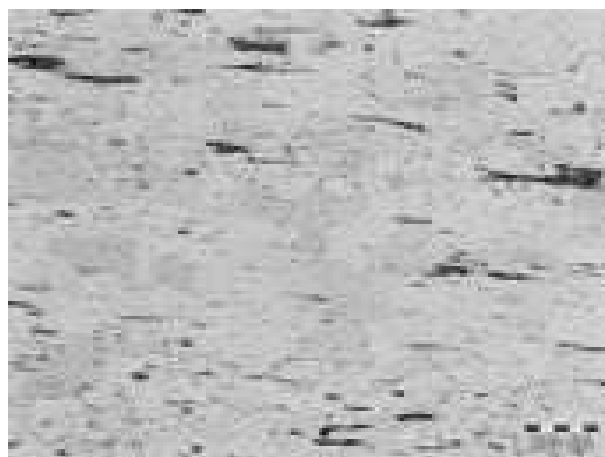
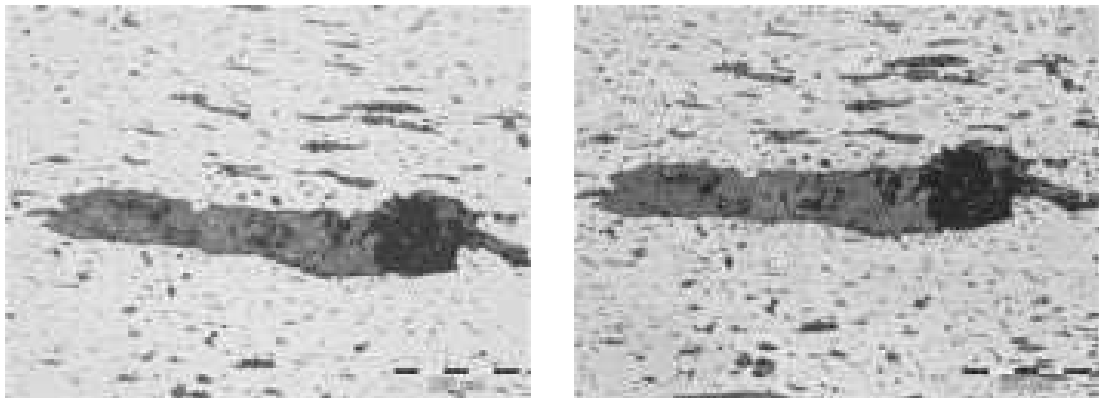


FIGURE 5.51 – Microstructure du fer puddlé du Pont sur l'Adour après attaque au Nital.

Certaines régions sont particulièrement riches en inclusions. Les micrographies de la figure 5.52 montrent par exemple une zone comportant une grosse inclusion allongée entourée de plus petites inclusions. Cette exemple montre la difficulté d'une attaque au Nital, qui peut révéler les inclusions de couches inférieures, retirées par l'acide.

D'autres régions permettent de mettre en évidence les strates issues du puddlage. Les inclusions de la figure 5.53 suivante montrent en effet les différents « plis » issus du brassage mécanique.

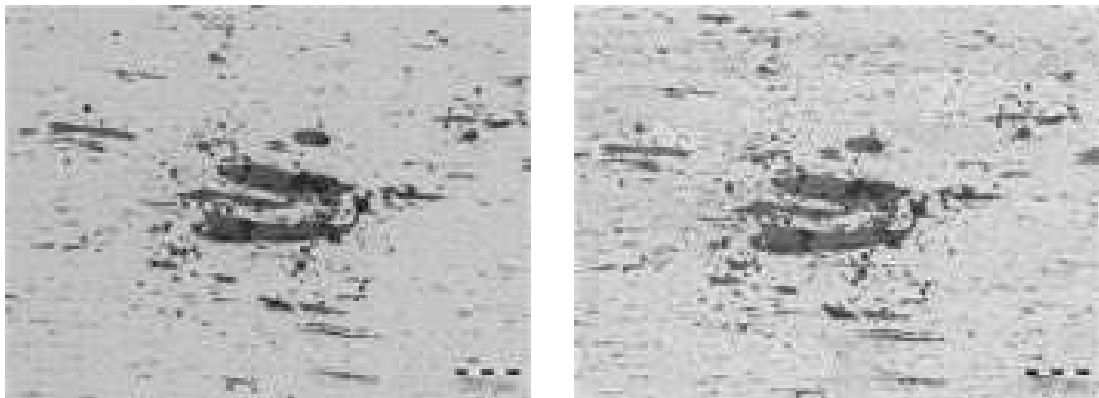




(a) Micrographie de zone non attaquée.

(b) Micrographie de zone attaquée au Nital 2%.

FIGURE 5.52 – Micrographies du fer puddlé provenant du Pont sur l’Adour. Voisinage d’une grosse inclusion.



(a) Micrographie de zone non attaquée.

(b) Micrographie de zone attaquée au Nital 2%.

FIGURE 5.53 – Micrographies du fer puddlé provenant du Pont sur l’Adour. Visualisation des « plis » du fer.

Dans cette figure 5.53, les inclusions centrales forment un cluster (les inclusions se rejoignent dans certains cas) ce qui rend délicat toute modélisation micro-mécanique du comportement d’une inclusion dans la matrice de fer. Les inclusions sont en effet de taille et de forme très diverses.

La figure 5.54 montre une reconstruction complète d’une section de  $160\text{mm}^2$  ( $8 \times 20\text{mm}^2$ ) qui montre une grande variabilité entre la taille et la géométrie des inclusions <sup>12</sup>.

Les micrographies des figures 5.52 et 5.53 montrent également différents niveaux de gris dans les inclusions. Celles-ci ont en effet de compositions potentiellement différentes qui peuvent aider à analyser la répartition des éléments d’addition (voir §5.1.1.2)

### 5.3.2 Répartition des éléments d’addition, analyse MEB-EDX

Le MEB, équipé d’un système de microanalyse par Énergie Dispersive de Rayons X (EDX) permet de connaître les éléments présents dans la zone d’étude. Cette analyse ne

12. Cette mosaïque très fine d’une section de fer puddlé a été réalisée avec le microscope confocal ZEISS LSM780 du service commun PIMM-DRX de l’UBO, muni d’un objectif « matériau » acquis très récemment.

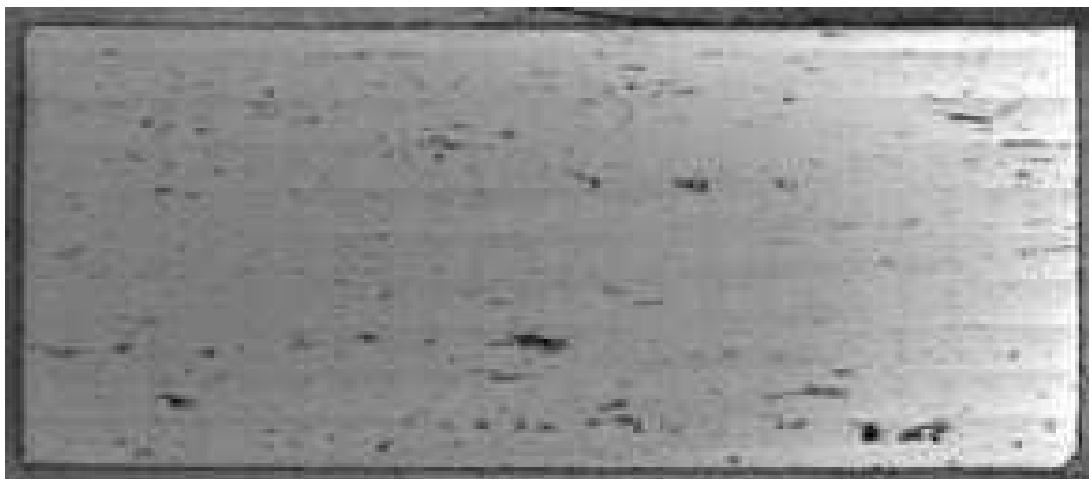


FIGURE 5.54 – Reconstruction en haute résolution d'une section droite provenant de l'éprouvette FP-MT-S160-03.

donne pas d'information précise sur la composition des inclusions mais permet de savoir si un élément est présent ou non.

La région étudiée dans la figure 5.55 montre par exemple une matrice riche en Fer et des inclusions peu riches en Fer (figure 5.55(a)). Cet exemple montre ainsi que l'inclusion étudiée contient du Phosphore, de l'Oxygène, du Silicium et du Carbone. La matrice de fer est en revanche pauvre en Carbone, Oxygène et Silicium et contient des traces de Phosphore et Soufre. Ces observations corroborent les analyses chimiques proposées en §5.1.1.2, même si elles ne concernent qu'une petite zone comprenant une inclusion.

La composition de la zone étudiée par microanalyse X est présentée dans la table 5.14.

TABLE 5.14 – Composition de la zone de traction monotone étudiée par microanalyse EDX.

Élément	% massique	% atomique
<i>Fer (Fe)</i>	76,86	46,49
<i>Carbone (C)</i>	12,97	38,48
<i>Oxygène (O)</i>	5,48	11,58
<i>Phosphore (P)</i>	1,23	1,34
<i>Silicium (Si)</i>	2,49	2,99
<i>Soufre (S)</i>	0,46	0,48

Même si la composition précise des inclusions n'est pas connue, l'analyse EDX permet de connaître les éléments qui les constituent. On retrouve ainsi les constituants soulignés par Sauveur (1938) et McCowan *et al.* (2011) qui indiquent que les inclusions sont riches en oxydes de fer, Silicium et Phosphore.

Comme souligné dans le chapitre 3, le Phosphore joue un rôle particulier dans les fers puddlés : il participe à l'hétérogénéité du matériau.

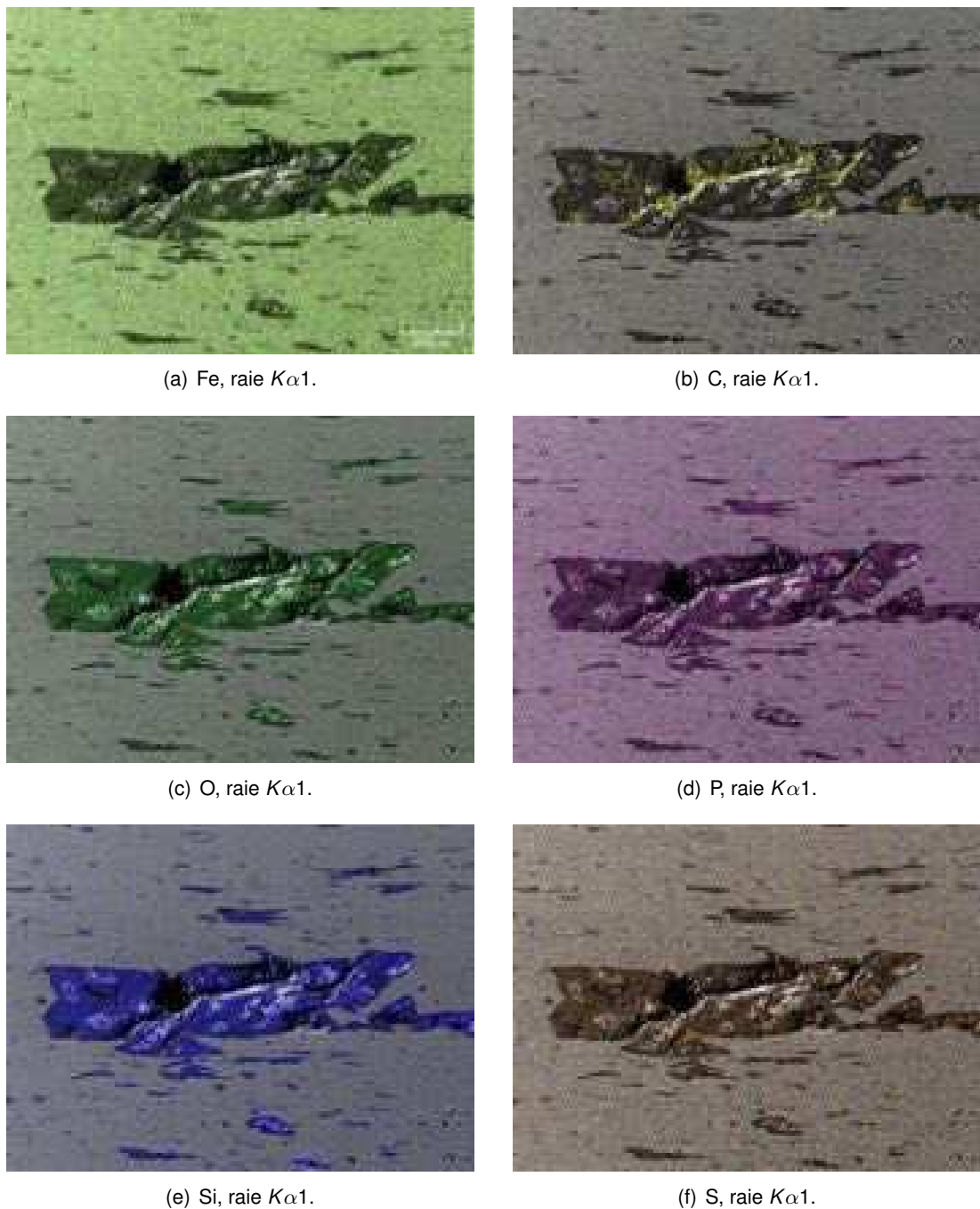
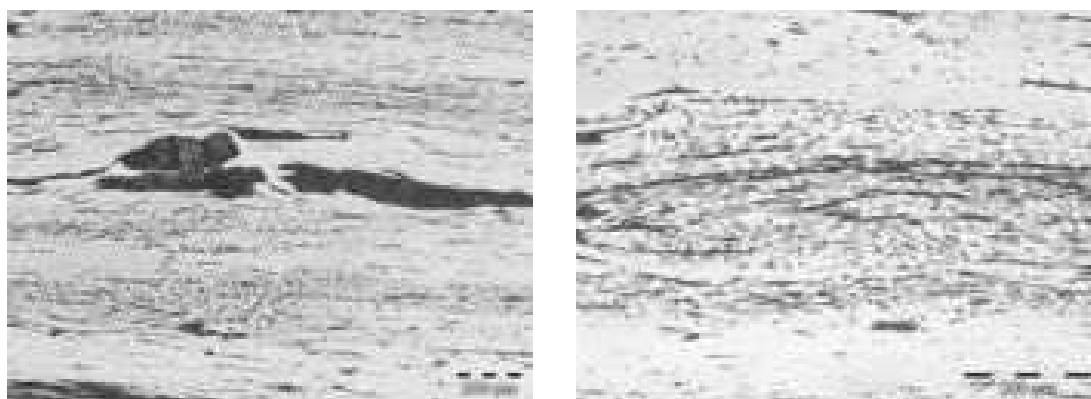


FIGURE 5.55 – Analyse MEB-EDX d'une région comportant une grosse inclusion fracturée, éprouvette FP-MT-S160-03.

### 5.3.3 Des bandes de Phosphore, réactif d'Oberhoffer

À l'aide d'une attaque au réactif d'Oberhoffer (voir chapitre 3), nous mettons en évidence les bandes de Phosphore (les zones sombres sont pauvres en Phosphore) et les structures « fantômes ». La figure 5.56 monte ces deux caractéristiques.

La micrographie de la figure 5.56(a) souligne par ailleurs que les grosses inclusions du fer du pont sur l'Adour n'absorbent pas le Phosphore de la matrice ferritique. Cette observation complète l'analyse EDX (sur grosse inclusion) où le Phosphore était détecté



(a) Mise en évidence de l'alternance de bandes riches (claires) et pauvres (sombres) en Phosphore dans le fer puddlé.

(b) Mise en évidence des structures « fantômes ».

FIGURE 5.56 – Micrographie de zone attaquée au réactif d'Oberhoffer. Fer puddlé du Pont sur l'Adour.

à la fois dans la matrice et dans les inclusions, mais sans marquer clairement de zones déphosphorées. Dans cet exemple, c'est surtout la matrice ferritique qui est phosphoreuse. Autour de certaines petites inclusions (dont la composition doit être différente), certaines zones déphosphorées sont également bien visibles. Ce phénomène de déphosphoration autour des inclusions a déjà été montré pour d'autres fers puddlés (voir chapitre 3) mais il n'est observé ici que pour les petites inclusions.

Le fer puddlé du pont sur l'Adour est donc doublement hétérogène :

- Par la présence d'inclusions non-métalliques riches en oxydes.
- Par une répartition hétérogène du Phosphore dans la matrice de fer.

### 5.3.4 Bilan

L'analyse microscopique de fer puddlé du Pont sur l'Adour montre certaines caractéristiques qui contribuent à expliquer les résultats de la caractérisation mécanique.

Ce fer puddlé contient en effet :

- Des grosses inclusions responsables de la fragilité.
- Des petites inclusions qui contribuent à l'apparition de microplasticité sous sollicitations cycliques.
- Des formes d'inclusions différentes rendant délicate une modélisation micro-mécanique de ce comportement.
- Des tailles de grains différentes.
- Une composition variable selon la région analysée qui participe à augmenter l'hétérogénéité du matériau (notamment le Phosphore).

## 5.4 Conclusion

Différentes campagnes expérimentales ont permis l'étude du comportement mécanique (sous chargements monotones et cycliques) et de la microstructure du fer puddlé du Pont

sur l'Adour.

Les résultats de la caractérisation sont dispersifs par la présence des inclusions et nous avons montré la fragilité du matériau.

Cette dispersion a été observée sur toutes les campagnes expérimentales mises en œuvre :

- Sous chargements monotones (étude de l'effet de volume, étude de l'anisotropie).
- Sous chargements cycliques (essais de fatigue classique, essais d'auto-échauffement).

Nous avons désormais des compléments d'information importants sur la caractérisation des fers, notamment sur les estimations de la dispersion des résultats (estimateur non-biaisé de l'écart type et écart inter-quartile). Ces données complètent celles de la littérature et sont essentielles dans l'étude du dimensionnement des ouvrages d'art. Elles sont donc importantes pour les campagnes de caractérisation menées sur mini-structure et présentées dans ce manuscrit. Le chapitre 4 a présenté les structures étudiées dans la suite du document : plaques percées, assemblages avec tige à haute limite élastique et assemblages rivetés. Le chapitre suivant portera sur les chargements quasi-statiques et le chapitre 7 sera dédié au comportement de ces mini-structures sous sollicitations cycliques.

# Caractérisation mécanique de détails constructifs simples sous chargements quasi-statiques

*Dans le chapitre précédent nous avons caractérisé le fer ancien provenant du Pont sur l'Adour. Nous avons évalué son comportement sous chargements quasi-statiques et sous chargements cycliques (fatigue). Cette base de données de caractéristiques matériau est maintenant utilisée dans la conception et l'analyse des campagnes expérimentales visant l'observation du comportement mécanique des géométries plus complexes (détails constructifs).*

*Ce sixième chapitre est consacré aux expériences de caractérisation mécanique sous chargements quasi-statiques pour les détails constructifs décrits dans le quatrième chapitre (stratégie expérimentale) : une plaque percée et alésée, un assemblage en double recouvrement avec tige à haute limite élastique, et un assemblage riveté à chaud en double recouvrement. L'ensemble des géométries a été réalisé en fer puddlé et en acier S235 dans le but d'observer, en plus des phénomènes propres à chaque configuration géométrique, l'effet du matériau.*

## Contenu

---

6.1	La corrélation d'images comme outil de caractérisation . . . . .	137
6.2	Identification des scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté . . . .	140
6.3	Caractérisation de la raideur d'un assemblage riveté . . . . .	157
6.4	Conclusion . . . . .	165

---



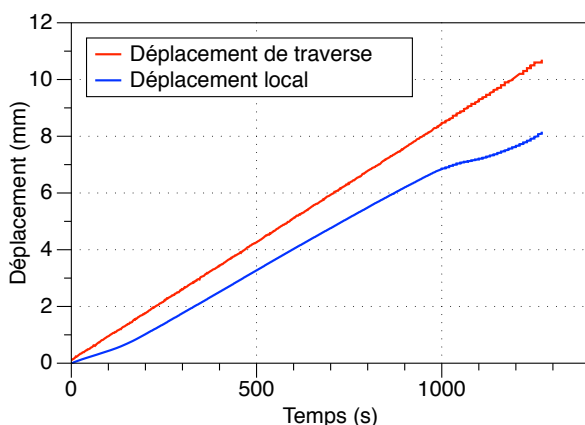
Dans les chapitres 2 et 4 nous avons soulevé les difficultés liées à la compréhension fine du comportement mécanique des assemblages rivetés à chaud. En effet, depuis les premières recherches réalisées sur ce sujet au XIX<sup>ème</sup> siècle, les moyens expérimentaux de sollicitation et d'observation ont beaucoup évolué.

Parmi les méthodes modernes d'observation, la mesure de champs de déplacement par corrélation d'images offre un intérêt certain. Cette technique présentée dans la section suivante nous permet en effet d'avoir accès localement à des grandeurs physiques sur des géométries complexes.

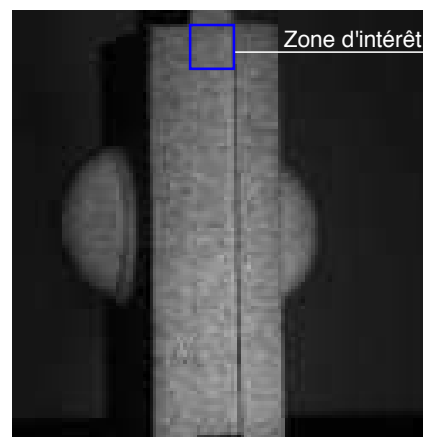
## 6.1 La corrélation d'images comme outil de caractérisation

Les essais de traction décrits et analysés au chapitre précédent portaient sur la caractérisation des matériaux. Un extensomètre a été utilisé pour mesurer la déformation homogène dans la partie utile des éprouvettes, en fonction de l'effort appliqué.

Dans les cas d'essais sur détails constructifs simples tels que ceux qui ont été introduits au chapitre 4, la déformation induite par une sollicitation mécanique n'est plus homogène, elle dépendra de la zone analysée. Les essais de traction que nous réalisons, pilotés en déplacement de traverse, nous permettent uniquement d'avoir accès à cette grandeur physique à travers des capteurs installés directement sur la machine universelle. Cependant, ce déplacement de traverse prend en compte la rigidité de la machine ( $k_{machine}$ ) et celle de l'éprouvette ( $k_{épreuve}$ ), plus faible. Ce rapport de rigidité  $k_{machine}/k_{épreuve}$  n'est pas négligeable et la mesure de déplacement de traverse n'est donc pas compatible avec une mesure locale du champ de déplacement au niveau de l'éprouvette. Les systèmes d'analyse basés sur la corrélation d'images permettent de s'affranchir de la rigidité de la machine et de ne s'intéresser donc qu'aux changements locaux du champ de déplacement (de Crevoisier *et al.*, 2012; Bidaud, 2014; Mauroux, 2011; David, 2014). L'exemple de la figure 6.1 présente cette différence importante entre le déplacement de traverse et le déplacement d'une zone d'une éprouvette déterminée par corrélation d'images.



(a) Évolution des mesures de déplacement dans le temps.



(b) Zone d'intérêt (carré bleu).

FIGURE 6.1 – Mise en évidence de la différence entre les mesures de déplacement de traverse (prélevées par la machine de traction) et celles du déplacement local sur une éprouvette (déplacement moyen de la zone d'intérêt).

Développée au début des années 80, la corrélation d'images 2D repose sur un algo-



rithme qui consiste à appairer successivement des points dans deux images en procédant point par point (David, 2014). L'image suivante décrit ce principe, après décomposition en niveaux de gris.

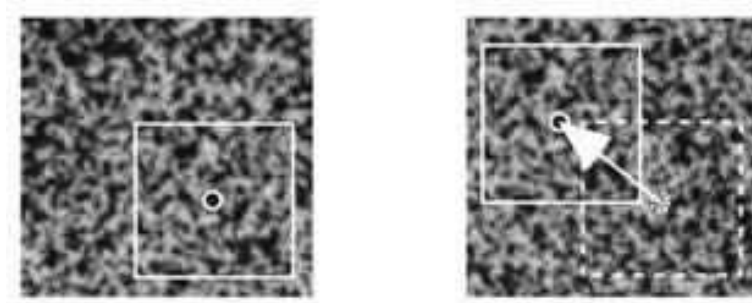


FIGURE 6.2 – Définition d'une zone d'intérêt (region of interest ROI) dans l'image de l'objet de l'état initial (à gauche) et dans l'image de l'objet après déformation (à droite) d'après Périé et al. (2002).

Des nombreux paramètres conditionnent les erreurs de mesure (David, 2014) :

- Le bruit présent dans l'image.
- La taille et la qualité du mouchetis utilisé pour suivre le mouvement.
- La taille de la zone d'intérêt (fenêtre de corrélation).
- La fonction de forme décrivant cette zone d'intérêt.
- La fonction d'interpolation en niveaux de gris.
- La distorsion des images par les objectifs.

Compte tenu de ces nombreuses sources potentielles d'erreur et de la précision que nous souhaitons dans nos mesures (les déplacements relatifs entre éléments de l'assemblage sont supposés très faibles, d'autant plus qu'ils sont liés à un phénomène d'adhérence) ainsi que des moyens à notre disposition nous avons utilisé un système de mesure de « stereo-corrélation » d'images 5M de la société GOM muni de son logiciel de traitement ARAMIS. Ce type de système nous permet de reconstruire le comportement d'une surface en trois dimensions avec une précision de 0,005% (mesure de déformation) (Société GOM, 2016).

### 6.1.1 Système de corrélation GOM - ARAMIS

Le principe de base de ce système est le même que l'exemple en deux dimensions montré dans la section précédente ; la différence majeure réside dans l'utilisation de deux caméras à la place d'une seule (stereovision). Ceci nous permet de mesurer le champ de déplacement en trois dimensions d'une pièce quelconque en suivant le mouvement des motifs aléatoirement générés sur sa surface. La figure suivante présente un exemple de mouchetis (motif aléatoire) réalisé sur une éprouvette en acier par application d'une base de peinture blanche suivie de l'aspersion des particules de graphite (aérosol).

