



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil
Université Clermont Auvergne
Clermont Auvergne INP
Laboratoire de l'Institut pascal



Mémoire de projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil

Exploration des voies de réemploi des éléments métalliques dans le domaine de la construction

Réalisé par :
M. Sohaib ACHOURI

Proposé par :
Pr. Abdelhamid BOUHAIR (UCA)

Encadré par :
Pr. ABDELHAMID BOUHAIR (UCA)
Pr. NOUREDINE BOURAHLA (ENP)
Dr. SEBASTIEN DURIF (UCA)

*Présenté publiquement et défendu le 23 octobre 2024 devant le jury
composé de :*

Présidente	Mme. Messaouda CHERRAK	M.C.A	ENP
Examineur	M. Brahim Khalil BENAZZOUZ	M.C.A	ENP
Encadrant	M. Nouredine BOURAHLA	Professeur	ENP
Co-encadrant	M. Abdelhamid BOUHAIR	Professeur	UCA
Co-encadrant	M. Sebastien DURIF	M.C.A	UCA



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil
Université Clermont Auvergne
Clermont Auvergne INP
Laboratoire de l'Institut pascal



Mémoire de projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Civil

Exploration des voies de réemploi des éléments métalliques dans le domaine de la construction

Réalisé par :
M. Sohaib ACHOURI

Proposé par :
Pr. Abdelhamid BOUHAIR (UCA)

Encadré par :
Pr. ABDELHAMID BOUHAIR (UCA)
Pr. NOUREDINE BOURAHLA (ENP)
Dr. SEBASTIEN DURIF (UCA)

*Présenté publiquement et défendu le 23 octobre 2024 devant le jury
composé de :*

Présidente	Mme. Messaouda CHERRAK	M.C.A	ENP
Examineur	M. Brahim Khalil BENAZZOUZ	M.C.A	ENP
Encadrant	M. Nouredine BOURAHLA	Professeur	ENP
Co-encadrant	M. Abdelhamid BOUHAIR	Professeur	UCA
Co-encadrant	M. Sebastien DURIF	M.C.A	UCA

ملخص

يستكشف هذا المشروع النهائي لإتمام الدراسة إمكانيات إعادة استخدام العناصر المعدنية في قطاع البناء، في سياق التنمية المستدامة. بناءً على العوارض الفولاذية المستخرجة من جسر داليه، تم إجراء سلسلة من الاختبارات الميكانيكية (الانحناء، الشد، القص، الصلابة) لتقييم الخصائص المتبقية لهذه العناصر. أظهرت النتائج أنه بالرغم من التعرض للبيئة والتآكل، فإن هذه العناصر تحتفظ بمقاومة ميكانيكية كافية لإعادة استخدامها. تم إجراء حسابات تحليلية ونمذجة رقمية للتحقق من صحة الاختبارات التجريبية، مؤكدةً جدوى استخدام الهياكل المختلطة من الفولاذ والخرسانة لتحسين توزيع الأحمال والأداء العام. يقترح هذا العمل أيضاً عملية منهجية لإعادة الاستخدام، تشمل التشخيص، والتفكيك، وتحضير المواد المسترجعة لإعادة الاستخدام. تؤكد الاستنتاجات على أهمية إعادة الاستخدام في تقليل البصمة البيئية لقطاع البناء، وتحث على إجراء المزيد من الأبحاث لتحسين توحيد وتعميم هذه الممارسات.

الكلمات المفتاحية: إعادة الاستخدام، العناصر المعدنية، الهياكل المختلطة من الفولاذ والخرسانة، التآكل، التنمية المستدامة، البناء المختلط، النمذجة الرقمية، برنامج Abaqus، جسر داليه

Abstract

This final year project explores the possibilities of reusing metallic elements in the construction sector within a sustainable development context. Using steel beams extracted from the Dallet Bridge, a series of mechanical tests (bending, tensile, shear, hardness) was conducted to assess the residual properties of these elements. The results revealed that, despite exposure to the environment and corrosion, these elements retain sufficient mechanical strength for reuse. Analytical calculations and numerical modeling using ABAQUS were carried out to validate the experimental tests, confirming the feasibility of composite steel-concrete structures to improve load distribution and overall performance. This work also proposes a systematic process for reuse, including diagnosis, dismantling, and preparation of recovered materials for new use. The findings highlight the importance of reuse in reducing the environmental footprint of construction and encourage further research to enhance the standardization and generalization of these practices.

Keywords : reuse, metallic elements, steel-concrete composite structures, corrosion, sustainable development, composite construction, numerical modeling, ABAQUS, Dallet Bridge

Resumé

Ce projet de fin d'études explore les possibilités de réemploi des éléments métalliques dans le secteur de la construction, dans un contexte de développement durable. À partir des poutrelles métalliques extraites du pont de Dallet, une série d'essais mécaniques (flexion, traction, cisaillement, dureté) a été réalisée pour évaluer les propriétés résiduelles de ces éléments. Les résultats ont révélé que, malgré l'exposition à l'environnement et la corrosion, ces éléments conservent une résistance mécanique suffisante pour une réutilisation. Des calculs analytiques et une modélisation numérique ont été menés pour valider les essais expérimentaux, confirmant la viabilité de structures mixtes acier-béton pour améliorer la répartition des charges et la performance globale. Ce travail propose également un processus systématique de réemploi, comprenant le diagnostic, le démontage, et la préparation des matériaux récupérés pour une nouvelle utilisation. Les conclusions mettent en évidence l'importance du réemploi dans la réduction de l'empreinte environnementale de la construction, et encouragent des recherches supplémentaires pour améliorer la standardisation et la généralisation de ces pratiques.

Mots-clés : réemploi, éléments métalliques, structures mixte acier-béton, corrosion, développement durable, construction mixte, modélisation numérique, Abaqus, pont de Dallet

Dédicace

“

À mes parents, Pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mes études. Votre amour et votre confiance ont été ma plus grande force,

À mes professeurs et encadrants, pour leur patience, leur expertise et leur passion à transmettre leurs connaissances. Vous m'avez inspiré et guidé vers l'excellence,

À mes camarades et mes amis, Pour les moments partagés, l'entraide et l'amitié qui ont rendu cette aventure inoubliable,

À tous ceux qui me sont chers, à vous tous,

À tous ceux qui œuvrent pour un avenir plus durable dans le domaine de la construction,

Merci.

”

- S.Achouri

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon encadrant, **M. Nouredine Bourahla**, pour son soutien inestimable, sa patience et ses encouragements constants. Son regard critique et ses conseils avisés ont été essentiels pour structurer ce travail et en améliorer la qualité. Je tiens également à le remercier pour son aide dans l'obtention de mon stage de fin d'études.

Je suis également très reconnaissant envers mon promoteur, **M. Abdelhamid Bouchair**, pour son encadrement de grande qualité, son suivi attentif et ses précieux conseils tout au long de ce projet. Sa patience et son professionnalisme ont été exemplaires.

Je souhaite également remercier **M. Sébastien Durif**, mon co-promoteur, pour ses orientations précieuses et son soutien durant cette période.

Que les membres du jury trouvent, ici, l'expression de mes sincères remerciements pour l'honneur qu'ils me font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers **M. Abdelmadjid Tadjadit**, chef de département, ainsi que **M. Abdelmalek Chergui**, directeur des études, et leurs secrétaires pour leur accompagnement. Je remercie également **M. Iskander Zouaghi**, directeur des relations extérieures, ainsi que toute l'administration de **l'École Nationale Polytechnique** pour les facilités qu'ils offrent et leur soutien aux étudiants.

Je souhaite aussi remercier l'équipe pédagogique et administrative de **l'École Nationale Polytechnique** pour leurs efforts dans le but de nous offrir une excellente formation.

Pour finir, je souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale 16

1 Secteur du BTP et son impact sur l'environnement

1.1	Introduction	20
1.2	Définition du BTP	20
1.3	Principaux impacts sur l'environnement	20
1.4	Déchets	21
1.4.1	Définition des déchets	21
1.4.2	Typologie des déchets	22
1.4.3	Déchets du secteur BTP en France	23
1.4.4	Gestion des déchets de BTP	25
1.5	Épuisage des ressources premières	27
1.6	Gaz à effet de serre	29
1.6.1	Définition des gaz à effet de serre	29
1.6.2	Statistiques globales sur les GES	30
1.6.3	Émissions de GES par le secteur du bâtiment	30
1.7	Pourquoi il faut réduire ces impacts ?	31
1.8	Efforts pour la préservation de l'environnement	32
1.9	Conclusion	33

2 Historique des matériaux métalliques de construction

2.1	Introduction	35
2.2	Définition et composition de base des aciers	35
2.3	Première utilisation du fer dans l'architecture	36
2.4	Développement de la fonte (fin XVIIIe siècle à 1850)	37
2.5	Fer puddlé (1830 au début du XXe siècle)	38
2.6	Aciers et leurs assemblages (1856 à nos jours)	40
2.6.1	Aciers anciens (1860-1970)	40
2.6.2	Aciers modernes après 1970	42
2.7	Aspect réglementaire et normatif	43
2.7.1	Développement des normes au fil du temps	43

2.7.2	Caractéristiques des métaux à prendre lors du recalcul d'un pont métallique	45
2.8	Conclusion du chapitre	46
3	Impact de la corrosion sur les éléments structurels métalliques	
3.1	Qu'est-ce que la corrosion?	48
3.2	Types de corrosion affectant les structures métalliques	48
3.2.1	Corrosion uniforme	48
3.2.2	Corrosion localisée	48
3.2.3	Corrosion-fatigue	50
3.3	Facteurs influençant la vitesse de corrosion	50
3.3.1	Facteurs du milieu	50
3.3.2	Nature du métal	51
3.3.3	Conditions d'emploi	52
3.4	Effet de la corrosion sur les structures en métal	54
3.4.1	Perte de dimension	55
3.4.2	Effet sur le moment d'inertie	56
3.4.3	Impact sur la raideur des poutres	59
3.5	Conclusion du chapitre	59
4	Focus sur le réemploi	
4.1	Introduction	61
4.2	Définitions et Principes de Réemploi	61
4.2.1	Définitions	61
4.2.2	Principes du réemploi	64
4.3	Histoire du réemploi	65
4.3.1	Antiquité	65
4.3.2	Du XVIIIe s. à 1930	66
4.3.3	Milieu du XXe siècle et l'après-guerre	69
4.4	Réemploi : un phénix qui renaît de ses cendres (1970 - aujourd'hui)	71
4.4.1	Éveil de la conscience environnementale	72
4.4.2	Évolutions législatives et normatives	72
4.4.3	Émergence de l'économie circulaire	72
4.5	Processus de réemploi des éléments métalliques	73
4.5.1	Diagnostic	73
4.5.2	Démontage et récupération des éléments	75
4.5.3	Caractérisation des matériaux récupérés	76
4.5.4	Reconditionnement et adaptation des éléments pour leur nouvelle utilisation	76
4.6	Défis du réemploi des éléments métalliques	78
4.6.1	Désamorcer les clichés	78
4.6.2	Faire face au coût élevé de la main d'œuvre	78
4.6.3	Se positionner vis-à-vis de la concurrence des produits neufs bon marché :	79
4.6.4	Se diversifier au-delà des marchés de niche	79

4.6.5	Permettre aux éléments de réemploi d'intégrer des contextes très formalisés	79
4.6.6	Faire face à l'imprévisibilité de l'offre	79
4.6.7	Stimuler la demande	79
5	Cas d'étude : Pont de la ville de Dallet	
5.1	Introduction	81
5.2	Présentation de l'ouvrage	81
5.3	Réhabilitation du pont de Dallet	83
5.4	Poutrelles métalliques provenant du pont	84
5.4.1	Présentation et dimensions	84
5.4.2	Observation visuelle et état des poutrelles	84
5.5	Essais effectués sur les poutrelles	85
5.5.1	Essai de flexion trois points	86
5.5.2	Essai de traction	92
5.5.3	Essai de cisaillement du rivet	98
5.5.4	Essai de dureté Brinell	107
5.6	Calcul analytique des poutrelles	109
5.6.1	Hypothèse et principe de base	109
5.6.2	Analyse de la poutrelle métallique seule	110
5.6.3	Comparaison avec les résultats expérimentaux	113
5.7	Calcul numérique des poutrelles	116
5.7.1	Hypothèses et propriétés des matériaux	118
5.7.2	Conditions aux limites et application de la charge	118
5.7.3	Interactions entre les éléments	120
5.7.4	Maillage	120
5.7.5	Résultats du calcul numérique	120
5.8	Analyse de la poutrelle en configuration mixte	127
5.9	Comparaison avec la poutrelle métallique seule	133
5.10	Conclusion du chapitre	134
	Bibliographie	137
	Webographie	139
	Annexes	141

Liste des tableaux

1.1	Revue de la littérature pour la part de la construction dans différents impacts. (Bertin 2020)	21
1.2	Évolution des déchets du BTP en France 2004-2020	23
1.3	Répartition des déchets du secteur du BTP en France en 2020	25
2.1	Évolution des métaux utilisés pour la structure des ponts	36
2.2	Caractéristiques selon les Règles de charges du 29 août 1891	39
2.3	Caractéristiques des matériaux selon le cahier des charges du 29 octobre 1913	41
2.4	Références des textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des aciers laminés pour constructions métalliques	44
2.5	Références des textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des rivets et boulons à serrage contrôlé	45
2.6	Caractéristiques des métaux pour le recalcul d'un pont métallique	46
3.1	Moyenne annuelle de concentration de H_2S et des ions de Cl^- dans les sites	51
3.2	Taux de corrosion estimés ($\mu m/an$) pour la première année d'exposition des métaux structuraux selon les différentes catégories de corrosivité (ISO 9223)	55
3.3	Taux de corrosion ($\mu m/an$) des métaux structuraux dans différentes régions d'Iran	56
3.4	Perte de moment d'inertie due à la corrosion pour différents profilés IPE, HEA et UPE	58
5.1	Tableau des résultats de l'essai de flexion trois points	88
5.2	Dimensions des éprouvettes pour l'essai de traction	92
5.3	Résultats de l'essai de traction, poutrelles pont de Dallet	93
5.4	Résultats de l'essai de cisaillement de rivet, poutrelles pont de Dallet . . .	106
5.5	Résultats des essais de dureté Brinell	107
5.6	Estimation de la résistance à la traction à partir de la dureté pour chaque élément	108
5.7	Comparaison entre les résistances estimées par essai de dureté et mesurées par essai de traction	108
5.8	Comparaison des trois approches de modélisation	117
5.9	Résultats du modèle de la poutrelle entière	121
5.10	Résultats du modèle de la demi-poutrelle	122
5.11	Comparaison avec les résultats analytiques et expérimentaux	124
5.12	Comparaison des performances structurelles	133

Liste des tableaux

13	Limite élastique R_e (“Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique” s. d.)	143
14	Limite plastique R_m (“Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique” s. d.)	144
15	Allongement % (“Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique” s. d.)	145
16	Pentes de chargement et déchargement de la poutre	150

Table des figures

1.1	Production des déchets en France en 2020 (<i>Déchets - Chiffres Clés, Édition 2023</i> 2023).	22
1.2	Graphique de l'évolution des déchets du BTP en France (2004-2020)	24
1.3	Répartition des types de déchets par secteur dans le BTP	25
1.4	Gestion des déchets en France (<i>Gestion des Déchets</i> 2024).	27
1.5	Quantité de granulat produite par département en 2018 (<i>Consommation de ressources du BTP - Chiffres clés du logement</i> 2022).	28
1.6	Évolution de la consommation de granulats en France (1970-2020)	29
1.7	Répartition des émissions de GES du secteur du bâtiment en France	30
2.1	Coupe sur la pierre armée du Panthéon de Paris.	37
2.2	The Iron Bridge, England	37
2.3	Tour Eiffel, France	39
2.4	Exemples de construction en acier	40
3.1	Impact de la corrosion sur la section en I	57
4.1	Métabolisme urbain de Plaine Commune	62
4.2	Senatus consultum de Tarentinis (Eich 2023)	66
4.3	Affiche imprimée en 1778 sur la déconstruction des hauts quartiers de Bruxelles	66
4.4	Estampe de la démolition de la Bastille, Musée de la Révolution française, 1789	67
4.5	Démolition de l'ancien Palais Granvelle, 1928	67
4.6	Entrée des entrepôts d'Achille Picart, avec un fronton provenant de l'ancien palais des Tuileries. Photo : Walter Daran, Getty Images.	68
4.7	Plan du château d'Amboise.	68
4.8	Développement des outillages et du matériel de démolition	69
4.9	Augmentation du coût de main-d'œuvre (Eich 2023)	70
4.10	Extraits publicitaires des années 1950-1960	71
4.11	Diversification des matériaux de construction	71
4.12	Lots d'éléments métalliques issus de déconstruction	73
4.13	Techniques de contrôle non destructif	75
4.14	Essais destructifs en laboratoire	76
4.15	Traitement de surface des structures métalliques	77
5.1	Pont de Dallet	81
5.2	Pont de la ville de Dallet avant rénovation	82

5.3	Inauguration des travaux de rénovation du pont métallique de Dallet (clermontinfos63.fr 2024)	83
5.4	Section des poutrelles	84
5.5	Dimensions des poutrelles extraites du pont	84
5.6	Investigations sur le métal	85
5.7	Protocole essai de flexion	87
5.8	Courbes Force-Déplacement expérimentales	89
5.9	Courbe Force-Déplacement poutrelle 01	89
5.10	Courbe Force-Déplacement poutrelle 02	90
5.11	Courbe Force-Déplacement poutrelle 03	90
5.12	Courbe Force-Déplacement poutrelle 04	91
5.14	Points de repère essai traction	93
5.15	Courbes Contrainte-Déformation expérimentales	94
5.16	Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 01 (semelle sup.)	94
5.17	Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 02 (âme)	95
5.18	Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 03 (semelle inf.)	95
5.19	Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 03 (âme)	96
5.20	Feuillage de l'éprouvette 04	97
5.21	Rupture fragile des éprouvettes	98
5.22	Éprouvette de l'essai de cisaillement	100
5.23	Préparation des éprouvettes de cisaillement	101
5.24	Déroulement de l'essai de cisaillement des rivets	101
5.25	Dimensions des éprouvettes	102
5.26	Rotation de l'âme autour du rivet	103
5.27	Courbes Force-Déplacement Éprouvette 01	104
5.28	Courbe Force-Glisement Éprouvette 01	105
5.29	Courbes Force-Déplacement Éprouvette 02	105
5.30	Courbe Force-Glisement Éprouvette 02	106
5.31	Section corrigée	110
5.32	Modèle de calcul numérique	116
5.33	Comportement adopté, comparé aux résultats de recherches antérieures	118
5.35	C.A.L Demi Poutre	119
5.34	Essai 1 avec $U1, U3 \neq 0$	119
5.36	Maillage des poutrelles	120
5.37	Graphe numérique poutre entière	121
5.38	Modèle poutre entière	121
5.39	Graphe numérique demi poutre	122
5.40	Déformation de la demi poutre sans préc.	123
5.41	Graphe numérique quart de poutre	123
5.42	Graphe numérique quart de poutre	124
5.43	Modèle quart de poutre sans rivets	125
5.44	Graphe numérique quart de poutre	125
5.45	Modèle quart de poutre sans trous	126
5.46	Dimensions de la configuration mixte	127
5.47	Position de l'axe neutre plastique	131
48	Essai 1	147

Table des figures

49	Essai 1-bis	147
50	Essai 2	148
51	Essai 3	148
52	Essai 4	149
53	Essai 4-force déplacement du vérin	149
54	Eprouvette 01 - semelle supérieur	150
55	Eprouvette 02 - ame	150
56	Eprouvette 03 - semelle inférieure	151
57	Éprouvette 04 - âme feuilltée	151
58	Rupture fragile des éprouvettes	151
59	Feuillage de la section des éprouvettes	152
60	Éprouvette 04 - âme feuilltée	153
61	Prise des échantillons pour l'essai de cisaillement	154
62	Prise des échantillons pour l'essai de cisaillement	154
63	Éprouvette 01 en fin de l'essai	155
64	Âme et rivet après cisaillement	156
65	Évolution des Xi éprouvette 01 Phase A	156
66	Évolution des Xi éprouvette 01 Phase B	157
67	Évolution des Yi éprouvette 01 Phase A	157
68	Évolution des Yi éprouvette 01 Phase B	158
69	Déplacements verticaux Éprouvette 01 Phase A	158
70	Déplacements verticaux Éprouvette 01 Phase B	159
71	Éprouvette 02 en fin de l'essai	159
72	Évolution des Xi éprouvette 02	160
73	Évolution des Yi éprouvette 02	160
74	Déplacements verticaux Éprouvette 02	161
75	Excel pour calcul de officient de cisaillement de Timoshenko κ	162

Liste des acronymes

BTP Bâtiment et Travaux publics

PIB Produit Intérieur Brut

FFB Fédération française de bâtiment

GES GAZ à effet de serre

DD Déchets dangereux

DND Déchet non dangereux

DI Déchet inerte

DNDNI Déchets non dangereux et non inertes

AGEC Anti-Gaspillage pour une économie circulaire

ISDI Installations de stockage de déchets inertes

ISDND Installations de stockage de déchets non dangereux

SDES Service des données et études statistiques

ECV Engagement pour la croissance verte

BIM Building Information Modeling

FCRBE Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements

BBC Bâtiments Basse Consommation

LTECV Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte

SNBC Stratégie nationale bas-carbone

IDP Inspections Détaillées Périodiques

Introduction générale

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études proposé par l'Institut Pascal, Site Polytech, Clermont-Ferrand, en collaboration avec l'École Nationale Polytechnique d'Alger, des entreprises et l'Institut Carnot MECD. Ce projet, encadré par des experts du département Génie civil de Polytech et du département Génie civil de l'École Nationale Polytechnique, se concentre sur l'exploration et la valorisation des voies de réemploi des éléments métalliques dans le domaine de la construction. Cette recherche s'inscrit dans un contexte global de prise de conscience des enjeux environnementaux pressants, notamment la nécessité de réduire l'empreinte carbone et de gérer de manière plus efficace les ressources naturelles.

Contexte

Le secteur du bâtiment et des travaux publics BTP se trouve aujourd'hui à un carrefour crucial, confronté à des défis environnementaux sans précédent. En 2023, la France a réaffirmé son engagement à réduire ses émissions de CO₂ pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris, fixant un budget carbone strict pour la période 2019-2023. Avec des émissions nationales actuelles estimées à 408 MtCO₂e/an, le secteur du BTP, l'un des plus émissifs, est particulièrement concerné par cet impératif de réduction.

Le secteur du BTP, à lui seul, était responsable d'une empreinte carbone de 75 MtCO₂e en 2023. Cette situation appelle à une transformation profonde des pratiques de construction, orientée vers des approches plus durables et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, l'écoconstruction et l'économie circulaire émergent comme des solutions prometteuses pour réduire l'impact environnemental du secteur.

Parallèlement, l'industrie de la construction fait face à des défis croissants en matière de gestion des ressources. La demande continue en matériaux de construction, couplée à la raréfaction des ressources naturelles, souligne l'urgence de repenser nos modes de production et de consommation dans ce secteur. C'est dans ce cadre que le concept de réemploi des matériaux de construction, et plus particulièrement des éléments métalliques, prend toute son importance.

Problématique

Bien que le réemploi des éléments métalliques dans la construction présente des avantages considérables, son application reste limitée. Cette réticence est souvent due à un manque de données fiables sur les performances et la durabilité des matériaux réemployés, à des incertitudes réglementaires – il n'existe pas de cadre normatif spécifique imposant des exigences techniques précises pour ces matériaux réemployés – ainsi qu'à des défis techniques et économiques. La problématique de cette recherche s'articule autour des interrogations suivantes, qui visent à lever les obstacles au réemploi et à promouvoir des pratiques de construction plus durables :

- Comment caractériser efficacement les matériaux métalliques issus de différentes périodes de construction pour évaluer leur potentiel de réemploi ?
- Comment surmonter les obstacles réglementaires, techniques et économiques au réemploi des éléments métalliques ?
- Quelles stratégies peuvent être mises en place pour une gestion durable des déchets métalliques issus du secteur du BTP ?
- Quelles solutions innovantes peuvent être proposées pour optimiser les performances mécaniques et la durabilité des structures réemployées ?
- Comment valoriser le potentiel inexploité des structures métalliques existantes ?

Objectifs

Ce projet de fin d'études vise à explorer et à évaluer les potentialités du réemploi des éléments métalliques dans le domaine de la construction, s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable.

Notre travail de recherche s'articulera autour d'une analyse de la littérature existante sur les pratiques actuelles de réemploi des matériaux métalliques, couplée à une caractérisation des propriétés mécaniques et physiques des éléments issus de la déconstruction. Nous développerons une méthodologie combinant la littérature et des techniques d'essais destructifs et non destructifs pour évaluer la performance et la durabilité de ces matériaux issus de différentes périodes. Nous rassemblerons également les données trouvées dans la bibliographie afin de créer une référence sur les résistances résiduelles des matériaux métalliques récupérés, qui servira de guide pour de futurs projets. Nous explorerons des solutions innovantes pour la valorisation de ces matériaux, notamment à travers des stratégies de mixité avec d'autres matériaux tels que le béton. Une analyse des obstacles techniques, réglementaires et économiques au réemploi des éléments métalliques nous permettra de formuler des recommandations concrètes pour surmonter ces défis. Enfin, nous réaliserons une étude de cas sur l'ancien pont de la ville de Dallet pour démontrer la faisabilité et les avantages du réemploi dans un projet concret.

À travers cette démarche globale, nous aspirons à contribuer significativement à l'avancement des connaissances et des pratiques dans le domaine du réemploi des matériaux de construction, en mettant l'accent sur les éléments métalliques, et à promouvoir une

approche plus durable et circulaire dans le secteur du bâtiment, contribuant ainsi à la réduction de l’empreinte carbone du secteur.

Organisateur du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre “**Secteur du BTP et son impact sur l’environnement**” présente le contexte environnemental du secteur du BTP. Il met en lumière les principaux impacts de ce secteur sur l’environnement, notamment en termes de consommation de ressources, de production de déchets et d’émissions de gaz à effet de serre. Ce chapitre pose les bases de la réflexion sur l’importance du réemploi dans la construction.

Le deuxième chapitre “**Historique des matériaux métalliques de construction**” offre une analyse historique détaillée des matériaux métalliques de construction. Il retrace l’évolution de ces matériaux, de leurs propriétés mécaniques et de leurs caractéristiques essentielles au fil du temps. Cette étude historique et technique fournit une base solide pour comprendre les matériaux à réemployer dans le contexte actuel.

Le troisième chapitre “**Impact de la corrosion sur les éléments structurels métalliques**” se concentre sur l’impact de la corrosion sur les structures métalliques. Il examine les différents types de corrosion, leurs effets sur les propriétés mécaniques des éléments métalliques, et les défis techniques liés à la durabilité des structures réemployées.

Le quatrième chapitre “**Focus sur le réemploi**” présente un état de l’art sur le réemploi dans la construction. Il explore l’histoire du réemploi, son évolution récente, la procédure de réemploi des éléments structuraux ainsi que la réglementation et les défis actuels. Ce chapitre met en évidence les obstacles et les opportunités dans le domaine du réemploi des matériaux de construction.

Le cinquième et dernier chapitre “**Cas d’étude : Pont de la ville de Dallet**” constitue le cœur de cette étude. Il présente une évaluation concrète du potentiel de réemploi des poutrelles métalliques extraites du pont de Dallet. Ce chapitre détaille les essais mécaniques réalisés, les calculs analytiques effectués, ainsi que la modélisation numérique par éléments finis des poutrelles afin de comparer les différents résultats. Il met en évidence les avantages de la transformation des poutrelles en structure mixte acier-béton et fournit une analyse des résultats obtenus.

Enfin, le travail sera terminé par une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

Chapitre 1

Secteur du BTP et son impact sur l'environnement

1.1 Introduction

Le secteur du bâtiment et des travaux publics BTP est un pilier essentiel de l'économie française, mais il est également l'un des principaux contributeurs aux impacts environnementaux. Ce chapitre se propose d'explorer les différentes dimensions de cette problématique, en mettant en lumière les défis liés à la gestion des déchets, aux émissions de gaz à effet de serre GES et à l'épuisement des ressources naturelles. Nous commencerons par définir le secteur du BTP et ses implications environnementales, avant d'analyser en détail les déchets générés par les activités de construction, ainsi que les émissions de GES associées. Enfin, nous aborderons la question de l'épuisement des ressources premières, soulignant la nécessité impérieuse de réduire ces impacts pour garantir un développement durable.

1.2 Définition du BTP

Le secteur du BTP est un domaine très important de l'économie française, représentant 6% du PIB en 2022 et employant 1,5 million de personnes. Il englobe un large éventail d'activités liées à la construction, à la rénovation et à la démolition des infrastructures. Comme son nom l'indique, le secteur du BTP se divise en deux sous-secteurs :

Bâtiment : Comprend toutes les activités liées à la construction, à la réhabilitation et à la démolition des bâtiments résidentiels et non résidentiels. Les activités de ce sous-secteur se répartissent aussi en deux catégories : le gros œuvre (fondations, structures, toitures) et second œuvre (aménagement, installations, etc.).

Travaux publics : Ce sous-secteur concerne la construction et l'entretien des infrastructures et des ouvrages d'art. Il comprend les infrastructures de transports (routes, voies ferrées, etc.), les ouvrages d'art (ponts, tunnels, etc.), les réseaux et les aménagements urbains.

1.3 Principaux impacts sur l'environnement

Malgré le rôle du secteur du BTP dans le développement économique et social, son impact sur l'environnement reste considérable. Tout au long du cycle de vie des projets, de l'extraction des matières premières à la démolition des structures, le BTP exerce une pression significative sur les ressources naturelles et contribue de manière importante aux problématiques environnementales globales.

Les impacts environnementaux du BTP se manifestent principalement sous trois formes majeures. Premièrement, il est le plus grand producteur de déchets en France, générant des volumes gigantesques de déchets issus de la construction, de la rénovation et de la démolition. Le secteur est responsable d'un tiers de tous les déchets en Europe, tant en poids qu'en volume (EUROSTAT s. d.). Deuxièmement, il est responsable d'une part

significative des émissions de GES, contribuant ainsi au changement climatique. Enfin, la consommation intensive de ressources naturelles, notamment pour la production de matériaux de construction, participe à l'épuisement des matières premières. Ces impacts sont interconnectés et ont des répercussions profondes sur la biodiversité, ainsi que sur la qualité de l'air, de l'eau et des sols, et sur la santé humaine.

TAB. 1.1 : Revue de la littérature pour la part de la construction dans différents impacts. (BERTIN 2020)

Auteurs	Consommation de ressources naturelles	Production des déchets	Consommation d'énergie	Émission de GES
Di Bari et al.	40%			50%
Santos et al.	50%		40%	36%
Crippa et al.		50%		33%
Iacovidou, Purnell		50%	42%	40%
Brütting et al.	50%		33%	33%
The United States (U.S.) geological survey's assessment		60%		33%
CITEPA				33%
Batiment energie-carbone (FR)			45%	
Thiers et al.			33%	33%
Zabalza et al.			33%	33%
Hoxha et al.				40%
Habert et al.				33%
Mousa et al.				36%
Global Alliance for Buildings and Construction			36%	39%

Le tableau 1.1 résume, selon plusieurs études, les contributions du secteur de la construction aux impacts environnementaux. Il indique une consommation de ressources naturelles allant de 40 à 50% et une production de déchets pouvant atteindre 60%. De plus, les émissions de GES sont également significatives, oscillant entre 33% et 50%, ce qui souligne l'importance d'adopter des pratiques de construction plus durables.

Dans les sections suivantes, nous examinerons en détail chacun de ces impacts majeurs, en commençant par la problématique des déchets.

1.4 Déchets

1.4.1 Définition des déchets

Selon (*Article L541-1-1 du Code de l'environnement 2024*), un déchet se définit comme toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire. Précise aussi l'article L541-4-2 qu'une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production de cette substance ou objet ne peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet au sens de l'article L 541-1-1 que si l'ensemble des conditions suivantes est rempli :

- L'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine.
- La substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes.

- La substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production.
- La substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions relatives aux produits, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation ultérieure.
- La substance ou l'objet n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine (*Article L541-4-2 du Code de l'environnement 2024*).

Ainsi, au sens de ces définitions, la France en 2020 était responsable de la production d'environ 310Mt de déchets dont la répartition est représentée dans la figure 1.4, soit environ 4,6t par habitant (*Déchets - Chiffres Clés, Édition 2023 2023*).

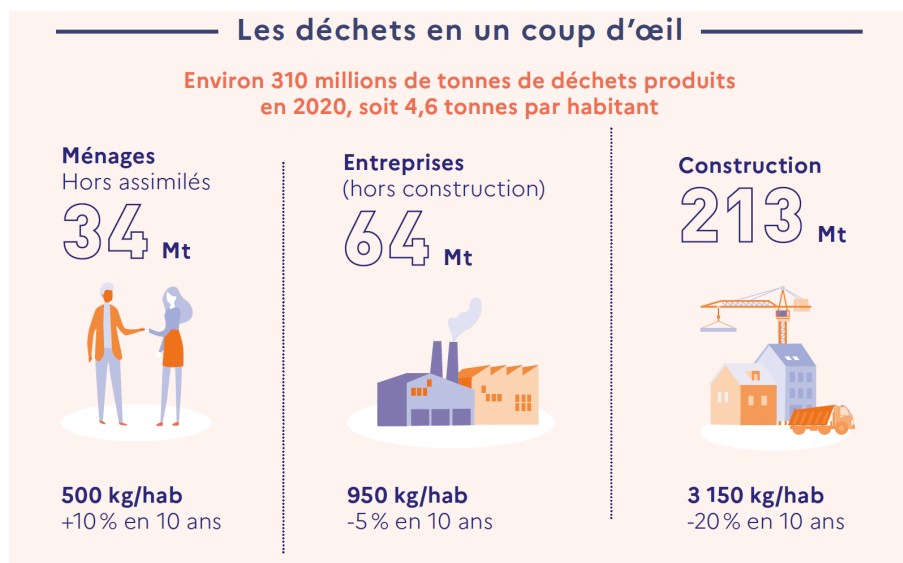


FIG. 1.1 : Production des déchets en France en 2020 (*Déchets - Chiffres Clés, Édition 2023 2023*).

1.4.2 Typologie des déchets

Les déchets peuvent être classés en fonction de plusieurs paramètres, tels qu'en fonction du producteur de déchet, des objectifs, ou encore de leur nature. Pour notre étude, on va juste s'intéresser à la classification selon la nature du déchet.

Le code de l'environnement divise les déchets selon leur nature en :

- Déchets dangereux (DD) : « Tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets mentionnée à l'article R. 541-7 ». Cette catégorie est dangereuse pour la santé humaine et environnementale et nécessite ainsi des installations de traitement spécifiques. Rentre dans cette catégorie les déchets toxiques, cancérigènes...et on les retrouve dans le domaine du bâtiment comme DD, le plomb, le flocage, et les HFC (hydrofluorocarbures).
- Déchet non dangereux (DND) : « Tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux ». On distingue dans cette catégorie :

- Déchet inerte (DI) : « Tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine ». Rentre dans ce type le béton, la brique, la céramique...
- Déchets non dangereux et non inertes (DNDNI) : Est DNDNI tout autre déchets non dangereux non inclus dans le type DI. Rentre dans ce type les métaux, le bois...
- Déchets POP : « Tout déchet constitué, contenant ou contaminé par l'une ou plusieurs des substances figurant sur la liste de l'annexe IV du règlement (UE) 2019/1021 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants, et dont la teneur en cette ou ces substances est égale ou supérieure aux limites de concentration fixées par ladite annexe ».

1.4.3 Déchets du secteur BTP en France

En tant que premier secteur producteur de déchets en France en 2020 et avec environ 213Mt de déchet produit, soit environ 69% de l'ensemble des déchets français, le secteur du BTP est susceptible de subir des actions productrices de déchets sur toutes les phases de cycle de vie des bâtiments et infrastructures, que ce soit en phase de construction, de maintenance et de réhabilitation ou encore en phase de démolition.

La figure 1.2 et le tableau 1.2 illustrent l'évolution de la production des déchets en France par ce secteur au cours des vingt dernières années selon les chiffres et les données disponibles sur les bilans sur la gestion des déchets du BTP.

TAB. 1.2 : Évolution des déchets du BTP en France 2004-2020

Année	Quantité (en million de tonnes)	Évolution en %
2020	212,733	-11,4
2018	240,190	+7,1
2016	224,355	-1,4
2014	227,621	-7,7
2012	246,700	-5,4
2010	260,700	+3,0
2008	253,040	-29,5
2006	358,880	+4,5
2004	343,500	-

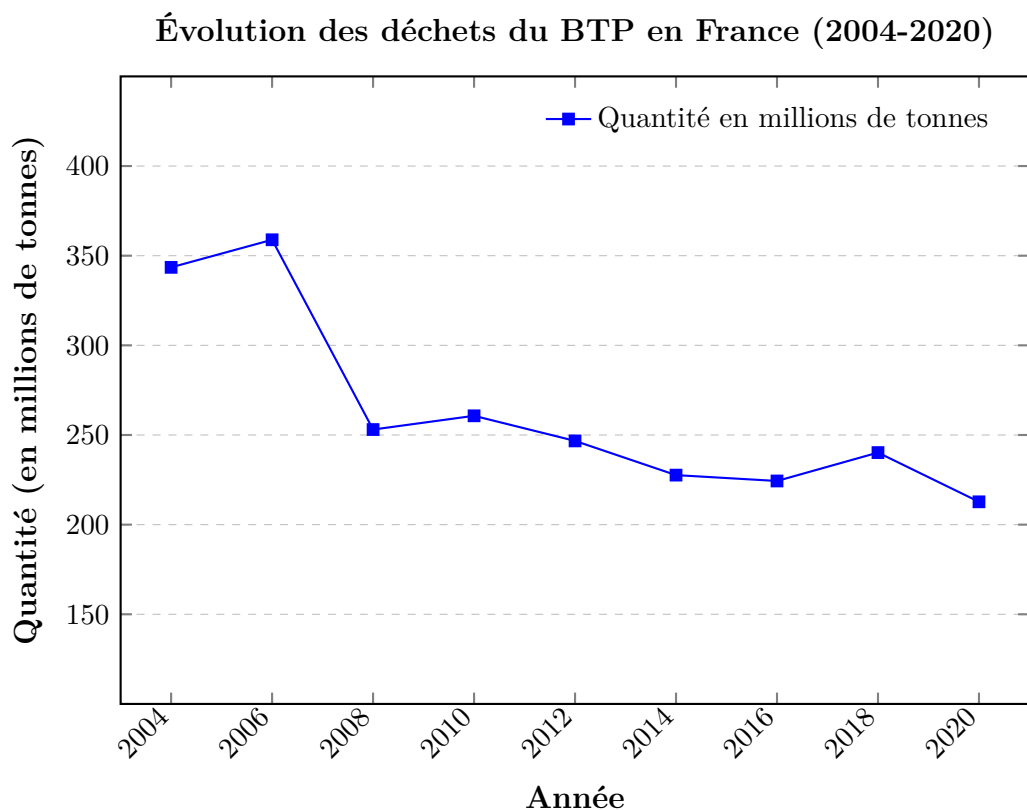


FIG. 1.2 : Graphique de l'évolution des déchets du BTP en France (2004-2020)

En 2008, on observe une baisse marquée d'environ 100Mt de déchets produits par le secteur. Cette diminution est principalement attribuable à un changement méthodologique dans la comptabilisation des déchets et déblais. La nouvelle méthode, introduite en 2008, stipule que les déchets ne sont comptabilisés qu'après avoir quitté le chantier où ils ont été produits, conduisant à une estimation plus précise des volumes.

Entre 2008 et 2010, la production de déchets est restée relativement stable. On constate ensuite une diminution en 2014, probablement due à la baisse d'activité du secteur durant la période 2008-2014, conséquence de la crise économique mondiale.

L'année 2020 marque une nouvelle baisse significative de 11,4% des déchets. Cette réduction est très probablement liée à la crise sanitaire de la COVID-19, qui a entraîné un ralentissement de l'activité économique, particulièrement dans ce secteur.

Les années 2021 et 2022 ont été caractérisées par des actions renforcées de la part des pouvoirs publics. On note notamment le déploiement des mesures de la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC) ainsi que le plan de relance qui a accéléré les projets de réduction et de valorisation des déchets.

L'analyse détaillée de la répartition des déchets dans ce secteur révèle des informations nécessaires pour orienter les efforts de réduction et de valorisation. Sur le total de 212,73Mt de déchets du BTP produits en 2022, une part prépondérante, soit 81% (172,5Mt), provient du sous-secteur des Travaux publics. Cette proportion souligne l'urgence de concentrer les initiatives de gestion des déchets sur ce domaine en particulier. Cependant, il est important de noter que le sous-secteur du Bâtiment contribue également de manière significative à la production de déchets. Au sein de ce sous-secteur, le

gros œuvre se distingue comme la principale source de déchets, représentant 13,6% du total des déchets du BTP.

Pour une compréhension plus approfondie de cette distribution, le tableau 1.3 ainsi que la figure 1.3 présentent une répartition détaillée des déchets pour l'ensemble des deux sous-secteurs avec les pourcentages pour chaque type de déchets.

TAB. 1.3 : Répartition des déchets du secteur du BTP en France en 2020

Secteur		Pourcentage de déchet	Pourcentage Types de déchet		
			DI	DNDNI	DD
Bâtiment	Gros œuvre	13,6%	80,6%	16,6%	2,8%
	Second œuvre	4,9%	57,6%	40,7%	1,7%
	Total	18,5%	72,4%	23,0%	2,5%
Travaux publics		81,5%	97,0%	2,0%	1,0%

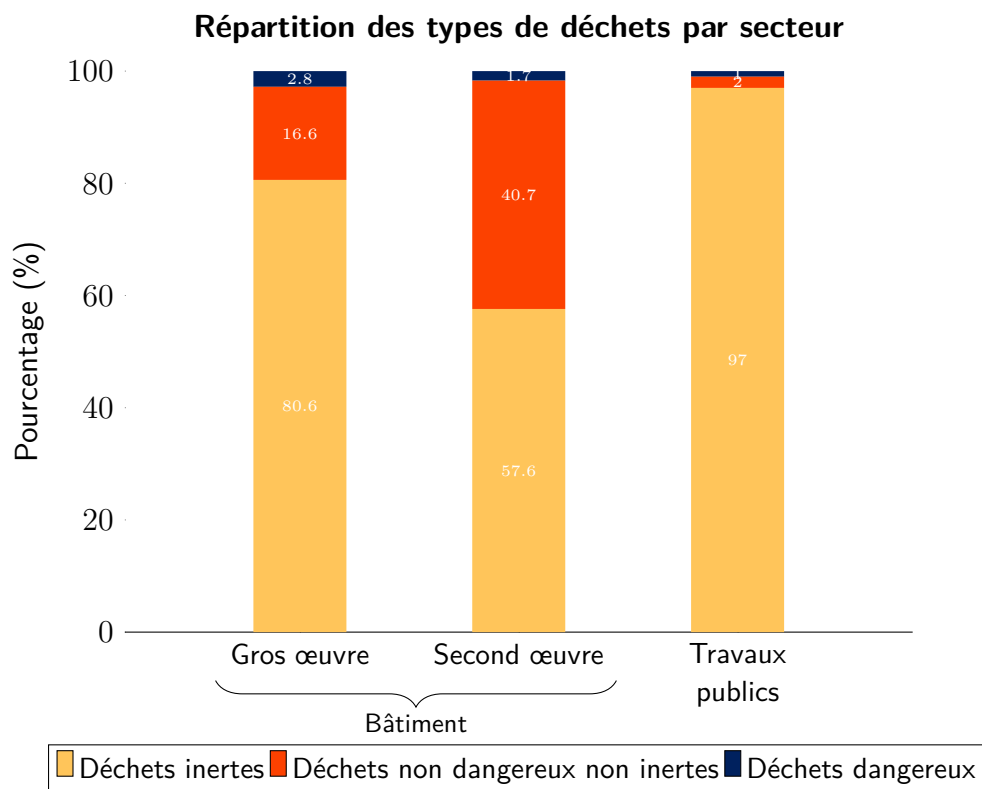


FIG. 1.3 : Répartition des types de déchets par secteur dans le BTP

1.4.4 Gestion des déchets de BTP

On a vu précédemment que le secteur du BTP est responsable de la majorité des déchets en France, mais la question qui se pose est : où vont ces déchets ?

Pour répondre à cette question, il faut savoir que l'article L541-4-3 du code de l'environnement précise qu'un déchet peut cesser d'être un déchet après avoir subi un traitement et subir une opération de valorisation, notamment de recyclage ou de réutilisation, s'il

remplit les conditions suivantes :

- La substance ou l'objet est utilisé à des fins spécifiques ;
- Il existe une demande pour telle substance ou objet, ou elle répond à un marché ;
- La substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- Son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

En France, la gestion des déchets du BTP s'articule autour de plusieurs techniques et principes, Selon la directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008, Elle suit les étapes suivantes : « le tri à la source, la collecte, le transport, la valorisation, y compris le tri, l'élimination des déchets et plus largement, toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris la surveillance des installations de stockage de déchets après leur fermeture, conformément aux dispositions relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi que les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations » (*Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives 2008*).

Voici un aperçu des principales méthodes actuelles :

Prévention : C'est la priorité absolue, visant à réduire la production de déchets à la source. Cela implique une meilleure conception des projets, l'utilisation de matériaux durables et la promotion du réemploi sur site. L'article 3 de la directive 2008/98/CE du Parlement européen définit la prévention comme : « Sont des mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet et réduisant :

- La quantité de déchets, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée de vie des produits ;
- Les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;
- La teneur en substances nocives des matières et produits ; » (*Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives 2008*)

Collecte : le ramassage des déchets, y compris leur tri et stockage préliminaires, en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets.

Préparation en vue de réutilisation : toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de pré-traitement. À noter que, pour cette même définition, la directive européenne emploie le terme de « préparation en vue du réemploi ».

Réemploi : il s'agit d'utiliser à nouveau des matériaux ou des éléments de construction pour un usage identique, sans qu'ils deviennent des déchets.

Recyclage : transformer les déchets en nouvelles matières premières.

Toute autre valorisation : « Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie ». On peut distinguer deux types de valorisation : La valorisation de matière : c'est l'utilisation des déchets comme substituts à d'autres matériaux ; la valorisation énergétique, qui représente l'incinération des déchets non recyclables avec récupération d'énergie.

Élimination : c'est le dernier recours pour les déchets ultimes qui ne peuvent être valorisés. Cela inclut l'enfouissement dans des installations de stockage de déchets inertes (ISDI) ou non dangereux (ISDND).

Déchet ultime : selon la loi 92-646 : « un déchet, résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » (Décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à la mise sur le marché des emballages 1997).

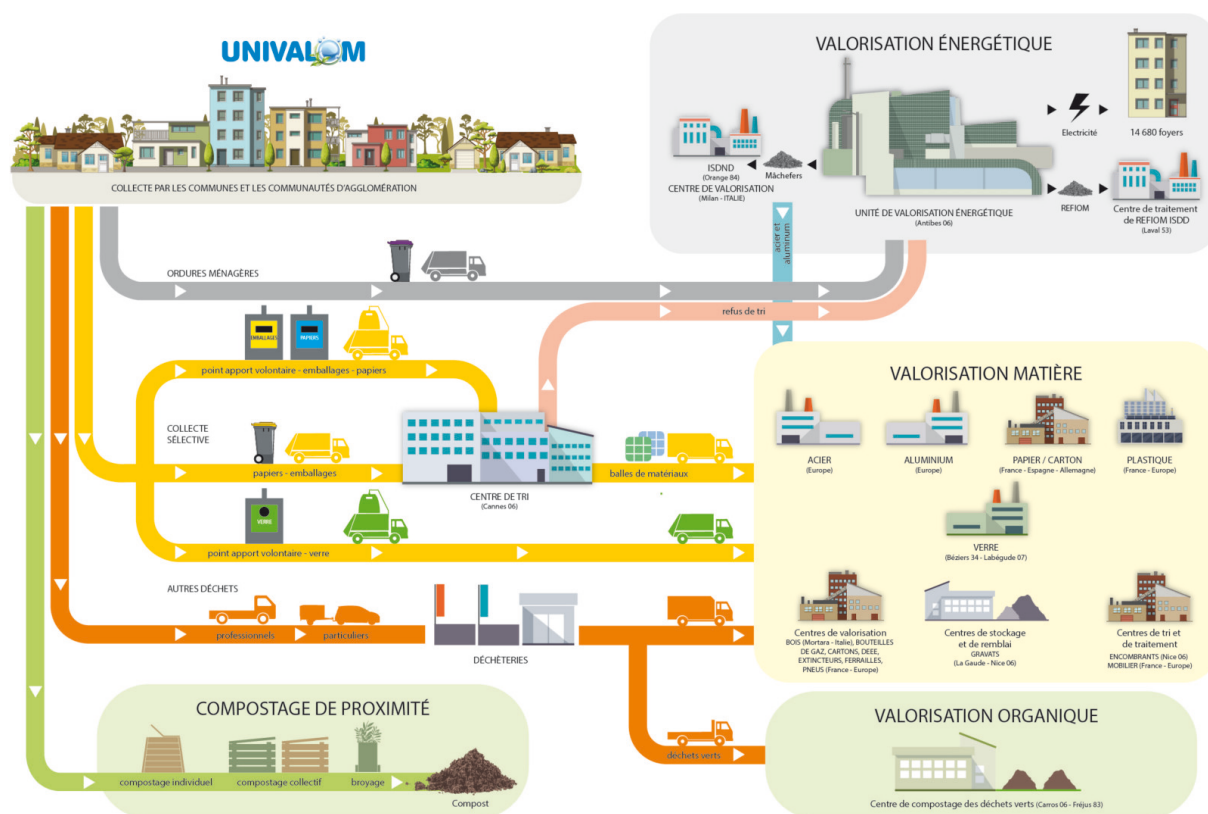


FIG. 1.4 : Gestion des déchets en France (*Gestion des Déchets 2024*).

1.5 Épuisage des ressources premières

Le secteur du BTP est un consommateur majeur de ressources naturelles. Les principaux matériaux utilisés dans ce secteur comprennent le béton, l'acier, le bois, le verre,

le plastique, ainsi que divers minéraux et agrégats. Parmi ces matériaux, le béton, composé de ciment, de granulats (sable et gravier) et d'eau, représente la plus grande part en volume. L'acier, bien que moins volumineux, est le plus important dans les structures, étant le seul à pouvoir reprendre les efforts de traction dans les structures en béton armé. Le chapitre 2 de ce mémoire traite en détail de l'histoire, de l'évolution et des caractéristiques des matériaux métalliques dans la construction, offrant une analyse approfondie de l'utilisation de l'acier dans le secteur du BTP. Le bois, quant à lui, est de plus en plus utilisé pour ses propriétés écologiques et sa capacité à stocker le carbone.

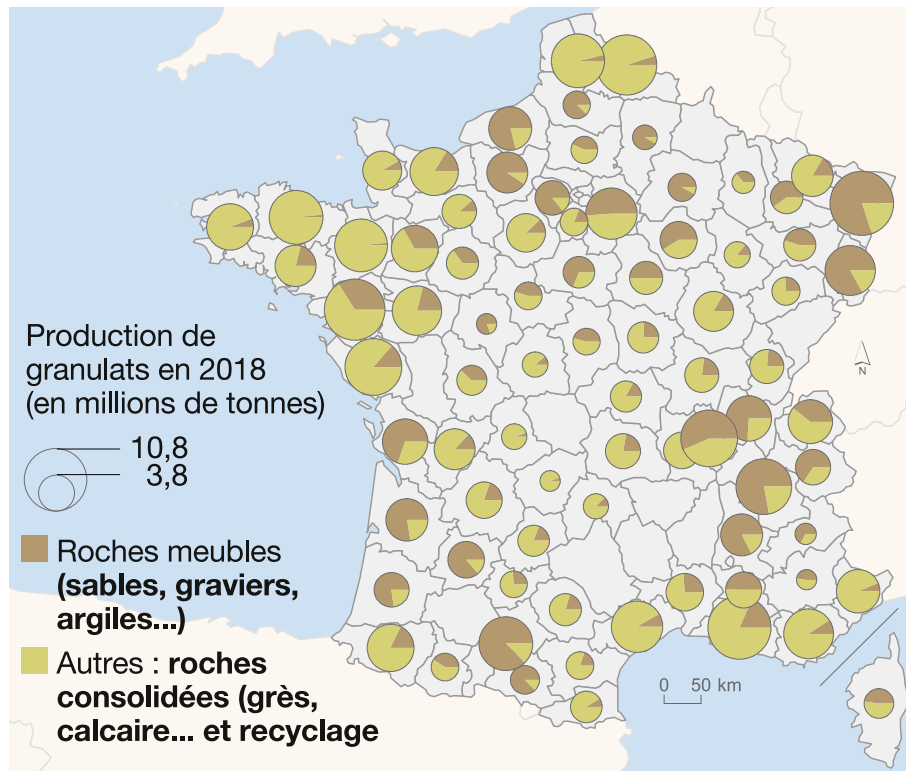


FIG. 1.5 : Quantité de granulat produite par département en 2018 (*Consommation de ressources du BTP - Chiffres clés du logement 2022*).

La consommation intensive de ressources naturelles par le secteur du BTP en France soulève des préoccupations quant à l'épuisement de ces ressources. Selon les données du Service des données et études statistiques (SDES) du ministère de la Transition écologique, le secteur du BTP en France mobilise environ $397Mt$ de matières minérales par an (*Consommation de ressources du BTP - Chiffres clés du logement 2022*).

Les granulats, principalement le sable et le gravier, constituent la majeure partie des matériaux non métalliques extraits. En 2018, $343Mt$ de graviers et de sables ont été extraits en France, représentant plus de la moitié de l'extraction intérieure totale. Cette extraction massive a des conséquences environnementales significatives, notamment la dégradation des sols, la modification des paysages et l'impact sur la biodiversité. La figure 1.5 illustre la répartition de la production de granulats par département en France en 2018.

L'extraction de ces ressources n'est pas uniforme sur le territoire français. La moitié de la production se concentre sur un quart des départements, ce qui peut entraîner des pressions localisées sur les écosystèmes et les ressources en eau.

Le recours au recyclage a permis d'économiser 32Mt de ressources en 2018, contre 26Mt en 2016. Cette évolution s'inscrit dans les objectifs de la directive-cadre européenne sur les déchets, qui fixe à 70% la part des déchets de construction devant être réemployés ou recyclés à partir de 2020. Cependant, malgré ces efforts de recyclage, la demande en ressources naturelles reste élevée. Un rapport de l'Institut national de l'économie circulaire (INEC) et de Capgemini prévoit que les besoins en ressources pour la transition énergétique française pourraient être multipliés jusqu'à 16 fois d'ici 2050. Cette augmentation potentielle souligne l'urgence de développer des stratégies durables pour la gestion des ressources dans le secteur du BTP (*Les ressources du futur pour la construction de demain 2024*).

Pour illustrer l'évolution de la consommation de granulats en France, voici un graphique montrant la tendance sur les dernières décennies (Figure 1.6).

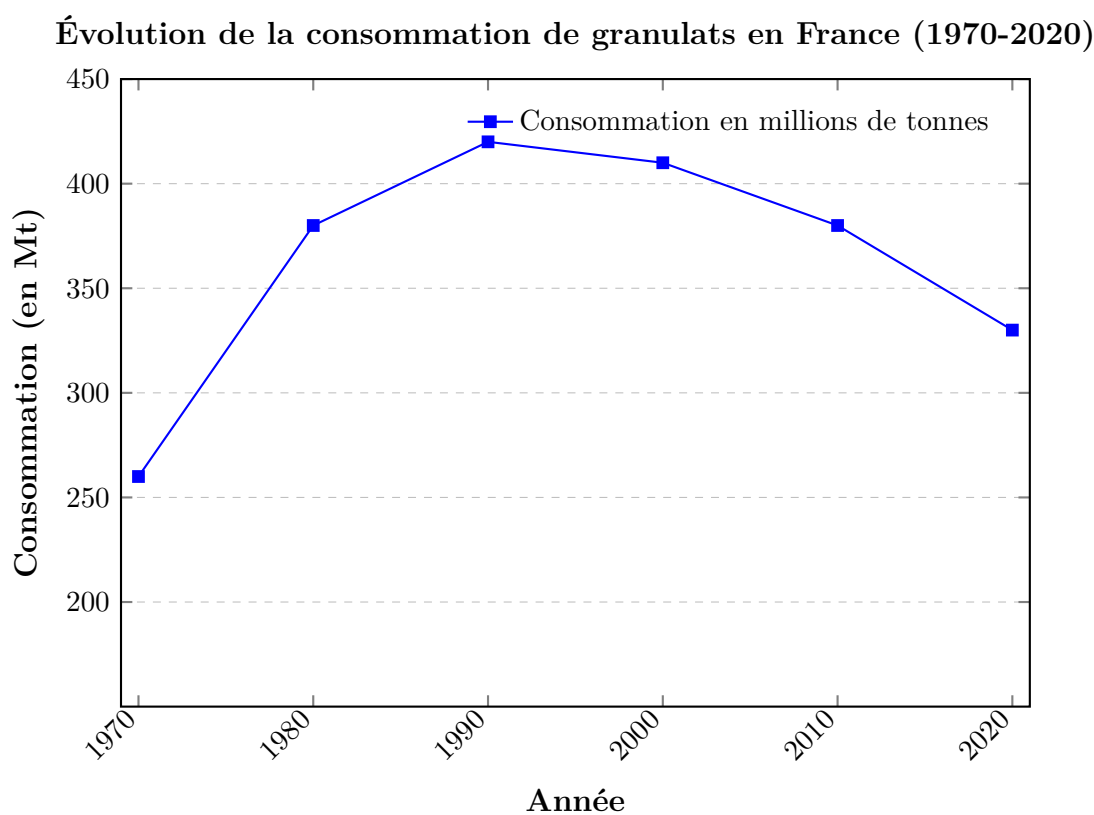


FIG. 1.6 : Évolution de la consommation de granulats en France (1970-2020)

1.6 Gaz à effet de serre

1.6.1 Définition des gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux de l'atmosphère, naturels ou anthropiques, qui absorbent et émettent des radiations infrarouges, contribuant ainsi à l'effet de serre. Les principaux GES liés aux activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et les gaz fluorés (CFC, HFC, PFC, SF_6).

1.6.2 Statistiques globales sur les GES

Le secteur du BTP a une grande part dans les émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette section présente une analyse détaillée des statistiques clés, leur évolution au fil du temps, et leur répartition entre les différents sous-secteurs et activités.

Dans le contexte du secteur du BTP, les émissions de GES sont généralement classées en deux catégories :

Émissions opérationnelles : liées à l'utilisation du bâtiment (chauffage, climatisation, éclairage, etc.).

Émissions incorporées : liées à la production des matériaux, à la construction, à la rénovation et à la démolition des bâtiments.

Notre analyse se concentrera principalement sur les émissions incorporées, qui sont directement liées aux phases de construction et de démolition.

Selon le rapport "Global Status Report for Buildings and Construction 2020" publié par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le secteur du bâtiment et de la construction est responsable de : 38% des émissions globales de CO₂ liées à l'énergie et 35% de la consommation finale d'énergie.

En France, selon les données du ministère de la transition écologique, le secteur du bâtiment représente 25% des émissions de GES nationales, ces émissions ont diminué de 28% entre 1990 et 2019.

1.6.3 Émissions de GES par le secteur du bâtiment

En 2020, le secteur du BTP était responsable de 23% des émissions de GES en France, soit environ 75MtCO_{2e}. Cette part significative souligne l'importance du secteur dans la stratégie nationale de réduction des émissions de GES. La répartition de ces émissions entre le secteur résidentiel et tertiaire est la suivante :

- Secteur résidentiel : 64% (48MtCO_{2e})
- Secteur tertiaire : 36% (27MtCO_{2e})

Cette répartition met en évidence le poids prépondérant du secteur résidentiel dans les émissions du bâtiment, soulignant l'importance des efforts de rénovation énergétique des logements.

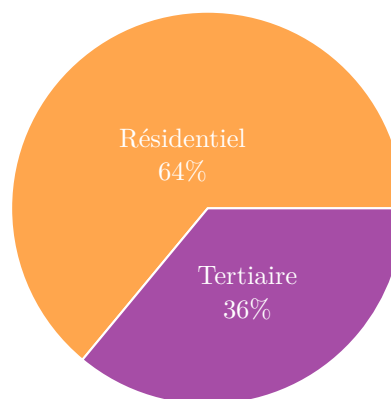


FIG. 1.7 : Répartition des émissions de GES du secteur du bâtiment en France

1.7 Pourquoi il faut réduire ces impacts ?

La réduction des impacts environnementaux du secteur du BTP en France, est devenue une priorité pour plusieurs raisons environnementales, économiques et réglementaires. Cette réduction non seulement préserve l'environnement et les ressources naturelles, mais aussi optimise les coûts et favorise l'innovation dans le secteur.

- Bénéfices environnementaux :
 - Préservation des ressources naturelles : le BTP consomme d'importantes quantités de matières premières. Réduire cette consommation permet de préserver ces ressources limitées et de ralentir leur épuisement.
 - Diminution de la pollution : moins de déchets et d'émissions signifie moins de pollution de l'air, de l'eau et des sols liée à leur élimination ou leur traitement.
- Avantages économiques :
 - Optimisation des ressources : une meilleure gestion des matériaux et de l'énergie permet d'augmenter la rentabilité des projets.
 - Création de valeur à partir des déchets et des émissions (valorisation énergétique, réemploi, recyclage, capture et utilisation du carbone...).
 - Réduction des coûts : moins de déchets et une meilleure efficacité énergétique impliquent moins de dépenses pour l'achat de matériaux, pour la gestion des déchets et pour moins de consommation d'énergie.
 - Conformité réglementaire : éviter les amendes et les sanctions liées à une mauvaise gestion environnementale.
- Bénéfices sociaux :
 - Amélioration de l'image de l'entreprise : les pratiques durables renforcent la réputation des entreprises auprès des clients et des parties prenantes.
 - Potentiel de création d'emplois dans les filières vertes : les secteurs du réemploi, du recyclage et des technologies propres peuvent générer de nouveaux emplois.
 - Stimulation de la recherche et du développement dans les technologies propres et les matériaux durables.
 - Réduction des nuisances : moins de déchets et d'émissions signifie moins de pollution sonore et atmosphérique pour les riverains des chantiers.
 - Amélioration de la santé publique : la réduction des émissions et de la pollution contribue à un environnement plus sain pour tous.
- Innovation et compétitivité :
 - Stimulation de l'innovation : la recherche de solutions pour minimiser les impacts environnementaux encourage l'innovation dans les techniques de construction, les matériaux utilisés et les processus de gestion.
 - Avantage concurrentiel : les entreprises qui maîtrisent la gestion environnementale peuvent se démarquer sur le marché et accéder à de nouveaux marchés axés sur la durabilité.
- Durabilité à long terme :

- Contribution aux objectifs de développement durable : la réduction des impacts environnementaux s'inscrit dans les objectifs mondiaux de développement durable et de lutte contre le changement climatique.
- Anticipation des futures directives européennes et nationales en matière d'environnement et de climat.
- Résilience face aux changements climatiques : un secteur du BTP plus durable est mieux préparé pour faire face aux défis futurs liés au changement climatique.

1.8 Efforts pour la préservation de l'environnement

Face aux défis environnementaux posés par ce secteur, la France a mis en place plusieurs initiatives et réglementations dont le but est de réduire son impact sur l'environnement. On peut résumer ces efforts en ce qui suit :

- **Réglementations et politiques :**

- La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte LTECV de 2015 a fixé des objectifs ambitieux pour le secteur du BTP, notamment en termes de réduction des déchets et d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.
- La Stratégie nationale bas carbone SNBC adoptée en 2015 et révisée en 2020 vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment de 49% d'ici 2030 par rapport à 2015.

- **Initiatives de l'industrie :**

- Le projet national RECYBETON, lancé en 2012, a pour objectif de favoriser le recyclage complet des bétons de déconstruction.
- L'engagement pour la croissance verte (ECV) relatif à la valorisation et au recyclage des déchets inertes du BTP, signé en 2016, vise à augmenter de 50% la quantité de matériaux recyclés à l'horizon 2020.

- **Innovations technologiques :**

- Le développement de bétons bas carbone et de ciments alternatifs contribue à réduire l'empreinte carbone des constructions.
- L'utilisation croissante de la maquette numérique (BIM) permet d'optimiser la conception des bâtiments et de réduire les déchets de construction.