Le système utilisé comprend deux caméras, deux sources lumineuses (polarisées), ainsi qu'un ordinateur muni des logiciels d'acquisition et de post-traitement des données. L'ensemble du dispositif expérimental utilisé pendant les campagnes de caractérisation sur détails constructifs est présenté dans la figure 6.4. La machine de traction utilisée est

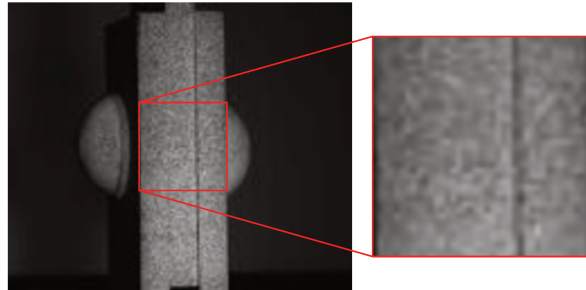


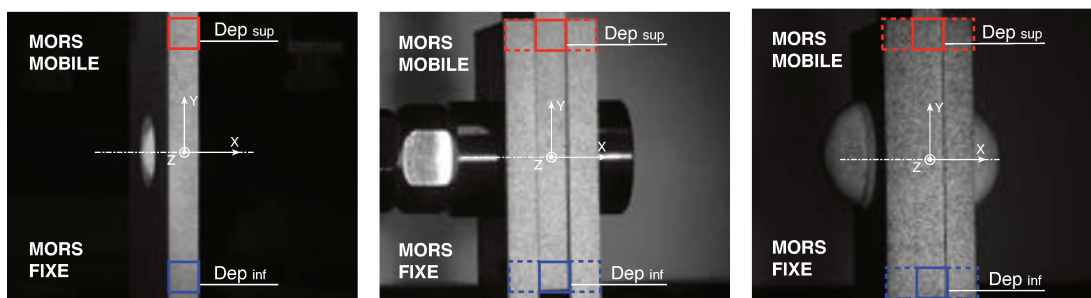
FIGURE 6.3 – Exemple du mouchetis réalisé sur la surface latérale d'un assemblage riveté en acier.

la même que celle utilisée dans la caractérisation monotone des matériaux (INSTRON® 5585).



FIGURE 6.4 – Présentation du dispositif expérimental de mesure de champs déplacement 3D par corrélation d'images.

Des mesures de déplacement global (par rapport au repère fixe de la caméra) ainsi que des mesures de déplacement relatif (par exemple d'une tôle par rapport à une autre) ont été effectuées. La figure 6.5 présente le bilan de ROI mises en place sur les trois types de détails constructifs étudiés.



(a) Définition des zones d'intérêt pour les plaques percées et alésées.

(b) Définition des zones d'intérêt pour un assemblage avec tige à haute limite élastique.

(c) Définition des zones d'intérêt pour un assemblage riveté à chaud.

FIGURE 6.5 – ROI (region of interest / zone d'intérêt) considérées dans chacun des détails constructifs étudiés.

## 6.2 Identification des scénarios de fonctionnement d'un assemblage riveté

### 6.2.1 Identification des conditions initiales d'un assemblage riveté

Les conditions de fonctionnement d'un rivet dans un assemblage dépendent de la présence (ou de l'absence) d'un jeu entre la tige du rivet et les tôles à assembler. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, les conditions de réalisation étaient variables : le diamètre du rivet avant sa pose était de 1 à 2 mm plus petit que le diamètres des trous (Collette, 2014; Collette *et al.*, 2014). Ce jeu permettait le refoulement du rivet lors de l'opération de rivetage (voir chapitre 2).

L'analyse macroscopique des assemblages rivetés montre la présence d'un jeu radial résiduel après le refroidissement. Ce jeu peut être important notamment dans les cas où l'épaisseur totale des tôles à assembler est grande. La figure 6.6 présente la coupe longitudinale d'un assemblage au niveau d'une semelle d'une poutre en « I » du pont sur l'Adour ; le jeu est ici très faible.

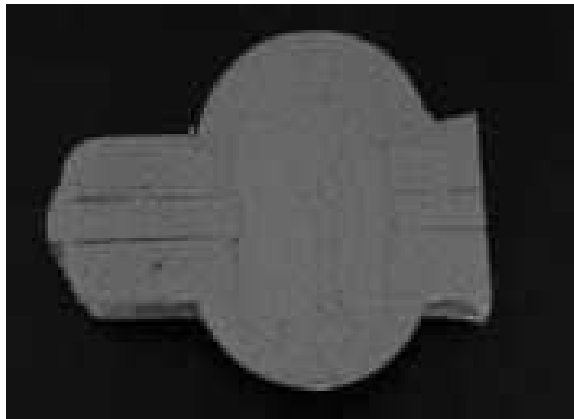


FIGURE 6.6 – Exemple d'un jeu radial visible dans un assemblage en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

D'autres exemples présentent des jeux beaucoup plus importants comme l'assemblage de cinq tôles de 12mm de la figure 6.7. Cet assemblage en fer puddlé a été prélevé dans la semelle d'une poutre principale d'un pont de 1883 également étudié au laboratoire.

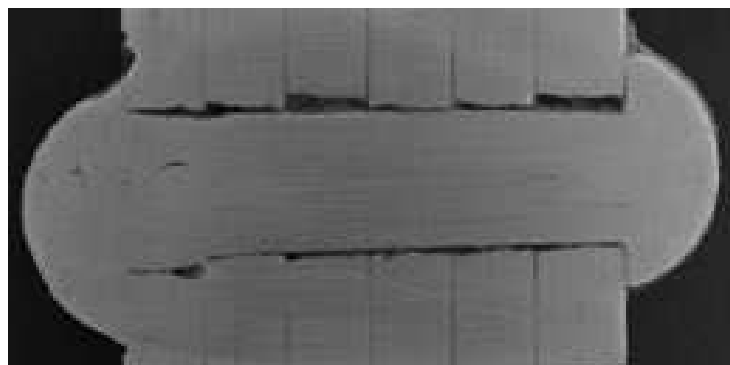


FIGURE 6.7 – Exemple d'un assemblage montrant un jeu radial variable important entre la tige du rivet et la surface interne des trous.

Ces deux exemples soulèvent la question du mode de fonctionnement d'un assemblage riveté lorsqu'il est sollicité. Les règlements et normes de dimensionnement indiquent que l'assemblage riveté travaille en cisaillement du rivet, en supposant un jeu nul entre la tige et la tôle (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement des structures (STRRES), 2014; Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2011). Le jeu, et donc le glissement entre les éléments d'un assemblage n'est donc pas pris en compte.

Au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, de nombreux travaux ont porté sur le glissement possible et sur les règles de dimensionnement à proposer pour les assemblages rivetés. En France, la question est posée dès 1852 lors du remplacement du Pont d'Asnières. Mathieu et Lavalley (1852) ont ainsi proposé une expérience très originale pour déterminer l'effort qu'il faut appliquer à un assemblage pour provoquer le glissement entre les tôles. Cette expérience est décrite dans la figure 6.8.

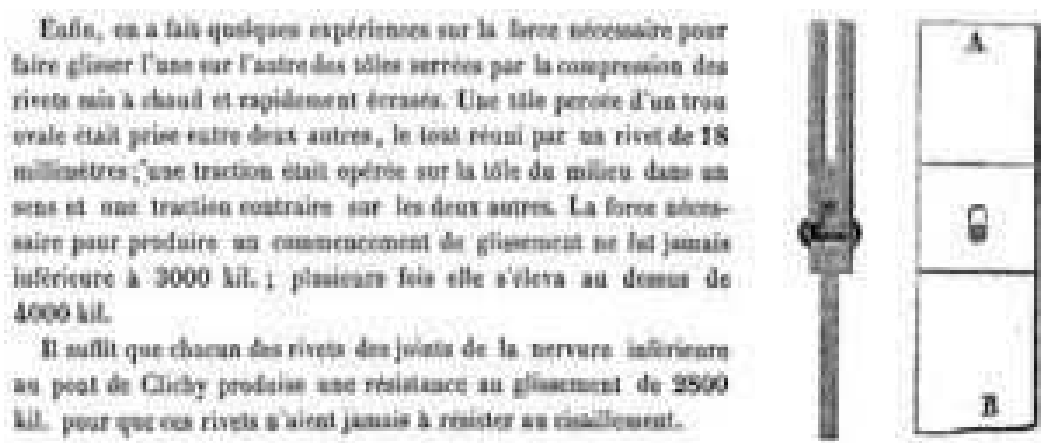


FIGURE 6.8 – Expérience proposée par Mathieu et Lavalley (1852) pour déterminer la force à appliquer pour provoquer le glissement dans un assemblage double recouvrement.

Cette expérience est discutable car le trou oblong modifie localement la déformation de la tôle lors du refroidissement du rivet. Néanmoins, nous nous sommes inspirés de cette idée pour les mesures de déplacements relatifs, avec des instruments de mesures aujourd'hui très précis.

Armand Considère a également repris cette idée en faisant réaliser des campagnes expérimentales très riches dans lesquelles ont été analysés les paramètres suivants dans la détermination de la force nécessaire au glissement (Considère, 1886)<sup>1</sup> :

- L'influence du procédé d'obtention de trous (perçage / poinçonnage).
- L'influence de la température de pose du rivet (rivetage manuel / rivetage machine).

Considère note que pour ces essais, l'effort provoquant le premier glissement est augmenté de 12% pour les tôles poinçonnées par rapport aux tôles forées et alésées. L'écart n'est que de 6% pour l'effort que produit la rupture de l'assemblage.

Un trou poinçonné présentant une bavure, la différence sur l'effort de premier glissement est ainsi attribuée à l'état des surfaces des tôles à assembler. Nous avons donc assuré

1. Autre source d'inspiration pour nos travaux, les assemblages mentionnés dans le texte de Considère ont été exécutés à l'arsenal maritime de Brest. 130 ans après ces essais, les campagnes expérimentales que nous avons menées à l'Université de Brest complètent ces données de la littérature.

le même type de procédé pour la réalisation de tous les trous des éprouvettes (perçage + alésage) afin de nous affranchir de ce paramètre.

Considère établit également que « la température à laquelle un rivet est écrasé exerce une influence importante sur sa valeur » (celle de l'effort du premier glissement). Les assemblages réalisés par l'équipe RPM comportaient des rivets chauffés à la même température et visaient une répétabilité optimale de leur exécution (pas de variation sensible dans la durée du rivetage pour chaque éprouvette)<sup>2</sup>.

De nombreuses références font mention de l'adhérence entre les tôles et non pas du cisaillement seul du rivet (Akesson, 2010; Considère, 1886; Frémont, 1906). Il convient donc d'analyser finement ce phénomène pour mieux comprendre le rôle d'un rivet dans l'assemblage.

### 6.2.1.1 Mesure des jeux sur les assemblages réalisés

Les assemblages rivetés que nous avons testés ayant été réalisés dans des conditions identiques, nous avons également fait réaliser des triplures (mêmes conditions)<sup>3</sup> de référence sur des assemblages en acier et en fer puddlé afin de mesurer les jeux initiaux. La figure 6.9 présente les triplures réalisées :



FIGURE 6.9 – *Triplures de référence exécutées par l'équipe de rivetage de SNCF Réseau.*

la figure 6.10 présente un exemple d'une coupe longitudinale sur triplure en acier (gauche) et en fer puddlé (droite)<sup>4</sup>.

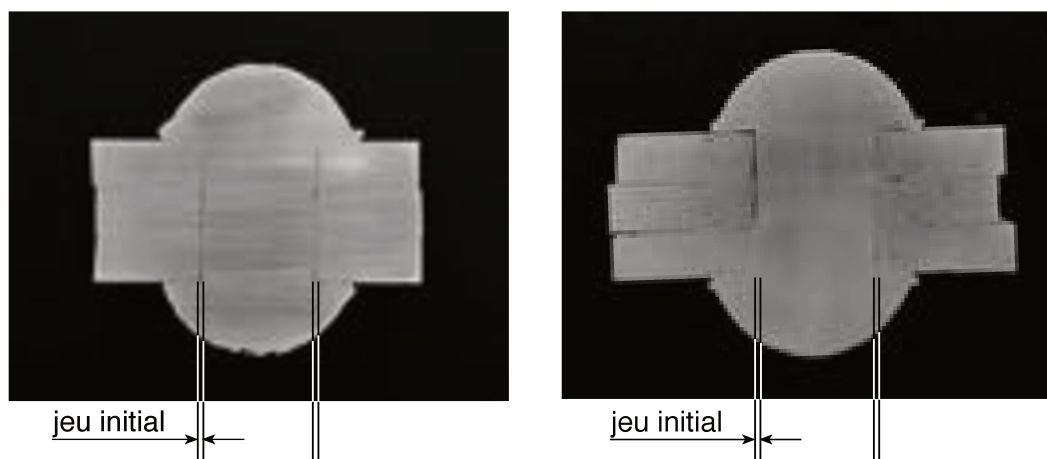
Le bilan des mesures des jeux radiaux initiaux sur les triplures est présenté à l'aide de la table 6.1.

---

2. Un chronométrage précis aurait permis d'être complètement certain de la répétabilité du paramètre « température de pose » pendant l'opération de rivetage des éprouvettes.

3. Celles-ci regroupent : même procédé d'obtention des trous, même longueur des rivets, mêmes conditions des rivetage.

4. Dans tous les assemblages réalisés, nous avons utilisé des rivets identiques en acier S355 ce qui nous permet également de nous affranchir du paramètre matériau du rivet dans l'analyse des résultats. Ces rivets sont couramment employés dans les opérations de réparation des ponts métalliques anciens de *SNCF Réseau*.



(a) Coupe longitudinale d'un rivet de la triplure de référence fabriquée en acier S235.

(b) Coupe longitudinale d'un rivet de la triplure de référence fabriquée en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

FIGURE 6.10 – Mise en évidence des jeux initiaux sur les triplures de référence.

TABLE 6.1 – Bilan des mesures des jeux initiaux sur les triplures de référence.

	Jeu moyen	Jeu min.	Jeu max.
<i>Triplure en acier</i>	0,15mm	0,07mm	0,25mm
<i>Triplure en fer</i>	0,18mm	0,11mm	0,24mm

## 6.2.2 Proposition d'un scénario de fonctionnement

La littérature propose différents modes de rupture susceptibles d'apparaître dans un assemblage riveté. Twelvetrees (1900) par exemple décrit les trois modes habituellement rencontrés : cisaillement du rivet, rupture par pression diamétrale excessive de la tige du rivet et rupture en traction de la tôle (voir figure 6.11).

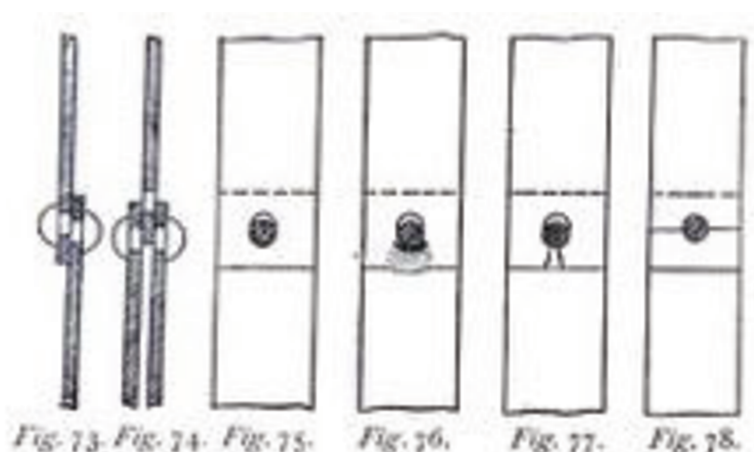


FIGURE 6.11 – Différents modes de rupture selon Twelvetrees (1900).

Nous avons ainsi conçu et réalisé, selon les dimensions de la littérature (Collette, 2014), des éprouvettes double recouvrement en acier et en fer permettant de mettre en évidence ces sollicitations : cisaillement du rivet, pression diamétrale et traction dans la tôle. Les

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

dimensions des éprouvettes sont présentées dans la figure 6.12<sup>5</sup>.

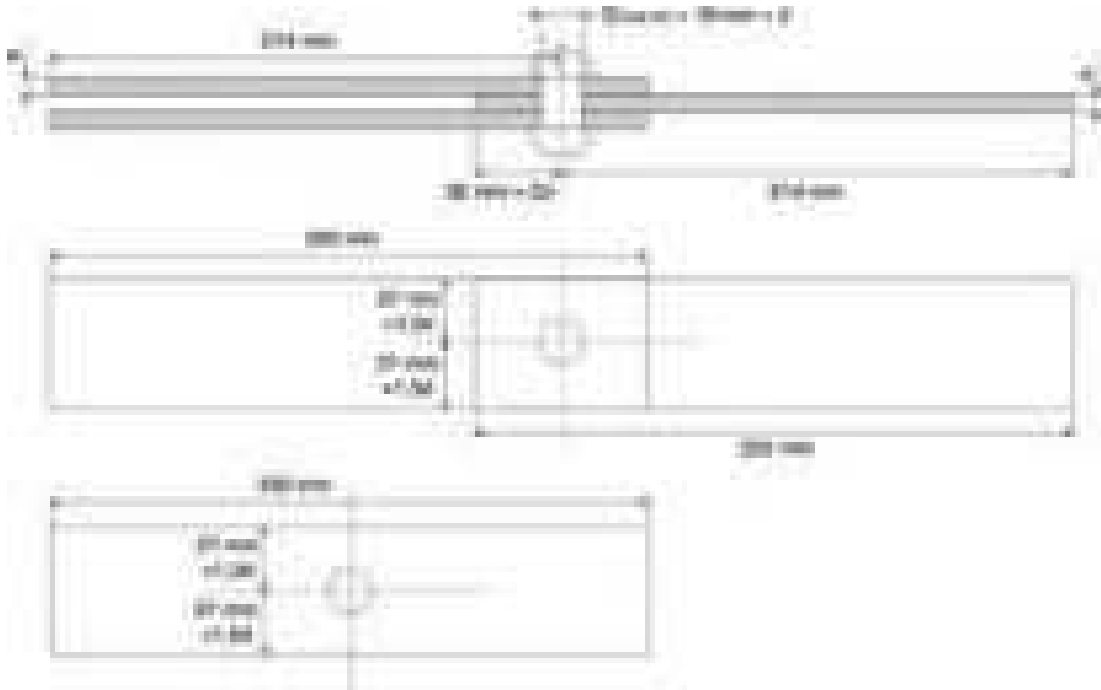


FIGURE 6.12 – Dimensions des éprouvettes en double recouvrement utilisées dans les campagnes expérimentales.

Les trous ont été percés à 15mm puis alésés à 19mm suivant les pratiques des équipes de réparation de *SNCF Réseau*. Les épaisseurs des tôles étaient de  $e = 7,8mm$  pour les assemblages en acier et de  $e = 7,2mm$  pour les assemblages en fer<sup>6</sup>.

Les assemblages double recouvrement avec axe à haute limite élastique ont exactement la même géométrie. Cet axe, en acier inoxydable martensitique de type X4CrNiMo16-5-1 possède une limite d'élasticité à 0,2% de 950MPa. La figure 6.13 présente le dessin de définition de l'axe épaulé utilisé pour les essais. Une bague ( $\phi_{int} = 19H7$ ,  $\phi_{ext} = 32mm$  et épaisseur = 12mm<sup>7</sup>) et un écrou (et son contre-écrou) permet de maintenir les tôles en position.

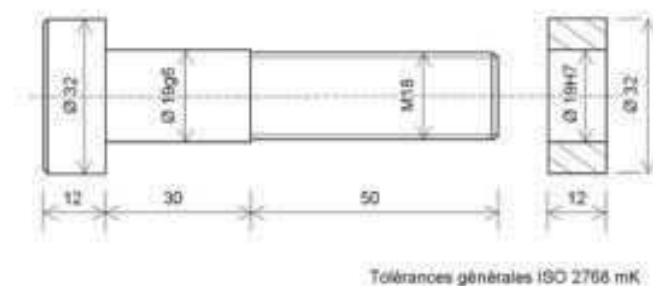


FIGURE 6.13 – Dimensions de l'axe à haute limite élastique.

5. Un talon est utilisé entre les tôles extérieures de l'assemblage au niveau des mors. Ce talon, de la même épaisseur que les tôles de l'assemblage, évite la déformation des tôles suite au serrage et garantit une sollicitation uniquement en traction.

6. La longueur de la tige du rivet à été découpée en conséquence.

7. Ces dimensions respectent les dimensions de la tête des rivets utilisés :  $h = 12mm$  et  $D = 32mm$  (voir figure 2.4).

Ces éprouvettes nous permettent d'étudier l'influence de l'adhérence, de la pression diamétrale, du cisaillement au rivet et de la traction dans les tôles, voir figure 6.14.

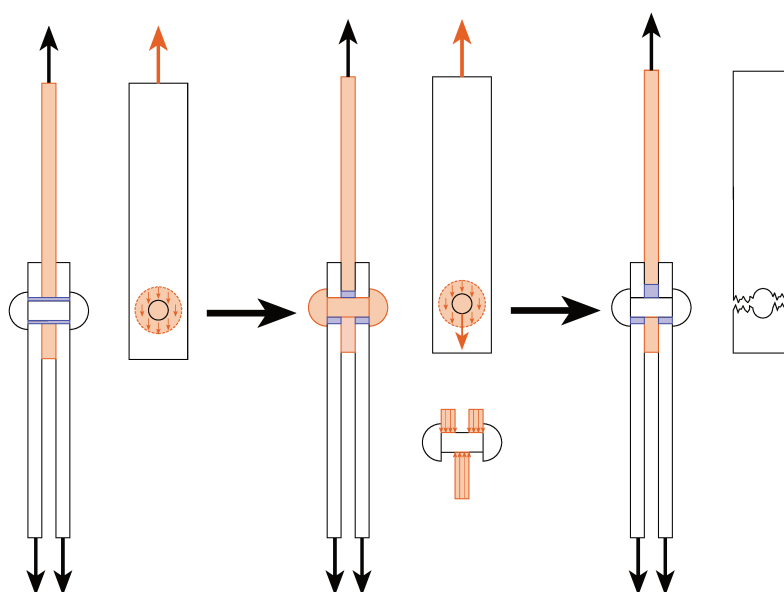


FIGURE 6.14 – Différents mécanismes de ruine étudiés avec les éprouvettes rivetées, réalisées par l'équipe de rivetage de SNCF Réseau.

Le scénario attendu est donc composé d'une première phase d'adhérence entre les tôles, suivie du glissement de la tôle centrale. Lorsque la tige du rivet est en contact avec la tôle, plusieurs mécanismes rentrent en jeu : l'adhérence entre les tôles, l'action de la pression diamétrale et le cisaillement du rivet. Enfin, la dernière étape attendue est la déformation plastique de la tôle centrale puis sa rupture en traction.

Comme précisé dans le chapitre 4, les essais sur les assemblages avec axe à haute limite élastique permettent d'analyser l'influence de l'absence d'adhérence et de l'absence du cisaillement (plastique) du rivet.

Les essais sur plaques percées et alésées permettent d'analyser l'influence de la concentration de contraintes au bord du trou (plasticité locale).

### 6.2.3 Essais de traction monotone

Les essais seront exposés dans l'ordre suivant :

1. Plaque percée et alésées (acier S235 puis fer puddlé).
2. Assemblage avec tige à haute limite élastique (acier S235 puis fer puddlé).
3. Assemblage riveté (acier S235 puis fer puddlé).

Cette stratégie permet de mettre en évidence, dans l'ordre :

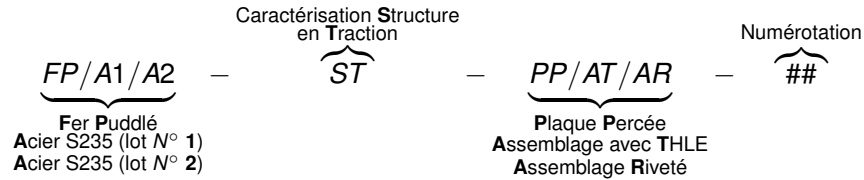
1. L'apparition de plasticité localisée au bord du trou.
2. L'influence de la pression diamétrale.
3. L'influence du serrage induit par le procédé de rivetage.

Trois essais de chaque type d'assemblage ont été analysés, dans le cas de l'acier S235 et dans le cas du fer puddlé. Nous présentons dans la suite du manuscrit un exemple de chaque type de cas testé.



### Notation des éprouvettes

Les éprouvettes de caractérisation matériau fabriquées en fer puddlé et en acier suivent l'appellation suivante :



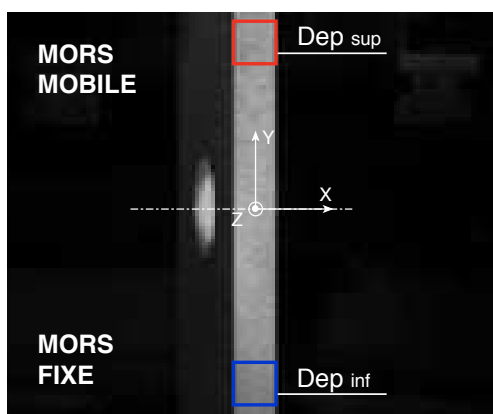
THLE : Tige à haute limite élastique.

La corrélation d'images est basée sur le suivi de motifs au niveau de la surface observée. Ce système atteint sa limite d'application lorsque le motif est trop distordu pour être suivi. La méthode est donc adaptée au suivi des mouvements de corps rigide et pour certains niveaux de déformation peu importants. Nous avons défini en conséquence les zones d'intérêt sur les éprouvettes du type détail constructif, voir figure 6.5. Ces zones d'intérêt présentées précédemment se situent suffisamment loin de la concentration des contraintes pour pouvoir identifier le déplacement de la partie supérieure ( $Dep_{sup}$ ) et le déplacement de la partie inférieure ( $Dep_{inf}$ ), en nous affranchissant des possibles difficultés liées au suivi sur une zone où la surface est déformée de manière plus importante (milieu de la tôle au niveau du trou).

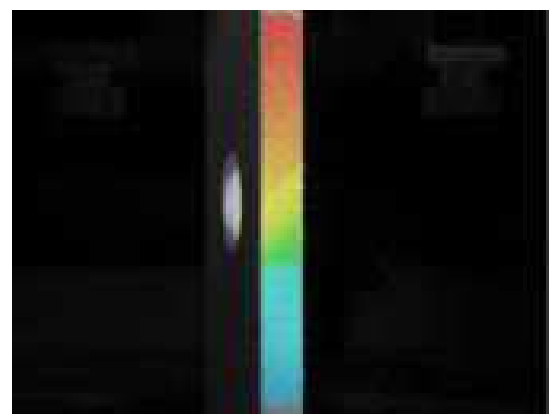
#### 6.2.3.1 Plaque percée et alésée

Les zones d'intérêt représentées sur la figure 6.15(a) sont des carrés de  $7,5 \times 7,5 mm^2$ , dans le cas des tôles en acier et de  $7 \times 7 mm^2$  pour les tôles fer puddlé du Pont sur l'Adour. Par la suite, le déplacement vertical moyen de la zone supérieure (carré rouge) sera noté  $DepY_{sup}$ , celui de la zone inférieure (carré bleu) sera noté  $DepY_{inf}$ .

Nous calculons le déplacement moyen sur chaque zone, voir figure 6.15 :



(a) Définition des zones d'intérêt sur une tôle percée.



(b) Champ de déplacement vertical. Effort = 80kN,  $Dep_{max} = 0,63mm$ ,  $Dep_{min} = 0,40mm$ .