- **Réemploi des matériaux :**

Le réemploi des matériaux de construction, notamment des éléments métalliques, est une approche prometteuse pour réduire l'impact environnemental du secteur du BTP. Cette pratique permet de prolonger la durée de vie des matériaux, de réduire la consommation de ressources premières et de diminuer la production de déchets. Ces efforts démontrent une prise de conscience croissante du secteur du BTP face aux enjeux environnementaux. Cependant, des défis importants subsistent, notamment en ce qui concerne le réemploi des matériaux de construction. Le chapitre 4 de ce

mémoire se penchera en détail sur cette question, en explorant les opportunités et les défis liés au réemploi des matériaux métalliques dans la construction.

1.9 Conclusion

Le secteur du BTP en France, malgré son importance économique, fait face à des défis environnementaux croissants qui forment une préoccupation majeure. Les efforts réglementaires et les initiatives de l'industrie témoignent d'une prise de conscience intensifiée. Cependant, la demande sur les matériaux de construction reste élevée et pourrait augmenter significativement dans les années à venir, donc des progrès significatifs restent à accomplir pour réduire l'empreinte écologique du secteur. Il est donc primordial de continuer à développer des solutions innovantes pour réduire la consommation de ressources naturelles, augmenter l'efficacité de leur utilisation et promouvoir l'économie circulaire dans le secteur, et c'est là où on doit faire appel à une pratique anecdotique et qui s'inscrit dans le développement durable... Le réemploi des matériaux de construction, notamment métalliques, qui apparaît comme une piste prometteuse qui sera explorée plus en détail dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Historique des matériaux métalliques de construction

2.1 Introduction

Dans le contexte actuel du réemploi des matériaux de construction, comprendre l'évolution historique et les caractéristiques des aciers utilisés dans le bâtiment est inévitable. Ce chapitre retrace le parcours des matériaux métalliques dans la construction, depuis les premières utilisations du fer jusqu'aux aciers modernes, en passant par le développement de la fonte et du fer puddlé. Cette analyse chronologique, couvrant les périodes clés de 1860 à 1970 pour les aciers anciens et post-1970 pour les aciers modernes, vise à fournir une base solide pour évaluer le potentiel de réemploi des structures métalliques existantes. En examinant l'évolution des compositions, des procédés de fabrication et des propriétés mécaniques des aciers, nous cherchons à établir un cadre de référence essentiel pour les projets de rénovation et de réutilisation.

2.2 Définition et composition de base des aciers

L'acier est un alliage métallique principalement composé de fer et de carbone. Sa teneur en carbone, généralement inférieure à 2%, est un facteur déterminant pour ses propriétés mécaniques. Les aciers de construction peuvent également contenir d'autres éléments d'alliage tels que le manganèse, le silicium, le chrome, le nickel, et le molybdène, qui influencent leurs caractéristiques spécifiques.

Le tableau suivant (Tableau 2.1) présente les caractéristiques principales des métaux employés dans la construction des ponts métalliques, couvrant la période allant des débuts de cette technologie jusqu'aux années 1960-1970. Les données pour les périodes ultérieures sont abordées dans les sections suivantes.

TAB. 2.1 : Évolution des métaux utilisés pour la structure des ponts

Métaux	Limite élastique (MPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à rupture (%)	Résistance à la corrosion	Soudabilité	Autres propriétés
Les fontes (fin XVIIIe S. à 1850)	50 – 100	100 – 150	1	Bonne	Non	Fragile
Le fer puddlé (1830 à début XXe S.)	170–300	260–400	5–25	Médiocre, risque de feuilletage	Possible après essais	Peut être fragile
Fer pur (VIIIe S. avant J.-C. à début XXe S.)	180	300	30	Très bonne	Non	Très ductile
Aciers doux (à partir 1860)	240 – 280	420 – 450	22	Peu sensible à la corrosion	Soudable après essais pour les ponts les plus anciens	Ductile (voir l'allongement)
Aciers mi-durs (à partir 1930)	360	520	20	Assez peu sensibles à la corrosion	Les plus anciens ne sont pas soudables	Les plus anciens sont à la limite de la fragilité

Nota : Les termes « Aciers doux » et « Aciers mi-durs » se réfèrent à des classifications métallurgiques basées sur la teneur en carbone. Ces désignations, bien que pertinentes pour les aciers produits avant les années 1970, ne permettent plus aujourd'hui de distinguer efficacement les aciers modernes.

2.3 Première utilisation du fer dans l'architecture

L'utilisation du fer dans la construction remonte à l'antiquité, bien que de manière limitée et principalement pour des applications non structurelles. Les premières traces d'utilisation du fer datent de la civilisation hittite, qui maîtrisait la forge du fer, vers 1500 avant J.-C. Cependant, ce n'est qu'à partir du VIIIe siècle avant J.-C., avec les Grecs et les Romains, que le fer a commencé à être utilisé de manière plus extensive dans la construction. Les Romains, en particulier, ont utilisé le fer pour renforcer les structures de leurs édifices et ponts (WILLIAMS 2003).

Le fer pur ou quasi-pur était principalement utilisé sous forme de clous, attaches, et armatures pour renforcer les structures en pierre et en bois. Bien que le fer ait été plus cher et moins disponible que le bois ou la pierre, sa résistance et sa durabilité en faisaient un matériau précieux pour des applications spécifiques, notamment dans les zones sujettes aux tremblements de terre. L'un des exemples notables de l'utilisation précoce du fer dans la construction est le Panthéon de Paris (figure 2.1), construit en 1755. Cette église a été construite avec la pierre armée, qui consiste à renforcer la pierre par des éléments métalliques noyés.

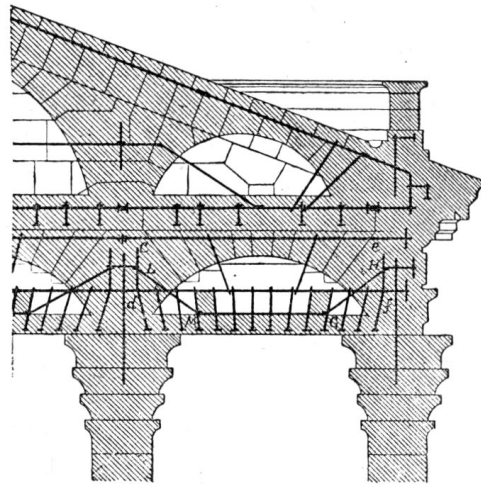


FIG. 2.1 : Coupe sur la pierre armée du Panthéon de Paris.

2.4 Développement de la fonte (fin XVIIIe siècle à 1850)

Le XVIIIe siècle a marqué une avancée majeure avec le développement de la fonte. La fonte est un alliage de fer contenant une quantité relativement élevée de carbone (entre 2,1% et 4%), ce qui la rend plus fusible et permet de la couler dans des moules. Elle a été produite en grandes quantités pour la première fois en Angleterre, notamment grâce à l'innovation d'Abraham Darby I qui, en 1709, utilisa le coke au lieu du charbon de bois pour fondre le minerai de fer. Cette innovation a permis de produire de la fonte de manière plus économique et en plus grandes quantités, facilitant son utilisation dans la construction.

La fonte a rapidement trouvé des applications dans la construction, notamment pour la fabrication de colonnes, poutres et autres éléments structuraux. Parmi les premières utilisations notables de la fonte dans la construction, on peut citer le premier pont métallique, le pont de Coalbrookdale (Iron Bridge). Ce pont en fonte de fer traverse la rivière Severn à Coalbrookdale, achevé en 1779 en Angleterre en seulement trois mois. Ce pont est souvent considéré comme la première grande structure métallique au monde. Il



FIG. 2.2 : The Iron Bridge, England

illustre les capacités portantes et la durabilité de la fonte, avec ses 384 tonnes de fonte utilisées pour construire un pont de portée de 30,60 mètres (MISA 1995).

Caractéristiques :

Limite élastique (σ_e) : 50 à 100MPa.

Contrainte de rupture (σ_r) : 100 à 150MPa.

Allongement à rupture (A) : 1 à 8%.

Soudabilité : Non soudable.

Résistance à la corrosion : Bonne.

Autres Propriétés : Fragile, résiste mal à la traction, aux chocs et aux dilatations thermiques.

2.5 Fer puddlé (1830 au début du XXe siècle)

Le fer puddlé a succédé à la fonte et précédé l'acier dans les applications de construction. Il était produit en faisant fondre la fonte issue des hauts-fourneaux dans des fours appelés « à réverbère ». Ensuite, cette fonte était brassée pour provoquer sa décarburation. À la fin de l'opération, le métal, à l'état pâteux, était soumis au marteau-pilon pour éliminer les scories. Enfin, il passait au laminoir pour être transformé en profilés, barres et tôles de petites dimensions. Le fer puddlé est plus malléable et moins cassant que la fonte. Il a été largement utilisé pour les structures nécessitant une plus grande ductilité et une meilleure capacité de charge.

En complément du processus de production, l'usinage et le laminage du fer puddlé affectent ses propriétés mécaniques finales. Après la décarburation de la fonte dans les fours à réverbère, le métal pâteux est soumis à une série d'étapes de laminage qui modifient sa microstructure interne. Ce laminage entraîne une orientation des fibres métalliques, où les inclusions de scories et d'oxydes se retrouvent alignées le long des plans de laminage. Ce procédé confère au fer puddlé une anisotropie marquée, avec une résistance longitudinale, dans le sens du laminage, beaucoup plus élevée que la résistance transversale, perpendiculaire à ces plans. En effet, ces inclusions peuvent provoquer des ruptures sous forme de feuilletage lorsque le fer puddlé est sollicité perpendiculairement à la direction du laminage. Ce phénomène est particulièrement exacerbé par des facteurs tels que la corrosion, qui attaque plus facilement les plans contenant des scories et favorise le délaminage (*Caractérisation mécanique des fers puddlés s. d.*).

Le fer puddlé est à la base de nombreuses grandes constructions. Il fut remplacé par l'acier au début du XXe siècle. Les assemblages des ponts en fer puddlé faisaient appel essentiellement aux rivets. Les premiers fers puddlés possèdent une structure hétérogène, composée d'une alternance de couches d'oxydes et de scories au sein d'un fer presque pur. En raison de ces inclusions, ils sont sensibles à la corrosion feuilletante. Grâce aux améliorations des techniques de puddlage, les fers puddlés les plus récents se rapprochent des aciers dits « doux » de type E24. (Tableaux 2.2 et 2.3)

Le fer puddlé permit la construction de structures emblématiques telles que la Tour Eiffel à Paris, construite entre 1887 et 1889. Cette tour, de 324 mètres de hauteur, est composée de 18038 pièces de fer puddlé assemblées par 2,5 millions de rivets, ainsi que le viaduc de Garabit. Construit par Gustave Eiffel en 1884, ce viaduc ferroviaire en fer puddlé traverse la rivière Truyère en France, illustrant la capacité de ce matériau à réaliser des constructions de grande envergure et des ouvrages d'art de grande portée.



FIG. 2.3 : Tour Eiffel, France

Désignation		A%	σ_r (MPa)
Fer laminé	Profilés et plats dans le sens du laminage	8	320
	Tôles dans le sens du laminage	8	320
	Tôles dans le sens perpendiculaire au laminage	3,5	280
Acier laminé (fer puddlé)		22	420
Rivets en fer		16	360
Rivets en acier		28	380

TAB. 2.2 : Caractéristiques selon les Règles de charges du 29 août 1891

Caractéristiques :

Limite élastique (σ_e) : 170 à 300MPa.

Contrainte de rupture (σ_r) : 260 à 400MPa.

Allongement à rupture (A) : 5 à 25%.

Soudabilité : Possible après essais, mais souvent difficile.

Résistance à la corrosion : Médiocre, sensible à la corrosion feuilletante.

Autres Propriétés : Structure hétérogène, souvent très fragile pour les plus anciens.

2.6 Aciers et leurs assemblages (1856 à nos jours)

Les aciers se différencient des fers puddlés par une régularité accrue de leurs caractéristiques. Développés en Angleterre au milieu du XIXe siècle avec le convertisseur Bessemer en 1856, les premiers aciers ont été produits en France dès 1880 grâce au procédé Thomas, une évolution du procédé Bessemer.

L'acier a rapidement remplacé le fer puddlé et la fonte dans la construction de ponts. Parmi les premières structures en acier, on peut citer le St. Louis Arch, le pont de Brooklyn aux USA, le pont du Firth of Forth. En France, et le viaduc du Vaur, un pont en arc de 220m de portée.



(a) St. Louis Arch, USA



(b) Viaduc du Vaur, France

FIG. 2.4 : Exemples de construction en acier

La proportion d'acier dans les ouvrages d'art a augmenté rapidement, supplantant définitivement la fonte et le fer puddlé au début du XXe siècle. Bien que le principe de fabrication reste le même, le matériau a beaucoup évolué tout au long du siècle pour améliorer la régularité des caractéristiques, les performances mécaniques, les dimensions des produits et la soudabilité. Une avancée majeure a été la mise au point de la coulée continue à la fin des années 1960.

À partir des années 1970, la soudabilité est systématiquement prise en compte tant techniquement que normativement, permettant de distinguer nettement les aciers produits avant et après cette période en termes de soudabilité. L'ajout de composants chimiques, comme le chrome et le nickel pour les aciers inoxydables ou le cuivre et le chrome pour les aciers autopatinables, améliore la résistance à la corrosion, bien que les aciers inoxydables soient rarement utilisés en raison de leur coût élevé.

2.6.1 Aciers anciens (1860-1970)

Les aciers anciens ont été assemblés exclusivement par rivetage, et seules les caractéristiques mécaniques essentielles, comme la limite de rupture et l'allongement, étaient recherchées. Ces aciers étaient généralement nommés d'après leur limite à rupture (en kg/mm^2).

Avant 1913, l'utilisation de l'acier était simplement mentionnée dans le Règlement de 1891 sur les épreuves des ponts métalliques. La qualité de ces aciers était beaucoup moins standardisée qu'aujourd'hui. Entre 1913 et 1970, la plupart des ouvrages ont été construits avec des aciers de type A42, ayant une limite élastique $\sigma_e \geq 235 MPa$.

En 1956, le cahier des charges général distingue deux nuances : AC42 et AC54, avec une différenciation entre les aciers rivetés et ceux destinés à être soudés, particulièrement en termes de résilience.

Le fascicule 4, titre III de 1962, distinguait deux types d'acier : A42 et A52, avec des exigences accrues en matière de résilience pour les aciers soudables, qui devaient présenter des garanties de résilience (valeurs d'énergie Charpy) KCU à $20^\circ C$, KCV à $0^\circ C$ ou KCV à $-20^\circ C$, selon la qualité de l'acier. Les aciers rivés devaient également présenter une garantie de résilience KCU à $20^\circ C$.

Chaque nuance d'acier comportait plusieurs qualités selon son usage prévu. Pour les ponts métalliques soudés, les qualités supérieures étaient utilisées, comme le A42 S4, renommé plus tard A42 S41, qui était soudable et possédait une bonne résilience.

Aciers doux : (Les aciers de limite élastique de l'ordre de $235 MPa$)

Les premiers aciers doux fabriqués, encore utilisés aujourd'hui pour les charpentes faiblement sollicitées, sont apparus pour la première fois dans les règles de charges de 1891 (tableau 2.2). À cette époque, ils étaient désignés comme des aciers à limite élastique d'environ $240 MPa$. Cet acier a évolué au fil du temps pour devenir l'acier A 42, puis le E 24, et aujourd'hui connu sous le nom de S 235. Ils ont une limite élastique de $240 MPa \leq \sigma_e \leq 280 MPa$, une contrainte de rupture de $420 MPa \leq \sigma_r \leq 450 MPa$, et un allongement à la rupture de $A \geq 22\%$ ce qui les rend ductiles.

Matériaux	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A%
Acier moulé	220	450	15
Acier laminé (tôles unies, plats, barres rondes et carrées, profilés)	240	420	25
Rivets	200	380	28

TAB. 2.3 : Caractéristiques des matériaux selon le cahier des charges du 29 octobre 1913

Vers les années 1920, l'acier connu sous le nom d'A 48 apparaît. Ce type d'acier est ensuite référencé sous la dénomination E 28, et aujourd'hui, désigné par S 275.

Aciers Mi-Durs : (Les aciers de limite élastique de l'ordre de $355 MPa$)

Vers les années 1930, les aciers A 52 et A 54 sont apparus, utilisés dans certaines constructions soudées. Ces aciers, ayant une teneur en carbone relativement élevée (0,25 à 0,3%), ont été responsables de plusieurs accidents : l'effondrement d'un pont sur le canal Albert en Belgique et la fissuration de deux ponts en Allemagne avant la Seconde Guerre mondiale, ces incidents étant dus à des ruptures par temps froid.

Les caractéristiques mécaniques de ces aciers sont les suivantes : limite élastique de $\sigma_e = 360 MPa$, contrainte de rupture $\sigma_r = 520 MPa$, allongement à la rupture $A \geq 20\%$, avec une bonne soudabilité, à l'exception des qualités plus anciennes. Bien que leurs caractéristiques soient restées relativement constantes pendant longtemps, leur ductilité

et leur soudabilité ont été améliorées au fil du temps.

Évolutions entre 1950 et 1970 : Pendant la Seconde Guerre mondiale, de nombreux bateaux soudés (principalement les Liberty Ships) se cassèrent littéralement en deux. Ainsi que les accidents des bâtiments dont on a parlé dans la section des aciers mi-durs. Des recherches furent entreprises pour expliquer les désordres et débouchèrent sur de nouvelles spécifications portant sur la limitation de la teneur en carbone (0,20%), outre les limites sur les teneurs en soufre et phosphore. En sus, fut introduite une valeur minimale pour la résilience.

Après la Seconde Guerre mondiale, la soudure a commencé à se développer de nouveau à partir des années 1950, avec l'utilisation d'ossatures en acier Martin de nuance A 42 S, qui posaient beaucoup moins de problèmes que les aciers A 52 utilisés avant la guerre.

Avant sa révision en 1958, le cahier des charges des ponts et chaussées spécifiait les aciers Ac 42 et Ac 54. À partir de 1958, le nouveau cahier des charges indiquait les aciers A 42 et A 52 pour la construction rivée, et les aciers A 42 S (qualités 2, 3 et 4, ultérieurement renommées 21, 31 et 41) ainsi que A 52 S (qualités a, b et g) pour la construction soudée.

Les règlements concernant l'homologation des produits métalliques pour les ponts limitaient l'épaisseur maximale des tôles à 50mm . En conséquence, la largeur des membrures des poutres ne devait pas dépasser 600 à 700mm , et il était possible d'utiliser jusqu'à 5 tôles superposées, ce qui compliquait considérablement les jonctions soudées. Par conséquent, il était également nécessaire d'augmenter le nombre de poutres.

À cette époque, les caractéristiques des éléments d'assemblage métalliques, tels que les rivets et les boulons HR (à serrage contrôlé), étaient les suivantes :

- **Rivets** : A 37 R et A 42 R, selon la nuance de l'acier de charpente ;
- **Boulons HR** : classes 8.8 et 10.9.

Cette période a vu l'émergence des aciers à haute limite élastique (HLE), permettant des épaisseurs de tôles allant jusqu'à 150mm , tels que les aciers E 355, E 390, E 420 et E 460. En outre, des aciers à résistance améliorée à la corrosion, appelés aciers autopatinables comme les aciers Corten et Indaten, ont été développés. Cette période a également marqué une prise en compte accrue de la résistance aux risques d'arrachement lamellaire lorsque des efforts de traction sont appliqués perpendiculairement à la tôle.

2.6.2 Aciers modernes après 1970

Les avancées dans les procédés de sidérurgie, notamment les procédés à l'oxygène, ont permis de produire des aciers de meilleure qualité, offrant une soudabilité améliorée. Les nuances modernes d'aciers sont maintenant désignées principalement par leur limite élastique. Les aciers les plus couramment utilisés, comme les anciens E36 et E355, sont désormais désignés S355 K2+N et S355N, grâce à l'harmonisation européenne des normes.

Les qualités d'acier ont évolué depuis les désignations R et FP2, qui garantissaient respectivement des résiliences de 60 joules à 0°C et 50 joules à -40°C . Aujourd'hui, ces qualités sont remplacées par les désignations N (40 joules à -20°C) et NL (27 joules à -50°C). Les caractéristiques des aciers modernes comprennent :

- Limite élastique (σ_e) : 355 à 460MPa.
- Résistance à la traction (σ_r) : 470 à 540MPa.
- Allongement à la rupture (A) : plus de 20%.
- Ténacité : élevée à très élevée (les aciers à grains fins peuvent dépasser 100 joules à $-20^\circ C$). Soudabilité : les aciers modernes sont plus facilement soudables que les anciens, et les aciers thermomécaniques, en particulier, présentent une soudabilité améliorée par rapport aux aciers normalisés à caractéristiques mécaniques équivalentes.

Cependant, des erreurs d'utilisation des aciers autopatinables dans des constructions telles que la tour du carrefour Playel à Saint-Denis, les glissières de sécurité de l'autoroute A4 et la couverture de l'autoroute A6B ont conduit à une forte diminution de leur usage en France jusqu'au début des années 2000. La circulaire de la Direction des Routes du 23 septembre 1985 avait déjà limité leur utilisation, et le Cerema a actualisé ces recommandations dans une note d'information en avril 2015, précisant les directives pour la conception, la mise en œuvre et l'inspection de ces aciers dans les structures de ponts et passerelles.

Dans les années 1980, plusieurs innovations ont marqué le domaine :

- Les tôles d'épaisseur variable, avec une pente initiale de $3mm/m$, augmentée à $4mm/m$ par la suite, ont permis de réduire le poids des structures et le nombre de soudures. Utilisées pour la première fois sur le pont de Joigny-sur-Meuse, ces tôles existent en différentes formes comme le coin, le chapeau chinois et le chapeau de gendarme.
- Les tôles de forte épaisseur ont facilité la découpe des tabliers de ponts, conduisant au remplacement des ponts à poutres multiples par des ponts bipoutres.
- Les aciers thermomécaniques, obtenus par un laminage à une température plus basse, ont permis la production d'aciers avec des caractéristiques mécaniques équivalentes à celles des aciers normalisés, mais avec une composition d'éléments d'alliage réduite, améliorant ainsi leur soudabilité.

2.7 Aspect réglementaire et normatif

2.7.1 Développement des normes au fil du temps

Les tableaux suivants (Tableaux 2.4 et 2.5) donnent les références des différents textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des différents aciers de construction et des organes d'assemblage après les années 50. Pour les années antérieures, ces renseignements figurent dans le corps du présent texte ci-devant.

Aciers laminés pour constructions métalliques				
N°	Texte officiel et date	Titre	Date d'annulation	Appellation des aciers – Observations
1	Circulaire n° 33 du 8 avril 1958	Approbation du Cahier des Prescriptions Communes (CPC)		Aciers : Ac 42, Ac 52
2	Circulaire n° 84 du 25 novembre 1962 – Fascicule spécial n° 63-1 bis	Annulation des articles 30 et 30 bis du CPC de 1958	Le 4 octobre 1996	Aciers : A 42, A 52, A42 S 21/31/41, A52 S $\alpha/\beta/\gamma$
3	Décret n°65-768 du 7 septembre 1965 et circulaire n°66 du 4 octobre 1966 – Fascicule spécial n° 66-19 ter	Titre III du Fascicule 4 du CPC	Le 24 juillet 1975	Aciers : A 42, A 52, A 42 S 3/3/4, A 52 S $\alpha/\beta/\gamma$
4	Circulaire 70-69 du 22 juillet 1970	Relative à la vérification du contrôle en usine		
5	Circulaire n° 71-86 du 11 août 1971	Les modalités de vérification du contrôle en usine des aciers soudables		
6	Décret 75-777 du 24 juillet 1975 et circulaire n° 75-128 du 28 août 1975 - BO 75-68 bis	Titre III du fascicule 4 du CPC	En cours de validité	Premier texte faisant référence aux normes. Aciers de construction d'usage général : E 24 à E 36 des qualités 1 à 4. Aciers soudables à haute limite élastique : E 355 à E 460.

TAB. 2.4 : Références des textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des aciers laminés pour constructions métalliques

Rivets et Boulons à serrage contrôlé				
N°	Texte officiel et date	Titre	Date d'annulation	Observations
1	Avant 1958	Rivets pour les aciers AC 42 et AC 52		
2	Circulaire n° 33 du 8 avril 1958	Approbation du cahier des prescriptions communes (CPC)	Annulation des articles 32, 33 et §3 et 7 de l'article 34 par la circulaire n° 58 du 14 septembre 1967	Rivets R.38 pour les aciers A42. Rivets R.42 pour les aciers A52. Utilisation des clauses de la SNCF pour les boulons à haute résistance (HR)
3	Circulaire n°58 du 14 septembre 1967	Titre IV du fascicule 4 : Rivets en acier – Boulons à haute résistance	Décret n° 83-251 du 29 mars 1983	Rivets A 37 R et A 42 R. Boulons à haute résistance HR 8.8 et HR 10.9
4	Décret n° 83-251 du 29 mars 1983	Titre IV du fascicule 4 : Rivets en acier et boulonnerie à serrage contrôlé	En cours de validité	Référence aux normes. Rivets : NF E 27.005, NF E 27.156. Boulons à serrage contrôlé : NF E 27.701, 702, 703 et 711.

TAB. 2.5 : Références des textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des rivets et boulons à serrage contrôlé

2.7.2 Caractéristiques des métaux à prendre lors du recalcul d'un pont métallique

Selon l'extrait d'un document interne du Sétra rédigé en 2002 par Daniel Poineau et actualisé en 2010, lors du recalcul d'un pont métallique, il est essentiel de commencer par consulter le dossier de l'ouvrage existant. Ensuite, des investigations sur la structure doivent être menées, incluant le prélèvement d'échantillons. Les étapes suivantes sont recommandées pour évaluer les caractéristiques des métaux :

- Mesure de la limite élastique σ_e , de la contrainte de rupture σ_r et de l'allongement à la rupture $A\%$;
- Mesure de la résilience ;
- Analyse chimique de la composition ;
- Mesure de la dureté sur les échantillons prélevés et sur le reste de l'ossature pour voir si tous les éléments sont de la même qualité ;

- Contrôle de l'état de corrosion, présence de fissures de fatigue...

Nota : Pour les ponts construits ou reconstruits entre 1940 et 1950, les investigations doivent être plus poussées à cause de l'utilisation d'aciers de toutes provenances, durant cette période de pénurie.

Sous réserve de confirmation par les investigations mentionnées ci-dessus, les caractéristiques suivantes (Tableau 2.6,) peuvent être adoptées pour le recalcul.

Métaux	Limite élastique σ_e (MPa)
Fer puddlé	200
Acier doux avant 1930	220
Acier doux après 1930	240
Acier mi-dur avant 1960	340
Acier mi-dur après 1960	360

TAB. 2.6 : Caractéristiques des métaux pour le recalcul d'un pont métallique

En annexe, on présente les tableaux synthétiques des nuances d'acier utilisées dans la construction des ouvrages d'art avec leurs limites élastiques, leur résistance maximale, ainsi que les allongements à la rupture.

2.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre retrace l'évolution des matériaux métalliques de construction, de la fonte aux aciers modernes. Cette analyse historique a mis en lumière les progrès constants dans la composition, les procédés de fabrication et les propriétés mécaniques de ces matériaux. La compréhension de cette évolution est très importante pour évaluer le potentiel de réemploi des structures métalliques anciennes. En effet, les caractéristiques spécifiques de chaque époque, telles que la résistance, la ductilité ou la soudabilité, influencent directement les possibilités et les méthodes de réutilisation. Cette perspective historique fournit ainsi une base solide pour appréhender les défis et les opportunités du réemploi des éléments métalliques dans la construction contemporaine.

Chapitre 3

Impact de la corrosion sur les éléments structurels métalliques

3.1 Qu'est-ce que la corrosion ?

La corrosion est un processus naturel qui transforme un métal raffiné en une forme chimiquement plus stable, comme l'oxyde, l'hydroxyde ou le sulfure. C'est le résultat d'une réaction chimique entre le métal et son environnement, généralement en présence d'humidité, d'oxygène et d'autres agents corrosifs.

Les mécanismes de corrosion impliquent souvent des réactions électrochimiques complexes. Par exemple, dans le cas de la corrosion du fer dans l'acide sulfurique, il se forme un gradient de viscosité entre l'interface métal-solution et le cœur de la solution. Ce phénomène influence la cinétique de dissolution du métal (CROLET et BÉRANGER 1998).

3.2 Types de corrosion affectant les structures métalliques

Il existe plusieurs types de corrosion qui peuvent affecter les structures métalliques, on peut citer parmi les types les plus courants :

3.2.1 Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est la forme la plus courante de corrosion. Elle se caractérise par une attaque homogène sur toute la surface du métal exposée à l'environnement corrosif. Ce type de corrosion entraîne une diminution progressive et relativement uniforme de l'épaisseur du métal.

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Perte de matière régulière sur toute la surface.
- Facilement prévisible et mesurable.
- Généralement moins dangereuse que les formes localisées de corrosion.

3.2.2 Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule dans un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Les causes principales de ce type de corrosion sont : surface de métal chimiquement hétérogène, différence de potentiel entre les différentes parties du métal créée par déformation et endommagement local de la couche passive.

Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est une forme de corrosion localisée qui se manifeste par la formation de petits trous ou cavités à la surface du métal. Elle est particulièrement dangereuse, car elle peut progresser rapidement en profondeur sans être facilement

délectable en surface. L'attaque de l'acier inoxydable par les chlorures constitue la forme la plus célèbre de corrosion par piqûres

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Formation de trous profonds et étroits.
- Souvent observée sur les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium.
- Peut conduire à une défaillance rapide de la structure.

Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse se produit dans des zones confinées où le renouvellement de l'électrolyte est limité, comme dans les interstices, sous les joints ou les dépôts.

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Se développe dans des zones à accès restreint.
- Souvent associée à une différence de concentration en oxygène.
- Peut être très agressive et difficile à détecter.

Corrosion inter-granulaire

La corrosion intergranulaire se produit le long des joints de grains du métal. Elle est particulièrement problématique pour les aciers inoxydables et certains alliages d'aluminium.

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Attaque préférentielle aux joints de grains.
- Plus la teneur en carbone est importante, plus la teneur en chrome est basse, plus la sensibilité à ce type de corrosion est grande.
- Entraîne une perte significative de résistance mécanique.
- Souvent liée à des traitements thermiques inadéquats.

Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action combinée d'un environnement corrosif et de contraintes mécaniques. Elle peut conduire à une fissuration rapide et imprévisible des structures métalliques.

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Fissures fines et ramifiées.
- Nécessite la présence simultanée de contraintes et d'un milieu corrosif spécifique.

- Particulièrement dangereuse, car elle peut se produire sous des contraintes inférieures à la limite d'élasticité du matériau.

3.2.3 Corrosion-fatigue

La corrosion-fatigue est un phénomène qui combine les effets de la fatigue mécanique et de la corrosion. Elle peut réduire considérablement la durée de vie des structures soumises à des charges cycliques dans un environnement corrosif.

les caractéristiques essentielles de ce type de corrosion sont :

- Fissures se propageant perpendiculairement à la contrainte principale.
- Accélère la propagation des fissures par rapport à la fatigue dans un environnement non corrosif.
- Particulièrement préoccupante pour les structures offshore et les ponts.

Ces différents types de corrosion peuvent se produire simultanément ou successivement sur une même structure, ce qui complique souvent le diagnostic et le traitement.

3.3 Facteurs influençant la vitesse de corrosion

Selon le type de l'acier, sa composition, les conditions environnementales auxquelles il est soumis et d'autres facteurs qu'on va explorer dans cette section, la vitesse de corrosion est influencée et peut varier de $0.01mm.an^{-1}$ à $0.1mm.an^{-1}$.

3.3.1 Facteurs du milieu

Les facteurs environnementaux ont un impact significatif sur la vitesse de corrosion. Parmi les plus importants, on trouve : la température, la concentration des réactifs, la teneur en oxygène, le PH du milieu, les impuretés et particules solides.

Dans la littérature, Ahmed et Lescop (2023) ont étudié l'impact de l'environnement marin tropical sur la corrosion de l'acier au carbone : ils ont pris des éprouvettes de l'acier au carbone DC01, les ont traitées par polissage mécanique avec du SiC jusqu'au grade 1200 pour lisser la surface et éliminer les irrégularités, puis rincées avec de l'eau distillée et de l'éthanol, puis séchées à l'air. Puis ils ont soumis les éprouvettes dans quatre sites avec différentes teneurs en H_2S et Cl^- . La durée totale de l'exposition était de 12 mois avec un intervalle de collection de données de 3 mois ; les conditions des sites sont résumées dans le tableau 3.1.

Les résultats de la perte d'épaisseur après 12 mois obtenus pour cette étude étaient comme suit : Vert-Pré : $107.2\mu m$, Diamant : $850\mu m$, Frégate Est : $883\mu m$, Frégate Est : $883\mu m$ et Vauclin : $983\mu m$. On a pu conclure que plus la teneur en Cl^- et H_2S est élevée, plus la vitesse de corrosion (perte de matière) est importante.

Site	H_2S (ppb)	Cl^- (mg/m.day)
Diamant	7	481
Vert-Pré	15.5	46
Frégate Est	2995	60.5
Vauclin	223	-

TAB. 3.1 : Moyenne annuelle de concentration de H_2S et des ions de Cl^- dans les sites

3.3.2 Nature du métal

On a vu précédemment que les conditions environnementales influencent la vitesse de la propagation de corrosion, ainsi qu'influencent la perte en matière et la perte en épaisseur des éléments. Dans cette partie, on va voir les caractéristiques intrinsèques du matériau qui ont un impact sur la corrosion des éléments métalliques et sur sa vitesse.

La nature intrinsèque du métal ou de l'alliage joue un rôle important dans sa résistance à la corrosion. Plusieurs facteurs liés à la composition et à la structure du métal influencent son comportement face à la corrosion :

Composition chimique et structure cristalline

La composition chimique du métal est un facteur déterminant de sa résistance à la corrosion. Selon les éléments d'alliages qui sont ajoutés et leurs teneurs, la résistance de l'élément à la corrosion varie. Parmi les alliages contrebutés à la résistance à la corrosion, on peut citer : Le chrome Cr forme une couche passive protectrice d'oxyde de chrome, le nickel Ni améliore la résistance à la corrosion, surtout en milieu acide, le cuivre Cu améliore la résistance à la corrosion atmosphérique des aciers, le titane et le niobium dans les aciers inoxydables stabilisent le carbone, prévenant la corrosion intergranulaire, et le molybdène Mo renforce la résistance à la corrosion par piqûre.

la structure cristalline du métal, influence également sa résistance à la corrosion. Les métaux à structure cubique à faces centrées (CFC) comme l'aluminium et le nickel sont généralement plus résistants à la corrosion que ceux à structure cubique centrée (CC) comme le fer . Les joints de grains sont souvent des sites préférentiels pour la corrosion intergranulaire.

Traitements thermiques

Les traitements thermiques peuvent modifier la microstructure du métal et ainsi affecter sa résistance à la corrosion : La trempe et le revenu peuvent améliorer la résistance à la corrosion en homogénéisant la structure. Le vieillissement peut parfois conduire à la précipitation de phases secondaires qui peuvent augmenter la susceptibilité à la corrosion.

Une recherche sur l'acier inoxydable duplex 2205 a montré que le traitement thermique à 800°C pendant 2 heures augmentait sa résistance à la corrosion par piqûres en milieu chloruré, en raison d'une meilleure distribution du chrome et du molybdène (DOE et

SMITH 2020).

Impuretés

Les impuretés peuvent avoir un impact négatif sur la résistance à la corrosion : par exemple, le soufre dans les aciers peut former des inclusions de sulfure de manganèse, qui sont des sites préférentiels pour l'initiation de la corrosion par piqûres. Le phosphore peut augmenter la susceptibilité à la corrosion intergranulaire.

Procédé d'élaboration

Différentes méthodes de fabrication peuvent influencer la microstructure, la composition et les propriétés de surface du matériau, affectant ainsi son comportement face à la corrosion.

Métallurgie des poudres Ce procédé présente plusieurs avantages en termes de résistance à la corrosion : Homogénéité de la structure : La distribution uniforme des éléments d'alliage réduit les risques de corrosion localisée ; Contrôle de la porosité : Une porosité contrôlée peut améliorer la résistance à certains types de corrosion en favorisant la formation de couches passives uniformes ; Possibilité d'incorporer des additifs : L'ajout de particules inhibitrices de corrosion directement dans la matrice métallique est possible.

Coulée continue La coulée continue est largement utilisée dans la production d'aciers et d'autres alliages. Cependant, ce procédé peut présenter certains défis en termes de résistance à la corrosion : Ségrégations : la solidification rapide peut entraîner des ségrégations d'éléments d'alliage ; créant des zones plus susceptibles de corrosion ; Inclusions : La présence d'inclusions non métalliques peut servir de sites d'initiation pour la corrosion localisée.

3.3.3 Conditions d'emploi

État de surface

La rugosité, et les défauts de surfaces contribuent eux aussi à l'accélération de la propagation de la corrosion, ainsi une surface rugueuse offre plus de sites d'initiation pour la corrosion. Les défauts de surface (rayures, piqûres) peuvent accélérer la corrosion localisée.

Les revêtements comme les revêtements organiques (peintures, résines) ou les revêtements métalliques (galvanisation, placage) et les autres moyens de protection comme la protection cathodique peuvent considérablement améliorer la résistance à la corrosion.

L'étude sur les infrastructures métalliques portuaires élaborée par (SAMIHA 2018) a montré que la préparation des surfaces avant l'application de revêtements protecteurs est cruciale pour la performance à long terme de ces structures. On a pris dans ces différentes

conditions de protection et les résultats ont montré que la vitesse de propagation pour le même milieu peut varier de 0.01 à 0.1 $mm.an^{-1}$.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent eux aussi être utilisés pour ralentir le processus de corrosion : Inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes, inhibiteurs en phase vapeur pour les espaces confinés.

Une étude a exploré l'utilisation de films zéolithiques comme inhibiteurs de corrosion écologiques pour les surfaces métalliques exposées à des solutions de NaCl (SAMIHA 2018).

Sollicitations mécaniques

L'interaction entre les contraintes mécaniques et l'environnement corrosif peut conduire à des phénomènes de dégradation accélérée, dont les plus notables sont la corrosion sous contrainte et la fatigue-corrosion. La corrosion sous contrainte se produit lorsqu'un métal est soumis simultanément à des contraintes mécaniques statiques (tension, compression ou torsion) et à un environnement corrosif spécifique. Ce phénomène peut entraîner une fissuration rapide et imprévisible, même sous des contraintes inférieures à la limite d'élasticité du matériau. La fatigue-corrosion, quant à elle, résulte de l'action combinée de contraintes cycliques et d'un milieu corrosif. Dans ce cas, la propagation des fissures est accélérée par rapport à ce qu'on observerait dans un environnement non corrosif ou sous des contraintes statiques. Ces phénomènes sont particulièrement préoccupants pour les structures soumises à des charges variables ou cycliques, comme les ponts, les structures offshore ou les composants d'avions.

Forme des pièces et procédés d'assemblage

Quant à la géométrie des pièces, les angles vifs sont plus susceptibles à la corrosion que les formes arrondies. Les zones de rétention d'eau favorisent la corrosion par aération différentielle.

Les méthodes d'assemblage, en particulier le soudage, ont un impact significatif sur la résistance à la corrosion des structures métalliques. Les joints soudés sont souvent des sites préférentiels pour l'initiation et la propagation de la corrosion, en raison des changements microstructuraux et des contraintes résiduelles induites par le processus de soudage.

Plusieurs études ont mis en évidence la vulnérabilité accrue des zones soudées à la corrosion. Une recherche sur les structures métalliques soudées d'équipements miniers a révélé que la corrosion était particulièrement prononcée dans les zones de joints soudés en croix et en T (DOBROTA, PĂUN et MIRICA 2018) (NAME 1987) Cette susceptibilité accrue à la corrosion est attribuée au changement de composition chimique : L'étude a observé une réduction de la concentration en carbone et une augmentation substantielle de la concentration en soufre dans le matériau soudé par rapport au matériau neuf. Le soufre est un élément fragilisant, tandis que la diminution du carbone réduit la résistance à la corrosion. Une étude sur les joints soudés de l'acier X80 dans du CO₂ supercritique saturé en eau a mis en évidence : Toutes les sous-zones des joints soudés de X80 ont été attaquées par la corrosion, avec des taches d'écailles de corrosion en forme de fleur composées de FeCO₃ granulaire. La corrosion la plus sévère est apparue dans le métal

d'apport (WM) en raison d'une proportion plus faible de ferrite par rapport à la perlite, La corrosion la plus sévère est apparue dans le métal d'apport (WM) en raison d'une proportion plus faible de ferrite par rapport à la perlite. La corrosion la plus sévère est apparue dans le métal d'apport (WM) en raison d'une proportion plus faible de ferrite par rapport à la perlite (DENG et al. 2019).

Une étude récente sur le comportement structural des connexions en acier boulonnées sous charges de tension axiale (YAVUZ, DUYSAK et ARISOY 2022) a révélé des informations importantes sur l'effet de la corrosion :

Pour les plaques d'acier de 4 mm d'épaisseur : Une corrosion de 10% a entraîné une diminution de 4% de la limite d'élasticité moyenne et de 10% de la déformation élastique moyenne. Une corrosion de 20% a entraîné une diminution de 16% de la limite d'élasticité moyenne et de 27% de la déformation élastique moyenne.

Pour les plaques d'acier de 6 mm d'épaisseur : Une corrosion de 10% a entraîné une diminution de 3% de la limite d'élasticité moyenne et de 5% de la déformation élastique moyenne. Une corrosion de 20% a entraîné une diminution de 13% de la limite d'élasticité moyenne et de 14% de la déformation élastique moyenne.

vieillessement

Le vieillissement des matériaux métalliques peut entraîner des changements dans leur microstructure, leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques, ce qui peut à son tour affecter leur résistance à la corrosion. Les phénomènes de vieillissement peuvent inclure l'oxydation naturelle, la fatigue des matériaux et la ségrégation des éléments d'alliage.

Les changements microstructuraux et chimiques induits par le vieillissement peuvent soit protéger le métal sous-jacent, soit accélérer la corrosion. Les études de cas sur les infrastructures portuaires et les échangeurs de chaleur montrent que l'exposition prolongée à des environnements agressifs peut considérablement augmenter les taux de corrosion.

3.4 Effet de la corrosion sur les structures en métal

La corrosion, phénomène électrochimique complexe, ne se limite pas à une simple dégradation esthétique des surfaces métalliques. Elle engendre des modifications profondes des propriétés mécaniques et structurelles des matériaux, pouvant compromettre l'intégrité et la sécurité des ouvrages. Cette partie de notre étude vise à examiner en détail les différentes facettes de l'influence de la corrosion sur les éléments métalliques. Nous analyserons successivement la perte d'épaisseur, les modifications du moment d'inertie, l'altération de la raideur des poutres, les changements dans la résistance du matériau, et enfin, l'impact sur la soudabilité.

3.4.1 Perte de dimension

La perte d'épaisseur est l'un des effets les plus directs et mesurables de la corrosion sur les éléments métalliques. Elle résulte de la réaction chimique entre le métal et son environnement, entraînant une réduction progressive de la section transversale du matériau. Cette diminution de l'épaisseur affecte non seulement la capacité portante des éléments structuraux, mais aussi leur durabilité et leur sécurité à long terme. Cette perte de matière est généralement mesurée en millimètres par an (mm/an). La vitesse de corrosion dépend de nombreux facteurs, notamment la composition du métal, l'environnement et les conditions d'exposition.

Dans la partie suivante, on va voir le taux de corrosion et la vitesse de propagation de la corrosion pour différents milieux et types d'acier selon les données disponibles dans la littérature.

La norme ISO 9223 classe la corrosivité atmosphérique en cinq catégories, de C1 (très faible) à C5 (très élevée). Le tableau 3.2 extrait de la même norme illustre les différents taux de corrosion durant la première année pour les différents types de métal et dans les différentes catégories de sites.

Après la première année, le comportement de la corrosion change généralement. Il y aura un ralentissement de la corrosion dû à la formation d'une couche de produits de corrosion qui peut agir comme une barrière protectrice, ralentissant le processus de corrosion. Pour de nombreux métaux, la corrosion à long terme suit une loi bilogarithmique, souvent exprimée sous la forme : $D = r_{corr}t^b$ avec : D : profondeur de corrosion ; r_{corr} : taux de corrosion pour la première année, t : temps d'exposition en année ; et b exposant de la loi de puissance (généralement entre 0,5 et 0,9 selon l'ISO 9224).

Pour les aciers au carbone, le taux de corrosion diminue généralement rapidement après la première année. Pour les aciers galvanisés, la couche de zinc se corrode d'abord, puis le taux change une fois que l'acier sous-jacent est exposé. l'aluminium, Forme rapidement une couche d'oxyde protectrice, maintenant un taux de corrosion faible à long terme. et finalement le Cuivre Développe une patine qui ralentit la corrosion ultérieure.

Cat	Corrosivité	Acier au carbone	Acier galvanisé	Cuivre	Aluminium
C1	Très faible	$r_{corr} \leq 1,3$	$r_{corr} \leq 0,1$	$r_{corr} \leq 0,1$	Négligeable
C2	Faible	$1,3 < r_{corr} \leq 25$	$0,1 < r_{corr} \leq 0,7$	$0,1 < r_{corr} \leq 0,6$	$r_{corr} \leq 0,6$
C3	Moyenne	$25 < r_{corr} \leq 50$	$0,7 < r_{corr} \leq 2,1$	$0,6 < r_{corr} \leq 1,3$	$0,6 < r_{corr} \leq 2$
C4	Élevée	$50 < r_{corr} \leq 80$	$2,1 < r_{corr} \leq 4,2$	$1,3 < r_{corr} \leq 2,8$	$2 < r_{corr} \leq 5$
C5	Très élevée	$80 < r_{corr} \leq 200$	$4,2 < r_{corr} \leq 8,4$	$2,8 < r_{corr} \leq 5,6$	$5 < r_{corr} \leq 10$
CX	Extrême	$200 < r_{corr} \leq 700$	$8,4 < r_{corr} \leq 25$	$5,6 < r_{corr} \leq 10$	$r_{corr} > 10$

TAB. 3.2 : Taux de corrosion estimés ($\mu m/an$) pour la première année d'exposition des métaux structuraux selon les différentes catégories de corrosivité (ISO 9223)

Selon une étude menée en Iran par (SHIRI et REZAKHANI 2020), l'étude a examiné la corrosion atmosphérique de l'aluminium, du cuivre, de l'acier au carbone et de l'acier galvanisé dans diverses régions d'Iran. Les taux de corrosion ont été mesurés sur des échantillons exposés pendant 12 mois dans 15 sites de test. le tableau 3.3 résume les

résultats clés de cette étude.

L'étude met en évidence l'impact significatif de l'environnement sur les taux de corrosion. Chabahar, situé sur la côte sud de l'Iran, présente systématiquement les taux de corrosion les plus élevés pour tous les métaux testés (sauf l'aluminium). Cela souligne l'agressivité particulière des environnements côtiers, due à la combinaison de l'humidité élevée et de la présence de chlorures marins.

L'acier au carbone montre la plus grande susceptibilité à la corrosion, avec des taux variant considérablement selon les sites. L'acier galvanisé démontre l'efficacité de la galvanisation, avec des taux de corrosion nettement inférieurs à ceux de l'acier au carbone. Le cuivre présente une résistance intermédiaire, mais reste vulnérable dans les environnements les plus agressifs. L'aluminium se distingue par sa résistance exceptionnelle, avec des taux de corrosion négligeables dans tous les environnements testés.

Métal	Taux max	Site max	Taux min	Site min
Acier au carbone	514,68	Chabahar	8,91	Shahrekord
Acier galvanisé	10,25	Chabahar	0,54	Shahrekord
Cuivre	11,01	Chabahar	0,23	Shahrekord
Aluminium	Approximativement nul dans tous les sites			

TAB. 3.3 : Taux de corrosion ($\mu m/an$) des métaux structurels dans différentes régions d'Iran

Il est important de noter que ces résultats sont basés sur une exposition d'un an. Des études à plus long terme pourraient révéler des tendances différentes, notamment en ce qui concerne la formation de couches protectrices sur certains métaux.

3.4.2 Effet sur le moment d'inertie

On a vu précédemment que la corrosion influait sur les dimensions des éléments métalliques en diminuant leurs épaisseurs. Dans cette partie, on va voir l'impact de cette diminution sur le moment d'inertie des éléments métalliques.

La corrosion, en réduisant progressivement la section transversale des éléments, affecte directement leur moment d'inertie, ce qui a des conséquences importantes sur leur capacité à résister à la flexion et au flambement. Pour illustrer cet impact, on va quantifier cette perte de moment d'inertie en prenant quelques sections standardisées comme exemples .

Dans le cadre de cette quantification, nous considérons trois niveaux de corrosivité environnementale : faible, moyenne et élevée. Ces catégories sont basées sur les valeurs établies par les travaux de recherche de Mahdi Shiri et Davar Rezakhani (SHIRI et REZAKHANI 2020). Pour l'environnement à faible corrosivité, nous adoptons la valeur minimale obtenue dans leur étude, soit $8,91 \mu m/an$. Concernant l'environnement à corrosivité moyenne, nous retenons la valeur de $50 \mu m/an$, qui correspond à la limite supérieure de la catégorie C3 (corrosivité moyenne) selon la norme ISO 9228. Enfin, pour l'environnement à forte corrosivité, nous utilisons la valeur maximale observée dans leur recherche, s'élevant à $514,68 \mu m/an$.

On prend quelques profilés utilisés couramment dans la construction (IPE, HEA, UPE, 200, 300, 400) et pour chaque profilé, on calcule le taux de corrosion pour les différentes périodes (1ans, 20ans, 50ans) puis on calcule le moment d'inertie initial, le moment d'inertie final, et la perte d'inertie. Les résultats de ce calcul sont résumés dans le tableau 3.4.

La complexité et l'imprévisibilité du phénomène de corrosion rendent difficile l'estimation précise de la perte de moment d'inertie. Néanmoins, nous pouvons adopter une approche réaliste pour modéliser l'impact de la corrosion sur les dimensions des éléments structuraux. Cette approche consiste à considérer une diminution uniforme de l'épaisseur sur toute la surface extérieure de l'élément. Ainsi, nous prenons en compte une réduction simultanée de l'épaisseur, de la largeur et de la hauteur de la section (figure 3.1). Cette méthode offre une représentation plus fidèle des effets de la corrosion sur la géométrie des éléments structuraux, par rapport à une simplification qui ne considérerait qu'une réduction de l'épaisseur.

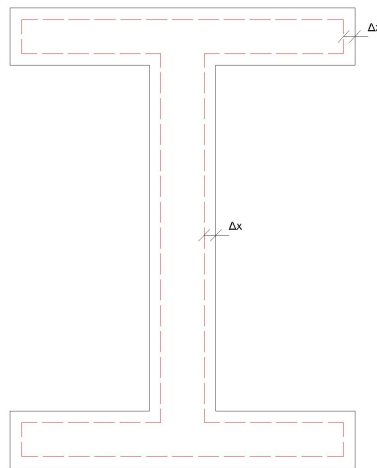


FIG. 3.1 : Impact de la corrosion sur la section en I

Remarque : Il est important de souligner que ce calcul reste une approximation et ne prétend pas fournir une quantification exacte de la perte d'inertie. L'objectif principal est d'estimer l'ordre de grandeur de cette perte, compte tenu de la nature complexe et difficilement prévisible du phénomène de corrosion.

N.B. : Le détail de calcul de ce tableau est bien expliqué dans l'annexe.

TAB. 3.4 : Perte de moment d'inertie due à la corrosion pour différents profilés IPE, HEA et UPE

Profilé	Corrosivité	Durée (ans)	Corrosion (μm)	$I_{\text{initial}} (\text{cm}^4)$	$I_{\text{final}} (\text{cm}^4)$	Perte (%)	Taux de corrosion ($\mu\text{m}/\text{ans}$)
IPE 200	Faible	1	8.91	1845.078456	1840.703711	0.2371	8.91
		20	42.69	1845.078456	1824.124474	1.1357	2.13
		50	76.18	1845.078456	1807.696726	2.0260	1.52
	Moyenne	1	50.00	1845.078456	1820.537405	1.3301	50.00
		20	239.56	1845.078456	1727.688128	6.3623	11.98
		50	427.49	1845.078456	1635.928864	11.3355	8.55
	Élevée	1	514.68	1845.078456	1593.456424	13.6375	514.68
		20	2465.90	1845.078456	658.9964419	64.2836	123.30
		50	4400.40	1845.078456	-238.5066034	112.9266	88.01
IPE 300	Faible	1	8.91	7997.455643	7982.499157	0.1870	8.91
		20	42.69	7997.455643	7925.810526	0.8958	2.13
		50	76.18	7997.455643	7869.628757	1.5983	1.52
	Moyenne	1	50.00	7997.455643	7913.54394	1.0492	50.00
		20	239.56	7997.455643	7595.846639	5.0217	11.98
		50	427.49	7997.455643	7281.531682	8.9519	8.55
	Élevée	1	514.68	7997.455643	7135.928446	10.7725	514.68
		20	2465.90	7997.455643	3913.766126	51.0624	123.30
		50	4400.40	7997.455643	785.7388627	90.1751	88.01
IPE 400	Faible	1	8.91	21872.78399	21839.84217	0.1506	8.91
		20	42.69	21872.78399	21714.97905	0.7215	2.13
		50	76.18	21872.78399	21591.22326	1.2873	1.52
	Moyenne	1	50.00	21872.78399	21687.95929	0.8450	50.00
		20	239.56	21872.78399	20988.01352	4.0451	11.98
		50	427.49	21872.78399	20295.23559	7.2124	8.55
	Élevée	1	514.68	21872.78399	19974.21759	8.6800	514.68
		20	2465.90	21872.78399	12854.82716	41.2291	123.30
		50	4400.40	21872.78399	5915.899395	72.9531	88.01
HEA 200	Faible	1	8.91	3507.7875	3501.070495	0.1915	8.91
		20	42.69	3507.7875	3475.611035	0.9173	2.13
		50	76.18	3507.7875	3450.37856	1.6366	1.52
	Moyenne	1	50.00	3507.7875	3470.101895	1.0743	50.00
		20	239.56	3507.7875	3327.407495	5.1423	11.98
		50	427.49	3507.7875	3186.210926	9.1675	8.55
	Élevée	1	514.68	3507.7875	3120.795595	11.0324	514.68
		20	2465.90	3507.7875	1671.770037	52.3412	123.30
		50	4400.40	3507.7875	261.8445947	92.5353	88.01
HEA 300	Faible	1	8.91	17277.73823	17253.98949	0.1375	8.91
		20	42.69	17277.73823	17182.03166	0.5540	2.13
		50	76.18	17277.73823	17094.69988	1.0605	1.52
	Moyenne	1	50.00	17277.73823	17164.19453	0.6576	50.00
		20	239.56	17277.73823	16687.71736	3.4150	11.98
		50	427.49	17277.73823	16125.0377	6.6744	8.55
	Élevée	1	514.68	17277.73823	15857.87104	8.2334	514.68
		20	2465.90	17277.73823	10156.26329	41.2289	123.30
		50	4400.40	17277.73823	3996.622574	76.8695	88.01
HEA 400	Faible	1	8.91	42841.20506	42785.94271	0.1293	8.91
		20	42.69	42841.20506	42643.66842	0.4625	2.13
		50	76.18	42841.20506	42442.08284	0.9310	1.52
	Moyenne	1	50.00	42841.20506	42605.64457	0.5500	50.00
		20	239.56	42841.20506	41390.80225	3.3837	11.98
		50	427.49	42841.20506	40187.75828	6.1924	8.55
	Élevée	1	514.68	42841.20506	39666.08429	7.4071	514.68
		20	2465.90	42841.20506	25328.05313	40.8746	123.30
		50	4400.40	42841.20506	10165.13103	76.2734	88.01
UPE 200	Faible	1	8.91	92224.88221	92105.72878	0.1291	8.91
		20	42.69	92224.88221	91729.73702	0.5360	2.13
		50	76.18	92224.88221	91292.74726	1.0111	1.52
	Moyenne	1	50.00	92224.88221	91759.86983	0.5050	50.00
		20	239.56	92224.88221	89117.11333	3.3736	11.98
		50	427.49	92224.88221	86517.04172	6.1952	8.55
	Élevée	1	514.68	92224.88221	85431.70853	7.3712	514.68
		20	2465.90	92224.88221	54625.25144	40.7727	123.30
		50	4400.40	92224.88221	21923.08079	76.2308	88.01

D'après le tableau 3.4 on remarque que la perte d'inertie varie selon la catégorie de l'environnement, les dimensions du profilé, et la période d'exposition. Pour les IPE, dans

des environnements à une faible corrosivité, la perte d'inertie après 50 ans varie entre 0.39% et 0.8%, dans un environnement à corrosivité moyenne, la perte d'inertie après 50 ans varie entre 2.26% et 21.45%, et pour un environnement à corrosivité Extrême la perte d'inertie après 50ans varie entre 19.70% et 36.36%.

On remarque aussi d'après le tableau que plus les dimensions initial sont petites plus la perte d'inertie est grande et vis versa.

3.4.3 Impact sur la raideur des poutres

On a vu précédemment que la corrosion affecte le moment d'inertie et on a pu quantifier la perte en terme de moment d'inertie. Cette réduction se traduit directement par une diminution de la raideur de la poutre.

Relation entre moment d'inertie et raideur

La raideur d'une poutre est directement liée à son moment d'inertie. La formule générale pour la raideur d'une poutre simplement appuyée est :

$$K = \frac{48EI}{L^3}$$

Où K est la raideur, E le module d'Young du matériau, I le moment d'inertie, et L la longueur de la poutre.

Calcul de la perte de raideur

Pour chaque profilé et chaque scénario de corrosion, on peut calculer la perte de raideur en utilisant le rapport entre le moment d'inertie initial et final. La relation entre la raideur et le moment d'inertie on sait que pour une perte de 10% d'inertie, par exemple, on aura la même perte en raideur (En ignorant la perte dû à la corrosion sur la longueur). La perte de raideur Pour les IPE dans des environnement à une faible corrosivité sera donc comprise entre 0.39% et 0.8%, Pour un environnement à corrosivité moyenne elle sera dans l'intervalle 2.26% à 21.45% et pour un environnement à corrosivité Extrême on aura une perte de raideur de 19.70% à 36.36%.

3.5 Conclusion du chapitre

L'étude de l'impact de la corrosion sur les structures métalliques a révélé l'importance de ce phénomène dans l'évaluation du potentiel de réemploi. La corrosion, sous ses différentes formes, peut significativement altérer les propriétés mécaniques et la durabilité des éléments métalliques. Cependant, cette analyse a également montré que les effets de la corrosion peuvent être quantifiés et, dans de nombreux cas, mitigés par des traitements appropriés. La compréhension des mécanismes de corrosion et de leurs conséquences est donc essentielle pour développer des stratégies efficaces de réemploi, permettant d'optimiser la durée de vie des structures métalliques tout en garantissant leur sécurité et leur performance.

Chapitre 4

Focus sur le réemploi

4.1 Introduction

Le secteur du BTP fait face à des défis environnementaux sans précédent. Dans ce contexte, le réemploi des matériaux, en particulier des éléments métalliques, s'impose comme une stratégie prometteuse. Cette approche consiste à prolonger la vie utile des matériaux existants, ce qui non seulement réduit le besoin de nouvelles ressources, mais contribue également à la réduction des déchets et des GES.

Ce chapitre vise à explorer les fondements du réemploi dans le domaine de la construction. Nous retracerons d'abord son évolution historique, puis nous analyserons les processus spécifiques au réemploi des éléments métalliques. Les aspects techniques et réglementaires seront examinés, de même que les implications économiques et environnementales. Pour conclure, nous nous pencherons sur les innovations récentes et les perspectives d'avenir, en mettant l'accent sur l'intégration du réemploi dans une approche de construction durable et circulaire.

4.2 Définitions et Principes de Réemploi

4.2.1 Définitions

Réemploi

Ensemble de systèmes et de filières qui consiste à donner une seconde vie aux éléments ou matériaux. L'élément clé pour le réemploi est la conservation du statut de « non-déchet ». Cette pratique s'inscrit dans une démarche de développement durable, qui permet non seulement la préservation des matières premières en prolongeant la longévité et la vie utile des produits, mais aussi la prévention des déchets, et tout ça sans modification majeure de leur forme ou de leur fonction initiale.

Selon la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008, le réemploi se définit comme "Toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus".

Réutilisation

Cette technique consiste à utiliser des matériaux devenus déchets pour un nouvel usage, après un éventuel contrôle, nettoyage ou réparation.

Recyclage

Le recyclage est un processus qui consiste à collecter, trier et traiter les matériaux usagés pour les transformer en nouveaux produits. Le recyclage comprend plusieurs étapes : la collecte des matériaux recyclables, leur tri et nettoyage pour éliminer les impuretés, et enfin leur transformation en matières premières qui peuvent être utilisées pour fabriquer de nouveaux produits.

Différence entre le réemploi, la réutilisation et le recyclage

Le réemploi, la réutilisation et le recyclage sont des concepts distincts dans le domaine de la gestion des déchets et de l'économie circulaire, chacun jouant un rôle important, mais différent dans le statut et l'usage de l'objet concerné.

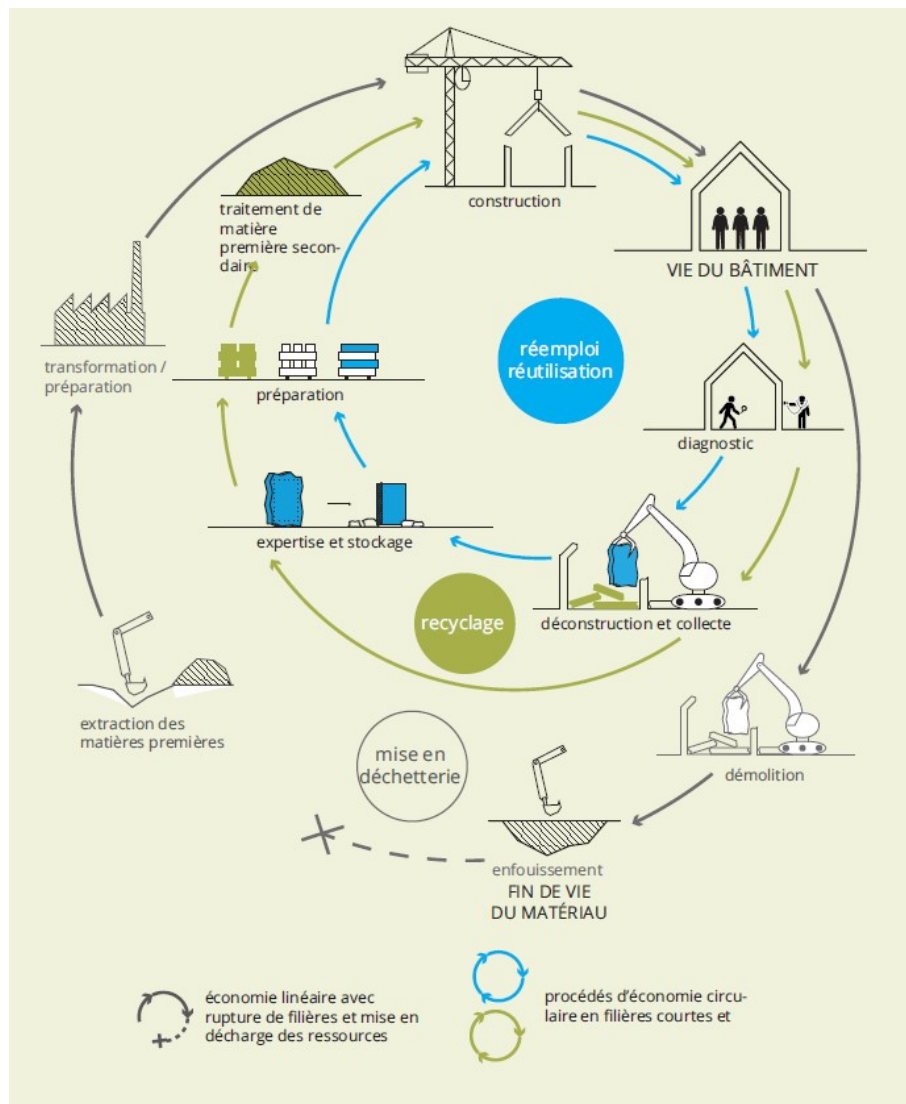


FIG. 4.1 : Métabolisme urbain de Plaine Commune

Le réemploi est une opération qui permet à des biens, qui ne sont pas encore des déchets, d'être utilisés à nouveau, maintenant leur intégrité et leur forme originale. Avec peu ou même pas de transformation. La réutilisation est une opération permettant à un objet, qui est devenu un déchet, d'être utilisé à nouveau en détournant éventuellement son usage initial. En revanche, le recyclage implique un processus plus radical où seule la matière première est conservée. L'objet est transformé, perdant sa forme et sa fonction initiales, pour être converti en nouveaux objets (*Le réemploi : une nouvelle filière pour réduire nos déchets* 2024).