FIGURE 6.15 – Traitement des données obtenus par corrélation d'images pour une plaque percée en acier S235.

Nous présentons dans un premier temps l'évolution de l'effort en fonction des déplacements moyens des deux zones d'intérêt, dans le cas de l'acier S235 (figure 6.16).

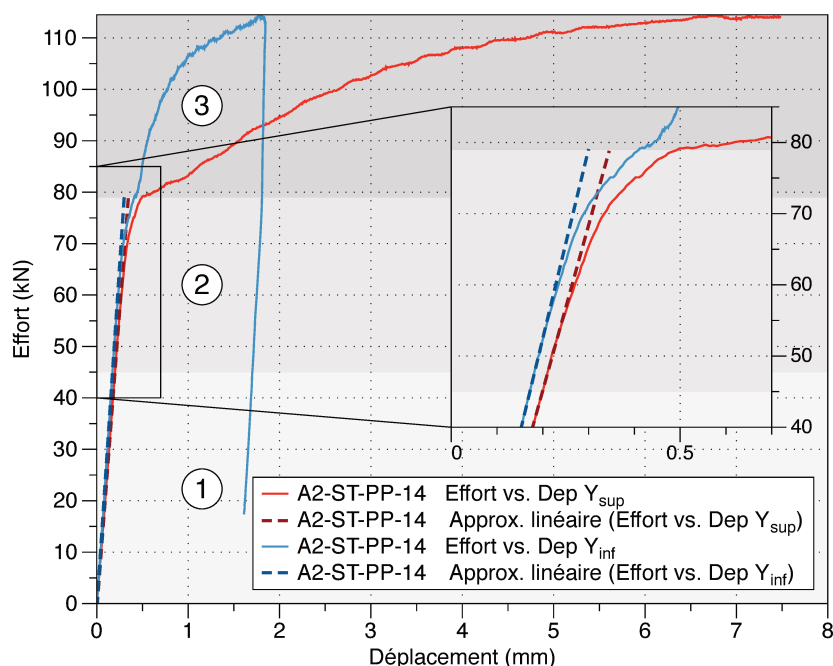


FIGURE 6.16 – Essai de traction xsur l'éprouvette A2-ST-PP-14 en acier S235 (lot N° 2).

Cette représentation nous permet d'observer trois étapes du comportement de l'éprouvette. Une **première étape** où la relation entre l'effort et le déplacement reste linéaire. Puis, une **deuxième étape** où cette évolution n'est plus linéaire et évolue « doucement » (à partir de 45kN). Le début d'une **troisième étape** est associé à son tour à un changement soudain de pente aux alentours de 79kN.

Dans le but de comprendre le fonctionnement du premier détail constructif, nous pouvons faire une vérification rapide du coefficient de concentration de contrainte (appliqué à la contrainte nette) pour le cas d'une plaque percée. Celui-ci peut être calculé à partir de la formule de Howland (Pilkey, 1997) (cadre élastique) :

$$K_{tn} = 2 + 0,28 \left(1 - \frac{d}{H}\right) + 0,60 \left(1 - \frac{d}{H}\right)^2 + 1,32 \left(1 - \frac{d}{H}\right)^3 \quad (6.1)$$

L'abaque associé à cette équation est proposé en tant que document annexe (A).

Pour une plaque en acier :

$$S_{nette} = 7,8 \cdot (54 - 19) = 273 \text{ mm}^2 \quad (6.2)$$

$$\Rightarrow \sigma_{nette} = 45000 \text{ N} / 273 \text{ mm}^2 = 164,84 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

À l'aide de l'expression 6.1 nous pouvons calculer le facteur de concentration de contrainte associé à la géométrie, et donc, la contrainte maximale.

$$K_{tn} = 2 + 0,28 (1 - 0,352) + 0,60 (1 - 0,352)^2 + 1,32 (1 - 0,352)^3 = 2,292 \quad (6.4)$$

$$\sigma_{max} = 2,292 \cdot 164,84 \text{ MPa} = 377,81 \text{ MPa} \quad (6.5)$$

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

Cette valeur de contrainte maximale est en effet proche de la limite élastique à  $375\text{MPa}$  retrouvée lors de la campagne de caractérisation matériaux (chapitre 5). Il faut signaler que cette estimation de contrainte (expression 6.1) ne sera plus valable une fois la déformation plastique atteinte (François *et al.*, 1993). Cependant, cette estimation d'apparition de plasticité suite à la concentration de contrainte n'est que théorique car l'influence du procédé d'obtention peut être non négligeable. Ici, le procédé de perçage + alésage a été retenu car il minimise la zone écrouie autour du trou par rapport au poinçonnage Considère (1886). Néanmoins, l'écrouissage induit par alésage modifie la limite élastique du matériau dans une proportion qui reste difficile à évaluer.

Le passage entre la deuxième et la troisième étape est lié à la généralisation de la plasticité sur la section nette de l'éprouvette.

Nous présentons ensuite l'évolution de l'effort et des déplacements moyens des zones d'intérêt ( $DepY_{sup}$  et  $DepY_{inf}$ ) en fonction du temps (figure 6.17). Nous avons reporté les valeurs limites des trois étapes (45kN, 79kN et 114kN respectivement). Une **quatrième étape** associée à la striction de l'éprouvette (et donc à une chute de l'effort appliqué) est cette fois-ci visible.

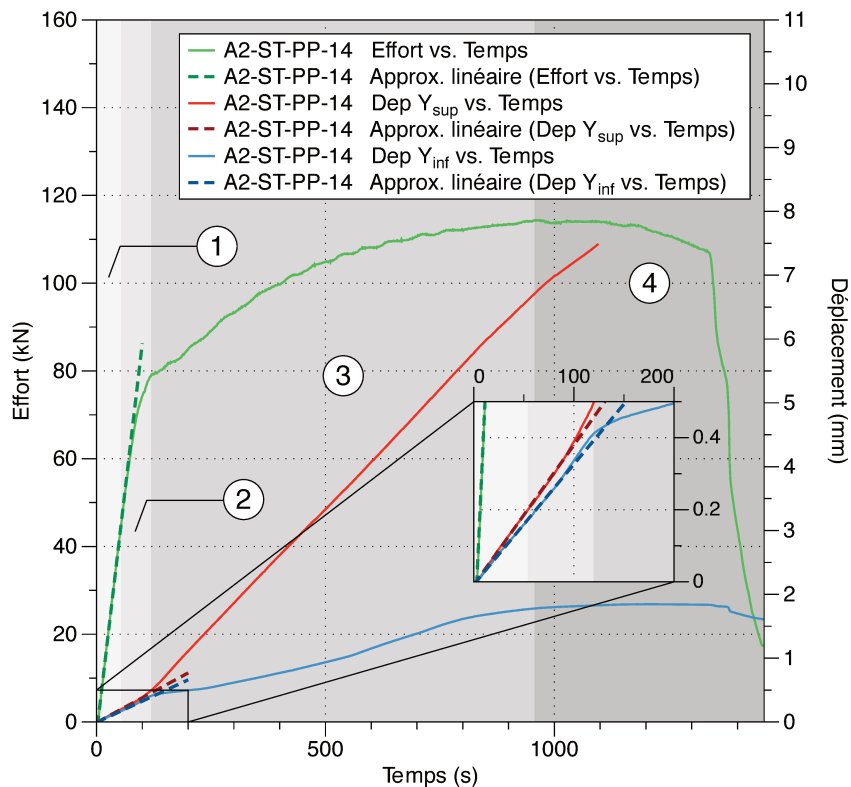


FIGURE 6.17 – Essai de traction sur l'éprouvette A2-ST-PP-14 en acier S235 (lot N° 2).

À partir des observations réalisées sur les diagrammes des figures 6.16 et 6.17, nous pouvons donc décomposer le comportement de la plaque percée en acier S235 de la manière suivante :

- **Première étape** : Les déplacements mesurés correspondent à la **déformation élastique** de l'éprouvette. Cette étape comprise entre 0kN et 45kN (pour l'éprouvette A2-ST-PP-14) correspond à une relation linéaire entre l'effort appliqué et la valeur

moyenne du déplacement vertical ( $DepY$ ) dans les zones indiquées dans la figure 6.15.

- **Deuxième étape** : Le déplacement vertical de zones étudiées correspond en partie à la **déformation plastique localisée** au bord du trou (concentration de contraintes) et à la déformation élastique du reste de la tôle (entre 45kN et 79kN pour l'éprouvette A2-ST-PP-14).
- **Troisième étape** : Les valeurs de déplacement mesurées correspondent en partie à la déformation élastique et à la **déformation plastique généralisée** de la section nette.
- **Quatrième étape** : **Striction** au niveau du trou.

Cette méthode d'identification des étapes basée sur l'analyse de la courbe d'effort vs. déplacement puis sur l'analyse de la courbe effort-déplacement vs. temps sera reproduite pour tous les cas étudiés dans la suite de ce document.

Dans le cas du **fer puddlé**, l'identification des étapes dans le comportement en traction d'une plaque percée est présentée dans les figures 6.18 et 6.19.

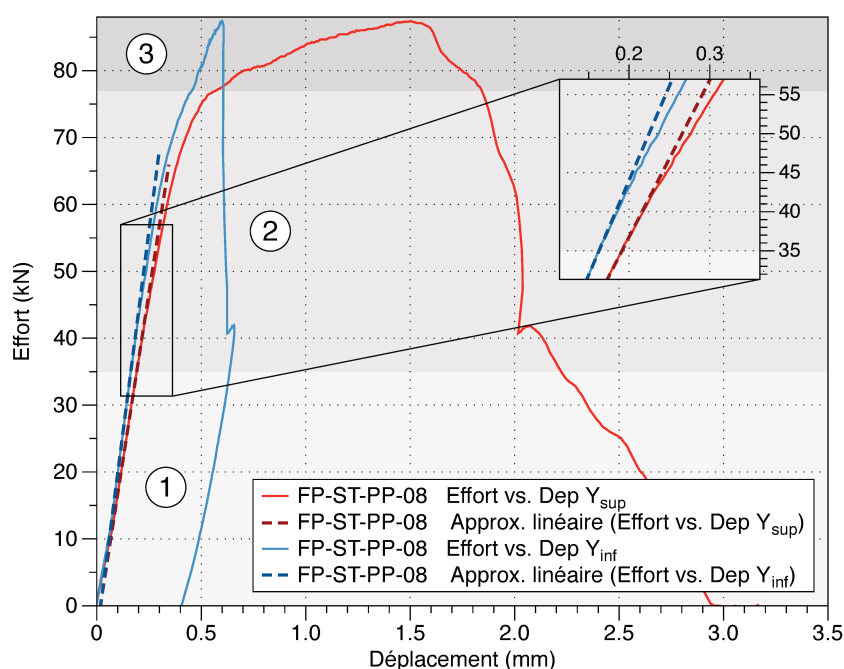


FIGURE 6.18 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-PP-08 en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

L'approche d'identification des étapes reste la même que pour les éprouvettes en acier. Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé nous retrouvons une plasticité plus précoce (35kN), validée par la caractérisation monotone réalisée dans le chapitre 5. En effet, cette valeur de 35kN correspond à une contrainte maximum de 318,3MPa qui est bien proche de la valeur moyenne de tous les essais de caractérisation effectués au chapitre 5.

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

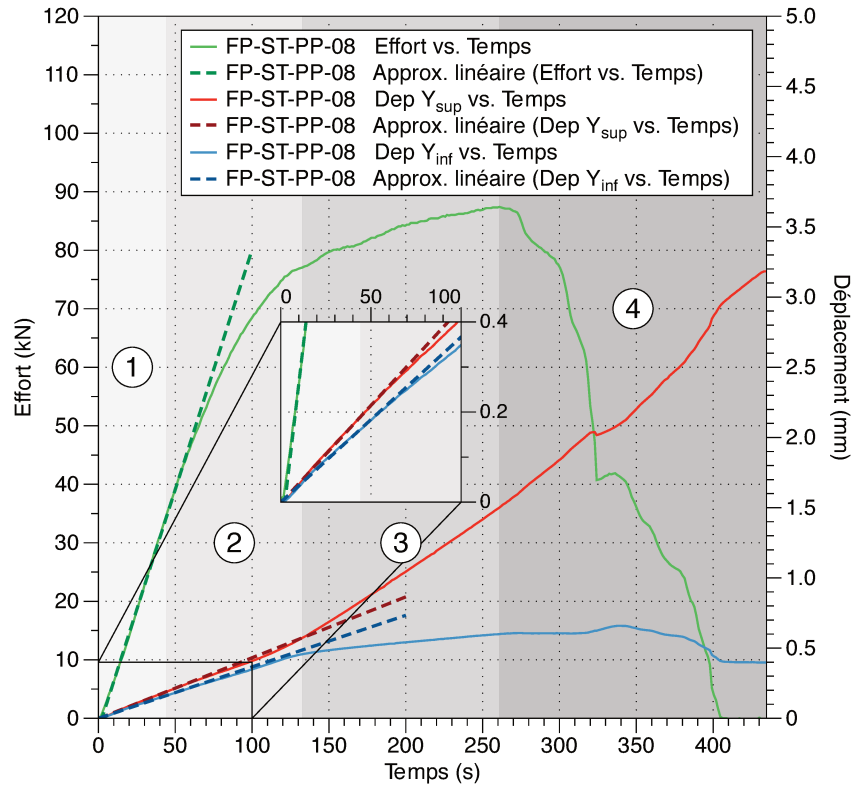
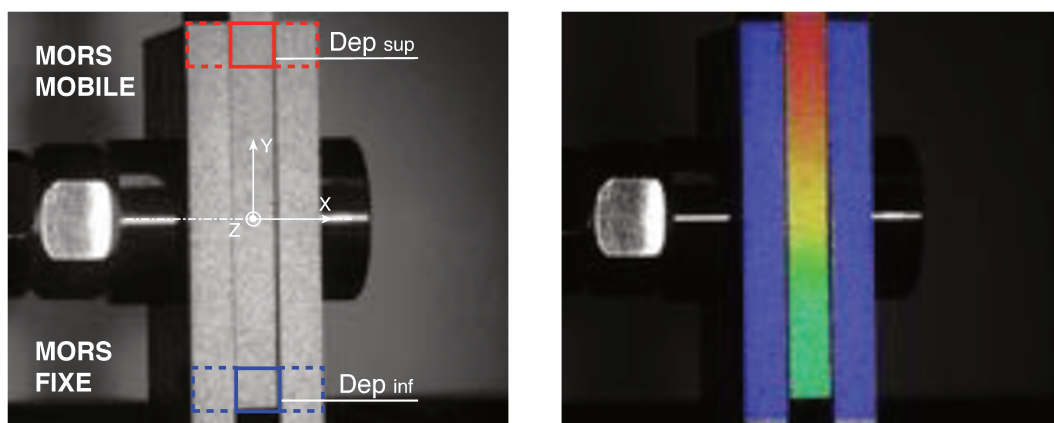


FIGURE 6.19 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-PP-08 en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

### 6.2.3.2 Assemblage avec tige à haute limite élastique

L'influence de la concentration de contrainte induite par l'opération de perçage/alésage ayant été analysée, l'étude de l'assemblage avec tige à haute limite élastique (THLE) est proposée pour ajouter la contribution de la pression diamétrale.

La figure 6.20 présente les zones de post-traitement pour ce type d'assemblage, ainsi qu'un exemple de champ déplacement vertical au cours de l'essai.



(a) Définition des zones d'intérêt sur assemblage avec THLE

(b) Champ de déplacement vertical. Effort = 101 kN,  $Dep_{max} = 3,90\text{mm}$ ,  $Dep_{min} = 0,36\text{mm}$ .

FIGURE 6.20 – Traitement des données obtenues par corrélation d'images pour un assemblage à haute limite élastique en acier S235.

Le dépouillement de ces essais sur assemblage s'avère plus délicat que celui pour la plaque percée. Nous nous confrontons à un champ de contraintes sur la tôle centrale de l'assemblage perturbé par la concentration au bord du trou et par la pression diamétrale exercée par la tige. Nous observons néanmoins dans la courbe d'effort vs. déplacement (figure 6.21) une étape de fonctionnement où la relation entre ces deux grandeurs reste linéaire. Cette plage de données est le point de départ de la procédure de dépouillement. Avant cette étape de comportement linéaire nous observons entre 0kN et 15kN un déplacement compatible avec un glissement entre la tôle centrale et les tôles extérieures de l'assemblage ( $\approx 0,2mm$ ).

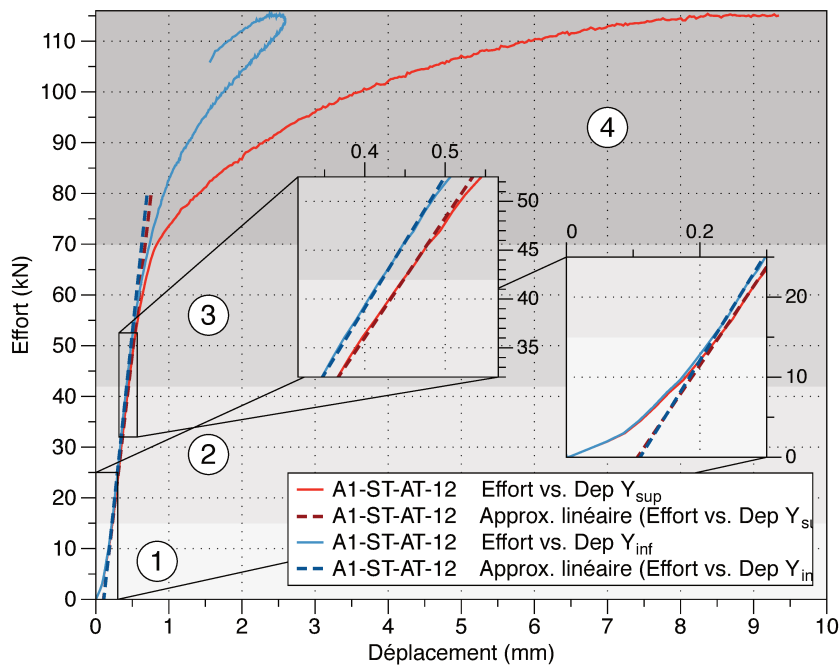


FIGURE 6.21 – Essai de traction sur l'éprouvette A1-ST-AT-12 en acier S235 (lot N° 2).

Cette plage de déplacement est également cohérente avec les observations réalisées sur la représentations des grandeurs mesurées en fonction du temps (figure 6.22). Sur ce graphe nous visualisons l'effort et les déplacements relatifs supérieurs et inférieurs ( $Dep Y_{sup} Rel$  et  $Dep Y_{inf} Rel$  respectivement) pour la tôle centrale de l'assemblage par rapport aux tôles externes (zones d'intérêt en ligne pointillée sur la figure 6.20(a)). Nous avons donc :

$$Dep Y_{sup} Rel = \left| Dep Y_{sup B} - \left( \frac{Dep Y_{sup A} + Dep Y_{sup C}}{2} \right) \right| \quad (6.6)$$

$$Dep Y_{inf} Rel = \left| Dep Y_{inf B} - \left( \frac{Dep Y_{inf A} + Dep Y_{inf C}}{2} \right) \right| \quad (6.7)$$

Où  $Dep Y_{sup A}$  et  $Dep Y_{inf A}$  correspondent aux déplacements verticaux moyens de la tôle à gauche de la tôle centrale.  $Dep Y_{sup B}$  et  $Dep Y_{inf B}$  correspondent aux déplacements verticaux moyens de la tôle centrale, et  $Dep Y_{sup C}$  et  $Dep Y_{inf C}$  correspondent aux déplacements verticaux moyens de la tôle à droite de la tôle centrale.

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

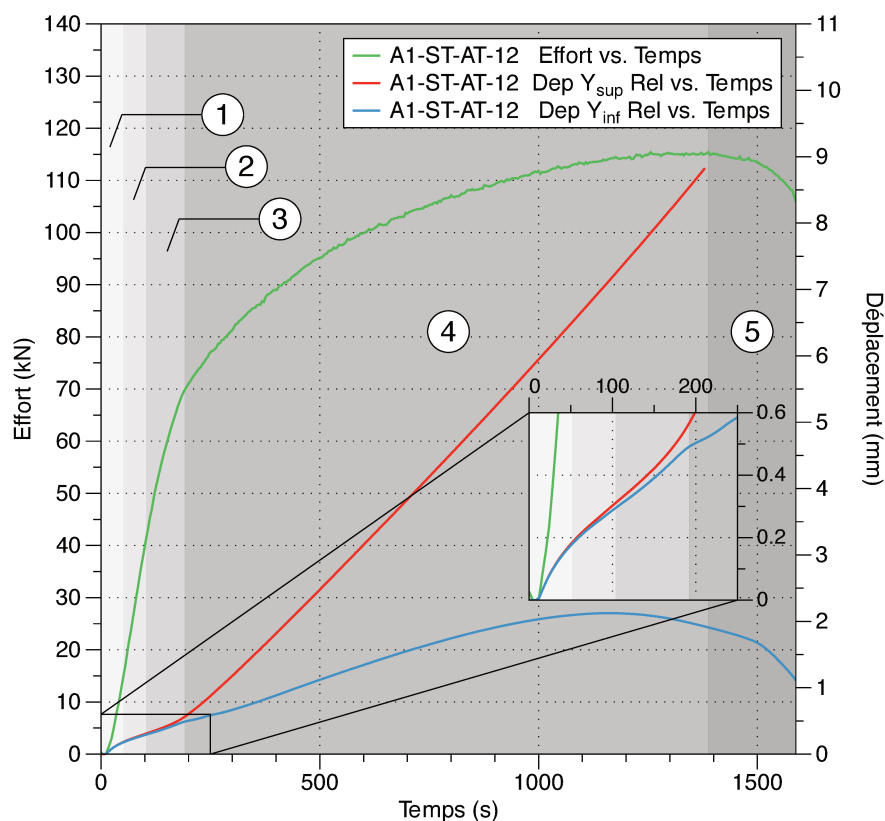


FIGURE 6.22 – Essai de traction sur l'éprouvette A1-ST-AT-12 en acier S235 (lot N° 2).

Nous identifions ainsi cinq étapes de fonctionnement pour une éprouvette du type assemblage avec tige à haute limite élastique.

- **Première étape** : Les déplacements relatifs supérieur et inférieur de la tôle centrale sont identiques. En absence d'un effort de serrage (écrou de la tige installé au contact). **La tôle centrale « glisse » par rapport aux tôles extérieures.**
- **Deuxième étape** : **La tige rentre en contact avec la surface interne du trou.** Le chargement subi par la tôle est transmis par l'effort diamétral.
- **Troisième étape** : La **plasticité locale** apparaît au bord du trou.
- **Quatrième étape** : La **plasticité est généralisée** dans la section nette de l'assemblage.
- **Cinquième étape** : **Striction** au niveau du trou.

Dans le cas du **fer puddlé**, la méthode de dépouillement reste la même (voir figures 6.23 et 6.24). Nous identifions les mêmes étapes que pour les assemblages à tige à haute limite élastique en acier. En accord avec les résultats de caractérisation matériau du chapitre 5 pour le fer du Pont sur l'Adour, nous atteignons des valeurs d'effort et de déplacement plus faibles que pour les éprouvettes en acier S235.

Les autres assemblages testés dans les mêmes conditions ont montré des comportements (étapes, durée et niveau d'effort) très similaires.

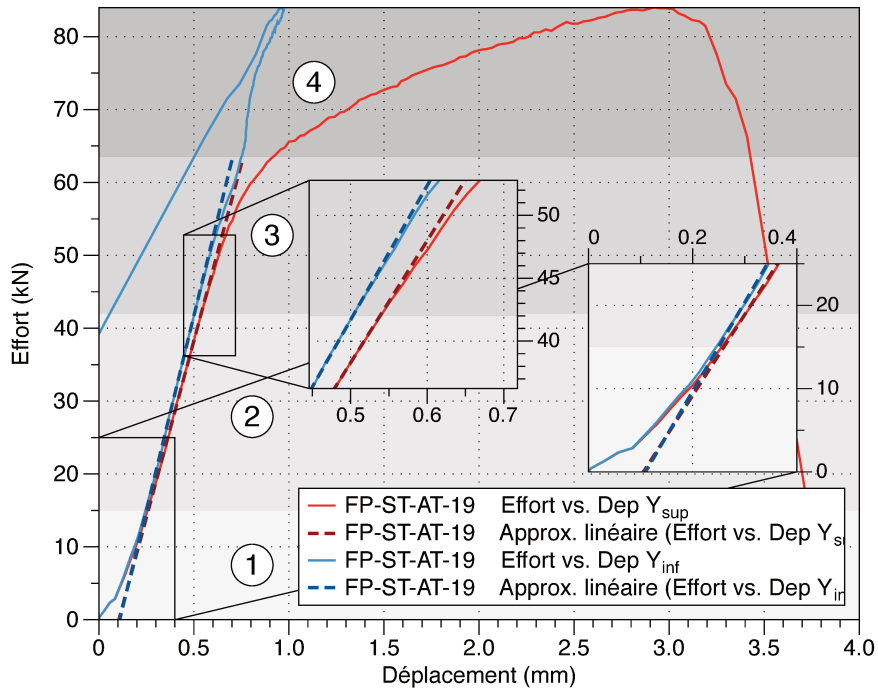


FIGURE 6.23 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AT-19 en fer puddlé du pont sur l'Adour avec tige à haute limite élastique.

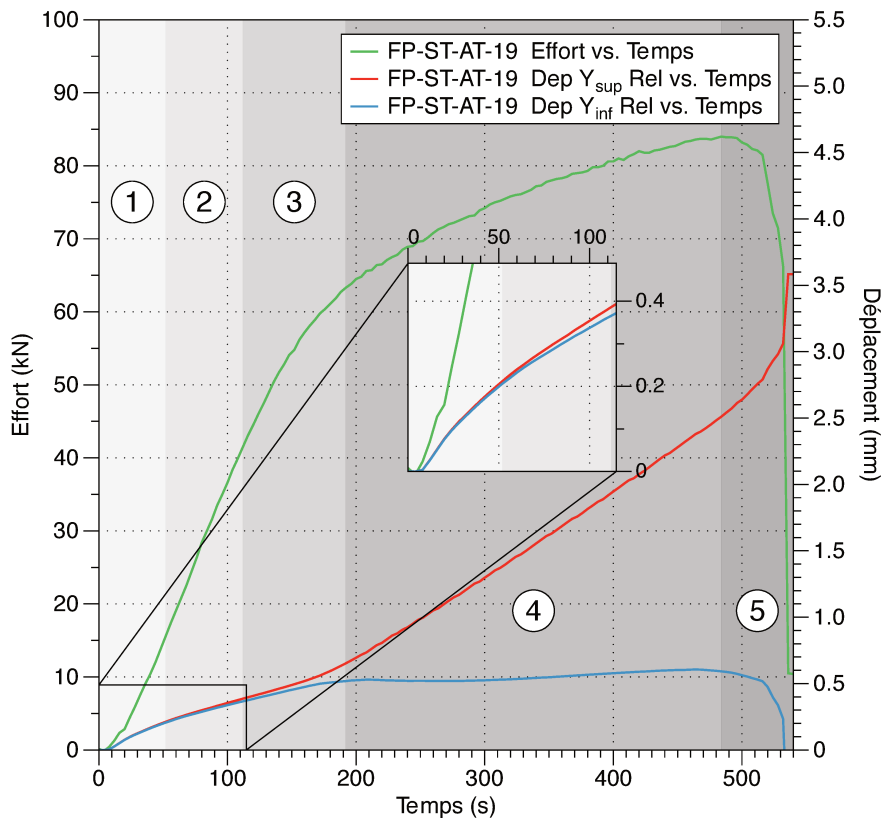


FIGURE 6.24 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AT-19 en fer puddlé du pont sur l'Adour avec tige à haute limite élastique.