Il est important de noter que le choix entre réemploi, réutilisation et recyclage, ou même le remplacement par un produit neuf, dépend de divers facteurs. Une analyse du

cycle de vie peut parfois révéler qu'il est plus bénéfique pour l'environnement de remplacer un objet ancien par un nouveau modèle plus écologique, plutôt que de le réemployer.

Bien que les trois opérations contribuent à la réduction des déchets et à la préservation des ressources, le réemploi est généralement considéré comme plus écologique. Il prolonge la vie des objets sans nécessiter de transformation significative, utilisant ainsi moins d'énergie, réduisant la demande de nouveaux produits et l'impact environnemental associé à leur production et à leur recyclage. Cependant, le choix optimal entre ces approches dépend souvent du contexte spécifique et des caractéristiques de chaque objet ou matériau.

Développement durable

Le développement durable se présente comme un paradigme multidimensionnel visant à harmoniser les besoins actuels de l'humanité avec la préservation des ressources pour les générations futures. Cette approche repose sur deux piliers fondamentaux : d'une part, la satisfaction des besoins essentiels, en accordant une priorité particulière aux plus démunis, et d'autre part, la reconnaissance des limitations imposées par l'état de nos technologies et de notre organisation sociale sur la capacité de l'environnement à répondre aux exigences présentes et futures. Ce concept holistique reconnaît les contraintes actuelles tout en soulignant le potentiel d'innovation et d'amélioration. Il prône une croissance économique équitable, une participation démocratique accrue et une gestion responsable des ressources.

Le développement durable n'est pas un état statique, mais un processus dynamique de changement, nécessitant des ajustements constants dans l'exploitation des ressources, les investissements, le progrès technologique et les institutions. Cette vision à long terme requiert une volonté politique résolue et un engagement collectif pour concilier les impératifs économiques, sociaux et environnementaux, dans une perspective intergénérationnelle (*1987: Le Rapport Brundtland 1987*).

Préparation en vue du réemploi

Toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement ; la préparation passe par un contrôle visuel, puis le tri et enfin une réparation et/ou retouche du matériau (*Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives 2008*).

Déchet ultime

Un déchet, résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux (*LOI n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement (1) 1992*).

Valorisation

Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie (*Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives 2008*). Et dans l'annexe II de cette dernière directive on trouve l'opération : « R4 Recyclage ou récupération des métaux et des composés métalliques » et rentre aussi dans la valorisation les opérations : « R11 Utilisation de déchets résiduels obtenus à partir de l'une des opérations numérotées R1 à R10 ; R12 Échange de déchets en vue de les soumettre à l'une des opérations numérotées R1 à R10 ; et R13 Stockage de déchets préalablement à l'une des opérations numérotées R1 à R12 » ainsi que d'autres opérations de préparation en vue de réemploi dont le démantèlement et la déconstruction.

Déconstruction et démolition

La déconstruction est un processus qui vise à retirer soigneusement les matériaux d'une structure existante afin de les préparer pour un réemploi ultérieur. Contrairement à la démolition traditionnelle, qui implique souvent la destruction brutale des bâtiments, la déconstruction permet de récupérer un maximum de matériaux en bon état. Cela nécessite une planification minutieuse et une évaluation préalable des éléments à récupérer.

4.2.2 Principes du réemploi

Les principes du réemploi s'articulent autour de plusieurs axes clés qui sont les suivants :

Préservation de l'intégrité Le réemploi vise à conserver la forme et la fonction originales des éléments. Pour les structures métalliques, cela signifie réutiliser les poutres, colonnes ou autres composants sans altération majeure de leur géométrie ou de leur capacité structurelle.

Évaluation et diagnostic Avant tout réemploi, une évaluation approfondie de l'état des matériaux est nécessaire et est indispensable. Pour les éléments métalliques, cela implique des inspections visuelles, des tests non destructifs et parfois des analyses en laboratoire pour évaluer la résistance résiduelle, la fatigue et la corrosion.

Déconstruction sélective Contrairement à la démolition traditionnelle, le réemploi nécessite une déconstruction soignée pour préserver l'intégrité des éléments à réutiliser. Cette approche minimise les dommages et maximise le potentiel de réemploi.

Traçabilité Il est important de maintenir un historique détaillé des éléments réemployés, incluant leur origine, leur âge, leurs caractéristiques techniques et leur historique d'utilisation. Cette traçabilité permet de garantir la sécurité et la conformité aux normes et facilite le processus de réemploi.

Adaptation minimale Bien que certaines modifications puissent être nécessaires, le principe est de minimiser les transformations. Pour les éléments métalliques, cela peut inclure des traitements de surface ou des renforcements mineurs, mais sans altération fondamentale de la structure.

Conformité aux normes actuelles Les éléments réemployés doivent répondre aux normes de construction en vigueur.

Optimisation du cycle de vie Le réemploi s'inscrit dans une approche d'optimisation du cycle de vie des matériaux.

Intégration dans la conception Le réemploi doit être considéré dès la phase de conception des nouveaux projets. Cela implique une collaboration étroite entre architectes, ingénieurs et spécialistes du réemploi pour intégrer efficacement les éléments réutilisés.

Économie circulaire Le réemploi s'inscrit dans le cadre plus large de l'économie circulaire, visant à minimiser les déchets et à maximiser l'utilisation des ressources existantes.

4.3 Histoire du réemploi

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le réemploi des matériaux et des éléments constructifs (L'économie circulaire au sens général) remonte à l'antiquité. Bien qu'il soit difficile d'en déterminer la première occurrence précise, les historiens s'accordent sur le fait que cette pratique était déjà largement répandue à l'époque de l'Empire romain. Les constructeurs romains avaient couramment recours à la réutilisation d'éléments architecturaux tels que des colonnes, des pierres taillées et des marbres, provenant d'édifices abandonnés ou détruits, pour ériger de nouvelles constructions.

4.3.1 Antiquité

En effet, c'est à partir de la fin de la Seconde révolution industrielle et jusqu'à la Seconde Guerre mondiale que les pratiques de l'économie circulaire ont peu à peu été délaissées au profit d'une économie linéaire. L'historienne Sabine Barles met en lumière qu'avant 1870, il existait une circulation spontanée des matériaux entre la ville, l'industrie et l'agriculture. Nous allons ainsi revisiter brièvement l'histoire pour analyser l'évolution des pratiques en matière de réemploi, qu'elles aient été favorisées ou non, et les comparer aux pratiques actuelles.

Déjà à l'époque de l'Empire romain, cette pratique répondait aux défis du transport, souvent long et contraignant en raison de la dépendance aux ressources limitées en énergie humaine et animale. De plus, la rareté et le coût élevé des matériaux poussaient à exploiter les ruines et les bâtiments à démolir comme sources de matériaux de construction. Les bâtiments étaient d'abord conservés et restaurés, mais en cas de dommages irréparables, ils étaient considérés comme des gisements de matériaux pouvant être démantelés et réutilisés, grâce à la flexibilité des matériaux de base qui s'adaptaient aisément à de nouveaux usages.

De plus, le réemploi à l'époque romaine n'était pas seulement encouragé, mais également encadré par des réglementations spécifiques. La Charte de Tarente (*Senatus consultum de Tarentinis*) (Figure : 4.2), un décret émis par le Sénat romain en 122 av. J.-C., fixait des règles pour la gestion urbaine et la préservation des bâtiments à Tarente, une colonie romaine de l'époque. Bien que centrée sur la gestion urbaine, cette charte établissait des dispositions qui favorisaient indirectement la réutilisation des structures et des matériaux de construction (EICH 2023). Ce texte encadrait notamment plusieurs aspects clés du réemploi :

- la remise en circulation des matériaux issus de la démolition de bâtiments publics ;
- la régulation de la démolition des ouvrages, visant à prévenir tout abus ;
- l'obligation de marquer les matériaux récupérés afin d'en certifier la réutilisation.

4.3.2 Du XVIII^e s. à 1930

Du XVIII^e siècle jusqu'au milieu du XX^e siècle, la démolition des bâtiments s'apparentait davantage à une déconstruction méthodique qu'à une simple démolition. Cela permettait la récupération efficace des composants des édifices, donnant naissance à une économie bien développée du réemploi qui impliquait l'ensemble des corps de métier du bâtiment d'une façon ou d'une autre.

Il existe de nombreux témoignages dans les archives historiques sur cette pratique autrefois très courante. Lors d'une démolition, le propriétaire d'un édifice mettait fréquemment son bien en vente, soit dans son intégralité, soit divisé en lots de matériaux distincts. Les entrepreneurs proposant les meilleures offres pour l'ensemble ou pour les différents lots se voyaient attribuer le marché. Un exemple notable de cette pratique est la vaste campagne d'embellissement d'un quartier de



FIG. 4.2 : *Senatus consultum de Tarentinis* (EICH 2023)

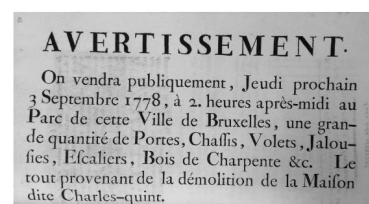


FIG. 4.3 : Affiche imprimée en 1778 sur la déconstruction des hauts quartiers de Bruxelles

Chapitre 4. Focus sur le réemploi

Bruxelles en 1778. Cette opération a généré un important gisement de matériaux et de produits, qui ont ensuite été revendus lors d'une vente publique (Figure 4.3).

Le réemploi n'était pas limité aux bâtiments ordinaires : des édifices monumentaux, des emblèmes de l'histoire et du pouvoir ont également fait l'objet de démantèlements minutieux. Comme c'était le cas pour La Bastille (Figure 4.4), et l'ancien Palais Granvelle (Figure 4.5) à Liège, ces déconstructions visaient à récupérer le maximum de matériaux, témoignant de la valeur accordée aux ressources bâties.

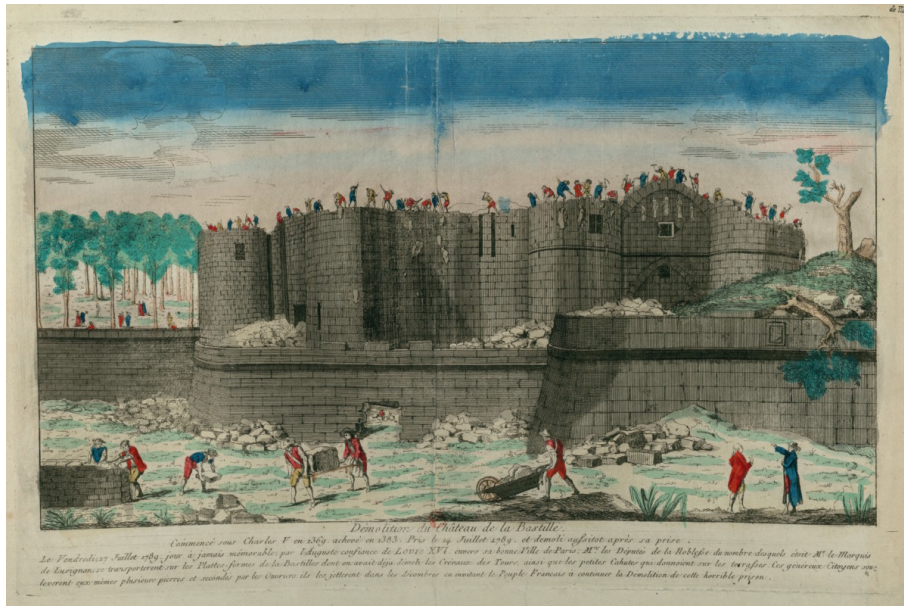


FIG. 4.4 : Estampe de la démolition de la Bastille, Musée de la Révolution française, 1789



FIG. 4.5 : Démolition de l'ancien Palais Granvelle, 1928

Au-delà de l'aspect purement économique, le réemploi jouait parfois un rôle dans la sauvegarde de la mémoire collective. Un exemple marquant de cette pratique est l'entrée des entrepôts d'Achille Picart, qui est décorée d'un fronton récupéré de l'ancien Palais des Tuileries.



C'est que derrière le fougueux entrepreneur de démolitions, il y a un ardent amateur d'objets d'art et de souvenirs historiques. Ses vastes magasins du boulevard Diderot, sont un véritable musée de choses rares et d'antiquités précieuses où, à côté de l'amas obligatoire de vieilles persiennes, de vieilles cheminées et de vieilles cloisons destinées au commerce, le collectionneur est tout étonné de trouver réunis des spécimens les plus remarquables de panneaux et de ferronnerie de toutes les époques. Ces poutres que vous voyez, suspendues au plafond, ce sont les magnifiques solives peintes de l'hôtel Zamet et de Lesdiguières. Ces caisses reléguées dans un coin sont pleines jusqu'au bord de ces jolis carreaux de Delft qui deviennent de plus en plus rares.

FIG. 4.6 : Entrée des entrepôts d'Achille Picart, avec un fronton provenant de l'ancien palais des Tuileries. Photo : Walter Daran, Getty Images.

De même, après la Révolution française, de nombreux édifices religieux et appartenant au patrimoine national ont été dégradés par des spéculateurs de matériaux. Un exemple notable est celui du château d'Amboise, où le consul Pierre-Roger Ducos, faute de moyens pour son entretien, a décidé de vendre les pierres d'une partie du château entre 1806 et 1810, entraînant ainsi la destruction des deux tiers des bâtiments (Figure 4.7 en noir la partie conservée, en gris les parties déconstruites servant de carrières de pierre).

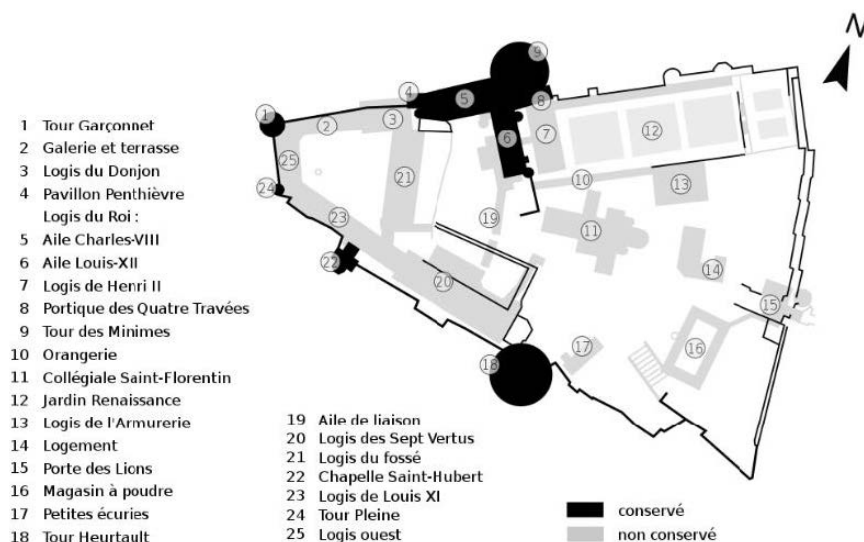


FIG. 4.7 : Plan du château d'Amboise.

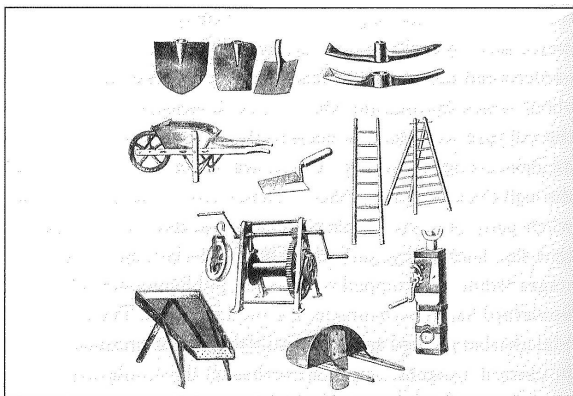
Ces exemples de réemploi, qu'ils soient motivés par l'économie, la mémoire ou autre, montrent à quel point cette pratique était ancrée dans le quotidien de la construction.

Maintenant, on peut se demander ce qui s'est passé. Pourquoi on a laissé tomber le réemploi alors que ça marchait si bien ? C'est toute une histoire...

4.3.3 Milieu du XXe siècle et l'après-guerre

Avec le début de l'industrialisation, les pratiques de construction ont eu des changements radicaux, dus à plusieurs facteurs que (Ghyoot et al., 2018) ont résumé dans ce qui suit :

Mécanisation du travail : Jusqu'alors, les outils des constructeurs étaient très simples et traditionnels, comme l'on peut voir sur la figure 4.8a. Cependant, avec l'introduction d'outils comme la dynamite, les marteaux-piqueurs hydrauliques, les bulldozers et les premiers engins de chantier comme les boules de démolition (Figure : 4.8d, 4.8c). La démolition est devenue plus rapide, moins coûteuse, mais moins minutieuse et elle a perdu en qualité, rendant difficile la récupération des matériaux de manière propre.



(a) Outillage de démolition avant XXe siècle



(b) Outillage pneumatique de démolition



(c) Pelle mécanique sur un chantier de démolition bruxellois, dans les années 1950



(d) Boule de démolition

FIG. 4.8 : Développement des outillages et du matériel de démolition

Coûts de main-d'œuvre : Avec l'augmentation des salaires, notamment suite aux mouvements de revendication sociale, il est devenu moins rentable d'employer de nombreux travailleurs pour démonter soigneusement un bâtiment (figure 4.9).

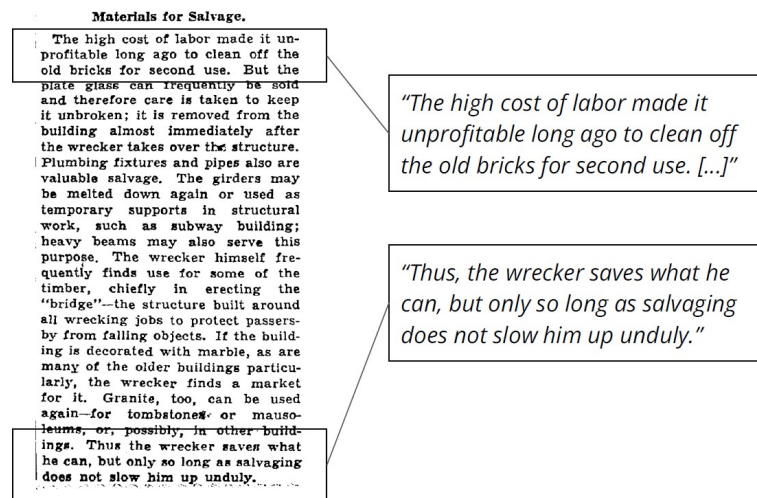


FIG. 4.9 : Augmentation du coût de main-d'œuvre (EICH 2023)

Pression immobilière : Surtout dans les zones urbaines très densifiées, la pression immobilière était un facteur important dans la transition vers l'économie linéaire. À partir des années 1920, la valeur des matériaux de construction a progressivement perdu de son importance face aux gains potentiels des projets immobiliers. Cette évolution s'est manifestée de manière particulièrement percutante aux États-Unis, et plus précisément à New York, où l'on observe une accélération notable des démolitions massives. Dans ce contexte, le temps est devenu un facteur déterminant dans le calcul des coûts et des profits pour les entrepreneurs chargés de la démolition, imposant l'introduction des méthodes de plus en plus rapides et mécanisées. En conséquence, en à peine une décennie, on est passé du démontage soigneux à la destruction express et les entrepreneurs ont perdu tout intérêt à récupérer des matériaux, jugés trop chronophages. Il est devenu plus avantageux financièrement de tout raser et de repartir à zéro avec des matériaux neufs.

Évolution des préférences immobilières et l'appétit pour la nouveauté : La période d'après-guerre a marqué un tournant significatif dans les aspirations résidentielles. Les logements traditionnels ont progressivement cédé la place à des habitations offrant plus de confort et de modernité. Cette époque a vu une valorisation croissante du neuf, alimentée en partie par les médias et la publicité qui présentaient des intérieurs modernes comme symboles de progrès (Figure 4.10).

Ce phénomène a eu des répercussions sur la perception des matériaux de construction. Les éléments réemployés, malgré leur qualité potentielle, ont souffert d'une image désuète. La société de consommation naissante a favorisé l'achat de produits neufs, même à un coût supérieur, contribuant ainsi au déclin des pratiques de réemploi dans le secteur de la construction.



FIG. 4.10 : Extraits publicitaires des années 1950-1960

Diversification des matériaux : Le XXe siècle a vu une explosion de la diversité des matériaux de construction comme le ciment portland, le béton préfabriqué, l'acier inoxydable, le bois minéral... (figure : 4.11) ce qui a rendu difficile de trouver des débouchés pour les matériaux récupérés.



FIG. 4.11 : Diversification des matériaux de construction

Ces facteurs combinés ont provoqué une diminution des pratiques d'économie circulaire et de réemploi, transformant ainsi des ressources précieuses en déchets.

4.4 Réemploi : un phénix qui renaît de ses cendres (1970 - aujourd'hui)

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, le réemploi a été progressivement délaissé avec l'industrialisation et la mécanisation de la construction, jusqu'à devenir

anecdotique. Mais qu'est-il arrivé ensuite ?

4.4.1 Éveil de la conscience environnementale

Cependant, après des décennies d'oubli, le réemploi dans le bâtiment a lentement refait surface, avant de gagner en ampleur. La création du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), qui a mis l'écologie sur l'agenda international, ainsi que les premières alertes environnementales, telles que le rapport "Halte à la croissance ?" du Club de Rome, ont ébranlé les certitudes, marquant ainsi les années 1970 comme un tournant décisif dans l'histoire du réemploi.

4.4.2 Évolutions législatives et normatives

Face à ces enjeux, les gouvernements ont commencé à prendre des mesures concrètes. Aux États-Unis, le "National Historic Preservation Act" de 1966 a encouragé la préservation des bâtiments historiques, amorçant une réflexion sur la valeur du patrimoine architectural. En France, la loi sur les déchets de 1975 a posé les premières bases d'une gestion plus responsable des matériaux et des ressources. Le rapport Brundtland mettant le concept de développement durable sur le devant de la scène a profondément influencé les politiques futures, préparant ainsi le terrain pour la réintroduction du réemploi dans la construction. Les gouvernements ont dû s'y mettre, créant des ministères de l'environnement, dans les pays développés surtout, et pendant les premières lois sur le sujet.

4.4.3 Émergence de l'économie circulaire

Le concept d'économie circulaire, théorisé dans les années 1970, a progressivement gagné en popularité au début du XXI^e siècle. Au début, en tant qu'outil de prévention et de gestion des déchets avec la directive européenne 2008/98/CE, qui considère le réemploi sous deux angles : d'une part, comme une forme de prévention, où un objet est réemployé sans passer par le statut de déchet, et d'autre part, comme un mode de traitement de déchets. Ensuite, l'Union européenne a continué à renforcer cette approche en décembre 2015 avec la présentation de son plan d'action pour l'économie circulaire intitulé "Boucler la boucle – Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire". En France, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, adoptée en 2015, a contribué au retour de cette pratique en inscrivant le concept d'économie circulaire dans le Code de l'Environnement, marquant ainsi un tournant législatif dans la gestion durable des ressources.

Aujourd'hui, le réemploi perdure en faisant face à de nombreux défis pour être réintégré dans les habitudes du secteur de la construction.

4.5 Processus de réemploi des éléments métalliques

Bien qu'il n'existe pas encore de législation fixe encadrant le réemploi des éléments métalliques, étant un domaine en plein développement, le secteur du bâtiment est régi par des réglementations générales qui encouragent la réduction des déchets et l'adoption de l'économie circulaire. En France, des dispositifs tels que la Réglementation Thermique (RT) et les Objectifs Bâtiments Basse Consommation (BBC) favorisent indirectement le réemploi, en mettant l'accent sur l'efficacité énergétique et la diminution de l'impact environnemental. Actuellement. Toutefois, nous pouvons nous appuyer sur les principes généraux du réemploi dans le bâtiment ainsi que sur des outils comme les guides développés dans le cadre du projet Interreg FCRBE (Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements), qui facilitent la mise en œuvre de ces pratiques et de définir les étapes à suivre pour réussir le projet de réemploi.

4.5.1 Diagnostique

L'identification et l'évaluation préliminaire des éléments métalliques susceptibles d'être réutilisés représentent un fondement essentiel pour assurer la réussite d'un projet de réemploi. Elle permet en pratique d'identifier et répertorier les éléments réemployables. Cette phase initiale, selon l'élément, requiert soit juste un œil expert pour mesurer l'intérêt d'un lot, ce qui est le cas pour des éléments isolés (ex. linteaux), soit un examen rigoureux, alliant des compétences techniques pointues à une compréhension approfondie de l'historique et de la structure du bâtiment.

Inspection visuelle

L'inspection visuelle approfondie constitue la première étape de cette évaluation. Des experts qualifiés scrutent avec attention chaque composant métallique, examinant d'abord les quantités, les dimensions, la nature et l'état du revêtement de surface, puis cherchant des indices de corrosion, de déformations, de signes de fatigue ou toute autre pathologie possible. Cette analyse ne se limite pas aux zones apparentes, mais s'étend aux parties cachées ou difficiles d'accès, souvent révélatrices de problèmes structurels importants.



FIG. 4.12 : Lots d'éléments métalliques issus de déconstruction

L'évaluation du mode de pose des éléments à réemployer (boulons, rivets, soudure, scellement...) ainsi que l'état des assemblages et la démontabilité des éléments sont aussi nécessaires en phase de diagnostic. Déjà, en premier lieu, elles permettent de définir le mode de démontement ou de déconstruction nécessaire, et d'autre part, elles sont nécessaires pour la conception du nouveau projet utilisant ces éléments.

Recherche documentaire et vérification de la qualité de l'acier

(*Steel Beam : Reuse Toolkit - Gros-oeuvre et enveloppe - Structure acier* 2021) En plus de l'inspection visuelle et avant de passer au démontement des éléments, il est important de passer par une étude approfondie de l'historique du bâtiment, déterminant les caractéristiques générales du bâtiment et des éléments qui le constituent, afin de s'assurer de leur capacité à être démontées et réemployées. Pour cela, il s'agit d'identifier les conditions d'utilisation du matériau et de retrouver des informations non seulement sur les archives du bâtiment, mais aussi sur des consultations avec les architectes, ingénieurs ou entrepreneurs d'origine, ainsi que sur d'autres sources locales disponibles ou parfois même des usagers du bâtiment. Cette recherche documentaire peut couvrir :

- Le bâtiment : date de construction, plans, localisation géographique (ainsi que les conditions environnementales liées), type d'utilisation et sollicitations ainsi que les sinistres éventuels, réparations ou rénovations éventuelles, etc.
- Les éléments : fiches techniques (type de profils, nuance et qualité de l'acier, nature du revêtement, etc.), fonction des éléments (poteau, poutre, linteau, etc.), sollicitations et nature de charges, réparations éventuelles, etc.

Tests in situ

Pour compléter l'évaluation visuelle et la recherche documentaire, on passe à des tests non destructifs in situ. Ces tests permettent d'évaluer l'intégrité structurelle des éléments sans les endommager. Parmi les méthodes couramment utilisées, on trouve :

- L'ultrason : Cette technique de contrôle volumique utilise des ondes sonores à haute fréquence pour caractériser la structure interne et détecter les fissures, les vides ou les inclusions dans le métal (figure 4.13a).
- La magnétoscopie : Particulièrement efficace pour les matériaux ferromagnétiques, cette méthode permet de déceler des discontinuités ou fissures peu profondes grâce au phénomène d'aimantation (figure 4.13b).
- La radiographie permet de contrôler l'intégrité de la structure interne de pièces ou de matériaux en les soumettant à des rayonnements électromagnétiques. Elle est utilisée pour le contrôle des soudures ainsi que pour rechercher des imperfections de fonderie (figure 4.13c).

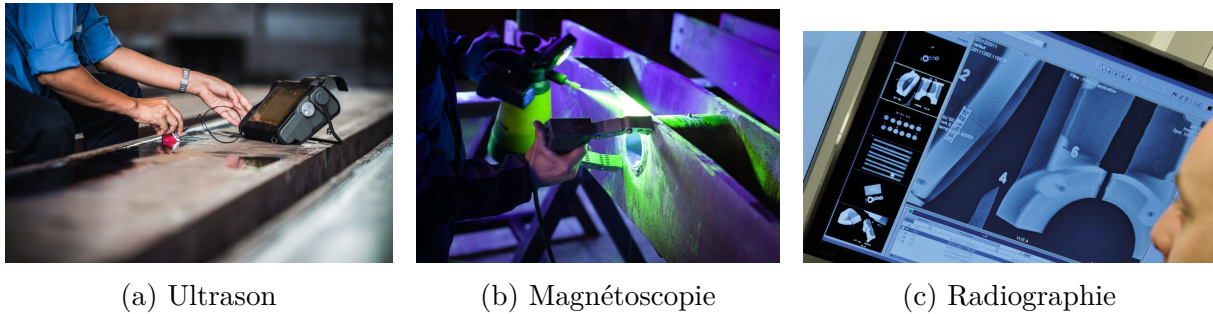


FIG. 4.13 : Techniques de contrôle non destructif

4.5.2 Démontage et récupération des éléments

Aussi appelée dépose, cette étape requiert une bonne coordination, une planification et une exécution précise pour préserver l'intégrité des éléments et assurer la sécurité des travailleurs. Les éléments doivent de préférence être identifiés individuellement au moyen d'un marquage physique afin de garantir la traçabilité de ces derniers.

L'élaboration d'un plan de déconstruction sélective détaillé est la première étape de ce processus. Ce plan définit la séquence précise des opérations de démontage. Il prend en compte la stabilité structurelle du bâtiment à chaque étape du processus, identifie les éléments porteurs critiques et établit des procédures pour leur retrait sécurisé.

Pour préserver l'intégrité des éléments métalliques, les méthodes de démontage s'adaptent aux objectifs spécifiques de réemploi. Contrairement à une démolition classique, qui privilégie la rapidité, le démontage dans le cadre du réemploi exige des techniques plus délicates et précises. Selon Ghyoot (2017), cette approche requiert un investissement supplémentaire en main-d'œuvre qualifiée, car chaque élément doit être soigneusement retiré afin de minimiser les dommages.

Des méthodes de découpe précises telles que l'oxycoupage contrôlé ou la découpe au plasma sont privilégiées pour les éléments métalliques. Pour les éléments assemblés par boulonnage, ils peuvent être démontés soit mécaniquement, soit par découpe minutieuse à proximité des connexions, afin de maximiser la longueur récupérable des éléments. Dans certains cas, des techniques innovantes comme la découpe au jet d'eau à haute pression peuvent être utilisées pour minimiser les déformations thermiques et préserver les propriétés mécaniques du métal. Voici quelques aspects importants à considérer :

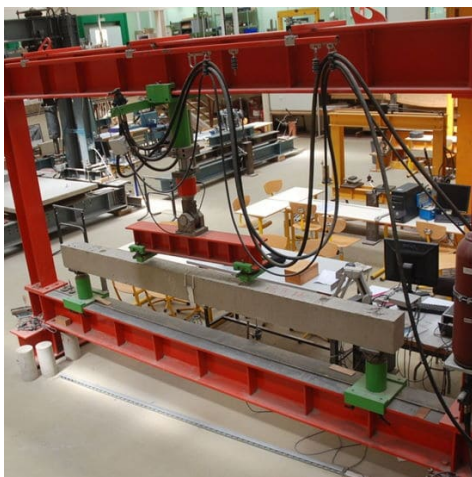
- Déformation des boulons : les boulons peuvent subir une déformation plastique sous contrainte. Il est essentiel de surveiller attentivement ces déformations lors du démontage pour éviter tout risque de rupture ou d'instabilité.
- Soudures : les jonctions soudées peuvent céder brusquement. Lors du retrait d'éléments avec des soudures critiques, un moyen de levage doit être constamment utilisé pour soulager la charge sur ces jonctions.
- Précautions pour les poutres : il est impératif d'empêcher les poutres de chuter au sol, afin de préserver leur intégrité et de limiter les dommages potentiels.

4.5.3 Caractérisation des matériaux récupérés

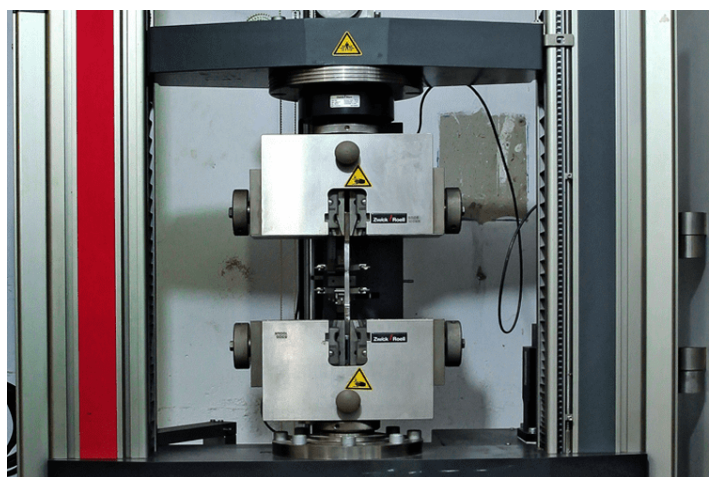
Après avoir récupéré les éléments, il faut passer à un échantillonnage pour choisir des éléments ou des parties d'éléments à tester pour déterminer leur aptitude au réemploi et définir leurs futures applications possibles. Cette phase implique une série d'analyses et de tests combinant des techniques de laboratoire et des méthodes de modélisation numérique.

Les analyses en laboratoire constituent le cœur de cette phase de caractérisation. Des échantillons représentatifs des éléments métalliques sont prélevés et soumis à une série de tests pour déterminer leur composition chimique, leur microstructure et leurs propriétés mécaniques. La spectrométrie à émission optique ou la spectrométrie de masse sont utilisées pour analyser la composition chimique précise des alliages. L'analyse de la microstructure est réalisée à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB) ou de la microscopie optique à haute résolution. Les tests de propriétés mécaniques sont élaborés pour évaluer la résistance et la ductilité des éléments métalliques. Des essais de traction, de compression, de flexion et dans des cas particuliers de cisaillement sont réalisés sur des échantillons normalisés pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux tels que la limite d'élasticité, la raideur, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture.

La modélisation numérique a aussi son rôle dans l'évaluation des performances futures des éléments métalliques réemployés. Des techniques d'analyse par éléments finis sont utilisées pour simuler le comportement des structures dans différentes conditions de charge et de contrainte. Ces modèles prennent en compte les propriétés mesurées des matériaux pour prédire avec précision le comportement structurel dans diverses situations.



(a) Essai de Flexion



(b) Essai de traction

FIG. 4.14 : Essais destructifs en laboratoire

4.5.4 Reconditionnement et adaptation des éléments pour leur nouvelle utilisation

Selon le besoin et le nouvel usage de l'élément, on procède à un reconditionnement, ce que la directive 2008/98/CE désigne sous le terme de "préparation en vue du réemploi".

Cette étape vise à restaurer et, si nécessaire, à améliorer les propriétés des matériaux pour garantir leur performance et leur durabilité dans leur nouveau contexte d'utilisation.

Le processus débute par un nettoyage et un traitement de surface des éléments métalliques. Les techniques de nettoyage sont choisies en fonction de l'état des surfaces et de la nature des contaminants. Le sablage est fréquemment employé pour éliminer la rouille, les vieilles couches de peinture ou autres résidus. Dans les cas plus complexes, un décapage chimique peut être nécessaire. Ces opérations de nettoyage sont cruciales, non seulement pour redonner aux matériaux une apparence adéquate, mais également pour préparer les surfaces à recevoir de nouveaux traitements protecteurs.



(a) Sablage d'une structure métallique



(b) Peinture antirouille, Tour Eiffel

FIG. 4.15 : Traitement de surface des structures métalliques

Après le nettoyage, l'application de nouveaux traitements anticorrosifs se fait selon l'environnement dans lequel l'élément sera utilisé et des contraintes auxquelles il sera soumis. On peut citer parmi les traitements couramment utilisés, la galvanisation à chaud, l'application de peintures époxy à haute performance, l'utilisation de revêtements zinc-rich pour une protection cathodique.

Des modifications géométriques mineures peuvent être nécessaires pour adapter les éléments métalliques à leur nouvelle fonction, telles que des opérations de découpe, de perçage ou de soudure. Ces ajustements doivent être soigneusement planifiés et réalisés pour préserver l'intégrité structurelle des matériaux. Les techniques de découpe de précision, comme le découpage au laser ou au plasma, sont souvent privilégiées afin de limiter les déformations thermiques. En ce qui concerne le soudage, des procédures spécifiques sont élaborées en tenant compte des propriétés métallurgiques des éléments réemployés, afin d'assurer leur solidité et leur durabilité dans leur nouvel usage.

Dans certains cas, lorsque les éléments ne répondent pas aux exigences du nouvel usage, un renforcement de la structure peut être nécessaire. En général, ce renforcement peut prendre la forme de l'ajout de raidisseurs, du renforcement des zones de connexion ou de l'augmentation de l'épaisseur des sections critiques. Dans des cas plus spécifiques, d'autres solutions existent, comme nous le discuterons dans la section . Ces interventions sont planifiées en fonction des résultats des tests et des analyses préalables et sont optimisées à l'aide de techniques de modélisation. L'objectif est de garantir la stabilité et la résistance des éléments réemployés tout en maximisant leur efficacité dans leur nouveau contexte d'utilisation.

4.6 Défis du réemploi des éléments métalliques

On a vu précédemment que le réemploi présente de nombreux avantages environnementaux et économiques. D'autre part, le réemploi des éléments de construction, y compris les éléments métalliques, est une pratique en plein développement. La Région de Bruxelles-Capitale s'est distinguée en matière d'économie circulaire avec l'adoption de son programme régional en avril 2016. Grâce à ce programme, elle se positionne comme un leader dans l'application de ces principes.

Cependant, pour assurer son essor et son intégration durable dans le secteur de la construction, on doit surmonter les défis qu'il confronte. Michaël Ghyoot dans son ouvrage "Objectif réemploi : Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale" (GHYOOT 2017) résume les défis liés au réemploi en sept grands points, qu'on va présenter dans ce qui suit :

4.6.1 Désamorcer les clichés

Le réemploi dans la construction, et surtout quand il s'agit des éléments structuraux, est entouré de clichés. Bien que ces préoccupations soient compréhensibles, elles proviennent souvent d'une connaissance partielle du sujet. L'un des défis adressés au réemploi est de faire mieux connaître son offre, ses services et ses spécificités.

Parmi les idées reçues, on trouve l'idée que les matériaux de réemploi ne sont que des déchets, ce qui est faux, car ils possèdent une valeur marchande et une demande sur le marché. D'autres stéréotypes incluent la perception que ces matériaux sont toujours de qualité inférieure ou réservés à des pièces historiques, alors qu'en réalité, une gamme diversifiée est disponible, offrant des caractéristiques uniques et des prix comparables aux produits neufs.

De plus, des inquiétudes liées à l'hygiène et à la sécurité existent, mais elles peuvent être atténuées par une expertise appropriée et des études démontrant que les matériaux réemployés peuvent même être moins polluants que les neufs. Enfin, l'idée que le réemploi n'est possible que pour des bâtiments spécifiquement conçus pour cela est également erronée, car de nombreuses structures actuelles offrent des opportunités de réemploi, comme le prouve le succès de nombreuses entreprises dans ce secteur en Belgique.

4.6.2 Faire face au coût élevé de la main d'œuvre

Le réemploi nécessite généralement plus de travail manuel que l'utilisation de matériaux neufs, ce qui peut augmenter les coûts. Le défi consiste à trouver des moyens de compenser ces coûts, soit par une valorisation accrue des éléments réemployés, soit par des incitations économiques.

4.6.3 Se positionner vis-à-vis de la concurrence des produits neufs bon marché :

Les éléments métalliques neufs, souvent produits à grande échelle et à bas coût, représentent une concurrence sérieuse. Il faut développer des arguments convaincants (qualité, durabilité, impact environnemental, valeur patrimoniale) pour justifier le choix du réemploi.

4.6.4 Se diversifier au-delà des marchés de niche

Actuellement, le réemploi des éléments métalliques est souvent limité à des marchés spécifiques. L'enjeu est d'élargir le champ d'application à des éléments plus courants et structurels, nécessitant le développement de filières de récupération et de distribution à plus grande échelle.

4.6.5 Permettre aux éléments de réemploi d'intégrer des contextes très formalisés

Les éléments métalliques réemployés doivent pouvoir s'intégrer dans des projets de construction modernes, soumis à des normes et des réglementations strictes. Cela implique non seulement de développer des méthodes pour évaluer et garantir leurs performances techniques et leur conformité aux normes actuelles, mais aussi de développer les normes et règlements afin que les pratiques de réemploi soient intégrées.

4.6.6 Faire face à l'imprévisibilité de l'offre

La disponibilité des éléments métalliques de réemploi est souvent fluctuante et imprévisible. Cela pose des défis en termes de planification des projets et de gestion des stocks, nécessitant le développement de systèmes logistiques flexibles et efficaces.

4.6.7 Stimuler la demande

Il est nécessaire de sensibiliser les acteurs du secteur (maîtres d'ouvrage, architectes, entrepreneurs et les assurances) aux avantages du réemploi et de les encourager à intégrer des éléments métalliques réemployés dans leurs projets. Cela peut impliquer des actions de communication, de formation et la mise en place d'incitations.

Surmonter ces défis nécessite une approche globale et collaborative, impliquant tous les acteurs de la chaîne de valeur de la construction. En relevant ces défis, le secteur du réemploi des éléments métalliques pourra se développer pleinement, contribuant ainsi à une construction plus durable et circulaire.

Chapitre 5

Cas d'étude : Pont de la ville de Dallet

5.1 Introduction

Le réemploi des matériaux de construction représente une stratégie clé pour la durabilité dans le secteur du bâtiment, qui est l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et un contributeur significatif aux émissions de carbone. La réutilisation de matériaux de construction et des éléments structuraux, tels que les poutrelles en charpente métallique, non seulement réduit la demande de nouvelles ressources, mais contribue également à la limite des déchets de construction. Dans ce contexte, l'ancien pont de la ville de Dallet, qui subit une rénovation, offre une occasion d'étudier la viabilité du réemploi des éléments métalliques qui ont déjà servi dans une structure et de vérifier s'ils restent toujours en bon état structural pour une nouvelle utilisation.

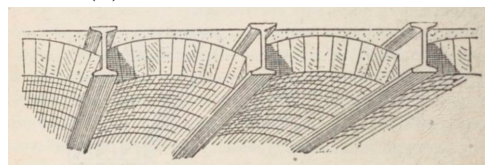
Cette étude se focalise sur l'analyse et le potentiel de réemploi des poutrelles en charpente métallique extraites du pont de Dallet. Notre approche combine des tests en laboratoire et une proposition de renforcement structural. Dans un premier temps, nous soumettrons les échantillons à une série d'analyses pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques actuelles, évaluant ainsi leur intégrité structurelle après des décennies de service. Sur la base de ces résultats, nous explorerons une stratégie de réemploi impliquant la mixité acier-béton. Cette technique consiste à ajouter une dalle en béton armé et des connecteurs. Notre objectif est de fournir des données empiriques et théoriques solides pour guider les décisions futures concernant le réemploi des matériaux métalliques dans la construction, en accord avec les principes de développement durable et d'économie circulaire.

5.2 Présentation de l'ouvrage

Le pont métallique de Dallet, situé sur la RD 769a, sur la commune de Mur-sur-Allier dans le département du Puy-de-Dôme, est un ouvrage qui enjambe la rivière Allier. Inauguré le 30 juillet 1899, il a remplacé l'ancien système de bacs qui était utilisé pour traverser la rivière. Ce pont, d'une longueur totale de 152 mètres, se caractérise par une structure composée de deux poutres treillis latérales qui font 5,15m de hauteur avec un entraxe de 4,00m reposant sur deux piles en pierre de Volvic. Le tablier initial est constitué de voûtains en brique reposant sur des poutrelles et d'une chaussée en enrobé. Il pesait 230t et a été monté sur la rive puis poussé en place en une seule journée, démontrant l'ingéniosité des techniques de construction de l'époque.



(a) Vue du pont de Dallet



(b) Construction en voûtains

FIG. 5.1 : Pont de Dallet

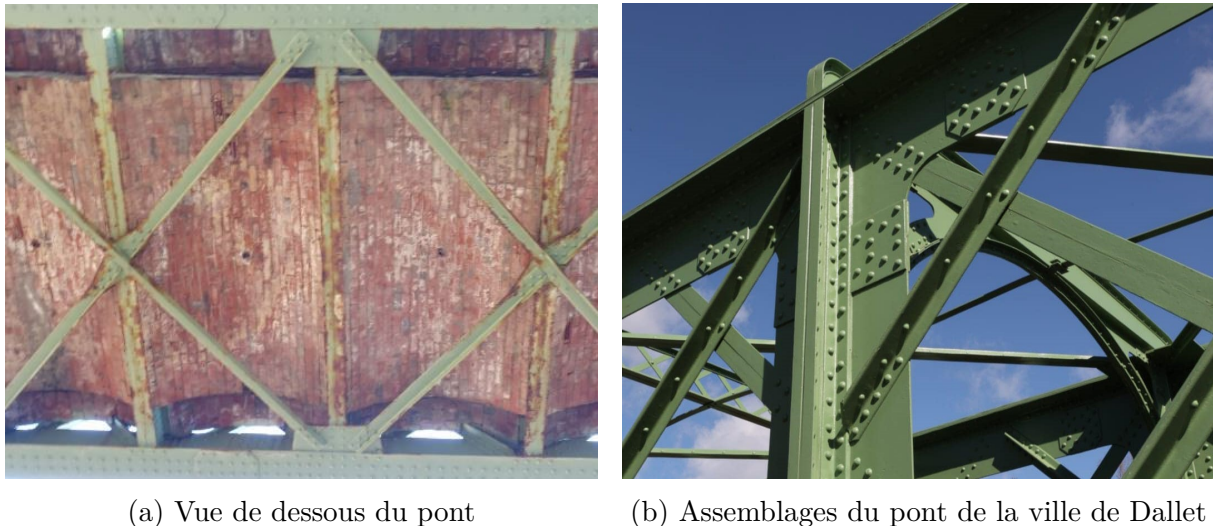


FIG. 5.2 : Pont de la ville de Dallet avant rénovation

La surveillance du pont de Dallet a été effectuée à travers des Inspections Détaillées Périodiques (IDP) dont les trois dernières ont eu lieu en 2008, 2014 et 2017. Ces inspections utilisent une échelle de 1 à 5 pour évaluer l'état de l'ouvrage, 1 représentant un ouvrage en parfait état et 5 indiquant un état critique. L'évolution des indices d'état montre une dégradation progressive de la structure : en 2008, l'indice était de 3, en 2014 il est passé à 4, et en 2017 il a atteint 5, signalant un mauvais état structurel. Les principaux désordres constatés incluent des problèmes d'étanchéité, une dégradation des voûtains, une corrosion évolutive de l'ensemble de la structure porteuse, des pertes de section localisées, ainsi que des rivets sectionnés ou absents. Cette surveillance régulière a mis en évidence la nécessité d'une réhabilitation majeure de l'ouvrage pour assurer sa pérennité et sa sécurité (PUY-DE-DÔME s. d.).

Une réhabilitation majeure de l'ouvrage a été réalisée en 2023, pour un coût total de 6 millions d'euros, cofinancé par le département, l'Union Européenne et l'État. Cette rénovation a permis d'adapter le pont aux besoins modernes tout en préservant son caractère historique. Les travaux ont inclus l'ajout de deux encorbellements de 2 mètres de chaque côté pour accueillir cyclistes et piétons, le remplacement de 91 pièces métalliques, et la pose de 5644 rivets et 1 km de garde-corps.

La réhabilitation a également impliqué l'utilisation de 8,6t d'acier de renfort et l'application de peinture verte sur 3830m² de métal. Une innovation majeure a été la reconstruction du tablier en béton fibré ultra-hautes performances, une première dans le département. Les méthodes de restauration ont respecté les techniques de construction d'origine, notamment le rivetage à chaud, témoignant d'un souci de préservation du patrimoine industriel.



FIG. 5.3 : Inauguration des travaux de rénovation du pont métallique de Dallet (CLERMONTINFOS63.FR 2024)

Cette rénovation s'inscrit dans une politique plus large d'aménagement cyclable du conseil départemental du Puy-de-Dôme. Elle vise à adapter le réseau routier aux besoins de mobilités douces et au développement touristique, notamment en permettant le passage de la Via Allier. Ainsi, le pont de Dallet continue de jouer un rôle important dans l'infrastructure locale tout en s'adaptant aux exigences contemporaines de mobilité et de durabilité.

5.3 Réhabilitation du pont de Dallet

Il est important de noter que le pont de Dallet a effectivement fait l'objet d'une réhabilitation complète, et non d'un réemploi au sens strict du terme. Cette réhabilitation, réalisée en 2023, a été une opération coûteuse visant à prolonger la durée de vie de l'ouvrage tout en préservant sa structure historique.

La réhabilitation a impliqué le remplacement de certains éléments structurels, le renforcement d'autres, ainsi que la mise aux normes de sécurité actuelles. Cette approche, bien que nécessaire pour maintenir l'intégrité et la fonctionnalité du pont, a représenté un investissement financier important.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'explorer une approche alternative : le réemploi des éléments métalliques du pont dans une configuration de structure mixte acier-béton. Cette approche, bien qu'hypothétique dans le cas du pont de Dallet déjà réhabilité, vise à démontrer le potentiel de réutilisation des éléments structurels existants, offrant ainsi une solution potentiellement moins coûteuse et plus durable.

Notre travail se concentre donc sur l'évaluation des propriétés mécaniques résiduelles des poutrelles métalliques et sur la proposition d'une solution de mixité acier-béton. Cette approche, si elle avait été appliquée, aurait pu offrir une alternative économique et performante à la réhabilitation traditionnelle, tout en s'inscrivant dans une démarche de réemploi et de valorisation des matériaux existants.

5.4 Poutrelles métalliques provenant du pont

5.4.1 Présentation et dimensions

Les poutrelles récupérées du pont de Dallet sont des éléments structuraux en forme de I, une configuration typique des constructions métalliques de la fin du XIXe siècle. Leur conception, caractéristique de l'époque de construction du pont (1899), se compose d'une plaque verticale centrale formant l'âme et de quatre cornières rivetées formant ainsi un profil en I. L'utilisation de cornières rivetées pour former les semelles du profil en I est une technique courante dans les ouvrages métalliques de cette période. Elle permettait d'obtenir des sections résistantes tout en optimisant l'utilisation du matériau, qui était probablement du fer puddlé ou de l'acier doux, selon les pratiques de l'époque. Cette méthode d'assemblage par rivetage était la norme avant l'avènement de la soudure dans les années 1930.

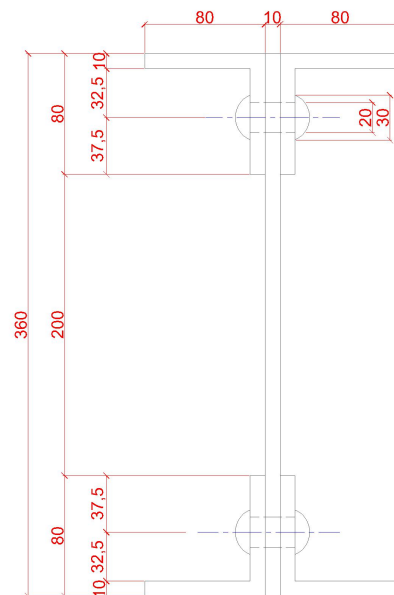


FIG. 5.4 : Section des poutrelles

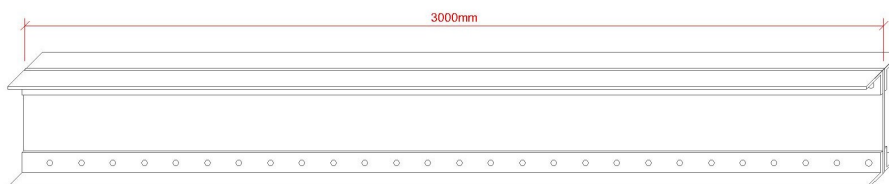


FIG. 5.5 : Dimensions des poutrelles extraites du pont

5.4.2 Observation visuelle et état des poutrelles

L'examen visuel des quatre poutrelles métalliques extraites du pont de Dallet a révélé des états de conservation hétérogènes, confirmant les résultats des IDP effectuées en 2008,

2014 et 2017. Cette analyse préliminaire a permis d'identifier la nature du matériau et d'évaluer son état après plus d'un siècle d'utilisation.

Sur certaines parties des poutrelles, on a observé une corrosion en forme de feuillets, caractéristique du fer puddlé. Cette particularité confirme que les poutrelles sont constituées de fer puddlé, un matériau couramment utilisé dans les constructions métalliques de la fin du XIXe siècle. Le fer puddlé est connu pour sa faible résistance à la corrosion, ce qui rend l'état de conservation des échantillons particulièrement intéressant pour notre étude. Les investigations menées ont confirmé la non-soudabilité du métal en place, une caractéristique typique du fer puddlé.



(a) Corrosion superficielle des poutrelles

(b) Acier rouillé dégradé en feuillette

FIG. 5.6 : Investigations sur le métal

Trois des quatre échantillons (poutrelles) présentaient un état de conservation relativement satisfaisant, malgré la présence d'une corrosion uniforme superficielle.

En revanche, le quatrième échantillon présentait un degré de dégradation nettement plus avancé, caractérisé par une corrosion significative et une perte de matière visible à l'œil nu. Les signes de dégradation étaient claires visuellement, et les résultats des tests qu'on verra dans ce qui suit vont confirmer cette évaluation.

Les investigations sur la peinture ont révélé une concentration en plomb proche de $0\text{mg}/\text{cm}^2$ et l'absence d'amiante. Les essais de décapage se sont avérés satisfaisants, ouvrant la voie à des interventions de remise en état.

Ces observations constituent la base pour comprendre le comportement des échantillons dans les essais auxquels ils vont être soumis, et soulignent l'importance d'une évaluation approfondie pour toute considération de réemploi ou de réhabilitation de ces éléments structurels historiques.

5.5 Essais effectués sur les poutrelles

Dans le cadre de notre étude et afin d'évaluer les propriétés mécaniques et le comportement des poutrelles récupérées du pont de Dallet, une série d'essais a été réalisée.

Le premier essai effectué sur les échantillons a été l'essai de flexion à trois points. Cet essai simule les conditions de charge que les poutrelles subissent généralement dans une structure. Il permet d'évaluer la résistance à la flexion, le module de chargement et le comportement global de la poutrelle sous charge. Suite à l'essai de flexion, des échantillons ont été prélevés sur les poutrelles cassées. Ces échantillons ont ensuite été soumis à des essais de traction. L'essai de traction avait pour but de déterminer les propriétés mécaniques du fer puddlé, telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture. Parallèlement aux essais de traction, un essai de cisaillement de rivet a été réalisé. Cet essai est particulièrement important pour la détermination de la résistance au cisaillement et pour comprendre le comportement de la poutrelle, notamment pour savoir si des rivets ont été plastifiés ou, le cas échéant, cisailés. Enfin, pour compléter cette série d'essais destructifs, des essais non destructifs de dureté ont été effectués sur les échantillons après les essais de traction. Ces tests de dureté permettent de vérifier la fiabilité des essais et de comparer les résultats entre les essais destructifs de traction et les essais non destructifs.

Cette série de tests réalisés sur les échantillons permet d'obtenir une caractérisation complète des propriétés mécaniques des poutrelles et de comprendre leur comportement afin de les valoriser et les réemployer de la façon la plus adaptée.

5.5.1 Essai de flexion trois points

L'essai de flexion à trois points est une méthode standardisée pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux, particulièrement adaptée aux poutrelles et aux éléments structurels allongés. Le principe de l'essai consiste à soumettre une poutrelle bi-appuyée à une charge appliquée au centre de la poutre et à enregistrer les déplacements ou les déformations obtenues jusqu'à la ruine.

Objectifs

L'objectif de cet essai est d'analyser la faisabilité du réemploi d'une poutrelle en charpente métallique provenant d'un ancien pont pour une nouvelle utilisation. En testant la poutrelle après son cycle de vie, il s'agit de déterminer sa capacité à être réutilisée de manière sûre et efficace. L'essai de flexion vise spécifiquement à évaluer la résistance à la rupture et à identifier les contraintes maximales développées sous différentes charges, afin de mieux comprendre les zones de faiblesse et d'évaluer si les modifications apportées à la poutrelle répondent aux normes de sécurité requises.

Protocole de l'essai

Pour notre étude, nous disposons de quatre poutrelles récupérées du pont. Ces poutrelles, d'une longueur de 3 mètres chacune, ont été soumises à l'essai de flexion à trois points. L'échantillon est placé sur deux appuis simples avec un entraxe de 2740mm, et une charge est appliquée au centre de la poutrelle.

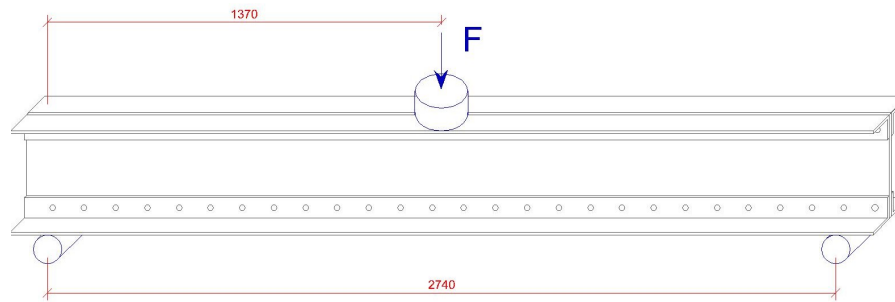


FIG. 5.7 : Protocole essai de flexion

L'essai a débuté avec la première poutrelle sur une presse hydraulique Zwick d'une capacité de $400kN$. Cependant, cette capacité s'est avérée insuffisante pour atteindre la rupture de l'échantillon. Suite à ce constat, on a continué le test de la première poutrelle et les autres poutrelles sur la presse Zwick de $600kN$, permettant d'appliquer des charges plus importantes et d'atteindre la ruine des poutrelles.

Avant d'entamer l'essai jusqu'à la rupture, chaque poutrelle a été soumise à plusieurs cycles de chargement. Cette méthode vise à analyser le comportement de la poutrelle sous des contraintes répétées, permettant ainsi de caractériser ses réponses en phase élastique et plastique. Cela permet également d'évaluer la résilience de la poutrelle, c'est-à-dire sa capacité à retrouver sa forme initiale après plusieurs cycles de charge-décharge, avant d'atteindre le point de rupture ultime.

Résultats de l'essai

Les résultats recueillis durant l'essai sont le temps, la force, le déplacement du vérin, la flèche au milieu ainsi que le déplacement de l'appui droit. À partir de ces données, nous avons pu construire un tableau récapitulatif (tableau 5.1) et les graphiques correspondant aux résultats de l'essai (figures : 5.8,5.9,5.10,5.11 et ,5.12). Pour tracer la courbe force-déplacement, nous avons pris la force mesurée par la machine et, pour le déplacement, nous avons calculé la différence entre le déplacement au milieu (flèche) de la poutrelle et celui de l'appui droit.

Légende des valeurs présentées dans le tableau 5.1 :

- K_i (Rigidité initiale) : représente la pente initiale de la courbe force-déplacement lors du premier chargement. K_{ch} (Rigidité moyenne des chargements) : moyenne des pentes des courbes de chargement pour tous les cycles.
- K_{dech} (Rigidité moyenne des déchargements) : moyenne des pentes des courbes de déchargement pour tous les cycles.
- K_{moy} (Rigidité moyenne) : moyenne entre K_{ch} et K_{dech} , donnant une estimation globale de la rigidité de la poutrelle.
- F_e (Force élastique) : force à laquelle le comportement de la poutrelle commence à dévier de la linéarité, marquant la fin du domaine élastique.
- Force résistante (F_r) : force maximale atteinte avant une chute significative de la capacité portante de la poutrelle. Elle est déterminée graphiquement sur la courbe

force-déplacement.

- Force maximale (F_u) : force la plus élevée enregistrée durant l'essai, représentant la capacité portante ultime de la poutrelle.
- Déplacement élastique : déplacement correspondant à la force élastique F_e .
- Déplacement $/F_r$: déplacement correspondant à la force résistante F_r .
- Déplacement $/F_u$: déplacement correspondant à la force maximale F_u .

TAB. 5.1 : Tableau des résultats de l'essai de flexion trois points

	Essai 1		Essai 2	Essai 3	Essai 4	Moyenne	Moyenne sans E4
	1	1-bis					
Rigidité initiale K_i (kN/mm)	51,85	-	57,24	50,00	44,40	50,87	53,03
Rigidité moyenne Chargements K_{ch} (kN/mm)	56,89	62,24	62,20	57,03	48,51	57,37	59,59
	59,57						
Rigidité moyenne Déchargements K_{dech} (kN/mm)	61,07	62,97	63,16	58,45	55,23	60,18	61,41
	62,02						
Rigidité moyenne K_{moy} (kN/mm)	58,98	62,61	62,68	57,74	51,87	58,77	60,50
	62,02						
Force élastique F_e (kN)	259,33	-	210,89	285,20	-	-	251,81
Déplacement élastique (mm)	-	5,83	4,19	5,77	-	-	5,26
Force résistante F_r (kN)	456,92	259,33	440,87	436,16	-	-	398,32
	358,13						
Déplacement $/F_r$ (mm)	-	9,50	8,15	8,45	-	-	8,70
Force maximale F_u (kN)	-	485,53	478,86	505,94	264,01	433,58	490,11
Déplacement $/F_u$ (mm)	-	18,10	17,89	18,12	-	-	18,03

Remarque : la quatrième poutrelle présente des résultats anormaux, comme l'illustre la courbe dans la figure 5.12, où son comportement s'écarte significativement de celui des autres poutrelles testées. Étant donné ces divergences, nous ne tiendrons pas compte des valeurs obtenues pour cet échantillon, car elles ne reflètent pas des conditions réalistes ou exploitables pour notre analyse.