### 6.2.3.3 Assemblages rivetés

Dans les sections 6.2.3.1 et 6.2.3.2 nous avons observé l'influence de la concentration de contrainte (plaques percées) et de la présence de la pression diamétrale (assemblage avec tige à haute limite élastique). Nous cherchons maintenant à comprendre la contribution de l'effort de serrage (liée au refroidissement du rivet après sa pose) par l'étude en traction monotone des assemblages rivetés à chaud exécutés par l'équipe de rivetage de *SNCF Réseau*.

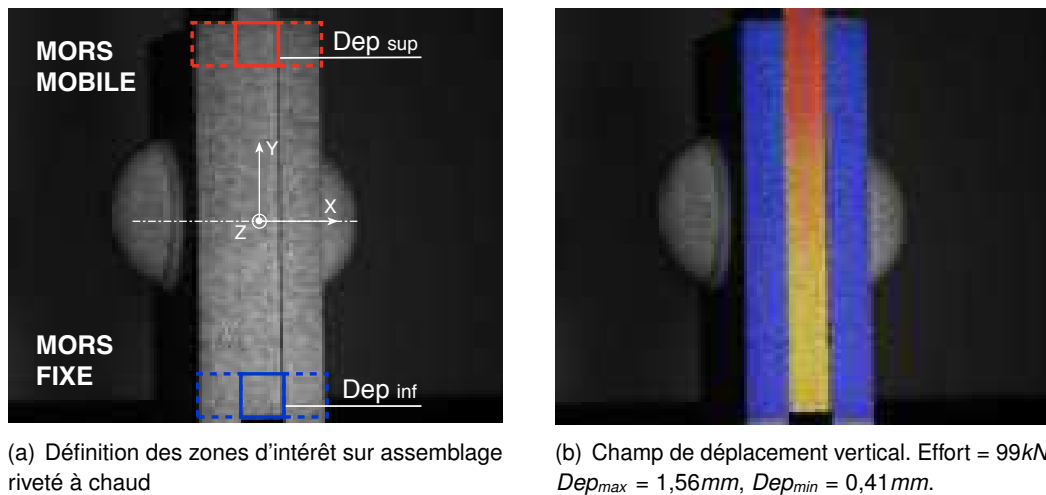


FIGURE 6.25 – Traitement des données obtenues par corrélation d'images pour un assemblage riveté en acier S235.

En utilisant la même méthode de dépouillement que pour les assemblages avec tige à haute limite élastique, nous avons traité les courbes d'évolution de l'effort appliqué à l'assemblage en fonction du déplacement supérieur moyen de la tôle centrale (figure 6.26), et l'évolution dans le temps des grandeurs mesurées (figure 6.27). De manière analogue au cas des éprouvettes assemblées par tige à haute limite élastique, le comportement des éprouvettes rivetées peut être divisé en cinq étapes :

- **Première étape** : Les déplacements relatifs supérieur et inférieur de la tôle centrale sont identiques. À la différence du scénario pour l'assemblage avec tige à haute limite élastique, cette étape correspond à une augmentation rapide de l'effort pour un déplacement relatif très petit (de l'ordre de 0,02mm). Cette observation est compatible avec la présence du **frottement** supplémentaire entre les tôles à cause du serrage exercé par le rivet. **La tôle centrale « glisse » par rapport aux tôles extérieures.** la fin du glissement est relevée à 0,07 mm ; cette valeur est compatible avec les valeurs de jeux/initiaux des assemblages, voir table 6.1.
- **Deuxième étape** : **La tige du rivet rentre en contact avec la surface interne du trou.** Le chargement subi par la tôle est transmis par effort diamétral et frottement induit par le serrage du rivet.
- **Troisième étape** : La **plasticité locale** apparaît au bord du trou.
- **Quatrième étape** : La **plasticité est généralisée** dans la section nette de l'assemblage.
- **Cinquième étape** : **Striction** au niveau du trou.

Dans le cas des éprouvettes en **fer puddlé**, la méthode de dépouillement reste la même (voir figures 6.28 et 6.29). Nous identifions les mêmes étapes que pour les assemblages à tige à haute limite élastique en acier. Dans ce cas, le glissement se produit sur  $0,07\text{ mm}$  avant le contact entre le rivet et la tôle centrale. Ce déplacement est également compatible avec les valeurs de la table 6.1. En accord avec les résultats de caractérisation matériau du chapitre 5 pour le fer du Pont sur l'Adour, nous atteignons des valeurs d'effort et de déplacement plus faibles que pour les éprouvettes en acier S235.

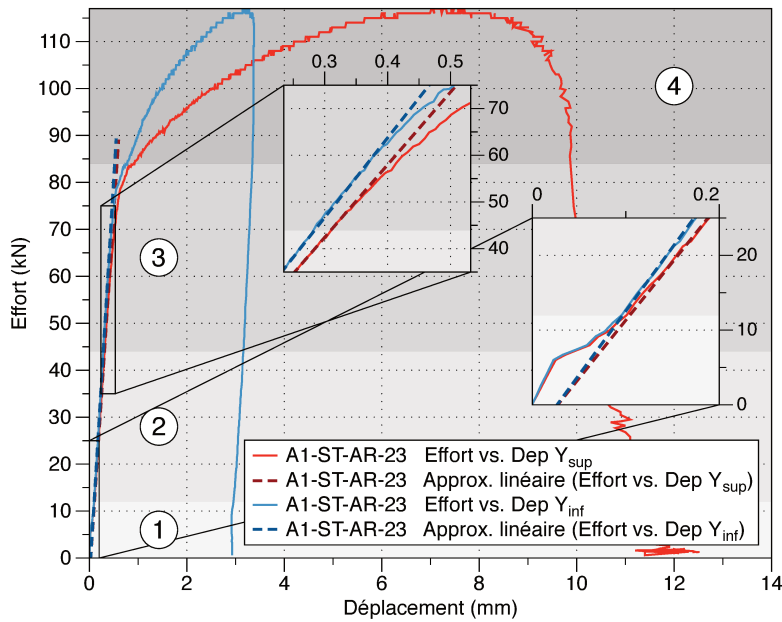


FIGURE 6.26 – Essai de traction sur l'éprouvette rivetée A1-ST-AR-23 en acier S235.

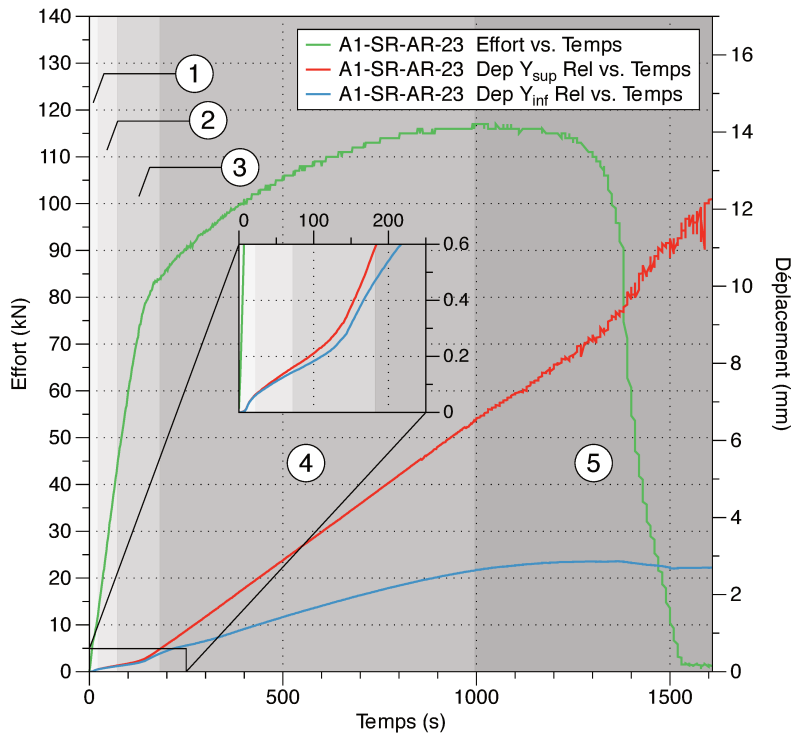


FIGURE 6.27 – Essai de traction sur l'éprouvette rivetée A1-ST-AR-23 en acier S235.

6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

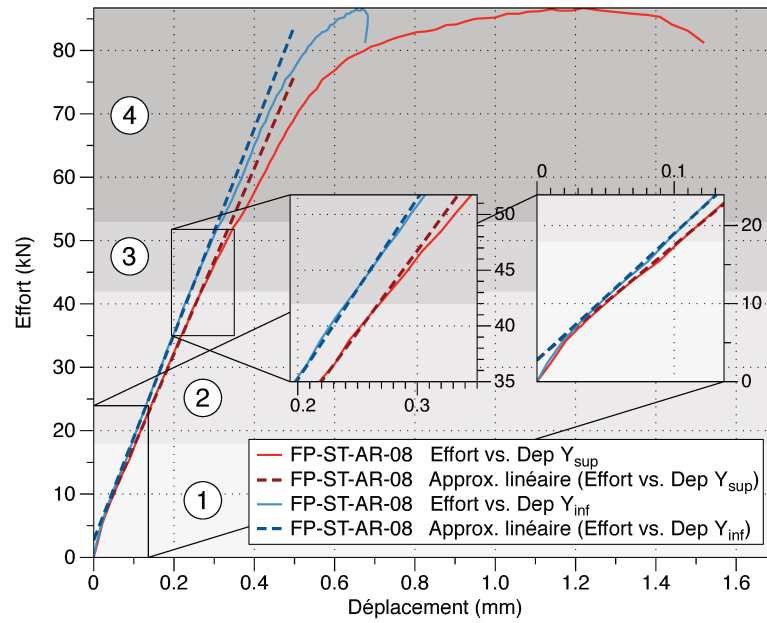


FIGURE 6.28 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AR-08 en fer puddlé et rivetée à chaud.

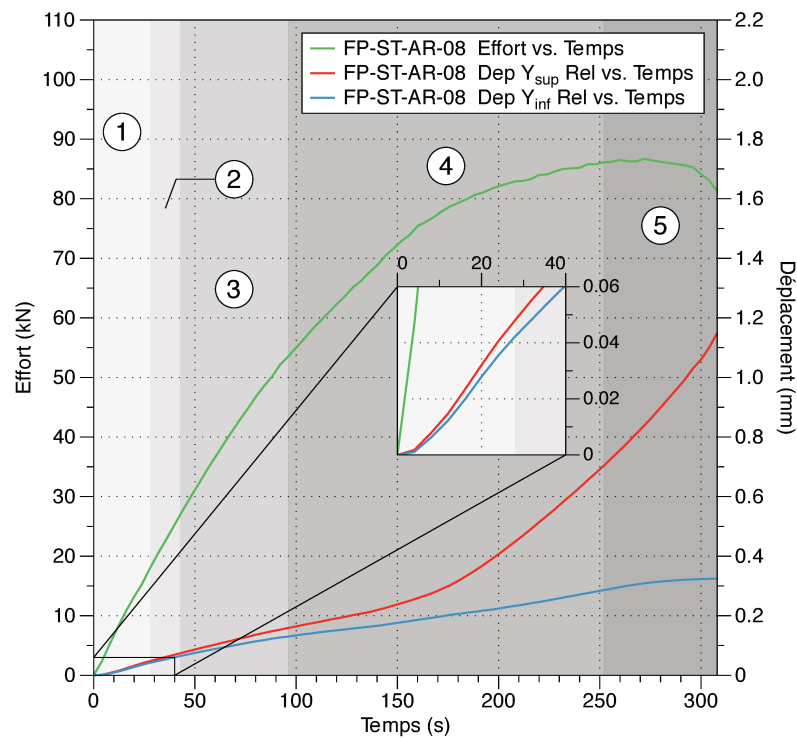


FIGURE 6.29 – Essai de traction sur l'éprouvette FP-ST-AR-08 en fer puddlé et rivetée à chaud.

Les autres assemblages testés dans les mêmes conditions ont montré des comportements (étapes, durée et niveau d'effort) également similaires.

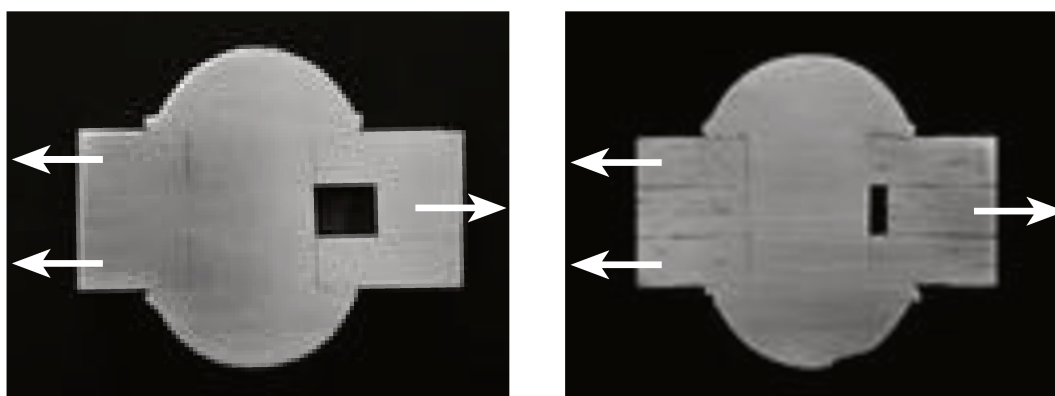
La table suivante propose un bilan des déplacements relatifs associés à la transition entre la première et la deuxième étape (entrée en contact présumée entre le tige du rivet et la surface interne du trou).

TABLE 6.2 – Bilan des déplacements verticaux relatifs à la transition entre la première et la deuxième étape du scénario de fonctionnement proposé pour les assemblages rivetés à chaud.

	A1-ST-AR-##			A2-ST-AR-##			FP-ST-AR-##		
# d'assemblage riveté	07	08	23	02	05	21	07	08	10
$DepY_{sup} Rel$	0,09	0,09	0,07	0,09	0,17	0,09	0,10	0,07	0,08

Nous observons donc une très bonne correspondance avec les valeurs les plus basses de la table 6.1. Ceci s'explique par un changement de comportement dès que le contact entre la tige du rivet et la tôle est établi (naturellement là où le jeu est le plus faible). Cette correspondance nous permet de valider la première étape du scénario associée au **glissement** entre les tôles.

Dans le but de vérifier nos observations par corrélation d'images, nous avons découpé des assemblages après leur rupture. Cette procédure nous a permis de vérifier le scénario global du fonctionnement de l'assemblage (voir figure 6.14). La figure 6.30 montre les jeux finaux (après rupture) pour une éprouvette en acier et une éprouvette en fer. Elles mettent en évidence l'effet de la pression diamétrale sur l'ensemble des tôles ainsi que le jeu très important de la tôle centrale dû à la déformation plastique (moins important dans le cas de du fer puddlé par son comportement fragile).



(a) Coupe longitudinale d'un rivet dans un assemblage fabriqué en acier S235 (Sire *et al.*, 2015).

(b) Coupe longitudinale d'un rivet dans un assemblage fabriqué en fer puddlé du Pont sur l'Adour.

FIGURE 6.30 – Analyse des jeux après rupture des éprouvettes rivetées.

**En conclusion, en complément des analyses précédentes, il nous est désormais possible de décrire la séquence de fonctionnement, en cinq étapes, d'un assemblage riveté en double recouvrement sollicité en traction monotone.**

### 6.3 Caractérisation de la raideur d'un assemblage riveté

Parmi les travaux traitant des scénarios de fonctionnement des assemblages rivetés sous chargements monotones nous retrouvons ceux proposés par Akesson (2010) et Al-

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

Emrani (2002) sur des assemblages rivetés en double recouvrement. La figure 6.31 illustre les étapes proposées dans leurs travaux.

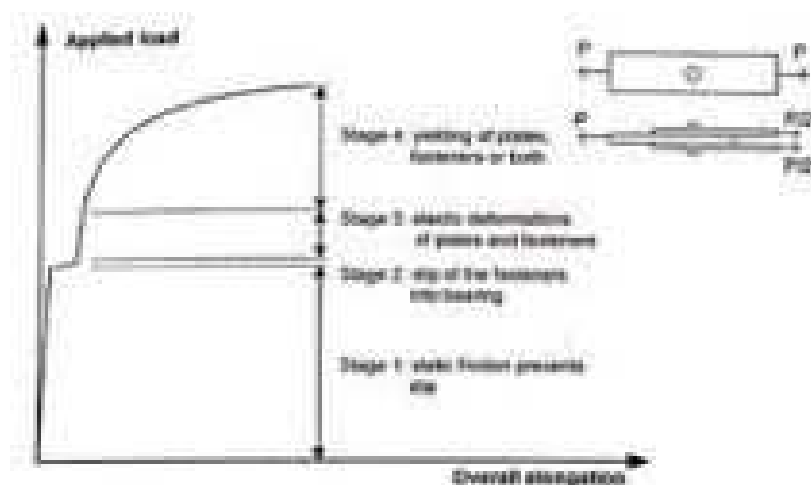


FIGURE 6.31 – Scénario de fonctionnement proposé par Al-Emrani (2002) pour un assemblage mono-rivet en double recouvrement.

Cette proposition de comportement est basée sur l'hypothèse considérant que le frottement induit par le serrage du rivet est suffisant pour transmettre des charges modérées sans qu'aucun glissement ne se produise entre les tôles. La définition de cette première étape où la raideur de l'assemblage serait particulièrement élevée ne correspondrait donc uniquement qu'au déplacement produit par la déformation élastique (et donc réversible) des tôles. Ceci expliquerait également l'utilisation de cette raideur, identifiée sous chargement monotone, comme paramètre du comportement mécanique de la structure également valable sous chargements cycliques.

Néanmoins, nos observations expérimentales montrent une séquence d'étapes de fonctionnement différentes où le mouvement relatif entre la tôle centrale et les tôles « externes » de l'assemblage apparaît dès le moment où une charge est appliquée. Nous nous confrontons donc à un mode de fonctionnement où les déplacements seraient liés à d'autres mécanismes que la seule déformation élastique des tôles.

En effet, lorsque nous observons le comportement mécanique sous chargement monotone des détails constructifs étudiés<sup>8</sup> en acier (dans le but de nous affranchir des possibles dispersions liées au matériau) (figure 6.32), nous faisons les observations suivantes pour les valeurs d'effort précédant toute apparition de plasticité théorique (même locale)<sup>9</sup> :

- Le comportement des tôles percées et des assemblages à tige à haute limite élastique est répétable, ceci n'est pas le cas des éprouvettes rivetées. En effet, malgré les nombreuses précautions prises lors de la séance de fabrication des éprouvettes rivetées, les nombreux paramètres agissant sur le processus du rivetage (§2.1.3) sont à la source de la dispersion observée pour ce type d'assemblage. Chaque assemblage riveté est unique.

8. Plaques percées, assemblage avec tige à haute limite élastique et assemblage riveté à chaud.

9. Dans ce domaine (en dessous de 40kN) il est possible de comparer le comportement des détails constructifs fabriqués à partir des tôles de deux lots d'acier S235. Ceci, uniquement sous l'hypothèse que l'alésage a réduit au minimum l'impact d'un éventuel écrouissage au bord du trou.

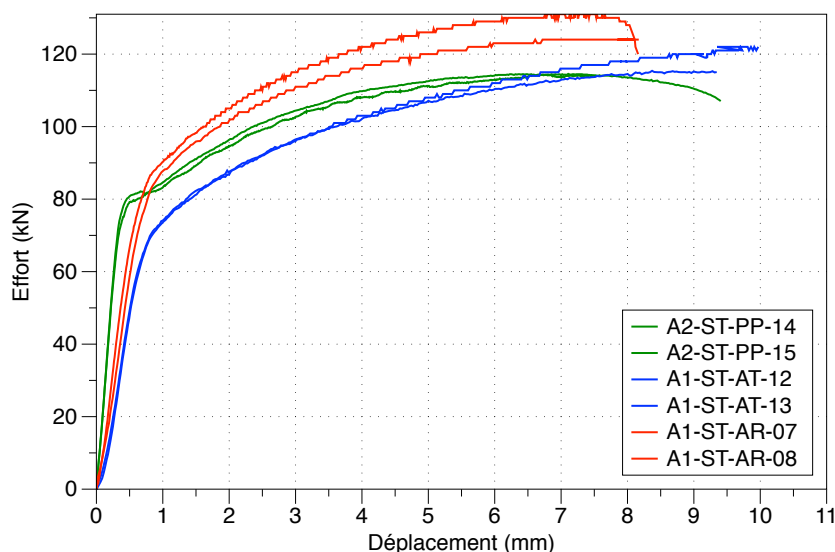


FIGURE 6.32 – Courbes de traction pour des éprouvettes de type détail constructif simple en acier (Effort vs.  $Dep Y_{sup}$ ) : plaques percées (en vert), assemblages avec tige à haute limite élastique (en bleu) et assemblages rivetés (en rouge).

- $k_{PP} < k_{AT} < k_{AR}$

Où  $k_{PP}$  représente la raideur d'une tôle percée,  $k_{AT}$  la raideur de l'assemblage avec tige à haute limite élastique et  $k_{AR}$  la raideur d'un assemblage riveté à chaud.

Pour les valeurs d'effort où la plasticité théorique locale est dépassée ( $> 45kN$  pour le lot N°1).

- Le rivetage à chaud semble retarder la plasticité généralisée dans la section nette (écart d'environ  $15kN$ )
- L'effort maximal atteint pour les assemblages rivetés est supérieur à celui des assemblages avec tige à haute limite élastique.

Ces observations, ainsi que celles basées sur les mesures de déplacements relatifs, soulèvent de nombreuses questions sur le rôle du serrage dans le comportement de l'assemblage, en particulier sur la plage d'effort durant laquelle le comportement reste linéaire (deuxième étape identifiée lors des expériences permettant de mettre en évidence une « raideur monotone »). En effet, la raideur identifiée dans cette étape de fonctionnement tiendrait compte du déplacement lié au glissement (non réversible) et les déplacements liés à la déformation élastique (et donc réversible) des tôles. C'est pourquoi, nous avons proposé la mise en place des essais de charge-décharge (retour à zéro) dans le but de distinguer les déplacements réversibles de ceux qui ne le sont pas.

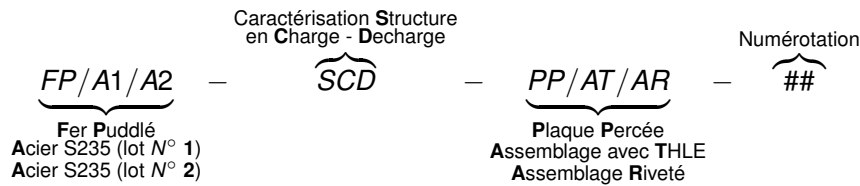
### 6.3.1 Essais de charge-décharge à charge maximale constante

Nous initions cette campagne expérimentale par l'application puis le relâchement d'un effort donné (charge-décharge) sur trois cycles. Cette manipulation nous permet d'observer, après le retour à  $0kN$  de l'effort, si la totalité du déplacement relevé pendant l'application de la charge lors du premier cycle<sup>10</sup> est réversible ou non.

10. Cette étape correspond à la sollicitation monotone des essais de traction analysés dans la section précédente.

### Notation des éprouvettes

Les éprouvettes de caractérisation matériau fabriquées en fer puddlé et en acier S235 suivent l'appellation suivante :



Ces essais ont été réalisés sur la même machine universelle utilisée pour les essais en traction monotone. Ils ont également été pilotés à une vitesse de déplacement de traverse de  $0.5 \text{ mm/min}$  avec des limites en effort. Les zones d'intérêt restent identiques à celles mises en place pour les essais sous chargement monotone (voir figure 6.5).

Nous commençons donc par l'analyse du comportement mécanique d'un assemblage riveté en acier (A1-SCD-AR-20) lors des trois premiers cycles de charge et décharge à une valeur maximale d'effort égale à  $22,5 \text{ kN}$ . L'évolution des grandeurs expérimentales mesurées pendant l'essai est illustrée dans la figure 6.33.

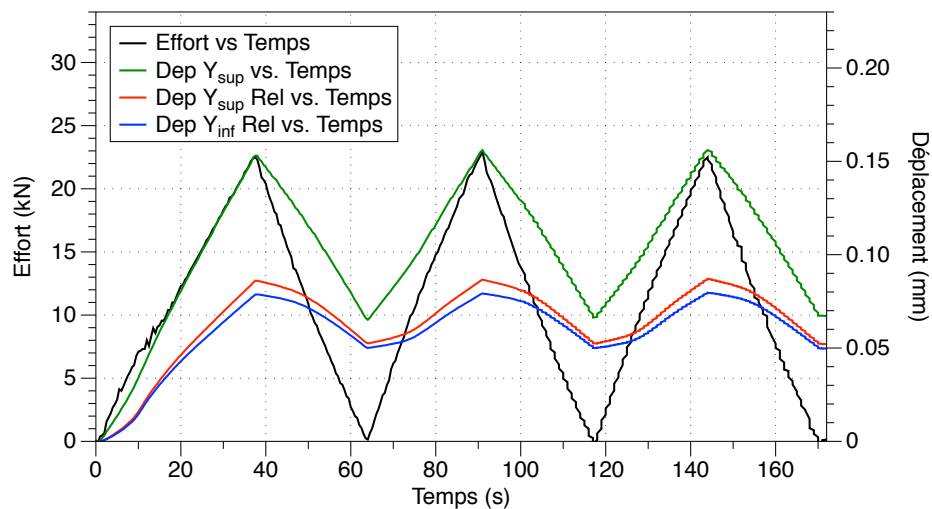


FIGURE 6.33 – Grandeurs expérimentales lors des premiers trois cycles de charge et de décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20.