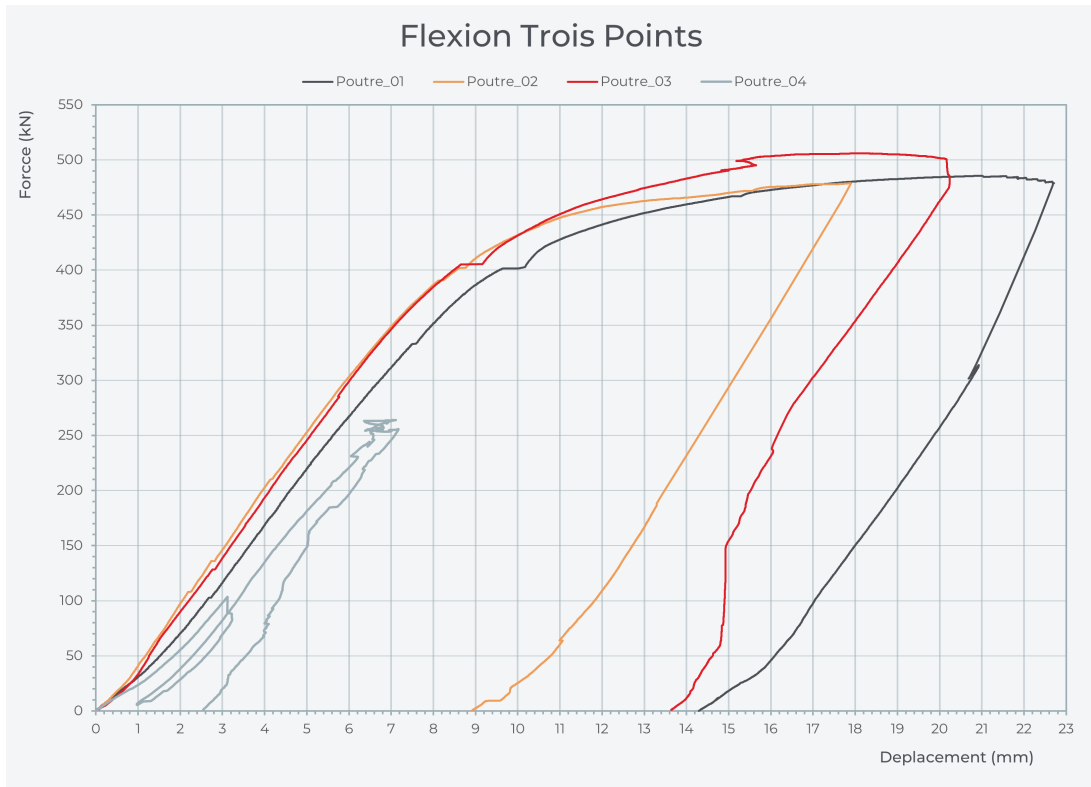


FIG. 5.8 : Courbes Force-Déplacement expérimentales

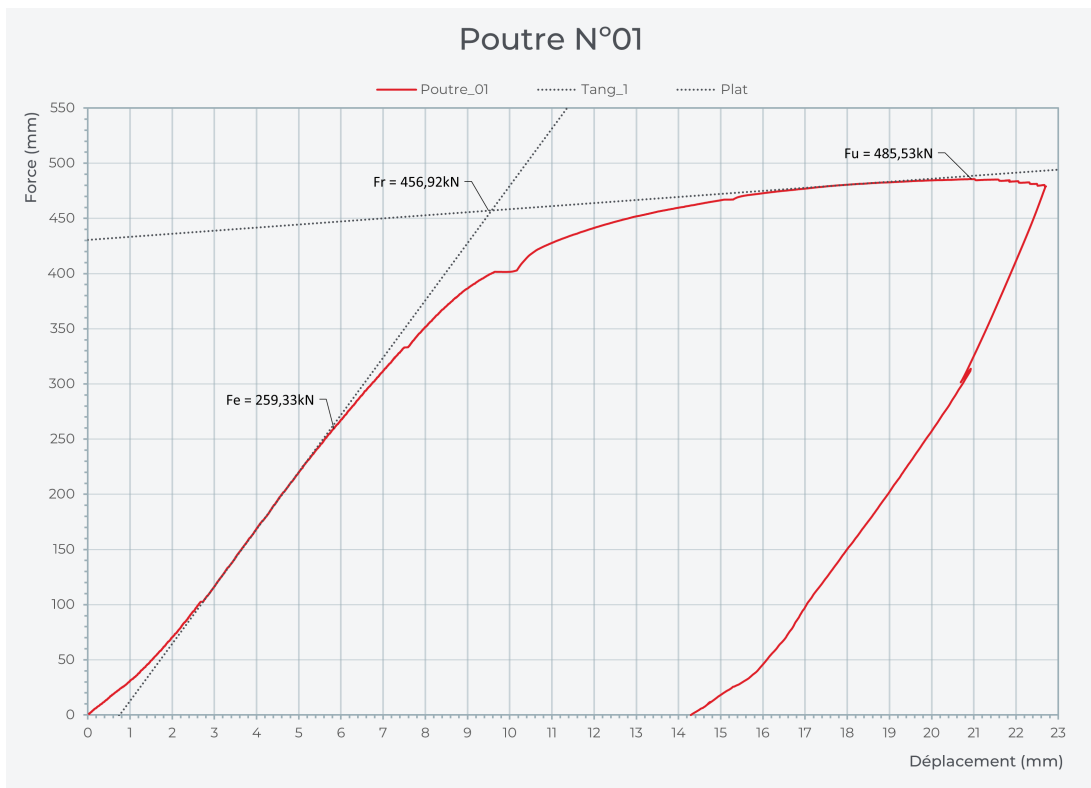


FIG. 5.9 : Courbe Force-Déplacement poutrelle 01

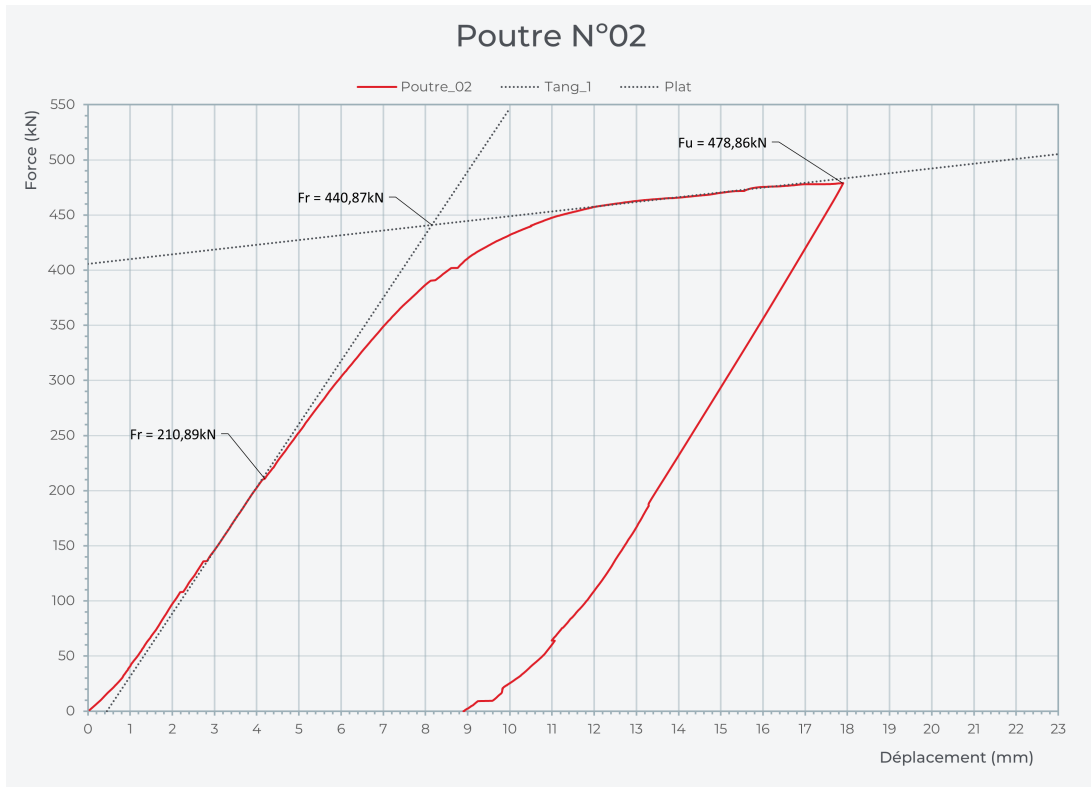


FIG. 5.10 : Courbe Force-Déplacement poutrelle 02

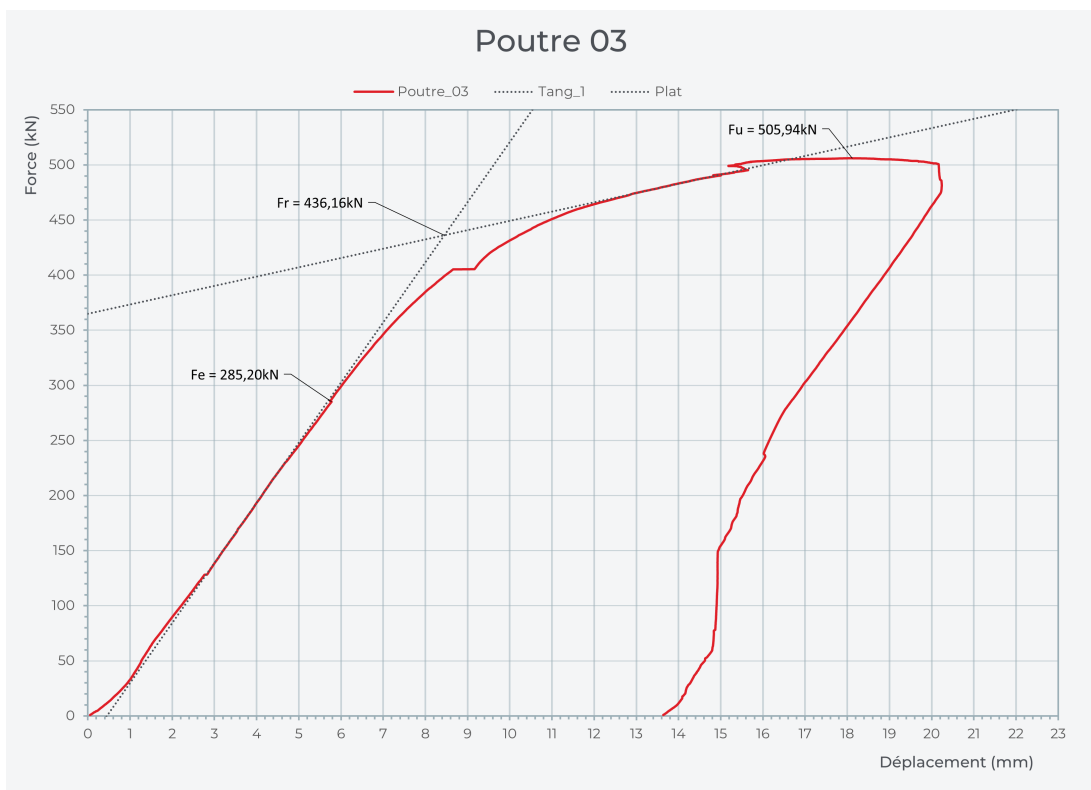


FIG. 5.11 : Courbe Force-Déplacement poutrelle 03

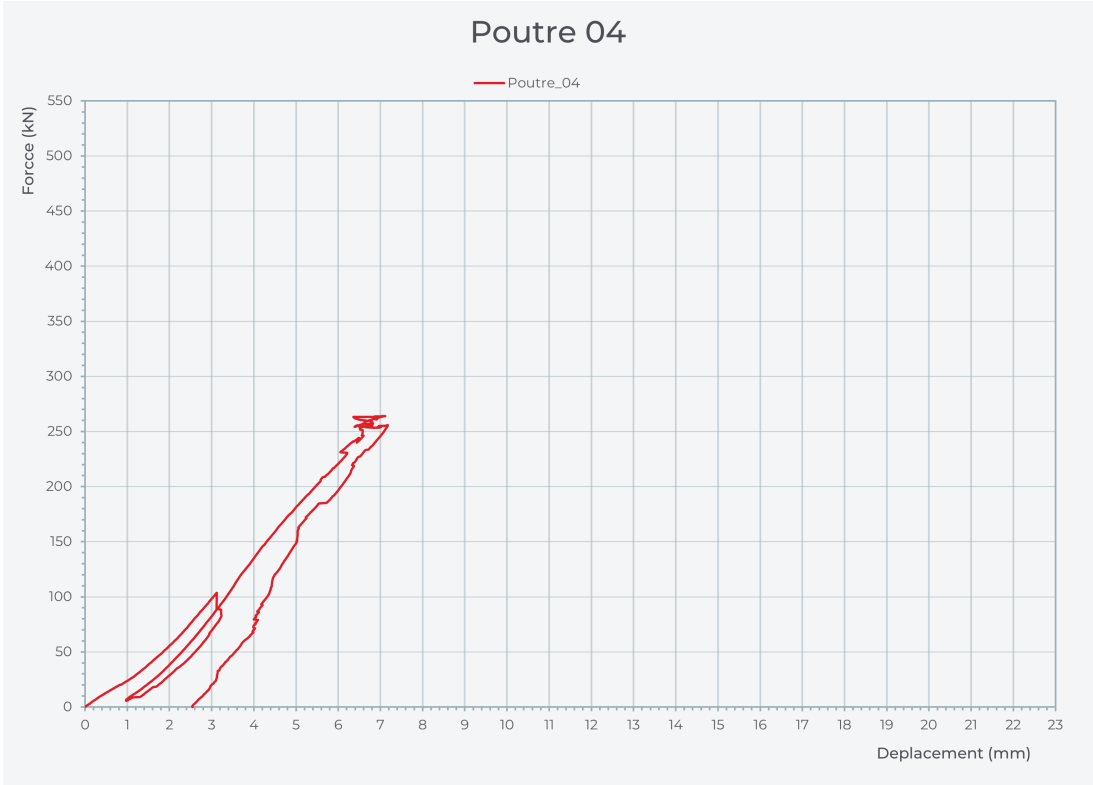
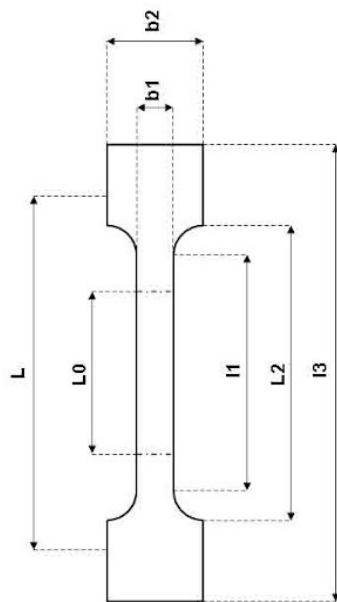


FIG. 5.12 : Courbe Force-Déplacement poutrelle 04

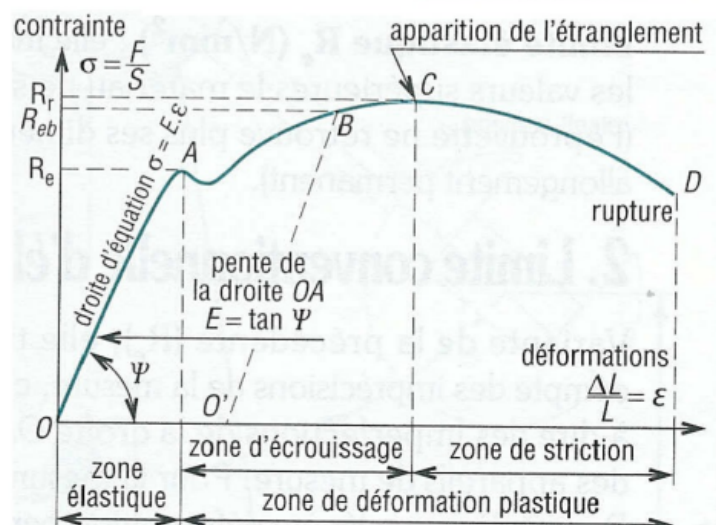
5.5.2 Essai de traction

Pour évaluer les caractéristiques de résistance et d'allongement élastique et plastique des matériaux, l'essai de traction est l'essai de référence. Il consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction uni-axiale jusqu'à sa rupture, permettant ainsi de tracer la courbe contrainte-déformation et de déterminer des propriétés mécaniques du matériau testé.

Suite aux essais de flexion trois points, quatre échantillons ont été prélevés sur les poutrelles cassées pour effectuer des essais de traction : deux échantillons de l'âme, un échantillon de la cornière supérieure (formant la semelle supérieure) et un échantillon de la cornière inférieure (formant la semelle inférieure).



(a) Éprouvette de traction



(b) Courbe contrainte déformation

Préparation et déroulement de l'essai

Les échantillons ont été soigneusement préparés : leur surface a été traitée et ils ont été formés en éprouvettes plates selon les dimensions requises pour l'essai de traction. Le tableau 5.2 présente les dimensions de chaque éprouvette.

TAB. 5.2 : Dimensions des éprouvettes pour l'essai de traction

Échantillon	$a(mm)$	$b(mm)$	$l_0(mm)$	Section (mm^2)
Semelle inférieure	7.2	20.9	69.3	150.48
Semelle supérieure	7.9	20.7	72.25	163.53
Âme 1	10.4	18.6	78.58	193.44
Âme 2	10.4	23.8	88.89	247.52

Avec :

- a représente l'épaisseur de l'éprouvette.

- b représente la largeur de l'éprouvette.
- l_0 représente la longueur initiale de référence.
- L_a section est calculée comme le produit de $A \times B$.

Après l'usinage des éprouvettes aux dimensions spécifiées, des lignes de référence ont été tracées sur chaque éprouvette. Une ligne centrale a été marquée, ainsi que deux lignes délimitant la longueur initiale l_0 . Ces lignes ont servi de points de référence pour le système optique. La caméra de la machine a été configurée pour suivre ces repères tout au long de l'essai, permettant ainsi une mesure exacte de l'allongement entre les repères de la longueur l_0 (figure 5.14).

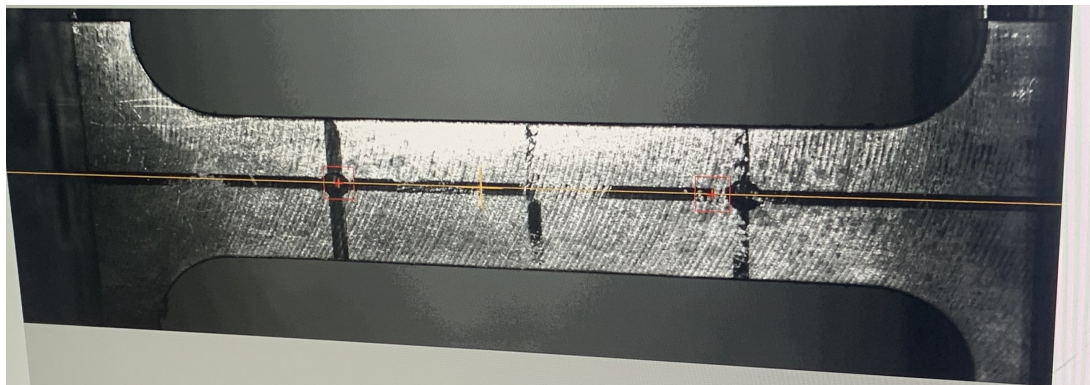


FIG. 5.14 : Points de repère essai traction

Résultats de l'essai

À partir des résultats de l'essai réalisé, on a pu obtenir les courbes contraintes déformations des quatre éprouvettes ainsi que les propriétés mécaniques résumées dans le tableau 5.3. Pour ce qui suit, on a pris les désignations suivantes pour les éprouvettes : éprouvette 01 pour la semelle supérieure, éprouvette 02 pour l'âme 01, éprouvette 03 pour la semelle inférieure et éprouvette 04 pour l'âme 02.

TAB. 5.3 : Résultats de l'essai de traction, poutrelles pont de Dallet

	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4	Moyenne	
					Avec EP4	Sans EP 4
Si (mm^2)	163.53	150.48	193.44	247.52	-	-
Sf (mm^2)	150.45	147.47	178.74	237.62	-	-
Coef. Striction	8,0%	2,0%	7,6%	4,0%	5,4%	5,9%
σ_e (Mpa)	228.63	226.10	250.63	243.46	237.21	235.12
ε_e (%)	0,55%	0,17%	0,25%	1,16%	0,53%	0,32%
σ_u (Mpa)	287.98	272.26	344.88	303.15	302.07	301.70
ε_u (%)	6,10%	8,24%	10,98%	6,58%	7,97%	8,44%
Module de chargement (Gpa)	224,79	200,47	203,21	140,72	192,30	209,49

N.B : Les essais de flexion à trois points et de traction ont été réalisés avant mon arrivée en stage. J'ai récupéré les données brutes et quelques remarques, sans avoir participé directement aux tests.

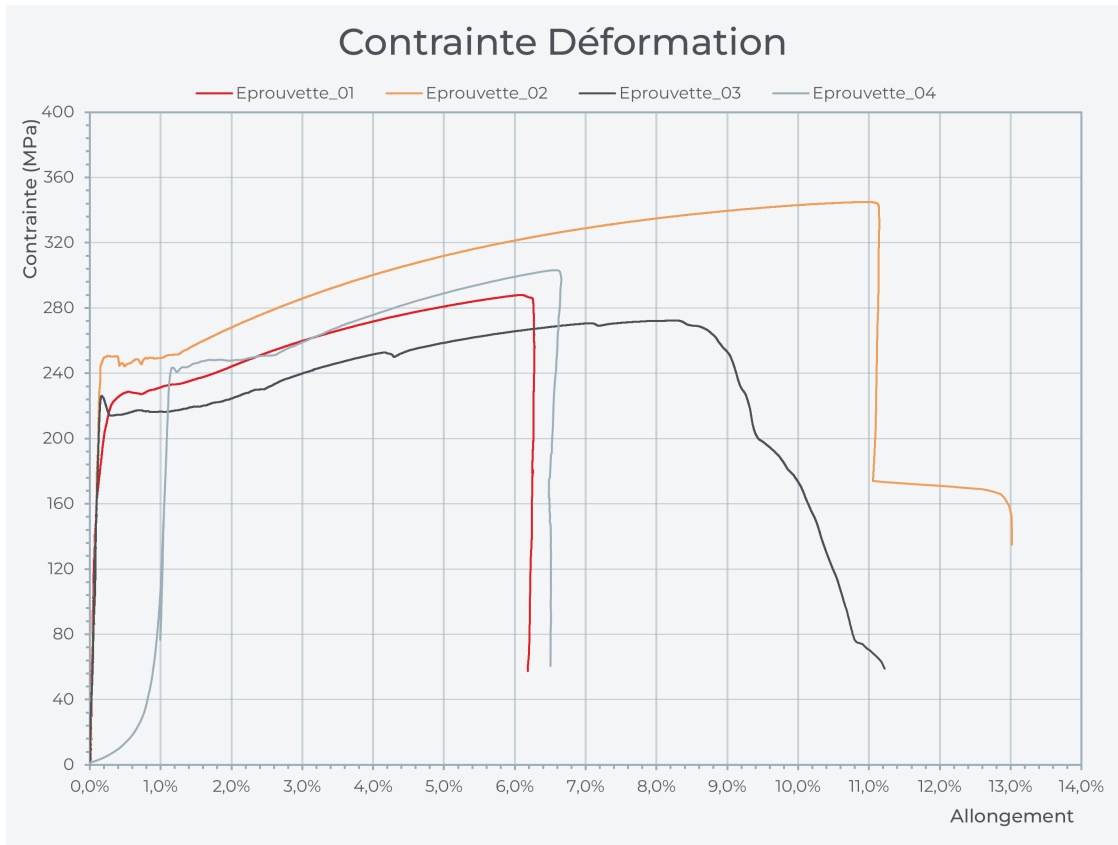


FIG. 5.15 : Courbes Contrainte-Déformation expérimentales

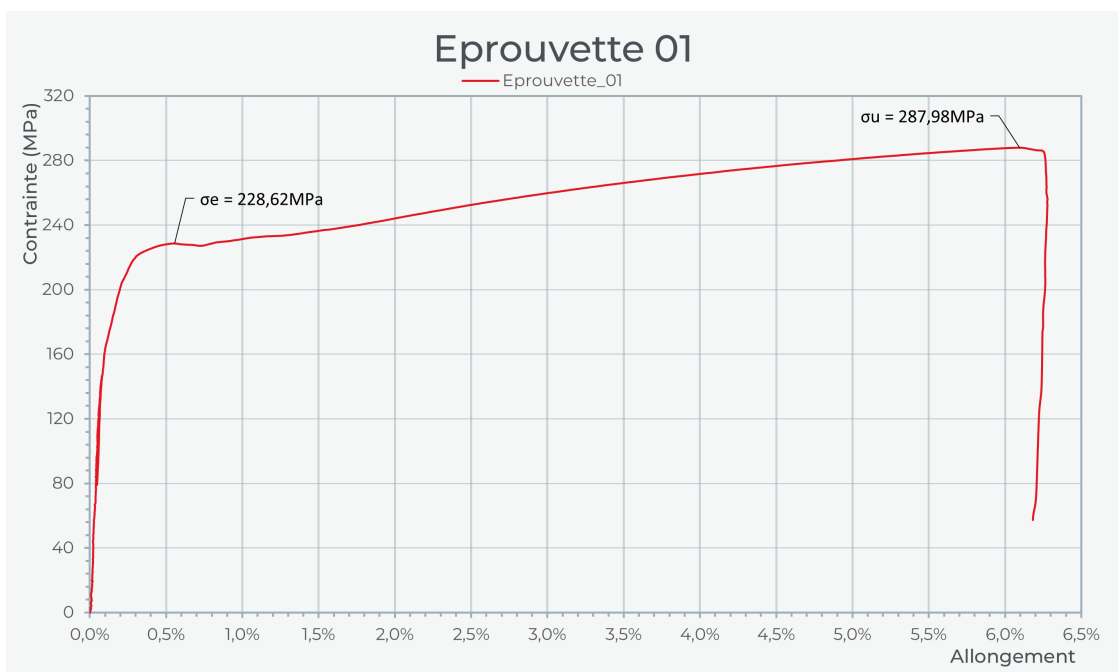


FIG. 5.16 : Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 01 (semelle sup.)

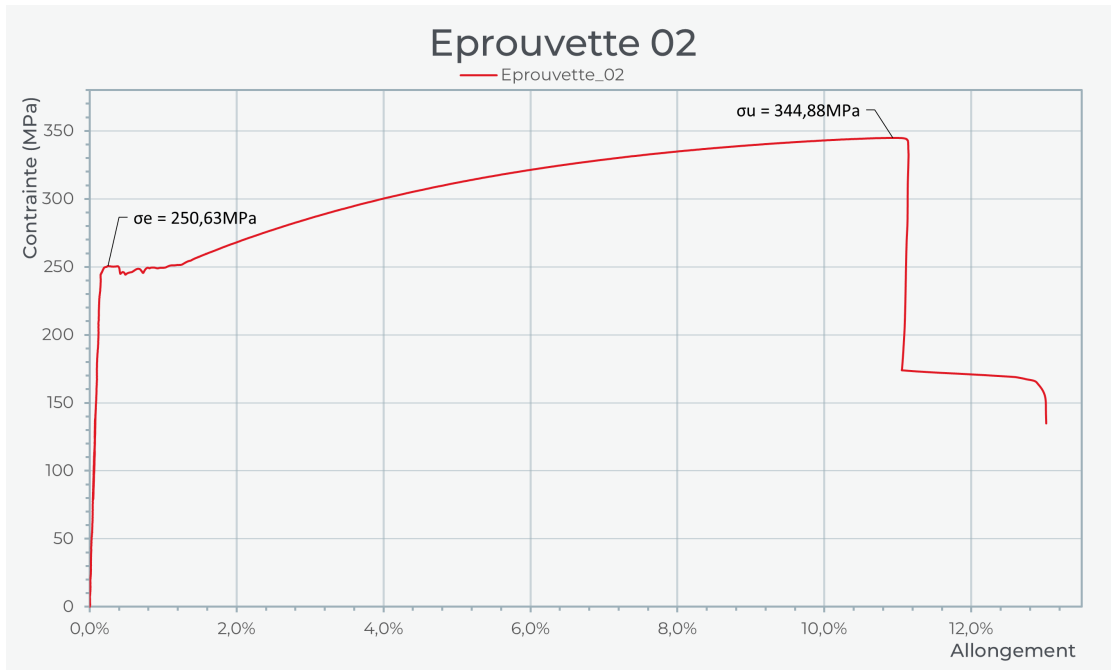


FIG. 5.17 : Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 02 (âme)

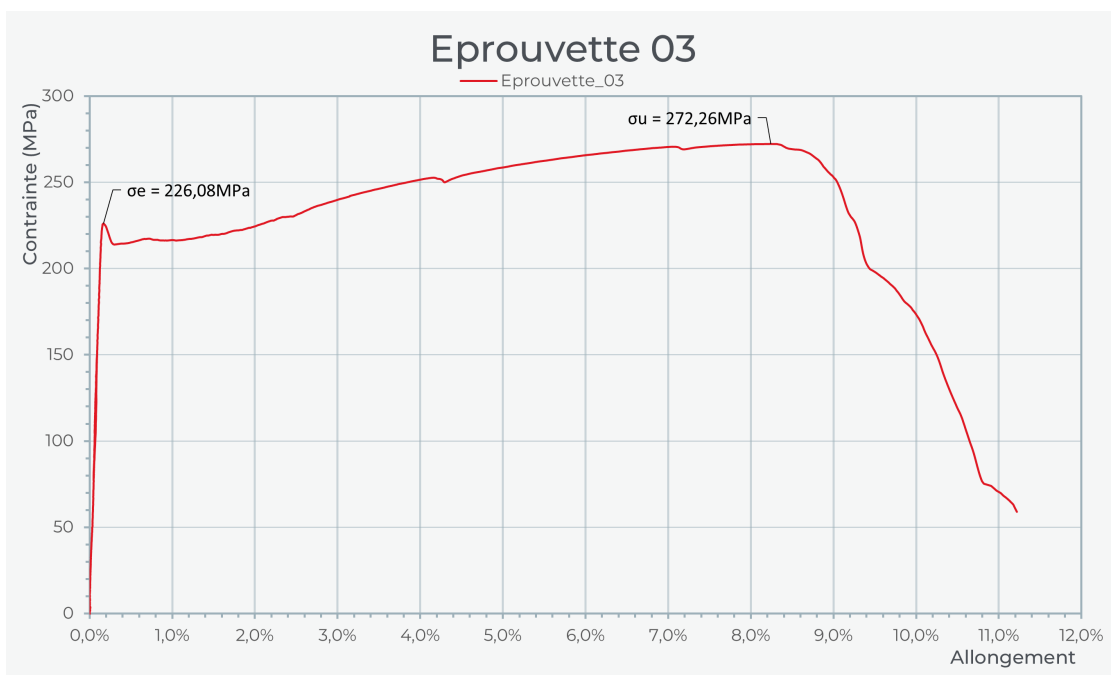


FIG. 5.18 : Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 03 (semelle inf.)

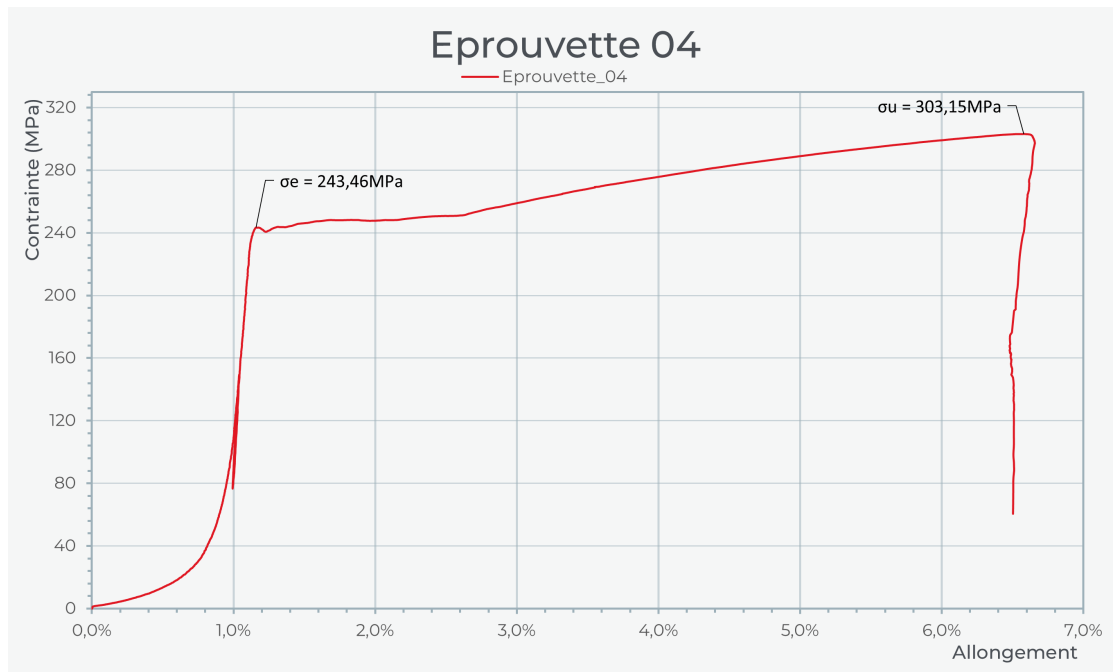


FIG. 5.19 : Courbe Contrainte-Déformation éprouvette 03 (âme)

Interprétation des résultats

Avant d'entamer l'analyse ou l'interprétation des résultats, il convient de noter que l'éprouvette 4 (Âme 02) a présenté un comportement anormal dès le début de l'essai, probablement dû à une erreur de manipulation lors de l'essai confirmée par le stagiaire ayant réalisé l'essai. Par conséquent, pour assurer la fiabilité de notre interprétation, nous avons choisi d'exclure les résultats de cette éprouvette de notre analyse principale, faute de pouvoir refaire les tests en l'absence d'autres échantillons disponibles.

Comportement à la rupture :

Les ruptures des éprouvettes ont été observées dans des zones proches des mors pour les éprouvettes 2 et 4. Pour l'éprouvette 2, la rupture est intervenue en dehors de la zone suivie par les points de référence de la caméra. Toutes les éprouvettes ont présenté une cassure sans signe d'écoulement de la matière, sans raccourcissement notable de la section transversale avant la rupture. En ce qui concerne l'éprouvette 04, la rupture a été particulièrement atypique : un feuilletage de la section a été observé, probablement dû à la corrosion. La section longitudinale de l'éprouvette s'est divisée en deux parties distinctes, chacune ayant rompu à un point différent, comme illustré dans la figure 5.20.