La figure 6.34 montre l'effort appliqué à l'éprouvette en fonction du déplacement moyen vertical de la section supérieure de la tôle centrale (en rouge) et en fonction du déplacement moyen vertical *relatif* de la section supérieure de la tôle centrale (en bleu). Cette représentation montre clairement la non-réversibilité du déplacement généré lors de l'application du premier cycle de chargement. Nous définissons donc, à partir de ces résultats, une raideur dite « sécante » qui correspond à la pente (moyenne) des droites associées aux valeurs extrêmes d'effort et de déplacement des cycles. Cette démarche expérimentale est d'ailleurs utilisée dans la compréhension du comportement d'autres type d'assemblage, voir par exemple les travaux de *de Crevoisier et al. (2012)*.

Nous avons ensuite répété trois fois la séquence de trois cycles en charge-décharge à la même amplitude de  $22,5 \text{ kN}$  (12 cycles au total). Les figures 6.35 et 6.36 montrent la

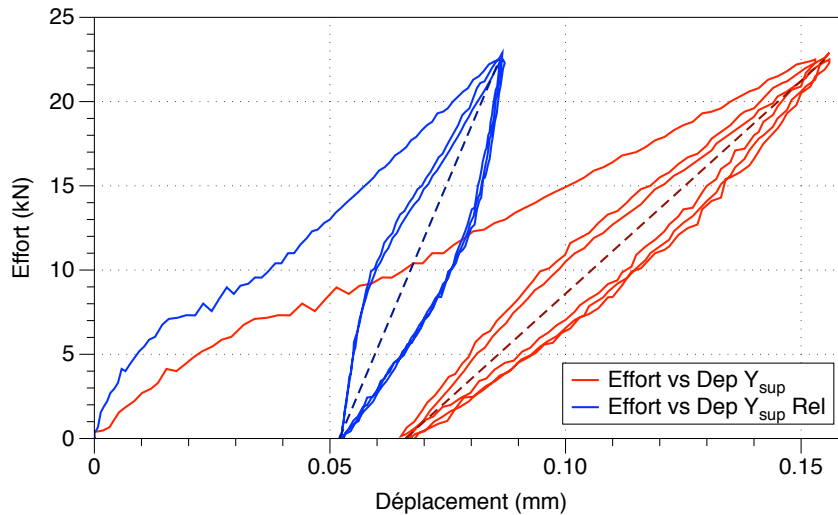


FIGURE 6.34 – Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les trois premiers cycles.

réponse de l'assemblage pour les cycles 4, 5 et 6 : la quasi-totalité du déplacement observé correspond au déplacement réversible. **C'est donc la raideur sécante** (observée à l'issue de 3, 6, 9 et 12 cycles) **et non la raideur monotone qui serait à prendre en compte dans l'analyse du comportement de l'assemblage sous sollicitations cycliques**. Les valeurs de cette raideur sécante (qui peut être calculée selon le déplacement global ou selon le déplacement relatif de la section supérieure de la tôle centrale) pour les deux assemblages testés est illustrée à l'aide la figure 6.37. Celle-ci met en évidence la non-évolution de cette raideur au bout des douze cycles appliqués à l'éprouvette. Cependant, il est à signaler que cette allure stable de la raideur sécante pour une douzaine des cycles ne garantit d'aucune manière sa non-évolution pour un nombre de cycles beaucoup plus important (des milliers, voire des millions de cycles). En effet, le frottement entre les tôles suite à des très nombreux cycles risque de modifier l'état des surfaces de contact entre les tôles (possible déconsolidation de l'assemblage).

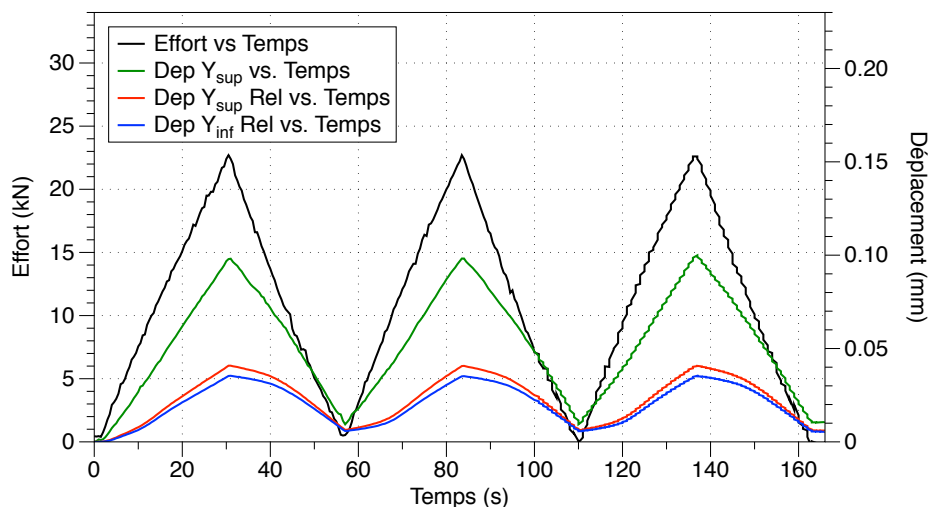


FIGURE 6.35 – Grandeurs expérimentales lors des cycles 4, 5 et 6 de charge et décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20.



6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

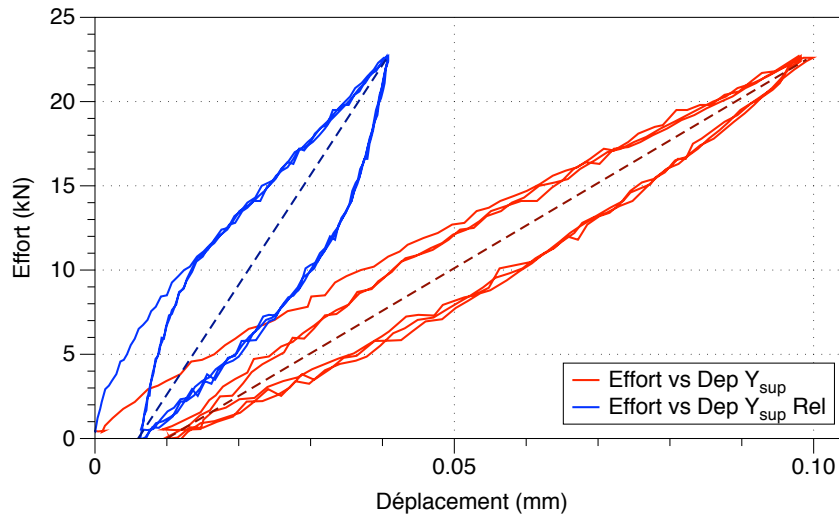
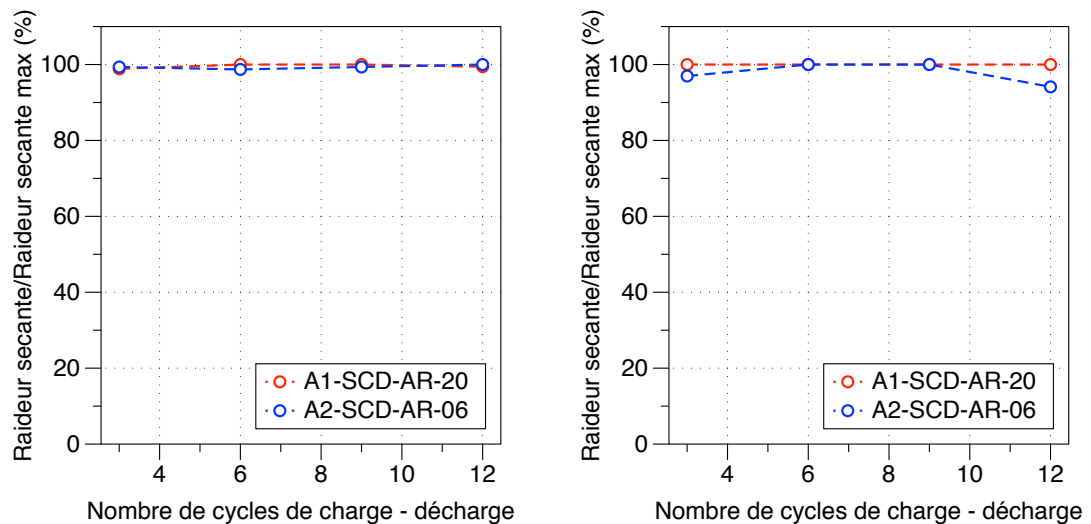


FIGURE 6.36 – Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les cycles 4, 5 et 6.

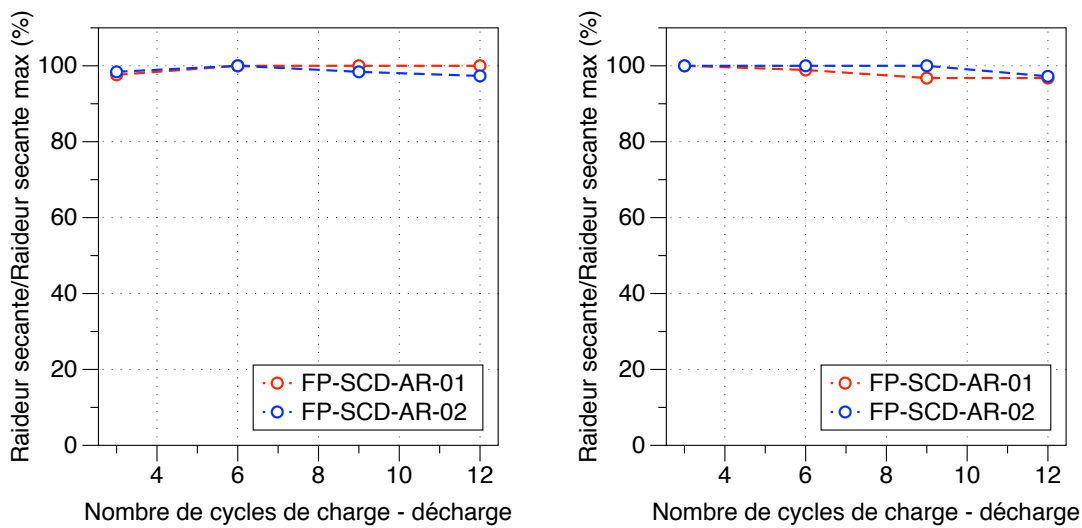


(a) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement global) selon le nombre de cycles de charge-décharge appliqués aux éprouvettes A1-SCD-AR-20 et A2-SCD-AR-06.

(b) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement relatif) selon le nombre de cycles de charge-décharge appliqués aux éprouvettes A1-SCD-AR-20 et A2-SCD-AR-06.

FIGURE 6.37 – Évolution de la raideur sécante en fonction des nombres de cycles appliqués sur des assemblages rivetés en acier.

La même procédure expérimentale à été utilisée sur des éprouvettes en fer puddlé, aucune évolution de la raideur sécante au bout de douze cycles n'a été constatée (voir figure 6.38) pour les deux assemblages en fer puddlé testés.



(a) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement global) selon le nombre de cycles de charge-décharge appliqués aux éprouvettes FP-SCD-AR-01 et FP-SCD-AR-02.

(b) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement relatif) selon le nombre de cycles de charge-décharge appliqués aux éprouvettes FP-SCD-AR-01 et FP-SCD-AR-02.

FIGURE 6.38 – Évolution de la raideur sécante en fonction des nombres de cycles appliqués sur des assemblages rivetés en fer puddlé.

### 6.3.2 Essais de charge-décharge à charge maximale incrémentale

En complément des essais à amplitude de charge constante nous souhaitons connaître l'influence du chargement maximal de chaque cycle de chargement sur la raideur sécante de l'assemblage. Compte tenu des valeurs presque identiques pour le premier et le douzième cycles observés, nous avons appliqué des cycles de charge décharge progressifs tels que montré dans la figure 6.39.

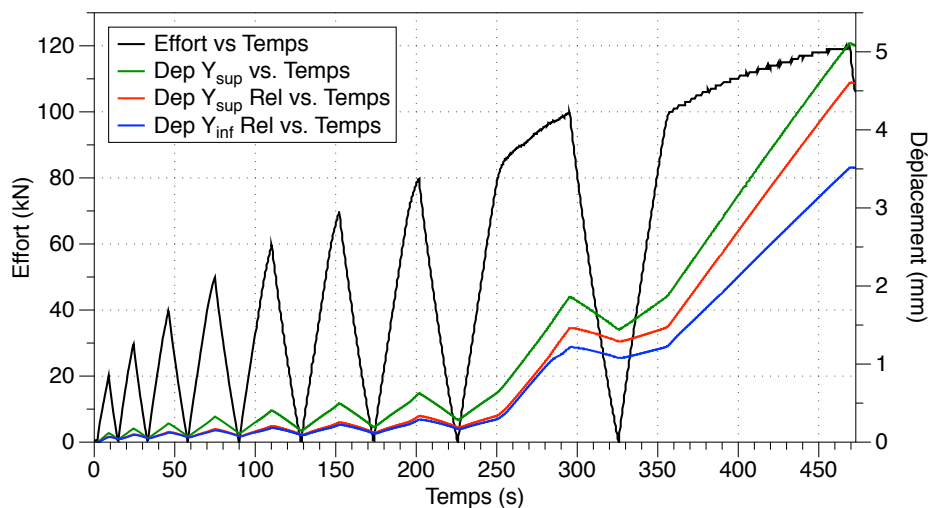


FIGURE 6.39 – Grandeurs expérimentales lors de cycles incrémentaux de charge et de décharge appliqués sur l'éprouvette A1-SCD-AR-20.

La figure 6.40 montre l'évolution de l'effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en

## 6. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

fonction des mesures de déplacements global et relatif pour la zone supérieure de la tôle centrale de l'éprouvette.

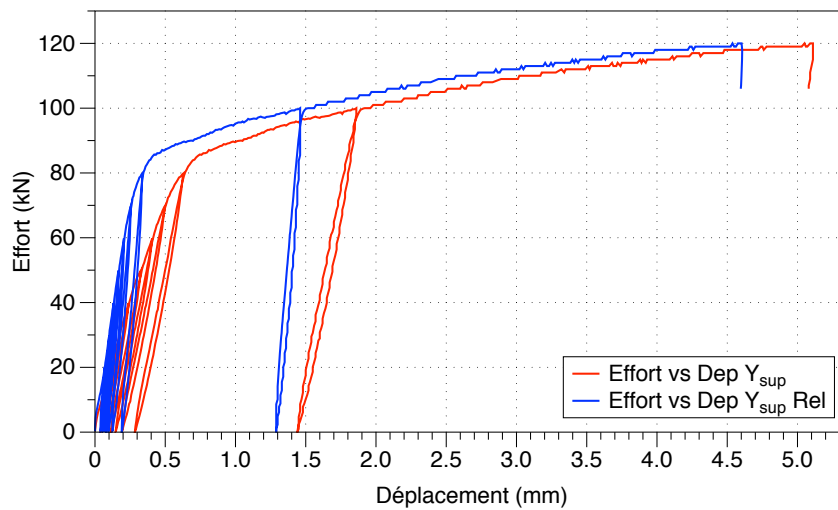
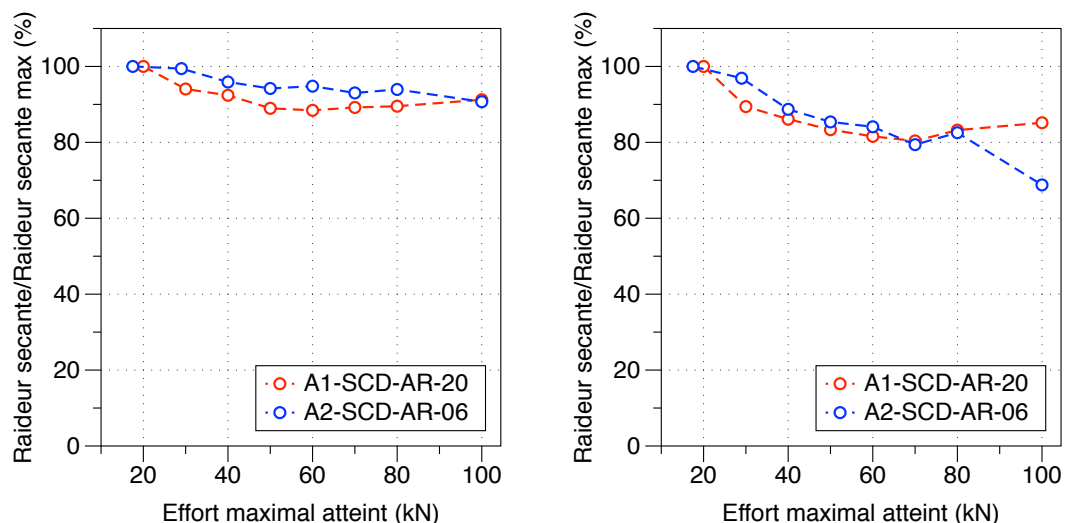


FIGURE 6.40 – Effort appliqué à l'éprouvette A1-SCD-AR-20 en fonction des déplacements mesurés sur la tôle centrale de l'assemblage pour les cycles incrémentaux de charge et de décharge.

L'évolution des raideurs sécantes pour les éprouvettes testées montre ici une tendance très claire vis-à-vis de la valeur maximale du cycle de charge décharge appliqué. Ces résultats sont néanmoins délicats à interpréter, car une fois que la plasticité apparaît, les mécanismes pouvant modifier la raideur de l'assemblage sont complexes (*e. g.* évolution du module d'élasticité en fonction de l'écrouissage.).

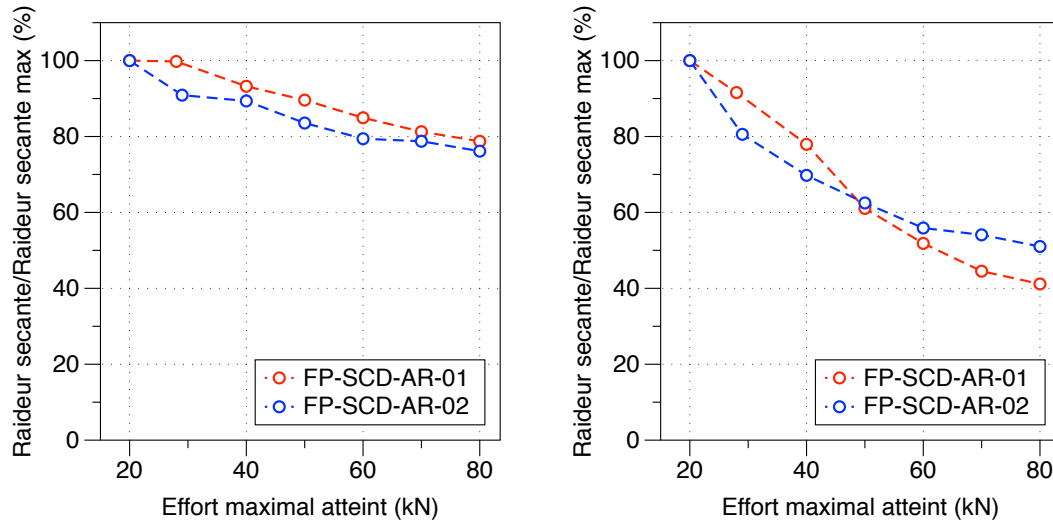


(a) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement global) selon l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué aux éprouvettes A1-SCD-AR-20 et A2-SCD-AR-06.

(b) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement relatif) selon l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué aux éprouvettes A1-SCD-AR-20 et A2-SCD-AR-06.

FIGURE 6.41 – Évolution de la raideur sécante en fonction de l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué sur des assemblages rivetés en acier.

La même procédure expérimentale à été utilisée sur des éprouvettes en fer puddlé, l'évolution constatée sur les deux éprouvettes testées est d'avantage marquée que pour les éprouvettes en acier.



(a) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement global) selon l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué aux éprouvettes FP-SCD-AR-01 et FP-SCD-AR-02.

(b) Évolution de la raideur sécante (pour les mesures de déplacement relatif) selon l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué aux éprouvettes FP-SCD-AR-01 et FP-SCD-AR-02.

FIGURE 6.42 – Évolution de la raideur sécante en fonction de l'effort maximum du cycle de charge-décharge appliqué sur des assemblages rivetés en fer puddlé.

Ces expériences, bien que réalisées sur un nombre réduit d'éprouvettes, soulèvent la potentielle dépendance de la rigidité d'un assemblage riveté aux chargements exceptionnels.

## 6.4 Conclusion

Dans le but de caractériser finement le comportement mécanique des assemblages rivetés, des expériences originales ont été mises en œuvre. Nous avons observé à l'aide d'un système de corrélation d'images le comportement de trois détails constructifs simples (plaque percée, assemblage avec tige à haute limite élastique et assemblage riveté) sous sollicitations quasi-statiques monotones et quasi-statiques en charge-décharge.

L'analyse comparative sous sollicitation monotone entre les trois configurations géométriques étudiées, nous a permis de proposer une séquence de fonctionnement comportant cinq étapes pour un assemblage mono-rivet en double recouvrement :

1. Glissement entre la tôle centrale et les tôles extérieures. Cette étape se termine par l'entrée en contact de la tige avec la surface interne du trou. **Transmission d'effort par frottement.**
2. Une fois le contact établi entre la tige du rivet et la tôle, la **transmission d'effort s'effectue par frottement et par pression diamétrale.** L'ensemble de l'assemblage se **déforme élastiquement.**
3. Apparition de **plasticité localisée** au bord du trou suite à un effet de concentration de contrainte.

4. **Généralisation de la plasticité** dans l'ensemble de la section droite la plus faible de la tôle centrale (section nette).
5. **Striction** de la section la plus faible de la tôle centrale (section nette).

Une fois la séquence de fonctionnement établie, nous nous sommes interrogés sur le caractère réversible (ou irréversible) des déplacements mesurés. Pour cela, des sollicitations en charge-décharge à amplitude constante et incrémentale ont été appliquées sur les assemblages rivetés étudiés.

Les sollicitations à amplitude constante ont mis en évidence la différence de raideur pour un assemblage lorsqu'il est soumis à un chargement monotone vs. un chargement cyclique. Elles ont aussi soulevé l'intérêt de poursuivre ce type d'expériences sur un nombre plus important de cycles.

Dans le cas d'étude de la raideur sous chargements incrémentaux, nous avons montré que celle-ci pouvait être fortement diminuée pour les charges élevées. Cette étude, doit donc être poursuivie notamment pour analyser la comportement des ouvrages rivetés suite à des chargements exceptionnels.

# Caractérisation mécanique de détails constructifs simples sous chargements cycliques

*La première partie de ce mémoire et les résultats expérimentaux du chapitre précédent ont mis en évidence l'existence de plusieurs modes de ruine au sein des assemblages rivetés. Ce chapitre présente les résultats de la démarche expérimentale décrite dans le chapitre 4 appliquée aux sollicitations cycliques.*

*Les résultats et la discussion des essais de caractérisation en fatigue sur des détails constructifs simples sont exposés. Des conclusions sur le comportement en fatigue des assemblages rivetés sont également présentées.*

## Contenu

---

7.1	Influence de la concentration de contrainte dans le comportement à la fatigue : essais sur plaques percées . . . . .	170
7.2	Influence de la présence d'une pression diamétrale : essais sur assemblages avec tige à haute limite élastique . . . . .	173
7.3	Influence de la présence d'un effort de serrage : essais sur assemblages rivetés . . . . .	175
7.4	Conclusion . . . . .	177

---



---

Après avoir analysé le comportement des mini-structures sous chargement monotone, nous proposons une caractérisation en fatigue « classique » de ces détails constructifs<sup>1</sup>. L'approche expérimentale adoptée, progressive, permet d'analyser l'influence dans le comportement en fatigue de :

- La concentration de contrainte au bord du trou.
- La pression diamétrale exercée par une tige.
- L'effort du serrage dû au rivetage.

Pour cette campagne, la machine de torsion - traction - compression de TEMA Concept décrite précédemment au chapitre 5 a été utilisée. Tous les essais sont pilotés en effort (chargement sinusoïdal) à une fréquence de 20Hz. Une limite en déplacement a été imposée comme critère d'arrêt des essais :  $\pm 5mm$ . Afin que de rapprocher le chargement expérimental proposé le plus possible (dans les limites des capacités de sollicitation) aux chargements subis par un assemblage en conditions réelles (sur un ouvrage d'art), un rapport de charge  $R = 0$  a été choisi.

Nous avons donc, pour chaque configuration testée, confronté nos résultats expérimentaux avec la courbe de fatigue correspondant au détail C71. Cette courbe est en effet utilisée comme repère par les bureaux d'étude dans le dimensionnement en fatigue des assemblages rivetés et sera donc utilisée en tant que référence.

Le coefficient  $m$  (§5.2.2.1) de la loi puissance correspondant aux résultats sera également précisé pour chaque type de détail constructif étudié<sup>2</sup>. Pour la détermination de ce paramètre  $m$ , seuls les points correspondant aux éprouvettes rompues sont pris en compte.

Afin d'analyser l'influence du paramètre « matériau », nous comparons les résultats obtenus pour les éprouvettes en fer puddlé du Pont sur l'Adour avec ceux pour les éprouvettes en acier S235. Tous les chargements appliqués, exprimés en étendue de contrainte (calculée dans la section nette), sont inférieurs aux limites élastiques des matériaux correspondants (voir chapitre 5). Les chargements appliqués se situent donc dans le domaine d'élasticité initial des aciers testés.

Enfin, nous proposons un code symbolique en couleurs pour la représentation des résultats d'essais :

- Les mini-structures en acier S235 sont marquées par un «  $\triangle$  ».
- Les mini-structures en fer puddlé sont marquées par un «  $\circ$  ».
- Les éprouvettes à section pleine du type « matériau » son indiquée en **violet**.
- Les mini-structures « plaques-percées » sont indiquées en **vert**.
- Les assemblages avec tige à haute limite élastique sont en **bleu**.
- Les assemblages rivetés sont en **rouge**.

Nous adoptons la représentation classique avec une flèche «  $\circ \rightarrow$  » pour les éprouvettes non rompues. Nous rappelons également que les résultats sont présentés dans un diagramme du type log-log, en étendue de contrainte nette (voir chapitre 1 pour les explications correspondantes).

---

1. Les mini-structures sont identiques à celles décrites et testées au chapitre précédent.

2. Il sera ainsi comparé avec la valeur correspondante donnée pour le détail constructif C71 où  $m_{C71}$  pour la plage de données concernée est égale à 3.



## 7.1 Influence de la concentration de contrainte dans le comportement à la fatigue : essais sur plaques percées

Les résultats des essais de fatigue sur fer puddlé sont présentés dans la figure 7.1 pour les plaques percées (et alésées) ainsi que pour les éprouvettes « matériau » de même section pleine.

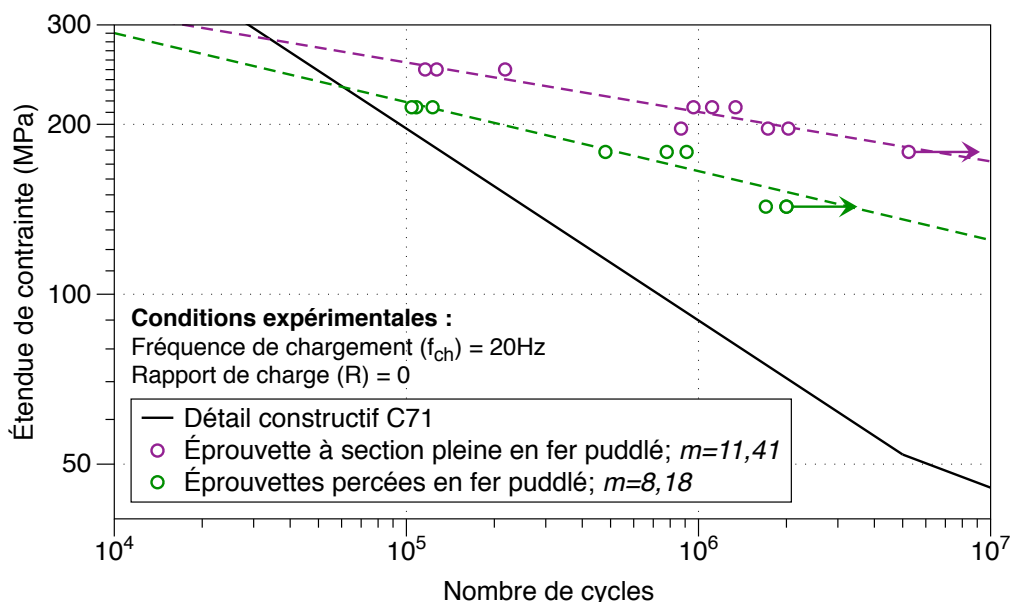


FIGURE 7.1 – Courbes S-N pour éprouvettes à section pleine et pour éprouvettes percées (et alésées) en fer puddlé du Pont sur l'Adour. Mise en évidence de l'influence de la concentration de contraintes sur le comportement en fatigue d'un détail constructif.

L'influence de la concentration de contrainte est clairement montrée. Le perçage diminue en effet sensiblement la résistance en fatigue d'une éprouvette en fer puddlé. Pour une étendue de contrainte de 200MPa, le nombre de cycles à rupture passe de  $2 \times 10^6$  cycles à  $2 \times 10^5$  cycles. À  $2 \times 10^6$  cycles, la diminution de l'étendue de contrainte acceptée diminue d'environ 50MPa; cette valeur semble stable lorsque le nombre de cycles augmente. Ces écarts sont dus à la concentration de contrainte au bord du trou pendant le chargement et également à la création d'une nouvelle surface (le trou) susceptible de présenter des inclusions, donc des amorces de fissures potentielles.

Les deux pentes proposées ont des coefficients  $m$  élevés ( $m = 8,14$  et  $m = 11,14$  pour la plaque percée et l'éprouvette « matériau » respectivement). Même si ces valeurs diffèrent, elles traduisent la dispersion forte propre aux éléments en fer puddlé. En effet, à étendue de contrainte donnée, le nombre de cycles à rupture peut beaucoup varier.

Les résultats de tests sur les éléments en acier S235 (lot N°2) sont présentés dans la figure 7.2. Le comportement de cet acier n'a pas pu être complètement défini au cours de cette campagne. En effet, à cause des limites d'efforts acceptables pour la machine et surtout du temps d'immobilisation requis pour les tests, nous avons dû limiter le nombre d'essais.

Comme le montrent les points sur la figure 7.2, la détermination du comportement de l'acier S235 aurait nécessité des essais très longs et non compatibles avec toutes les autres campagnes expérimentales nécessaires à ce travail. Un essai de  $8 \times 10^6$  cycles à 20Hz

7.1. Influence de la concentration de contrainte dans le comportement à la fatigue : essais sur plaques percées

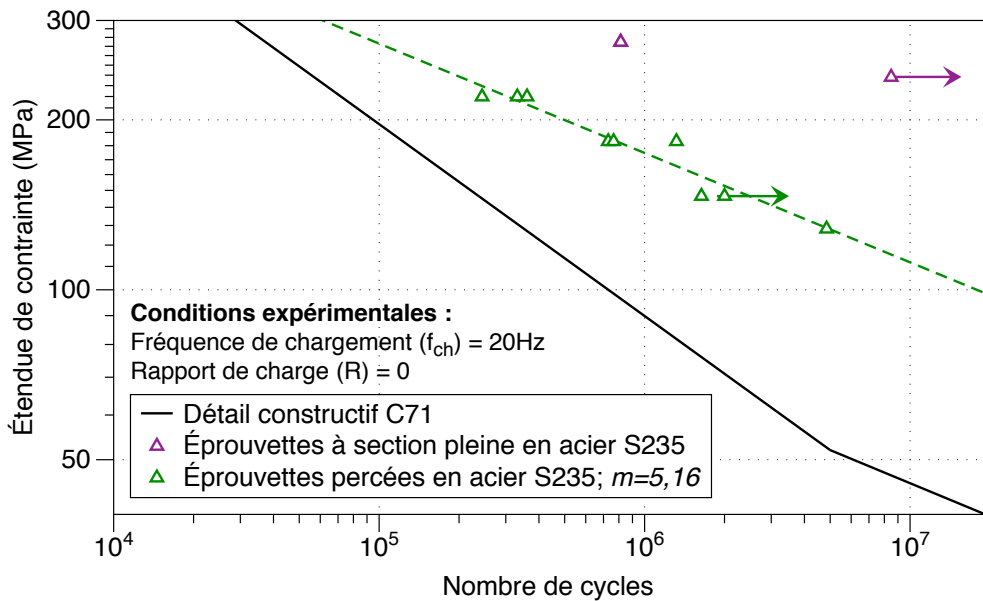


FIGURE 7.2 – Courbes S-N pour éprouvettes à section pleine et pour éprouvettes percées (et alésées) en acier S235 (lot N° 2). Mise en évidence de l'influence de la concentration de contraintes sur le comportement en fatigue d'un détail constructif.

de plus en plus dure en effet, approximativement 4 jours et 15 heures. Cependant, comme pour le cas du fer puddlé, une diminution de la résistance en fatigue est montrée (pour 800000 cycles, la différence en étendue de contraintes est de 80MPa). L'analyse microscopique de l'acier ne présentant pas d'inclusions, cette différence peut être expliquée par l'accident géométrique résultant du perçage qui crée une forte concentration de contraintes.

La figure 7.3 regroupe les résultats obtenus sur plaques percées en acier S235 et en fer puddlé.

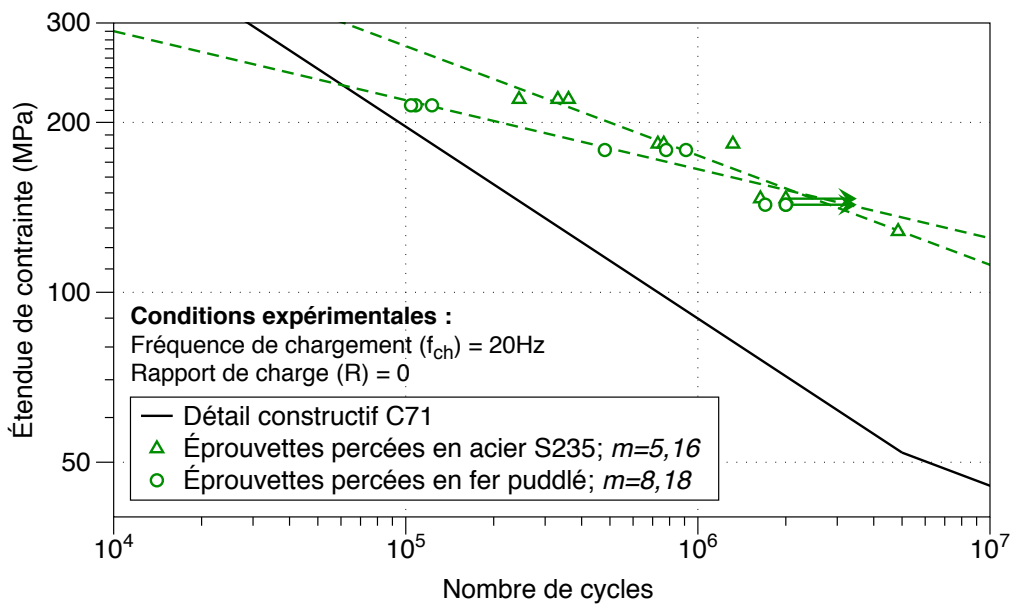


FIGURE 7.3 – Courbes S-N pour éprouvettes percées (et alésées) en fer puddlé du Pont sur l'Adour et en acier S235. Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type.

## 7. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES

Cette comparaison montre un comportement à  $2 \times 10^6$  très proche et le comportement plus dispersif du fer puddlé est montré par un coefficient de pente plus élevé. Enfin, on note que la courbe de fatigue associée au détail constructif C71 est conservatrice pour les points obtenus.

Le procédé d'obtention des trous (perçage vs. poinçonnage) a potentiellement, comme pour les chargements monotones (voir chapitre 6), une influence sur le comportement en fatigue des plaques percées. La figure 7.4 présente un bilan de tests réalisés sur éprouvettes avec trous percés vs. éprouvettes avec trous poinçonnés (Mang et Bucak, 1996). Ce bilan montre que la courbe de fatigue C71 n'est pas non plus adaptée aux détails testés, notamment pour les étendues de contraintes élevées où elle s'avère particulièrement conservatrice.

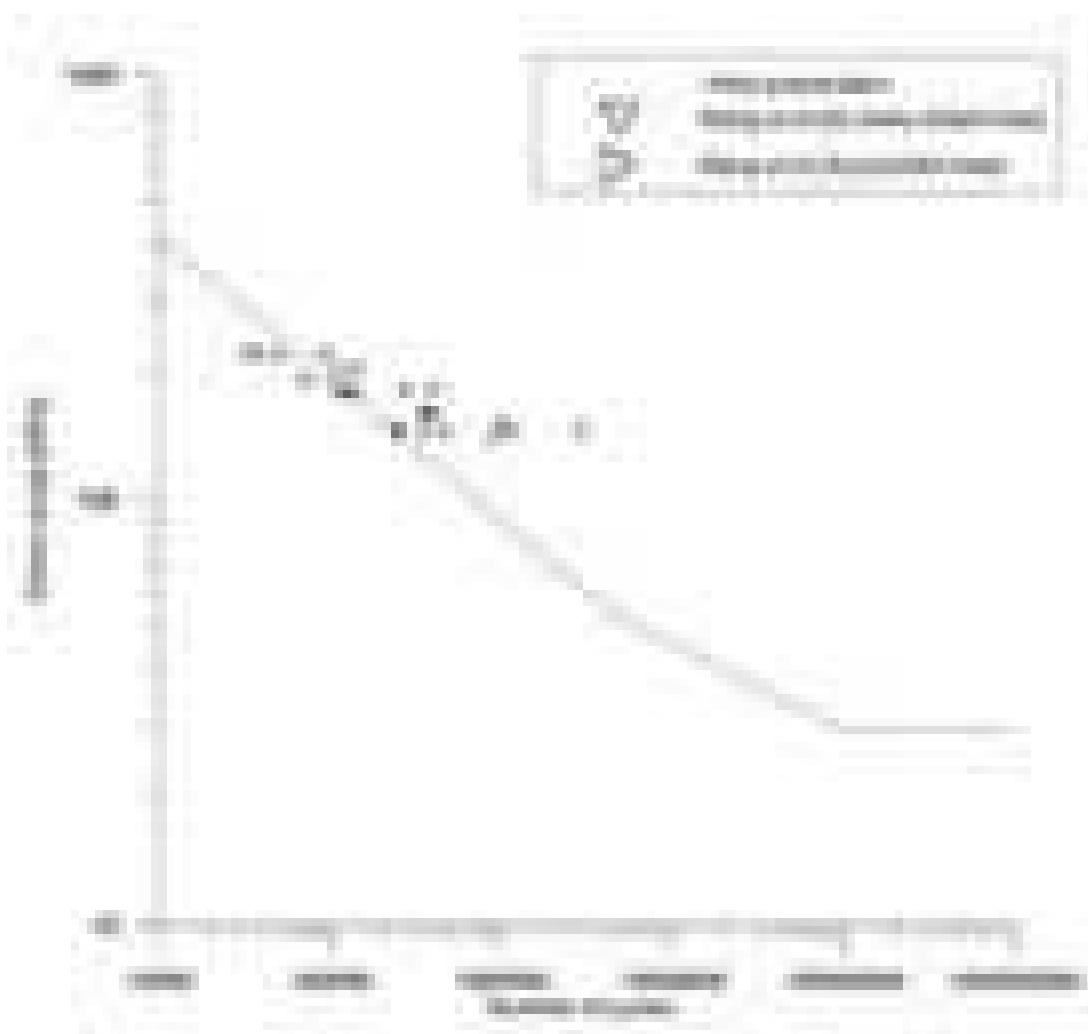


FIGURE 7.4 – Essais de fatigue sur tôles percées. Mise en évidence de l'influence du procédé utilisé, d'après Mang et Bucak (1996); Sustainable Bridges (2007).

Mang et Bucak (1996) soulignent à partir de cet exemple qu'il n'y a pas *a priori* de différence marquée dans le comportement en fatigue entre les éprouvettes poinçonnées et les éprouvettes percées.

## 7.2 Influence de la présence d'une pression diamétrale : essais sur assemblages avec tige à haute limite élastique

La figure 7.5 présente les résultats comparatifs obtenus sur acier S235 entre une plaque percée et d'un ensemble de trois tôles reliées par un axe à haute limite élastique. Cet ensemble de trois tôles est maintenu par cet axe épaulé et un écrou (et contre-écrou) de l'autre coté (voir figure 6.13). Un serrage jute au contact a été appliqué<sup>3</sup> ; nous considérons, comme pour le chapitre précédent, que cet effort de serrage quasi nul est négligeable. En considérant une adhérence nulle entre les tôles, nous comparons bien une plaque percée avec une plaque percée subissant une pression diamétrale .

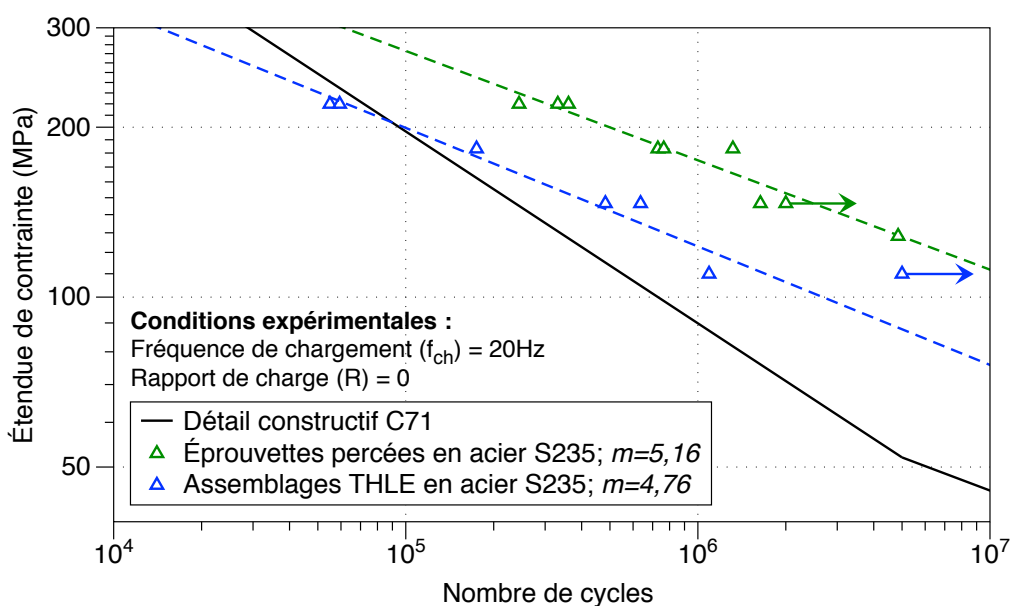


FIGURE 7.5 – Courbes S-N pour éprouvettes percées et alésées et éprouvettes assemblées en double recouvrement (en acier S235, lot N° 1) par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence d'une pression diamétrale.

Sur acier S235, l'effet négatif induit par la pression diamétrale est montré. Les deux pentes étant quasiment parallèles (les valeurs de  $m$  sont très voisines) cet effet négatif est d'environ  $60MPa$  à  $1 \times 10^6$  cycles. À  $180MPa$  d'étendue de contrainte, l'écart est d'environ 400000 cycles. Nous notons que la courbe associée au détail C71 est encore conservatrice pour le domaine à grand nombre de cycles. En revanche, cette courbe ne semble pas adaptée aux étendues de contrainte importantes.

Ces conclusions sont identiques dans le cas du fer puddlé, voir figure 7.6. La faible différence des pentes semble accroître, pour les grands nombre de cycles, l'effet négatif du matage induit par la pression diamétrale de la tige.

À durée de vie donnée, l'écart en étendue de contraintes est d'environ  $50MPa$ . À  $180MPa$  d'étendue de contrainte, l'écart est d'environ 500000 cycles. Pour ce matériau, la courbe C71 ne semble pas non plus être adaptée aux fortes étendues de contrainte.

Le coefficient  $m$  est abaissé par le matage. Celui-ci, induit par la pression diamétrale de la tige traduit une dispersion moindre des résultats. La surface matée semble ainsi réduire

3. Ce contact permet la mise en place des trois tôles dans les mors de la machine d'essais.

7. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES

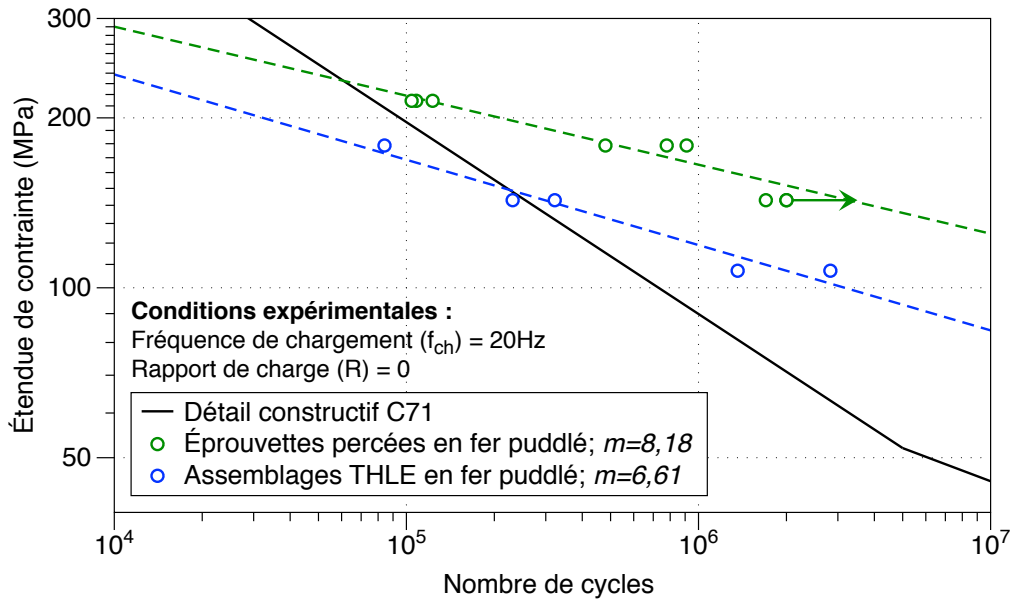


FIGURE 7.6 – Courbes S-N pour éprouvettes percées et alésées (en fer puddlé du Pont sur l'Adour) et éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence d'une pression diamétrale.

le risque d'apparition de fissures de fatigue au bord du trou. Ce supposé écrasement des amorces au niveau des inclusions doit néanmoins être étudié d'avantage pour proposer une conclusion plus certaine (notamment avec d'avantage de points d'expérimentation).

L'effet matériau est mis en évidence par les résultats de la figure 7.7.

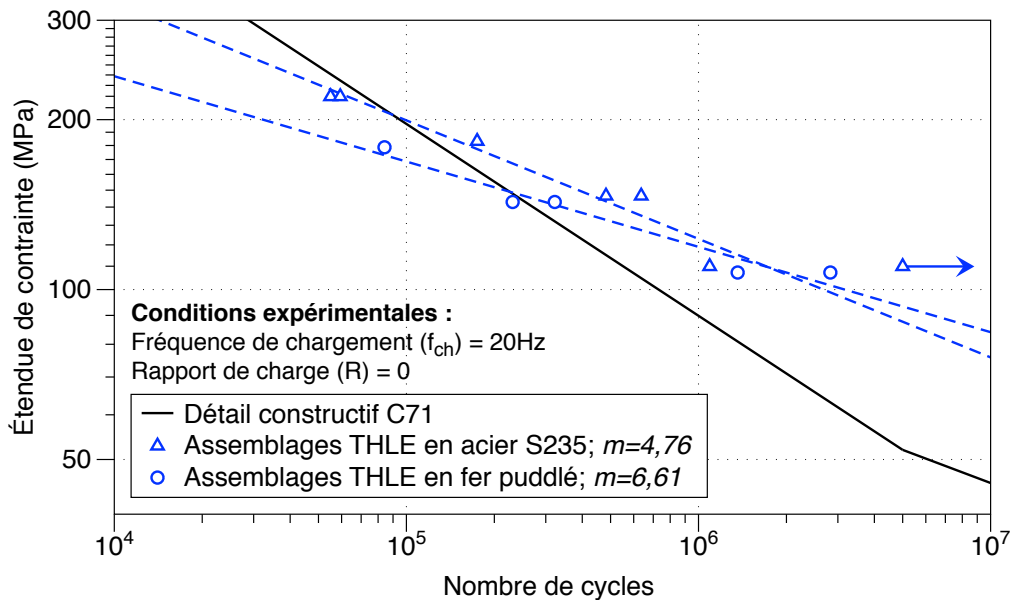


FIGURE 7.7 – Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique. Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type.

La différence, certes moins marquée, entre les pentes de ces deux courbes de fatigue souligne à nouveau le comportement plus dispersif du fer puddlé. À  $2 \times 10^6$  cycles, les

résultats sont très proches entre acier S235 et fer puddlé. Nous observons que pour ces deux métaux, le détail C71 ne semble pas être adapté. Il sous-estime de manière significative la résistance à la fatigue à grand nombre de cycles.

### 7.3 Influence de la présence d'un effort de serrage : essais sur assemblages rivetés

La figure 7.8 présente l'influence de l'effort de serrage dû au procédé de rivetage à chaud sur des assemblages en acier S235.

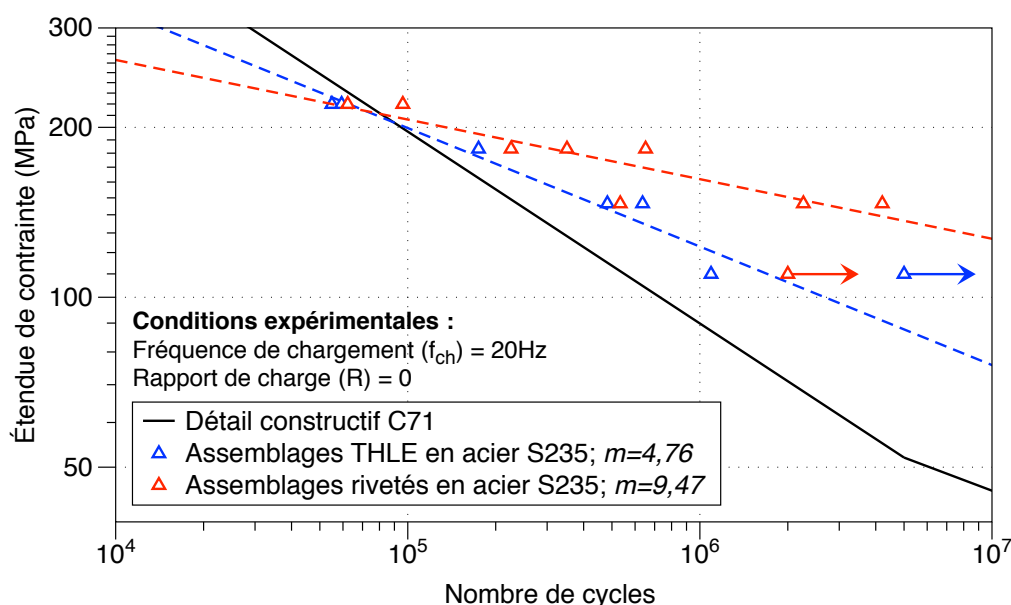


FIGURE 7.8 – Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique et éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355 et tôles en acier S235, lot N° 2). Mise en évidence de l'influence d'un effort de serrage.

La comparaison de ces deux courbes apporte deux conclusions. Tout d'abord, le serrage dû au rivetage induit une augmentation nette de la résistance en fatigue de la tôle centrale de l'assemblage. De plus, le coefficient  $m$  de la pente est plus élevé, traduisant une dispersion plus forte des résultats. Cette augmentation de dispersion est attribuée, comme au chapitre 6, aux nombreux paramètres difficilement maîtrisables du procédé de rivetage (température de pose, durée du rivetage, etc.).

Ces résultats sont très voisins aux alentours de  $200\text{MPa}$  (équivalents à  $50\text{kN}$ ). Sous cette étendue de contrainte élevée, l'assemblage riveté semble donc se comporter comme un assemblage avec tige à haute limite élastique.

Dans le cas du fer puddlé, nous n'observons pas de différence marquée avec l'assemblage avec tige à haute limite élastique voir figure 7.9. L'état de surface des tôles assemblées, identique dans les deux cas, semble avoir un rôle déterminant dans la tenue en fatigue des assemblages. En effet, la peinture (minium) présente sur les tôles en fer puddlé s'altère au cours des cycles et les particules retirées par le frottement s'installent entre les tôles et dégradent l'adhérence. Cette modification des conditions d'adhérence est

## 7. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES

illustrée sur la figure 7.10. Les pentes proches relevées sur ces deux courbes suggèrent également un effet matériau important. Pour des faibles étendues de contraintes, le rivetage semble toutefois, pour les éprouvettes testées, augmenter la résistance en fatigue de la tôle centrale.

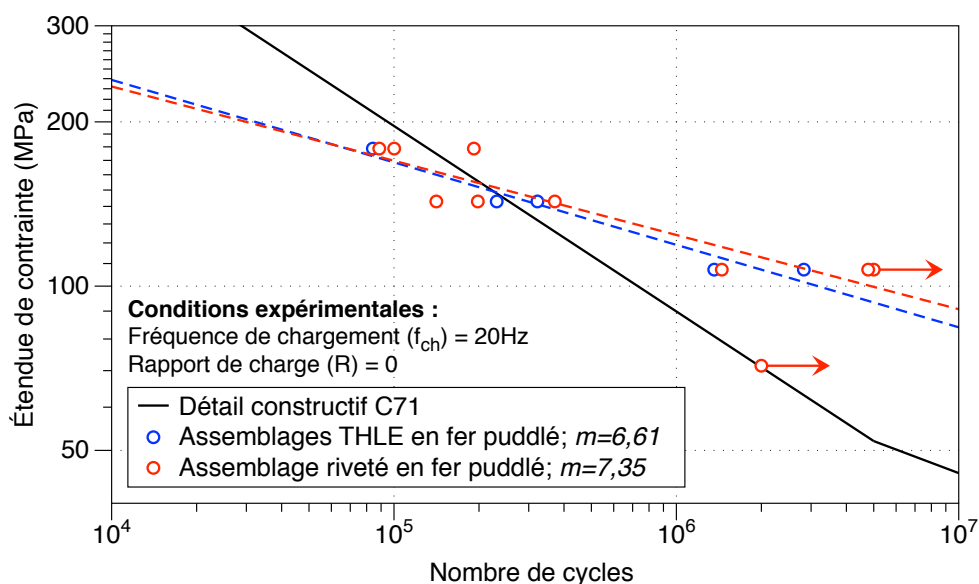


FIGURE 7.9 – Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par une tige à haute limite élastique et éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355 et tôles en fer puddlé). Mise en évidence de l'influence d'un effort de serrage.

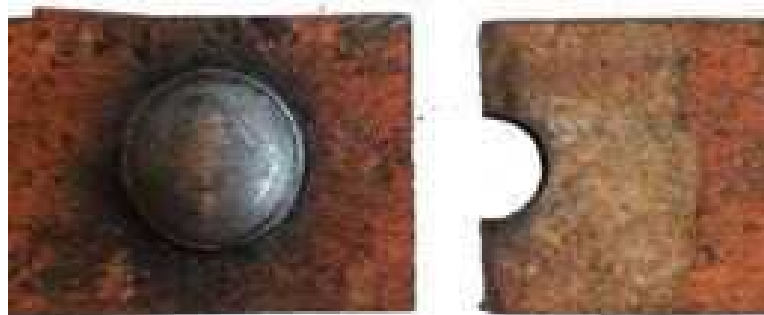


FIGURE 7.10 – Mise en évidence de la dégradation de la peinture sous chargement cyclique pour les éprouvettes en fer puddlé.

Le bilan de la figure 7.11 montre la dispersion importante des résultats de fatigue, quel que soit le matériau.

Cette dispersion, caractérisée par un coefficient  $m$  élevé, traduit un effet procédé important. La courbe de fatigue C71 ne semble pas être adaptée aux assemblages testés, notamment pour les fortes étendues de contrainte et en particulier pour le fer puddlé.

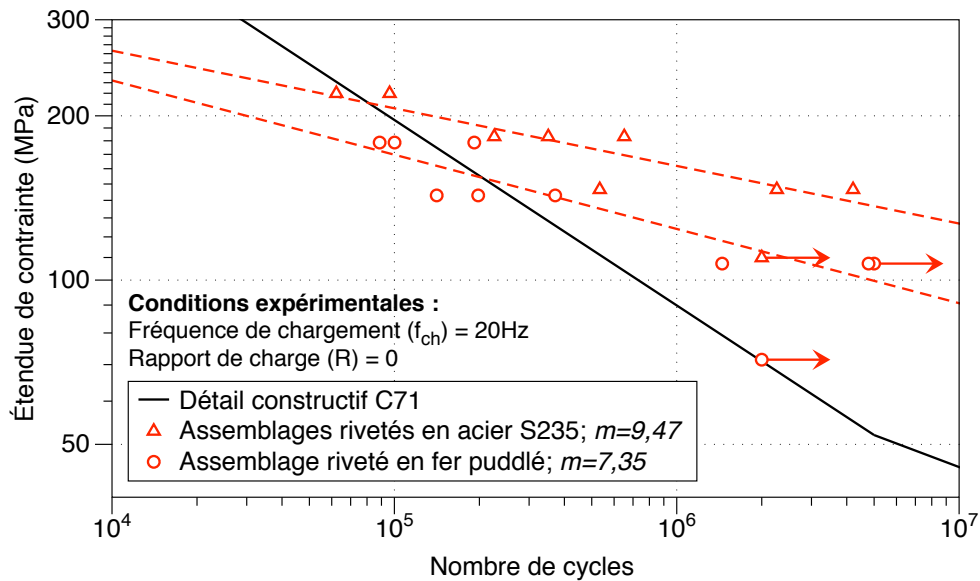


FIGURE 7.11 – Courbes S-N pour éprouvettes assemblées en double recouvrement par rivetage à chaud (rivet en acier S355). Mise en évidence de l'influence des caractéristiques matériau sur le comportement en fatigue d'un détail constructif de ce type.

## 7.4 Conclusion

Cette étude expérimentale sur le comportement de détails constructifs simples sous sollicitations cycliques a permis de mettre en évidence :

- Un effet matériau significatif : la dispersion associée au fer puddlé est retrouvée quel que soit le détail constructif testé en fatigue.
- L'influence de la peinture qui recouvre les tôles en fer puddlé ; celle-ci se dégrade au cours des cycles et modifie l'adhérence.
- L'influence négative d'une concentration de contrainte dans la résistance en fatigue.
- L'influence négative du matage induit par la pression diamétrale sur la résistance en fatigue. Le matage semble néanmoins diminuer la possibilité d'amorçage de fissures de fatigue au niveau du trou.
- L'influence positive du serrage induit par le rivetage à chaud sur la résistance en fatigue.

La figure 7.12 présente les modes de rupture de la tôle centrale mettant en évidence, dans le cas de l'acier S235 : la striction et le matage induit par la pression exercée par la tige du rivet. Du fait de la fragilité du fer puddlé, la striction est toujours beaucoup moins marquée pour ce matériau. Nous observons en revanche les mêmes preuves de matage sur les mini-structures en fer puddlé.

L'ensemble de ces campagnes expérimentales de caractérisation en fatigue est présenté pour l'acier et le fer puddlé dans les figure 7.13 et 7.14 respectivement.



## 7. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES



FIGURE 7.12 – Exemples de rupture en fatigue pour des éprouvettes du type détail constructif.

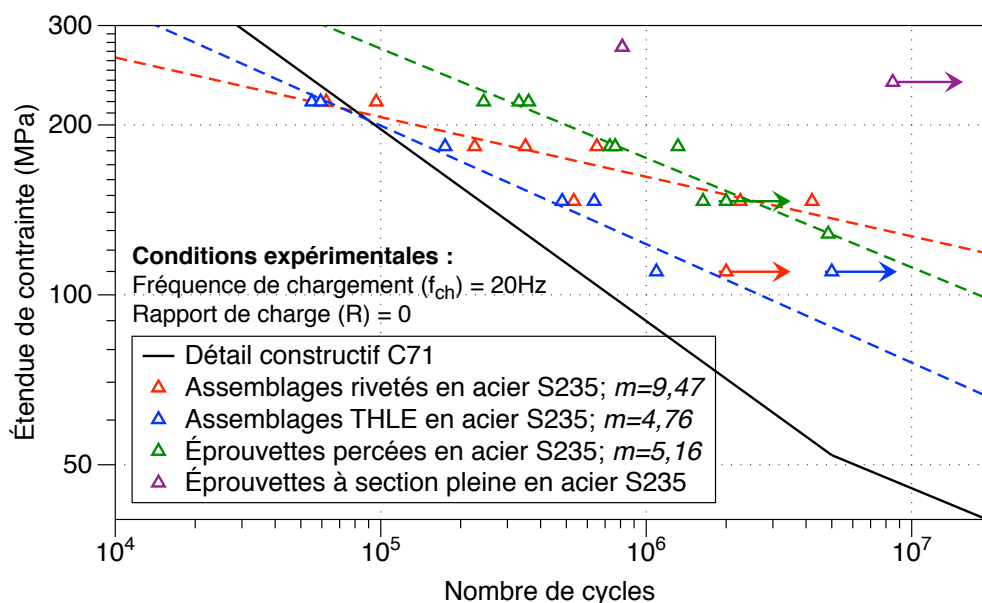


FIGURE 7.13 – Courbes S-N pour éprouvettes fabriquées en acier S235.

Ces deux bilans montrent que la courbe de fatigue associée au détail constructif C71 n'est pas adaptée aux fortes étendues de contraintes, aussi bien pour les mini-structures en acier que pour celles en fer puddlé. Ceci est particulièrement problématique pour l'estimation de l'endommagement cumulé d'un détail constructif, d'un côté celui-ci est surestimé pour les valeurs d'étendues de contraintes d'amplitudes les plus faibles. De plus, il est sous-estimé pour les étendues les plus élevées.

Le bilan de plusieurs campagnes expérimentales de fatigue (de 1935 à 2008) dressé par Taras et Greiner (2010) (voir chapitre 1) est rappelé ici en figure 7.15. Les conditions

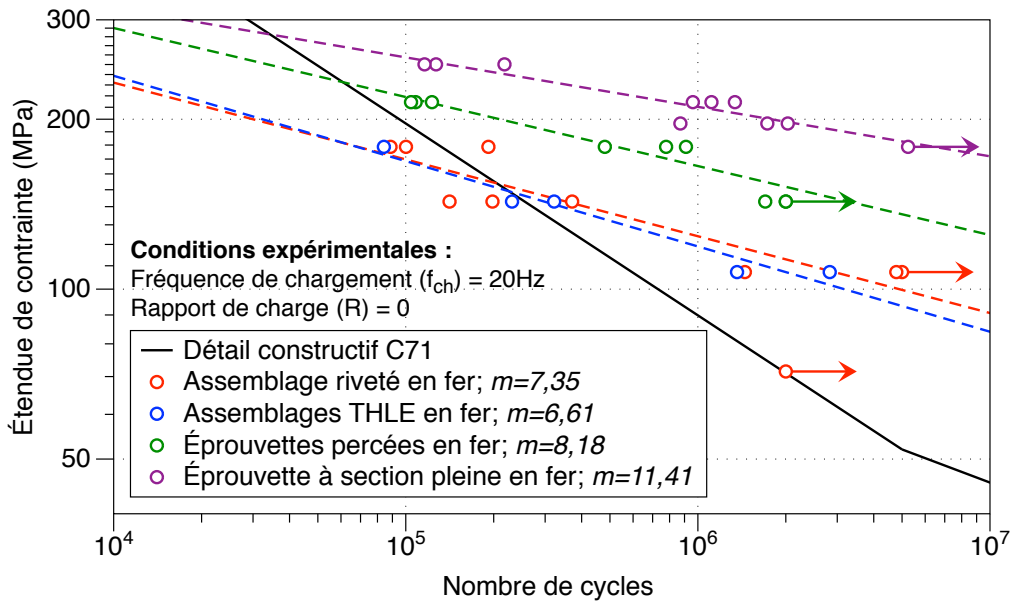


FIGURE 7.14 – Courbes S-N pour éprouvettes fabriquées en fer puddlé.

expérimentales sont différentes d'un type d'assemblages à un autre (géométrie, matériau, nombre de rivets, types de sollicitation, fréquence, rapport de charge, etc.) et l'analyse comparative est difficile à mener. Néanmoins, ces résultats semblent indiquer une courbe C71 conservatrice à partir de 100000 cycles.

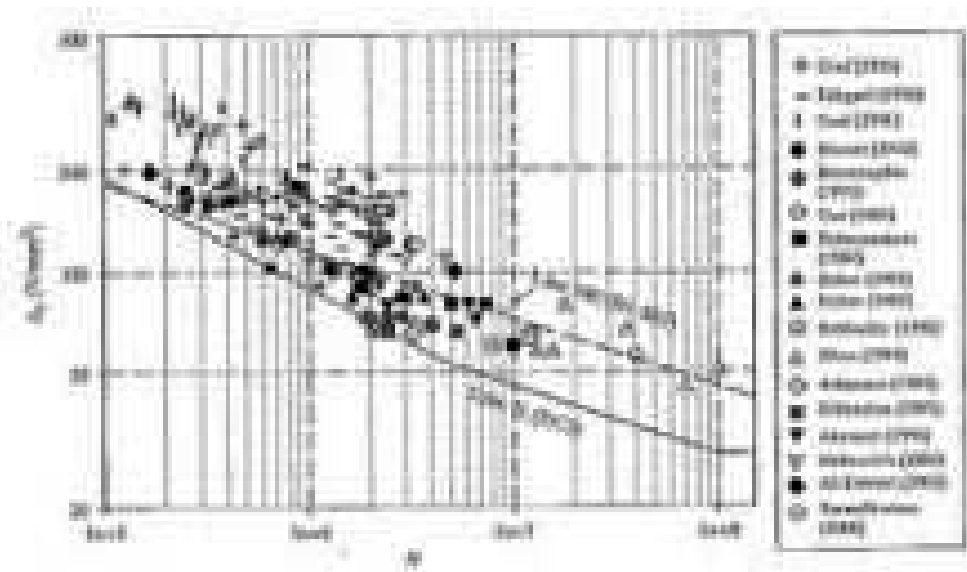


FIGURE 7.15 – Comparaison avec courbes de détail constructifs proposés dans la littérature.

Les résultats des tests de fatigue effectués par Taras et Greiner (2010) suggèrent que le détail C71 est trop conservateur. Ces auteurs proposent donc l'utilisation d'autres courbes de fatigue pour différents types d'assemblage ; celui qui correspond le plus au détail étudié ici est construit à partir du détail C80 ( $\Delta\sigma_C = 80 \text{ MPa}$  à  $2 \times 10^6$  cycles) avec une loi puissance différente (pente  $m = 5$  dans un diagramme S-N log-log). La figure 7.16 présente la comparaison de ces deux critères.

Pour le type de sollicitations que nous avons choisi, la courbe de fatigue proposée par Taras et Greiner (2010) est certes conservatrice, mais elle ne traduit pas l'ensemble des

7. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DE DÉTAILS CONSTRUCTIFS SIMPLES SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES

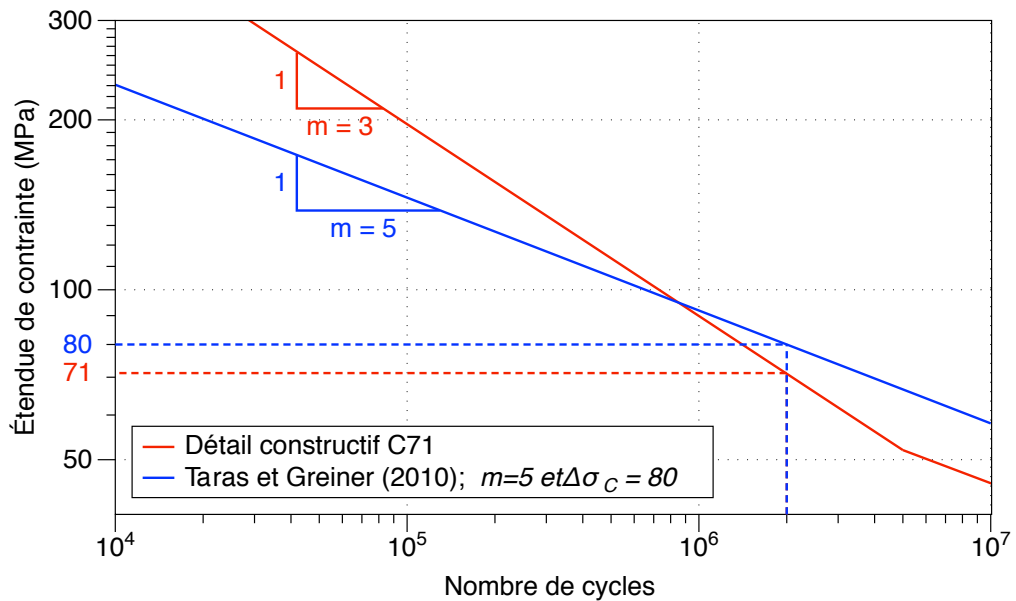


FIGURE 7.16 – Comparaison avec courbes de détail constructifs proposés dans la littérature.

résultats que nous avons obtenus. À partir de nos résultats sur la fatigue des assemblages rivetés en fer puddlé et en acier de type S235, nous proposons ainsi une courbe dont les paramètres sont  $\Delta\sigma_C = 100 \text{ MPa}$  et  $m = 8$  pour les détails constructifs que nous avons étudiés (assemblages mono-rivet en double recouvrement sollicités en traction). Cette courbe tient notamment compte des pentes relevées sur les données expérimentales qui traduisent la dispersion associée aux nombreux paramètres du rivetage à chaud. La figure 7.17 suivante propose ainsi une comparaison des différentes courbes de fatigue : celle associée au détail C71, celle proposée par Taras et Greiner en 2010 et celle issue des travaux de cette thèse.

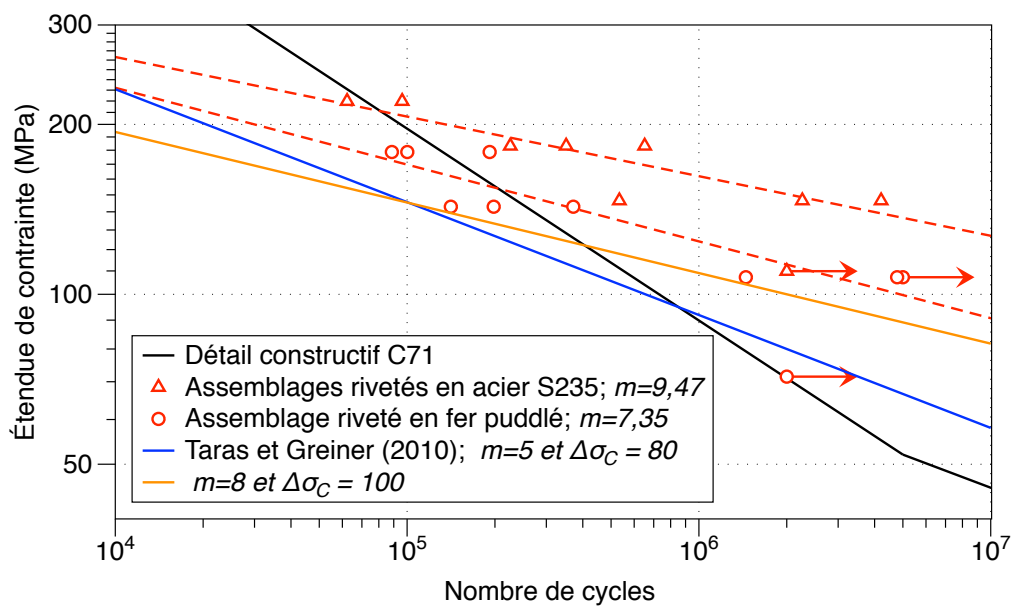


FIGURE 7.17 – Comparaison de la courbe proposée pour les assemblages rivetés que nous avons étudié ( $\Delta\sigma_C = 100 \text{ MPa}$ ,  $m = 8$ ) avec les courbes de détails constructifs issues de la littérature (Taras et Greiner, 2010; Comité Européen de Normalisation, 2005).

# Conclusions générales et perspectives

*If you know what you are looking for and you find it... you have learned nothing. What is important is to find what is not expected. That's how science advance.*

---

SAMUEL TING

La compréhension du comportement mécanique des assemblages rivetés des anciens ponts ferroviaires nécessite de mener plusieurs études complémentaires. Dans le chapitre introductif, nous avons exposé les enjeux de ce travail de thèse et avons posé les questions relatives à la maintenance des ouvrages métalliques, depuis la structure jusqu'au matériau. Nous avons répondu à ces questions dans les trois chapitres bibliographiques dédiés aux méthodes d'évaluation des ponts métalliques anciens, aux assemblages rivetés qui les constituent, et au matériau fer puddlé.

Les thèmes suivants ont ainsi été abordés :

- Le vieillissement et les pathologies des ouvrages métalliques ferroviaires.
- Les assemblages rivetés et leurs défauts rencontrés dans le cadre des opérations d'inspection des ouvrages.
- Les fers puddlés, de leur fabrication jusqu'à leurs microstructures et leurs caractéristiques mécaniques.

Dans un second temps, nous avons construit une démarche expérimentale allant de l'éprouvette « matériau » jusqu'au détail constructif afin de comprendre le fonctionnement d'un assemblage riveté sous chargement monotone et cyclique. Les différentes campagnes que nous avons menées ont porté sur :

- Une famille de matériaux, les fers puddlés, qui constituent les éléments des assemblages rivetés des ponts ferroviaires anciens.
- Des assemblages rivetés élémentaires afin de comprendre l'influence des différents modes de rupture susceptibles d'apparaître dans les ponts métalliques.

*Le travail de cette thèse, à caractère principalement expérimental, vise à proposer des campagnes de caractérisation originales permettant de comprendre le rôle d'un rivet dans un assemblage en fer puddlé, sous sollicitations monotones et cycliques.*

La caractérisation monotone du fer puddlé du pont sur l'Adour à Bayonne, objet de l'étude, a permis de montrer le comportement anisotrope de ce matériau. L'analyse de l'effet de volume n'a en revanche pas montré de dépendance des caractéristiques à l'aire de la section des éprouvettes testées. Ces essais ont par ailleurs permis d'analyser la dispersion des résultats, donnée complémentaire aux informations de la littérature.

Sous sollicitations cycliques, un comportement très dispersif et anisotrope est observé, notamment pour les faibles amplitudes de contrainte. Une méthode « rapide » de détermination de la limite d'endurance moyenne a également été testée. Basée sur la mesure de l'auto-échauffement sous sollicitations cycliques, celle-ci s'est avérée inadaptée aux fers puddlés car trop fragiles par la présence de défauts (inclusions) induits par le procédé de fabrication.

La population des inclusions a été analysée à partir d'applications Python spécialement développées. L'analyse microscopique a ainsi permis d'identifier que les grosses inclusions étaient responsables de la fragilité et que les plus petites contribuaient à l'apparition de la micro-plasticité au cours d'un chargement cyclique. L'hétérogénéité due à la distribution du Phosphore dans le fer puddlé a également été étudiée à partir de l'attaque chimique du réactif cuivrique d'Oberhoffer.

Afin de comprendre le fonctionnement d'un assemblage riveté simple en fer puddlé, nous avons proposé une démarche expérimentale originale visant à identifier la contribution des nombreux paramètres relevés en partie bibliographique. Ainsi, différentes mini-structures ont été conçues et fabriquées afin de mettre en évidence dans le comportement mécanique des assemblages rivetés (sous sollicitations monotones et cycliques) :

- L'influence du matériau fer puddlé.
- L'influence de la plasticité localisée au bord du trou.
- L'influence du cisaillement du rivet.
- L'influence de l'effort de serrage.
- La contribution de l'adhérence entre les tôles assemblées.

Les essais sous chargement monotone nous ont permis de proposer un scénario de fonctionnement d'un assemblage riveté mono-rivet en double recouvrement. À l'aide d'un système de corrélation d'images, nous avons montré que le glissement entre les tôles correspondait au jeu initial présent dans l'assemblage. Cette phase de glissement se poursuit par une mise en contact de la tige du rivet sur les tôles. À cet instant, la transmission d'effort s'effectue donc par frottement entre les tôles et par cisaillement du rivet. Progressivement, une plasticité localisée prend place au bord du trou puis se généralise à toute la section de la tôle centrale de l'éprouvette rivetée. Celle-ci rompt finalement en traction.

Des essais cycliques complémentaires ont été ensuite effectués et nous avons montré que la raideur sécante des assemblages n'évoluait pas au cours des cycles imposés. Il serait pertinent de compléter ces premiers essais sur un nombre de cycles limité, par une campagne visant à étudier l'évolution de cette raideur sur une période de cyclage plus longue. L'analyse de cette « raideur sécante », différente de la raideur monotone pourrait

---

par ailleurs être un paramètre pertinent pouvant alimenter des modèles de comportement des structures rivetées. Nous avons également montré une relation entre l'amplitude du cycle imposé et l'évolution de cette raideur sécante.

Les campagnes expérimentales sous chargements cycliques ont montré que la courbe associée au détail constructif C71, utilisée pour calculer l'endommagement des assemblages rivetés, n'était pas adaptée aux assemblages que nous avons testés. En effet, cette courbe sous-estime l'endommagement à des étendues de contraintes élevées et sur-estime cet endommagement à grand et très grand nombre de cycles. Nous avons ainsi proposé de calculer l'endommagement à partir d'une courbe correspondant à une pente de 8 pour une  $\Delta\sigma_C = 100 \text{ MPa}$ . Cette proposition devra être validée pour d'autres types d'assemblages et d'autres configurations de sollicitations.

Les résultats encourageants de ces travaux de recherche ouvrent des perspectives liées à la maintenance des ouvrages d'art métalliques anciens. En effet, l'évolution de la raideur d'un assemblage sous sollicitations cycliques permettrait d'avoir un nouvel angle d'étude de la prévision des phénomènes de dégradation des assemblages tels que la déconsolidation. Ceci est également le cas pour les chargements exceptionnels que peut subir un assemblage riveté pendant sa durée de vie. En effet, un seul cycle exceptionnel risque d'avoir un impact permanent sur le comportement d'un assemblage : la déconsolidation des assemblages et les chargements exceptionnels ne sont actuellement pas pris en compte dans le calcul de l'endommagement. Ce calcul doit-il être modifié pour prendre en compte ces deux phénomènes ?

La base de données des comportements mécaniques observés sur des détails constructifs mono-rivet sous chargement quasi-statiques (scénarios de fonctionnement) et en fatigue (influences des mécanismes potentiels de ruine), permet d'envisager des études complémentaires. La mise en œuvre d'expériences de caractérisation sur des assemblages à géométries plus complexes (plusieurs rivets) et sous conditions de chargements différents, permettraient de compléter ces premiers résultats.

Un autre point possible d'exploration est de confronter l'ensemble des nos résultats expérimentaux avec des données issues des inspections sur ouvrages instrumentés. Cette démarche pourra révéler, entre autres, si les conclusions obtenues sur le fer puddlé du pont sur l'Adour de Bayonne (1864) sont applicables à d'autres fers puddlés, en particulier, des fers puddlés fabriqués à d'autres périodes.



# Bibliographie

- AKESSON, B. (2010). *Fatigue life of riveted railway bridges*. Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology. CRC Press.
- AL-EMRANI, M. (2002). *Fatigue in riveted railway bridges : A study of the fatigue performance of riveted stringers and stringer to floor-beam connections*. Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (1978). *NF P 22 - 410 : Construction métallique - Assemblages rivés - Dispositions constructives – Calcul des rivets*.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (1993). *A03 - 406 : Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable. Méthode Rainflow de comptage des cycles. Principe et utilisation*.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (2005). *NF EN 10025 - 2 : Produits laminés à chaud en aciers de construction, Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés*.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (2011). *NF EN 1090-2 : Exécution des structures en acier et des structures en aluminium*.
- BALASUBRAMANIAM, R. (2008). Metallurgy of ancient indian iron and steel. *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*, pages 1608–1613.
- BARBA, J. (1875). *Étude sur l'emploi de l'acier dans les constructions : Exposé de la méthode à suivre pour la mise en oeuvre de tôles et barres profilées en métal fondu*. Librairie Polytechnique J. Baudry.
- BATHIAS, C. et PINEAU, A. (2008). *Fatigue des matériaux et des structures 1 : Introduction, endurance, amorçage et propagation des fissures, fatigue oligocyclique et gigacyclique*. Lavoisier.
- BIDAUD, P. (2014). *Analysis of the cyclic behavior of an adhesive in an assembly for offshore windmills applications*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.



- BOWMAN, M. et PISKOROWSKI, A. (2004). Evaluation and Repair of Wrought Iron and Steel Structures in Indiana. pages 1–242.
- BRÜHWILER, E., SMITH, I. F. C. et HIRT, M. a. (1990). Fatigue and Fracture of Riveted Bridge Members. *Journal of Structural Engineering*, 116(1):198–214.
- BRUNBAUER, J., ARBEITER, F., STELZER, S. et PINTER, G. (2014). Stiffness Based Fatigue Characterisation of CFRP. *Advanced Materials Research*, 891-892:166–171.
- BUCHETTI, J. (1898). *Manuel des construction métalliques : charpentes et ponts*. Librairie Polytechnique Ch. Béranger.
- CAZAUD, R. et PERSOZ, L. (1943). *La fatigue des métaux*. Dunond.
- COL, A. et COLOMBIÉ, M. (2010). *L'emboutissage des aciers*. Dunod.
- COLLETTE, Q. (2014). *Riveted connections in historical metal structures (1840 - 1940) Hot-driven rivets : Technology, design and experiments*. Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel.
- COLLETTE, Q., SIRE, S., VERMES, W. J., MESLER, V. J. et WOUTERS, I. (2014). Experimental investigations on hot-driven structural rivets in historical French and Belgian wrought-iron structures (1880s–1890s). *Construction and Building Materials*, 54:258–269.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (2005). *Eurocode 3 EN 1993-1-9 : Calcul des structures en acier (fatigue)*.
- CONSIDÈRE, A. (1886). *Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions*, volume XI de 6<sup>ème</sup> série. Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents.
- CONSTANT, A., GUY, H. et CHARBONNIER, J.-C. (1992). *Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers*. Pyc édition.
- DAVID, C. (2014). *Indentification de paramètres mécaniques de matériaux composites à partir de corrélation d'images numériques multi-échelles*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- DE BOUW, M., WOUTERS, I., VEREECKEN, J. et LAURIKS, L. (2009). Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 – A complex and confusing situation resolved. *Construction and Building Materials*, 23(8):2775–2787.
- de CREVOISIER, J., SWIERGIEL, N., CHAMPANEY, L. et HILD, F. (2012). *Identification of In Situ Frictional Properties of Bolted Assemblies with Digital Image Correlation*, volume 52.
- DE JESUS, A. M., DA SILVA, A. L., FIGUEIREDO, M. V., A.F.O. CORREIA, J., RIBEIRO, A. S. et FERNANDES, A. A. (2011). Strain-life and crack propagation fatigue data from several Portuguese old metallic riveted bridges. *Engineering Failure Analysis*, 18(1):148–163.
- DE JESUS, A. M., PINTO, H., FERNÁNDEZ-CANTELI, A., CASTILLO, E. et a.F.O. CORREIA, J. (2010). Fatigue assessment of a riveted shear splice based on a probabilistic model. *International Journal of Fatigue*, 32(2):453–462.

- DE JESUS, A. M. P., DA SILVA, A. L. L. et CORREIA, J. A. F. O. (2015). Fatigue of riveted and bolted joints made of puddle iron—An experimental approach. *Journal of Constructional Steel Research*, 104:81–90.
- DECHAMPS, H. (1908). *Les principes de la construction des charpentes métalliques et leurs applications aux ponts à poutres droites, combles, supports et chevalements*. Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris, 3 édition.
- DIBATTISTA, J., ADAMSON, D. E. J. et KULAK, G. (1998). Fatigue strength of riveted connections. *Journal of Structural Engineering*, 124(7):792–797.
- DILLMANN, P. et BALASUBRAMANIAM, R. (2001). Characterization of ancient indian iron and entrapped slag inclusions using electron, photon and nuclear microprobes. *Bull. Mater. Sci.*, 24(3):317–322.
- DOUDARD, C. (2004). *Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir des essais d*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.
- EZANNO, A. (2011). *Caractérisation rapide des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles des matériaux de fonderie à partir d'essais d'auto-échauffement : application aux alliages d'hélices marines*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- FAIRBAIRN, W. (1850). An Experimental Inquiry into the Strength of Wrought Iron Plates and Riveted Joints as Applied to Ship-Building. . *Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London (1843-1854)*, 5(January):960–962.
- FAIRBAIRN, W. (1861). *Iron : its history, properties and processes of manufacture*. Adam and Charles Black, Edinburgh (SCO).
- FRANÇOIS, D., PINEAU, A. et ZAOUÏ, A. (1993). *Comportement mécanique des matériaux : viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique du contact*. Hermes.
- FRÉMONT, C. (1906). *Étude expérimentale du rivetage*. Société d'encouragement pour l'industrie nationale (Paris).
- GALLEGOS MAYORGA, L. (2012). *Vers la caractérisation rapide des propriétés en fatigue (HCF) des alliages pour ponts*. Thèse de Master.
- GALLEGOS MAYORGA, L., SIRE, S., CALLOCH, S., YANG, S., DIELEMAN, L. et MARTIN, J. L. (2013). Fast characterization of fatigue properties of an anisotropic metallic material : Application to a puddled iron from a nineteenth century french railway bridge. *Procedia Engineering*, 66:689–696.
- GALLEGOS MAYORGA, L., SIRE, S. et PLU, B. (2015). Understanding Fatigue Mechanisms in Ancient Metallic Railway Bridges : A Microscopic Study of Puddled Iron. *Procedia Engineering*, 114(0):422–429.
- GARNIER, J. (1878). *Le fer*. Librairie Hachette, Paris (FR).

- GORDON, R. (1997). Process deduced from ironmaking wastes and artefacts. *Journal of Archaeological Science*, 24:9–18.
- GRUNER, M. (1878). *Traité de métallurgie. Tome second*. Dunod Editeur, Paris (Fr).
- GUILLOT, I. et FLUZIN, P. (1987). Interprétation structurale de l'élaboration et de l'utilisation d'outils miniers. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 84(8):248–256.
- HELMERICH, R. (2012). Full scale fatigue testing of original truss members and connections. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, pages 1420–1427.
- HÉNAFF, G. et MOREL, F. (2005). *Fatigue des structures : Endurance, critères de dimensionnement, propagation des fissures, rupture*.
- INSTITUT FÜR EISENHÜTTENKUNDE DER RWTH AACHEN (1993). *Eigenschaften und Anwendung von Stählen, Band 1 : Stahlkunde*. Verlag der Augustinus Buchhandlung Aachen.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2009). *International Standard ISO 6892 1 : Metallic materials tensile testing*, first édition.
- KIRKALDY, D. (1862). *Results of an experimental inquiry onto the comparative tensile strength and other properties of various kinds of wrought-iron and steel*. Hamilton, Adams, & Co. ; Simpkin, Marshall, & Co.
- KISS, K. et DUNAI, L. (2000). Stress history generation for truss bridges using multi-level models. *Computers & Structures*, 78(1-3):329–339.
- KRAPEZ, J.-C. et PACOU, D. (2002). Thermography detection of early thermal effects during fatigue tests of steel and aluminum samples. *In Quantitative Nondestructive Evaluation*, volume 615, pages 1545–1552. AIP Publishing.
- KÜHN, B., LUCKIĆ, M., NUSSBAUMER, A., GÜNTHER, H. P., HELMERICH, R., HERION, S., H., K. M., WALBRIDGE, S., ANDROIC, B., DIJKSTRA, O. et BUCKAK, O. (2008). *Assessment of existing steel structures : Recommendations for estimation of remaining fatigue life*. Sustainable Bridges.
- LAKHTINE, I. (1971). *Métallographie et traitements thermiques des métaux*. Editions MIR, Moscou (URSS).
- LARSSON, T. (2009). *Fatigue Assessment of Riveted Bridges*. Thèse de doctorat, Lulea University of Technology.
- LEMAITRE, J., CHABOCHE, J.-L., BENALLAL, A. et DESMORAT, R. (2009). *Mécanique des matériaux solides*. Dunond, 3ème édition édition.
- L'HÉRITIER, M., JUHIN, A., DILLMANN, P., ARANDA, R. et BENOIT, P. (2005). Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du moyen age. état des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques. *Archéosciences*, 29:117–132.

- LOVE, G. (1859). *Des diverses résistances et autres propriétés de la fonte, du fer et de l'acier et de l'emploi de ces métaux dans les constructions*. Lacroix et Baudry, Paris (FR).
- LUONG, M. (1995). Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*, 158(2–3):363 – 376.
- MABRU, C. et CHRYSOCHOOS, A. (2001). Dissipation et couplages accompagnant la fatigue des matériaux métalliques. *Photo Mécanique 2001*, pages 375–382.
- MANG, F. et BUCAK, O. (1996). Tauglichkeit und lebensdauer von bestehenden stahlbauwerken. *Stahlbau – Ein Handbuch für Studium und Praxis*, 3.
- MATHIEU, M. et LAVALLEY, M. (1852). *Mémoire XXXI sur la reconstruction du pont biais de Clichy, chemin de fer de Saint-Germain*. Mémoires de la société des ingénieurs civils 5.
- MAUROUX, T. (2011). *Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support : influence de l'adjuvantation par des éthers cellulose*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
- MCCOWAN, C., SIEWERT, T., MCCOLSKEY, J., HILDEBRAND, K. et OLSON, D. (2011). United States Capitol dome : Characterization of cast and wrought materials. *Materials Characterization*, 62(8):807–816.
- MINER, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME*, 12(3):159–164.
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS (1891). *Circulaire du ministre des travaux publics aux préfets 29 Août 1891*.
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS (1927). *Circulaire du ministre des travaux publics aux préfets 10 Mai 1927*.
- MOORE, H. et KOMMERS, J. (1927). *The fatigue of metals*. McGraw-Hill book Company.
- MORIN, A. (1857). *Résistance des matériaux*. Librairie de L. Hachette et Cie.
- MUNIER, R. (2012). *Étude de la fatigue des aciers laminés à partir de l'auto-échauffement sous sollicitation cyclique : essais, observations, modélisation et influence d'une pré-déformation plastique*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- MURAKAMI, Y. (2002). *Metal Fatigue : Effects of Small Defect and Nonmetallic Inclusions*. Elsevier.
- NADOT, Y. (2007). *Thèse de HDR : Tolérance aux défauts dans les métaux soumis à des sollicitations cycliques multiaxiales*.
- OKAMOTO, H. (1990). The fe-p (iron phosphorus) system. *Bulletin of alloy phase diagrams*, 11(4):404–412.
- O'SULLIVAN, M. et SWAILES, T. (2009). A Study of Historical Test Data for Better Informed Assessment of Wrought Iron Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 3(4):260–275.

- PÉRIÉ, J.-N., CALLOCH, S., CLUZEL, C. et HILD, F. (2002). Analysis of a multiaxial test on a c/c composite by using digital image correlation and a damage model. *Experimental Mechanics*, 42(3):318–328.
- PESSARD, E. (2009). *Comportement anisotrope en fatigue des composants mécaniques forgés*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- PESSARD, E., MOREL, F., MOREL, a. et BELLETT, D. (2011). Modelling the role of non-metallic inclusions on the anisotropic fatigue behaviour of forged steel. *International Journal of Fatigue*, 33(4):568–577.
- PILKEY, W. D. (1997). *Peterson's stress concentration factors*. John Wiley & Sons, Inc., second edition édition.
- PIPINATO, A., PELLEGRINO, C., BURSI, O. et MODENA, C. (2009). High-cycle fatigue behavior of riveted connections for railway metal bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(12):2167–2175.
- RABBE, P., LIEURADE, H.-P. et GALTIER, A. (2000). Essais de fatigue (parties i et ii). *Techniques de l'Ingénieur*.
- RANKINE, W. J. M. (1843). On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles. *Minutes of the Proceedings of The Institution of Civil Engineers*, 2:105–108.
- ROBERTS-AUSTEN, W. (1898). *An introduction to the study of metallurgy*. Charles Griffin and Company, London (GB).
- SAUVEUR, A. (1938). *The metallography and heat treatment of iron and steel*. The University Press, Cambridge (USA).
- SERRANO, L. (2015). *Caractérisation thermomécanique du comportement en fatigue des thermoplastiques renforcés de fibres de verre courtes*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- SIRE, S., GALLEGOS MAYORGA, L., MARTIN, J.-L., DOUDARD, C. et CALLOCH, S. (2012a). Fast characterization of fatigue properties of a French historical railway bridge puddle iron. *In International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)*, pages 2231–2237, Wroclaw (POL).
- SIRE, S., GALLEGOS MAYORGA, L., MARTIN, J. L., DOUDARD, C. et CALLOCH, S. (2012b). Fast characterization of fatigue properties of an anisotropic metallic material : Application to a puddled iron from a nineteenth century french railway bridge. *In 8th International Conference on Structural Analysis of HISTORICAL CONSTRUCTIONS*, éditeur : *Conference Proceedings*, pages 2231 – 2237, Worclaw (Poland).
- SIRE, S., GALLEGOS MAYORGA, L. et PLU, B. (2015). Observation of Failure Scenarios in Riveted Assemblies : An Innovative Experimental Strategy. *Procedia Engineering*, 114(0):430–436.
- SOCIÉTÉ GOM (2016). ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis. <http://www.gom.com/metrology-systems/digital-image-correlation.html>. [En ligne ; 16 avril 2016].

- SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES (2011). *SIA 269/3 :2011 - Maintenance des structures porteuses - Structures en acier.*
- STROMEYER, C. E. (1914). The determination of fatigue limits under alternating stress conditions. *Proceedures of the Royal Society of London*, A90:411 – 425.
- SUN, B. (2004). High-cycle fatigue damage measurement based on electrical resistance change considering variable electrical resistivity and uneven damage. *International Journal of Fatigue*, 26(5):457–462.
- SUSTAINABLE BRIDGES (2007). *Backgorund document D4.6 : Improved assessment methods for static and fatigue resistance of old steel railway bridges.*
- SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DES STRUCTURES (STRRES) (2014). *Guide n1 : Réparation et rénovation des structures métalliques.*
- TARAS, A. et GREINER, R. (2010). Development and Application of a Fatigue Class Catalogue for Riveted Bridge Components. *Structural engineering international*, 1:91–103.
- THIELE, A. et HOSEK, J. (2015). Estimation of phosphorus content in archaeological iron objects by means of optical metallography and hardness measurements. *Acta Polytechnica Hungarica*, 12(4):113–126.
- TISSANDIER, G. (1889). *La Tour Eiffel de 300 mètres : description du monument, sa construction, ses organes mécaniques, son but et son utilité.* G. Masson (Paris).
- TWELVETREES, W. N. (1900). *Structural Iron and Steel.* Whittaker & Co.
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC) (1965). *Lexique général des termes ferroviaires.*
- VEGA, E., DILLMANN, P. et FLUZIN, P. (2002). Contribution à l'étude de fers phosphoreux en sidérurgie ancienne. *Revue d'Archéométrie*, 26:197–208.
- WEBER, B. (1999). *Fatigue multiaxiale des structures industrielles sous chargement quelconque.* Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.



## Abaque de calcul de facteur de concentration de contrainte pour une plaque percée (Pilkey, 1997)

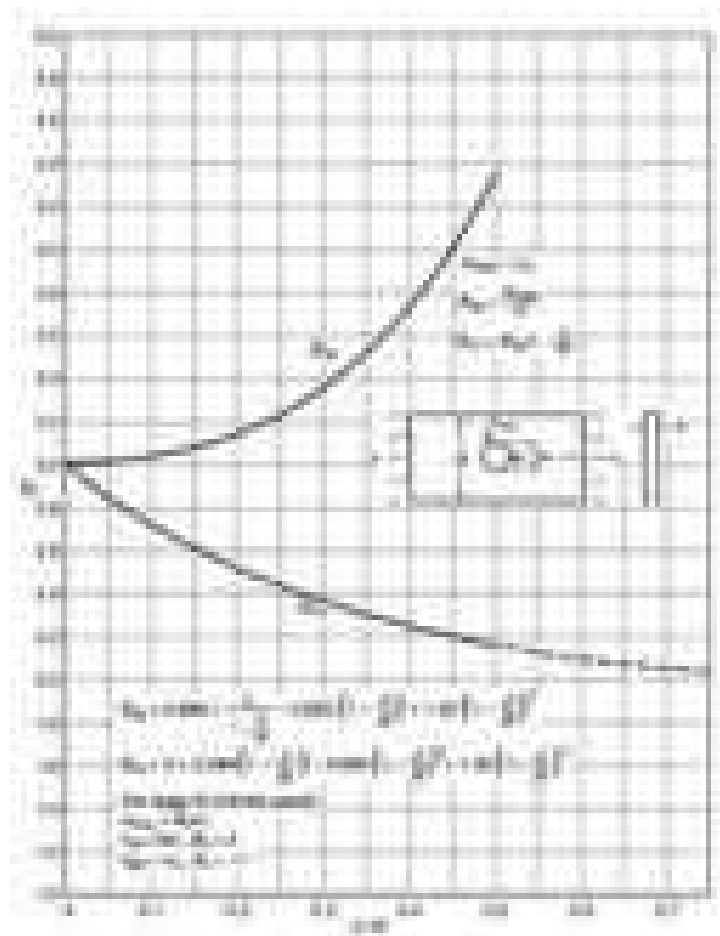


FIGURE A.1 – Évolution du facteur de concentration de contraintes au bord d'un trou en fonction des paramètres géométriques de la tôle étudiée (Howland).





## Publications et communications

### B.1 Articles dans des revues internationales issues de congrès

- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S., CALLOCH, S., YANG, S., DIELEMAN, L. ET MARTIN, J. L. (2013). Fast characterization of fatigue properties of an anisotropic metallic material : Application to a puddled iron from a nineteenth century French railway bridge. *Procedia Engineering*, 66 : 689-696.
- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S., CALLOCH, S., YANG, S., DIELEMAN, L. ET MARTIN, J. L. (2014). A self-heating approach to characterize anisotropy effects in fatigue behaviour : Application to a nineteenth century puddled iron from a French railway bridge. *Advanced Materials Research*, 891-892 : 136-142.
- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S. ET PLU, B. (2015). Understanding fatigue mechanisms in ancient metallic railway bridges : A microscopic study of puddled iron. *Procedia Engineering*, 114 : 422-429.
- SIRE, S., **GALLEGOS MAYORGA, L.** ET PLU, B. (2015). Observation of failure scenarios in riveted assemblies : An innovative experimental strategy. *Procedia Engineering*, 114 : 430-436.

### B.2 Communications lors des congrès internationaux

Le nom de la personne ayant présenté les travaux est souligné.

#### B.2.1 Présentations orales

- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S., CALLOCH, S., YANG, S., DIELEMAN, L. ET MARTIN, J. L. (2014). A self-heating approach to characterize anisotropy effects in fatigue behaviour : Application to a nineteenth century puddled iron from a French railway bridge. *11th International Fatigue Congress*, Melbourne (Australia).

- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S. ET PLU, B. (2015). Understanding fatigue mechanisms in ancient metallic railway bridges : A microscopic study of puddled iron. *1st International Conference on Structural Integrity*, Funchal (Portugal).
- SIRE, S., **GALLEGOS MAYORGA, L.** ET PLU, B. (2015). Observation of failure scenarios in riveted assemblies : An innovative experimental strategy. *1st International Conference on Structural Integrity*, Funchal (Portugal).

### B.2.2 Posters scientifiques

- **GALLEGOS MAYORGA, L.**, SIRE, S., CALLOCH, S., YANG, S., DIELEMAN, L. ET MARTIN, J. L. (2013). Fast characterization of fatigue properties of an anisotropic metallic material : Application to a puddled iron from a nineteenth century French railway bridge. *5th International Conference of Fatigue Design*, Senlis (France).

Cette communication à fait l'objet du prix de la meilleure présentation scientifique sur format de poster.

## Glossaire Technique

TERME	DÉFINITION
<i>Catégorie de détail constructif</i>	La désignation numérique attribuée à un détail constructif particulier pour une direction donnée de contraintes afin d'indiquer la courbe de résistance à la fatigue à appliquer pour évaluer sa résistance (ce nombre correspond à la résistance de référence à la fatigue $\Delta\sigma_C$ en MPa) (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Contrainte nominale</i>	contrainte dans le métal de base au voisinage de l'emplacement potentiel d'une fissure, calculée selon la théorie élastique, à l'exclusion de tout effet de concentration de contrainte (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Deconsolidation (ou dislocation) d'un assemblage riveté</i>	Assemblage riveté avec perte d'adhérence entre les pièces qui le constituent. Présence du mouvement relatif entre les pièces de l'assemblage.
<i>Détail constructif</i>	Classification constructive donnée pour une configuration particulière d'assemblage.
<i>Durée de vie résiduelle</i>	Période de temps entre la date de l'évaluation d'une pièce (ou d'une structure) et la date de fin de vie estimée à la fatigue.
<i>Dureté</i>	Degré de résistance d'un matériau à la pénétration par un autre matériau.
<i>Écrouissage ou adoucissement cyclique</i>	Modification de la contrainte d'écoulement sous chargement cyclique.

<i>Endurance</i>	Durée de vie, exprimée en nombre de cycles, sous l'action d'un historique de contraintes d'amplitude constante.
<i>Étendue de contrainte</i>	La différence algébrique entre les deux extrêmes d'un cycle particulier de contrainte faisant partie d'un historique de contraintes (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Fragilité</i>	Caractère d'un matériau qui se rompt sans déformation permanente appréciable ou dont la rupture est atteinte sous une très faible déformation.
<i>Limite de fatigue sous amplitude constante</i>	Valeur limite d'étendue de contrainte normale ou de cisaillement, en dessous de laquelle aucun endommagement ne se produit au cours d'un essai à amplitude constante. Sous chargement d'amplitude variable, toutes les étendues de contrainte doivent être inférieures à cette limite pour qu'aucun endommagement ne se produise (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Limite de troncature</i>	Limite en dessous de laquelle les étendues de contrainte du spectre de calcul ne contribuent pas à l'endommagement calculé (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Résilience</i>	Caractéristique mécanique définissant la résistance aux chocs d'un matériau.
<i>Résistance (traction)</i>	Aussi appelé résistance à la traction conventionnelle (et noté $R_m$ ). Il s'agit de la valeur de contrainte maximale tolérée par un matériau avant la striction pour les matériaux ductiles et la rupture pour les matériaux fragiles.
<i>Résistance de référence à la fatigue</i>	Étendue de la contrainte à amplitude constante $\Delta\sigma_C$ correspondante à une endurance de $N = 2 \times 10^6$ cycles pour une catégorie de détail donnée (Eurocode NF EN 1993-1-9).
<i>Soudabilité</i>	Propriété d'un matériau qui se prête à la réalisation d'une construction par joints soudés.
<i>Voie à pose directe</i>	Voie non ballastée.

---

## Dictionnaire Technique

Le tableau suivant est un guide de certains termes utilisés tout au long du manuscrit. La majorité de traductions provient du Lexique générale des termes ferroviaires de l'Union Internationale des Chemins de Fer (Union internationale des chemins de fer (UIC), 1965). Les termes marqués d'une étoile (\*) ont été ajoutés à cette liste.

FRANÇAIS	ANGLAIS
<i>acier à haute résistance</i>	high-tensile steel
<i>agent du chemin de fer</i>	railway employee
<i>aléser</i>	to bore, to ream
<i>alésoir</i>	boring (or drilling) machine, reamer
<i>âme (d'une poutrelle, d'une poutre assemblée)</i>	web (of a small girder, of a built-up girder)
<i>amorce de rupture*</i>	initial crack
<i>biais (d'un pont)</i>	skew (of a bridge)
<i>bouterolle*</i>	rivet setter <i>or</i> riveting pin
<i>calaminage</i>	carbon deposit
<i>contrainte*</i>	stress
<i>contre-bouterolle*</i>	rivet header
<i>cornière</i>	angle (iron)
<i>cornière, couvre-joint</i>	angle joint-cover
<i>cornière support</i>	angle support
<i>décalaminage</i>	decarbonizing, carbon removal (or scraping)
<i>déformation*</i>	strain
<i>détail constructif*</i>	constructional detail
<i>diagonale</i>	diagonal
<i>durée de vie*</i>	fatigue life
<i>dureté*</i>	hardness
<i>écrouissage</i>	hardening

<i>encastrement</i>	housing, embedding, encasing
<i>éprouvette</i>	specimen
<i>fer forgé</i>	wrought iron
<i>fer puddlé*</i>	puddled (or puddle) iron
<i>fonte</i>	cast iron
<i>four à rivets</i>	rivet heating furnace
<i>fragilité*</i>	brittleness
<i>haute résistance</i>	high tensile strength
<i>jeu</i>	clearance
<i>limite d'endurance</i>	fatigue strength (or endurance)
<i>longeron</i>	stringer, bar girder, longitudinal girder
<i>loupe de fer</i>	ball of iron
<i>martelage</i>	hammering, peening
<i>matage</i>	hammering (of edges)
<i>montant</i>	vertical
<i>MEB (Microscope Électronique à Balayage)</i>	SEM (Scanning electron microscope)
<i>nœud de membrure (ou d'ossature)</i>	centre (of structural framework)
<i>ossature métallique</i>	metal structure, body frame
<i>ouvrage d'art</i>	structure (bridges, tunnels, etc...)
<i>platelage (de pont)</i>	bridge covering (or flooring or plan- king)
<i>pièce de pont</i>	floor-beam
<i>poinçonneuse</i>	punching machine
<i>portée, ouverture (ponts)</i>	span width, opening, bridge span, clear span (bridges)
<i>poutre (pont)</i>	girder, beam
<i>poutre à âme pleine</i>	plate girder, web plate girder
<i>poutre armée</i>	trussed girder (or beam)
<i>poutre en caisson</i>	box girder
<i>poutre principale</i>	main girder
<i>poutre à (ou en) treillis</i>	lattice girder
<i>résilience*</i>	toughness
<i>résistance (en traction)*</i>	(ultimate tensile) strength
<i>ringard</i>	fire (or clinkering) iron, poker
<i>semelle</i>	gusset
<i>soudabilité*</i>	weldability
<i>tablier métallique (ponts)</i>	metal flooring (or platform) (bidges)
<i>tension de rétrait (métal)</i>	shrinking (or contraction) stress (me- tal)
<i>travée (ponts)</i>	span (ponts)
<i>travée intermédiaire</i>	intermediate span
<i>trepabilité*</i>	hardenability

---