FIG. 5.20 : Feuillage de l'éprouvette 04

Analyse générale des éprouvettes :

L'allongement moyen obtenu pour l'ensemble des éprouvettes, sans tenir compte de l'éprouvette 4, est de 8.44% et le coefficient de striction est de 5.9%. Ces deux paramètres, relativement faibles, indiquent un comportement mécanique fragile des éprouvettes, renforcé par l'absence visible de palier plastique sur les courbes de traction et confirmé par les clichés des essais qui montrent des sections rompues sans déformation plastique significative (figure 5.21).

L'essai de traction effectué sur ces quatre éprouvettes a révélé une résistance à la rupture moyenne de $302,07MPa$ et une limite élastique de $237,21MPa$ (sans écarter l'éprouvette 4), ce qui correspond globalement aux propriétés du fer puddlé comme on a vu dans le chapitre "Historique des matériaux métalliques de construction". Le fer puddlé présente une résistance différente selon la direction de la contrainte appliquée. Pour notre cas, on est en longitudinal, et selon les données présentées précédemment, le fer puddlé a, en longitudinal, une résistance à la rupture de $\geq 314MPa$ et une résistance élastique qui varie entre 250 et $340MPa$. Les valeurs obtenues restent cependant dans des marges acceptables pour un fer puddlé bien conservé, malgré l'exposition à la corrosion, qui a pu entraîner des fragilités spécifiques sur certaines zones.

Le module de Young, obtenu à partir de la pente de la courbe de traction durant la phase de chargement, est calculé à $209.49GPa$ après exclusion de l'éprouvette 04. Cette valeur est très proche de celle généralement admise pour les aciers de construction, soit environ $210GPa$, ce qui valide l'hypothèse selon laquelle le matériau étudié présente encore des caractéristiques mécaniques similaires à celles des aciers modernes, malgré son âge.

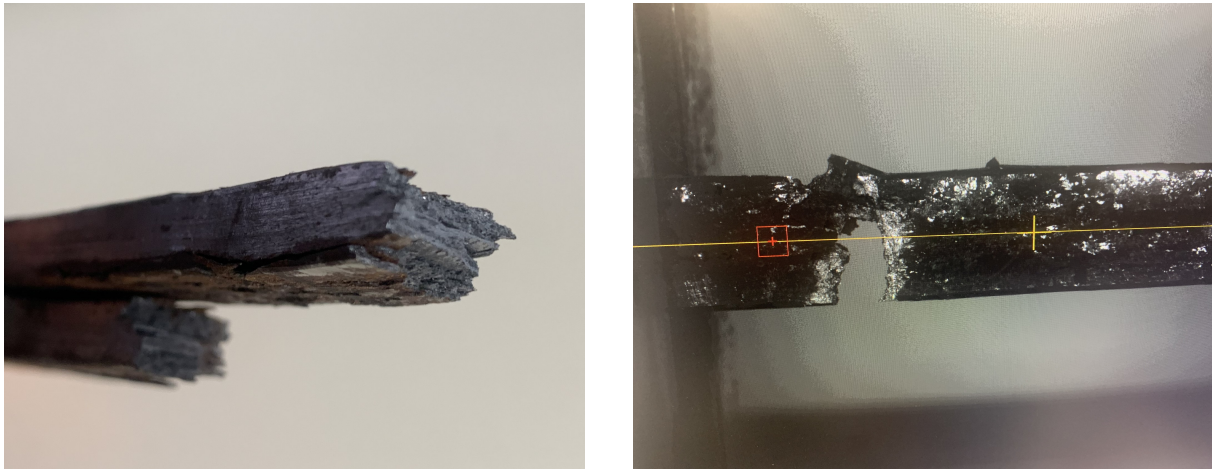


FIG. 5.21 : Rupture fragile des éprouvettes

5.5.3 Essai de cisaillement du rivet

Les assemblages rivetés à chaud ont été largement utilisés jusqu'aux années 1970 pour les ponts métalliques (LEONETTI et al. 2020), et de nombreux ouvrages de ce type sont encore en service aujourd'hui. L'évaluation de leur durée de vie en fatigue nécessite une compréhension approfondie du comportement mécanique des rivets, en particulier de la force de serrage résiduelle. Dans ce cadre s'inscrit l'essai de cisaillement comme essai nécessaire pour l'évaluation de la résistance des assemblages rivetés des structures métalliques historiques. La force de serrage des rivets, résultant du processus de rivetage à chaud, affecte significativement le comportement en fatigue des assemblages rivetés AKESSON 1994 ; WILSON et THOMAS 1938. Cette force présente une variabilité importante, avec un coefficient de variation supérieur ou égal à 0,3 LEONETTI et al. 2020.

La longueur de serrage (grip length) est un paramètre déterminant. Wilson et Thomas WILSON et THOMAS 1938 ainsi que Baron et Larson BARON et LARSON 1955 ont démontré qu'une longueur de serrage plus grande augmente la force de serrage moyenne et réduit sa dispersion. Le type d'acier et le processus de martelage ont un impact moindre sur cette force.

Pour des rivets installés en laboratoire, Akesson AKESSON 1994 a rapporté des contraintes de serrage moyennes de 0,61 à 0,77 fois la limite d'élasticité du rivet pour des longueurs de serrage de 75 à 125mm. En revanche, Zhou et al. ZHOU et al. 1995 ont observé des valeurs inférieures pour des rivets extraits de structures réelles, avec une moyenne d'environ 84 MPa pour une longueur de serrage de 30mm.

LEONETTI et al. 2020 ont mis en évidence que les rivets installés sur le terrain présentent davantage d'imperfections que ceux installés en laboratoire. Leur étude sur des rivets extraits du pont Botlek à Rotterdam, en service pendant plus de 50 ans, a révélé des valeurs de force de serrage différentes et généralement inférieures à celles observées en laboratoire. La méthode couramment employée pour mesurer la force de serrage consiste à insérer des jauges de déformation spéciales dans un trou percé au centre de la tige du rivet LEONETTI et al. 2020 ; ZHOU et al. 1995. Cette technique permet une évaluation précise de la contrainte axiale résiduelle dans le rivet. Leonetti et al. LEONETTI et al. 2020

ont développé un modèle par éléments finis pour simuler le développement de la force de serrage après l'installation du rivet. Ce modèle, validé par des données expérimentales, permet de prédire l'effet de la longueur de serrage sur la force de serrage. Les résultats indiquent que plus le rapport entre la longueur de serrage et le diamètre est élevé, plus la force de serrage est importante.

Objectifs de l'essai

L'essai de cisaillement effectué sur les échantillons de poutrelles issus du pont de Dallet avait pour objectifs de :

- Déterminer la résistance au cisaillement des assemblages rivetés :
 - Mesurer la force maximale que peuvent supporter les rivets avant la rupture en cisaillement, afin de vérifier l'état des rivets suite à l'essai de flexion précédemment réalisé sur les poutrelles, visant à déterminer si certains rivets ont subi une plastification ou atteint leur force de cisaillement limite durant l'essai de flexion. Cette information nous donne une meilleure compréhension du comportement global des poutrelles lors de l'essai et de la redistribution des efforts au sein des assemblages rivetés sous charge.
 - Évaluer la capacité portante résiduelle des assemblages après plus d'un siècle de service.
- Analyser le comportement mécanique des rivets :
 - Observer le mode de rupture (cisaillement net, arrachement, déformation plastique).
 - Étudier la relation force-déplacement pour comprendre la rigidité et la ductilité des assemblages.
- Évaluer la variabilité des propriétés mécaniques :
 - Quantifier la dispersion des résultats pour estimer la fiabilité des assemblages.
 - Identifier d'éventuelles différences liées à la position des rivets dans la structure.
- Comparer les résultats avec les données de la littérature :
 - Situer les performances des rivets du pont de Dallet par rapport aux valeurs typiques de l'époque.
 - Évaluer l'impact du vieillissement et des conditions de service sur les propriétés mécaniques.
- Fournir des données pour la modélisation numérique :
 - Calibrer les modèles de calcul pour l'évaluation globale de la structure.
 - Permettre des analyses plus précises de la fatigue et de la durée de vie résiduelle du pont.

Préparation des échantillons

Afin de tester les rivets au cisaillement, deux échantillons ont été prélevés à partir des poutrelles précédemment testées en flexion. La section initiale en I a été réduite à une

section en T après découpage, comme illustré dans la figure 5.22. Les dimensions exactes des deux éprouvettes présentaient de légères variations, tant au niveau de l'âme que des cornières. Ces écarts par rapport aux dimensions présentées précédemment peuvent être attribués à des imperfections inhérentes au processus de construction et de mise en place d'origine et à une réduction dimensionnelle due à la corrosion au cours de la durée de vie de l'ouvrage.

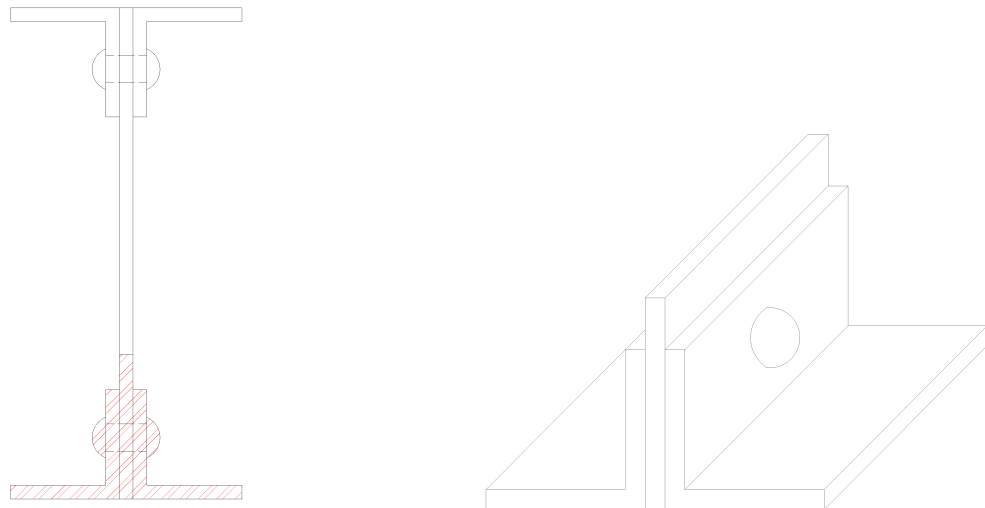
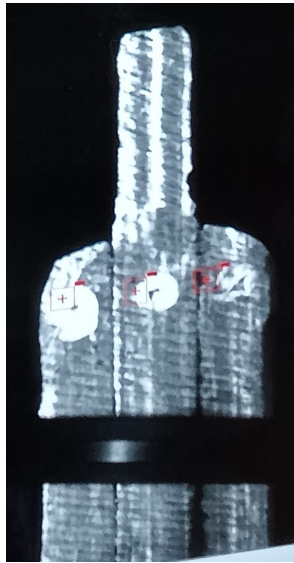


FIG. 5.22 : Éprouvette de l'essai de cisaillement

Une observation particulière a été faite, avant d'entamer l'essai, sur l'un des deux rivets (éprouvette 01). Ce rivet présentait une imperfection notable dans sa mise en place : il n'était pas parfaitement perpendiculaire au trou, comme le montre la figure 5.25a. Cette anomalie, initialement interprétée comme un défaut potentiellement significatif, s'est révélée être principalement un défaut de surface après l'essai de cisaillement. L'examen post-rupture a montré que cette imperfection était limitée à la tête du rivet et résultait probablement du processus de rivetage à chaud, sans affecter significativement l'intégrité structurelle du rivet dans son ensemble.

De plus, pour assurer la précision des mesures durant l'essai, un point de référence a été marqué sur chacune des trois parties de l'éprouvette : l'âme, la cornière gauche et la cornière droite (figure : 5.23a). Ces repères ont été utilisés pour le suivi des déplacements par la caméra pendant l'essai. L'éprouvette a ensuite été placée sur deux cales, laissant un espace libre sous l'âme afin qu'elle puisse se déplacer librement lors de l'application de la charge.



(a) Points de références



(b) Disposition de l'essai de cisaillement

FIG. 5.23 : Préparation des éprouvettes de cisaillement

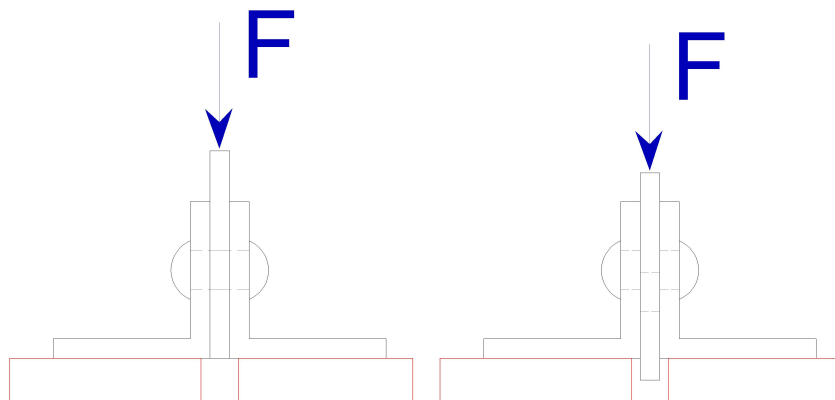
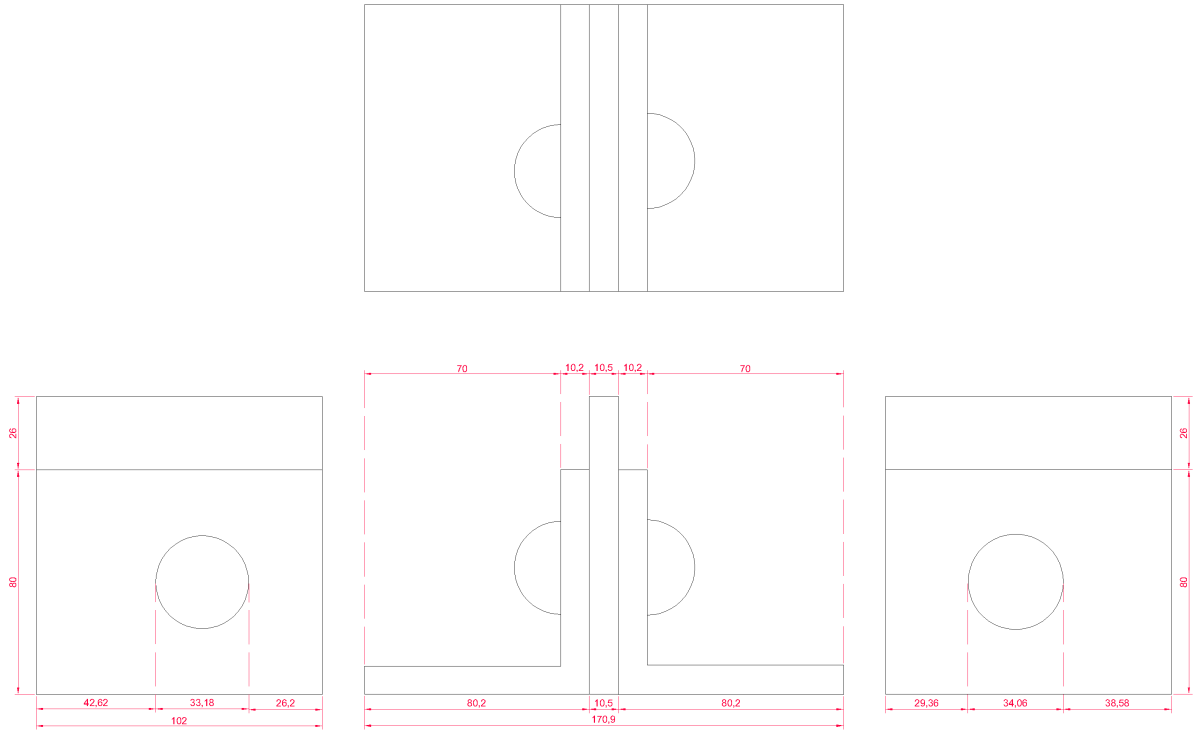
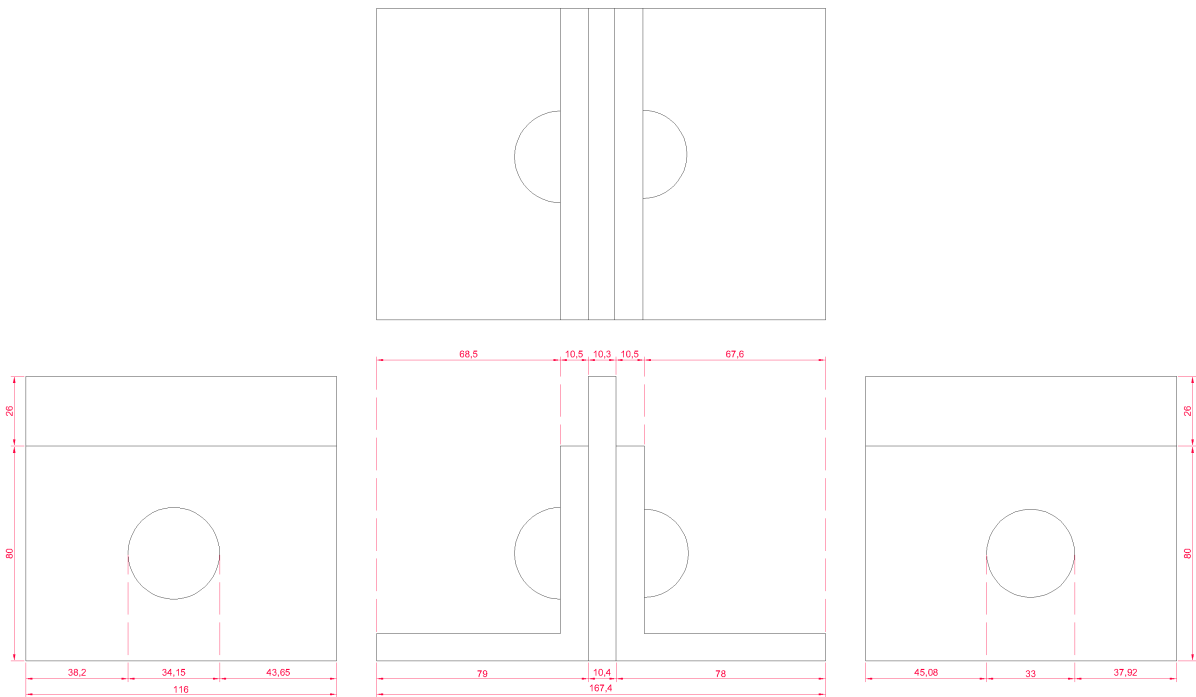


FIG. 5.24 : Déroulement de l'essai de cisaillement des rivets

La charge a été appliquée sur la partie supérieure de l'âme dans une configuration similaire à un essai de type « push-out ». Cette configuration vise à induire un effort de cisaillement pur sur le rivet, permettant d'évaluer sa résistance au cisaillement. La figure 5.23b montre clairement la disposition expérimentale.



(a) Éprouvette 01



(b) Éprouvette 02

FIG. 5.25 : Dimensions des éprouvettes

Déroulement de l'essai

L'essai de cisaillement a été réalisé sur deux éprouvettes, avec des procédures légèrement différentes en raison des contraintes expérimentales rencontrées.

Éprouvette 01 : L'essai s'est déroulé en cinq phases distinctes :

- Phase A : L'éprouvette a été placée dans la machine Zwick Rockwell de $200kN$, avec une limite de déformation fixée à 10. En cette phase, on n'a pas atteint la rupture.
- Phase B : La même machine a été utilisée sans limite de déformation. La force a été augmentée jusqu'à atteindre la capacité maximale de $200kN$, sans provoquer de rupture des rivets.
- Phase C : Passage à la machine Zwick Rockwell de $600kN$. Cette machine, équipée d'une rotule sur la plaque de charge, a nécessité un positionnement très précis. Durant cette phase, une rotation indésirable de l'âme autour de l'axe du rivet a été observée, comme illustré dans la figure 5.26.
- Phase D : Après redressage de la pièce, on a procédé à un rechargement sur la machine de $600kN$ avec une limite de déformation de 10.
- Phase E : Enfin, la limite de déformation a été retirée et la charge a été augmentée jusqu'au cisaillement du rivet.

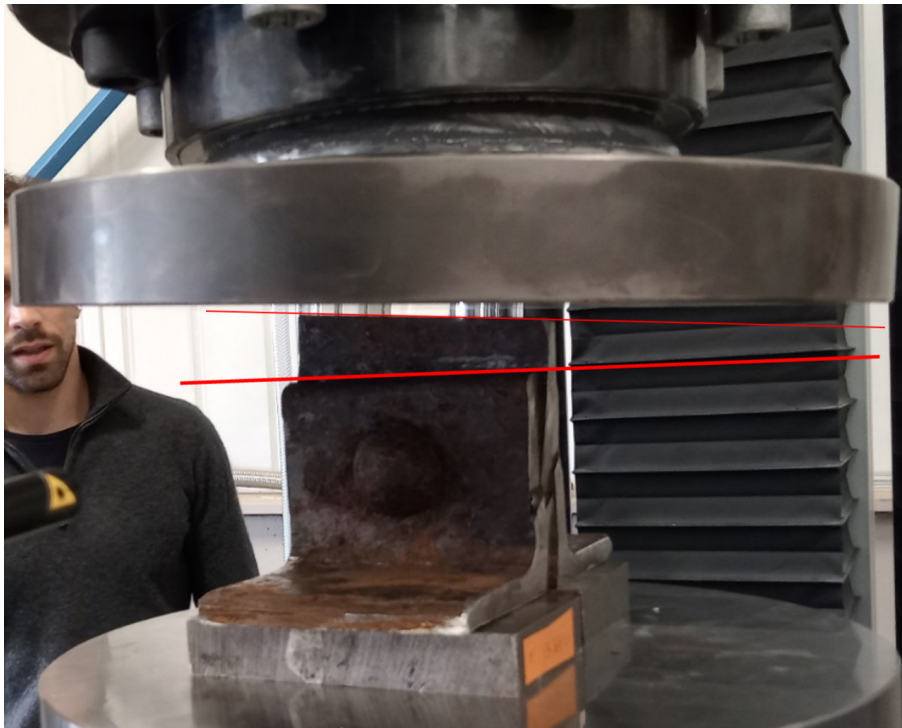


FIG. 5.26 : Rotation de l'âme autour du rivet

Éprouvette 02 : Pour l'éprouvette 02, le déroulement s'est fait en deux phases :

- Phase A : L'éprouvette a été testée sur la machine Zwick Rockwell de $200kN$, sans atteindre la rupture. Cela a permis d'obtenir des informations préliminaires sur le comportement du rivet.
- Phase B : L'éprouvette a ensuite été transférée à la machine de $600kN$, où elle a été chargée jusqu'à la rupture des rivets. Bien que cette machine ne soit pas équipée d'une caméra pour suivre les points de référence marqués précédemment, les données obtenues ont permis d'analyser le comportement des rivets sous charge.

La stratégie adoptée pour l'éprouvette 02, de passer d'abord par la machine à 200kN visait à maximiser les informations recueillies sur les déplacements des plaques et le glissement entre celles-ci. En utilisant d'abord la machine à 200kN , il a été possible d'observer les déplacements initiaux avant d'appliquer une charge plus importante sur la machine à 600kN . Bien que cette dernière ne permette pas le suivi visuel des points marqués, elle fournit le déplacement de la plaque de charge.

Résultats de l'essai

Les essais de cisaillement réalisés sur les rivets extraits des poutrelles du pont de Dallet ont fourni un ensemble de données comprenant le temps, la force appliquée, le déplacement du vérin, et les coordonnées (x, y) des trois points de référence marqués sur les cornières gauche et droite ainsi que sur l'âme.

Pour les phases utilisant la machine Zwick 200 kN équipée d'une caméra, l'analyse s'est concentrée sur le glissement relatif entre l'âme et les cornières. Ce glissement a été calculé selon la formule : $Glissement = \frac{x_1+x_3}{2} - x_2$ où x_1 , x_2 , et x_3 représentent respectivement les déplacements verticaux des points de référence sur la cornière gauche, l'âme, et la cornière droite. Pour les phases utilisant la machine Zwick 600 kN, ne disposant pas de caméra, l'analyse s'est basée sur la force appliquée et le déplacement du vérin.

Courbes force-déplacement :

Pour les phases des deux essais utilisant la Zwick 200kN , deux types de courbes force-déplacement ont été tracés. Une en fonction du déplacement du vérin donné par la machine, et l'autre en fonction du glissement calculé précédemment. Pour les phases utilisant la Zwick 600kN on n'a que la courbe en fonction du déplacement de vérin.

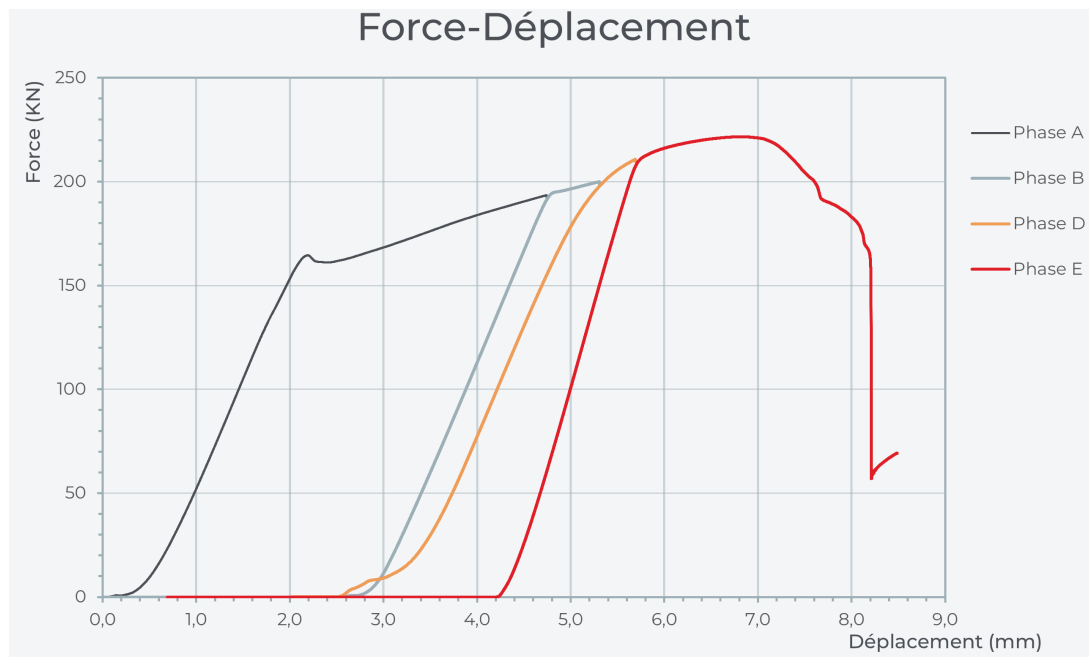


FIG. 5.27 : Courbes Force-Déplacement Éprouvette 01

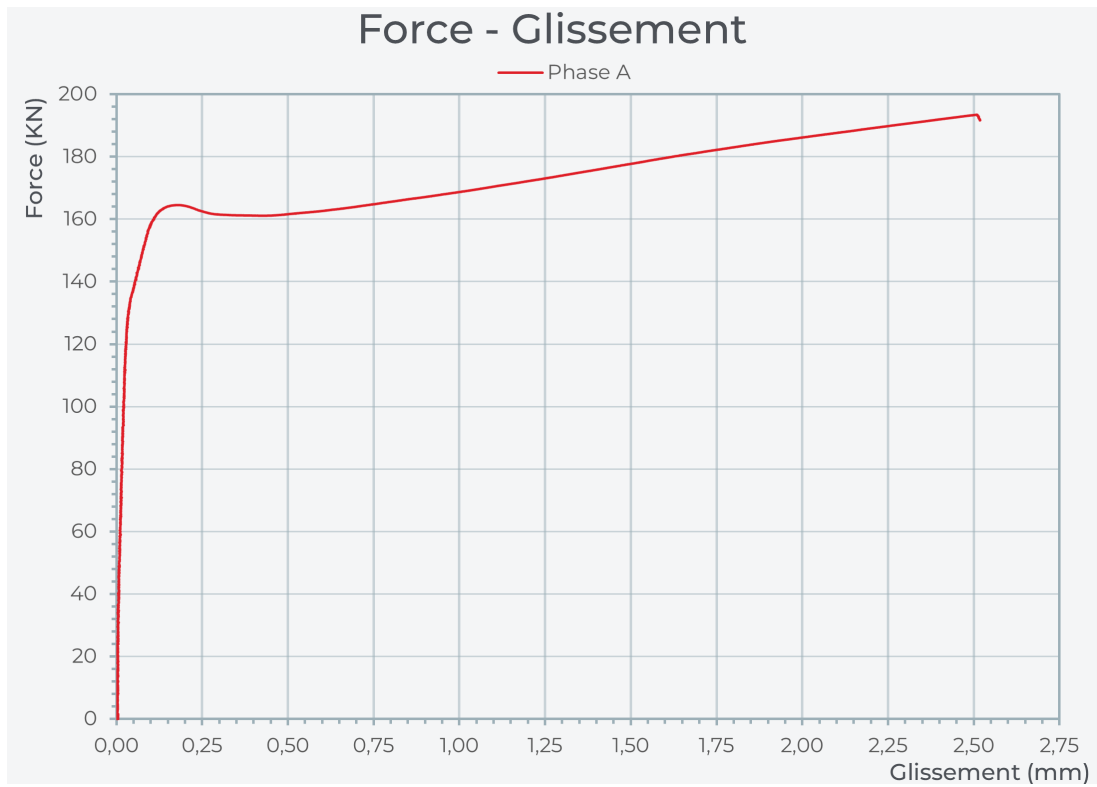


FIG. 5.28 : Courbe Force-Glisement Éprouvette 01

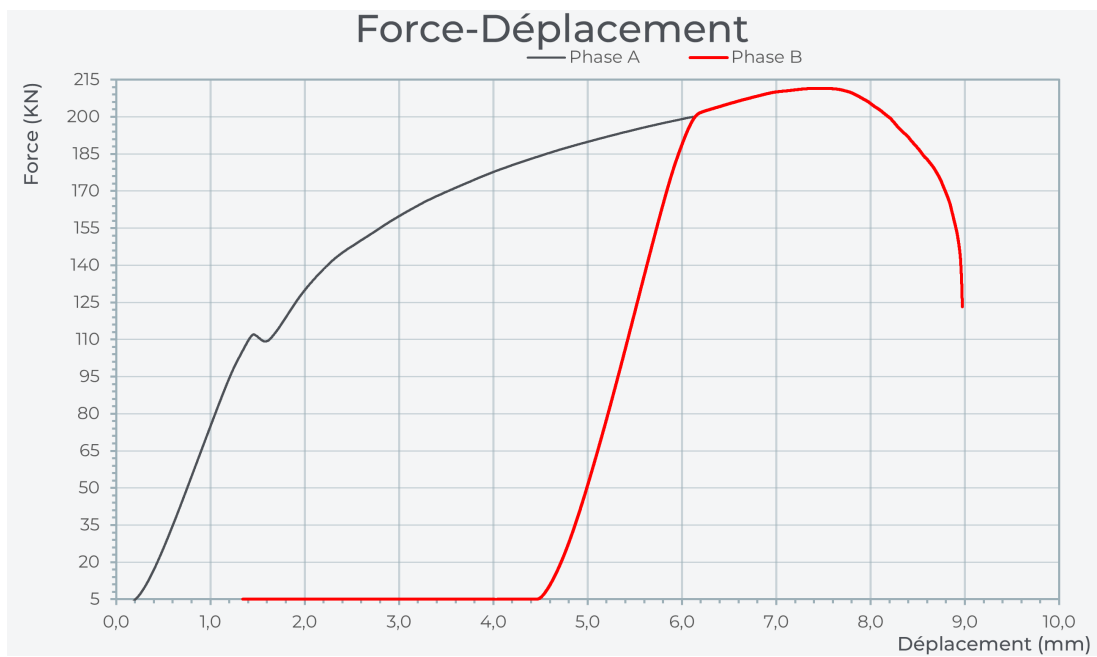


FIG. 5.29 : Courbes Force-Déplacement Éprouvette 02

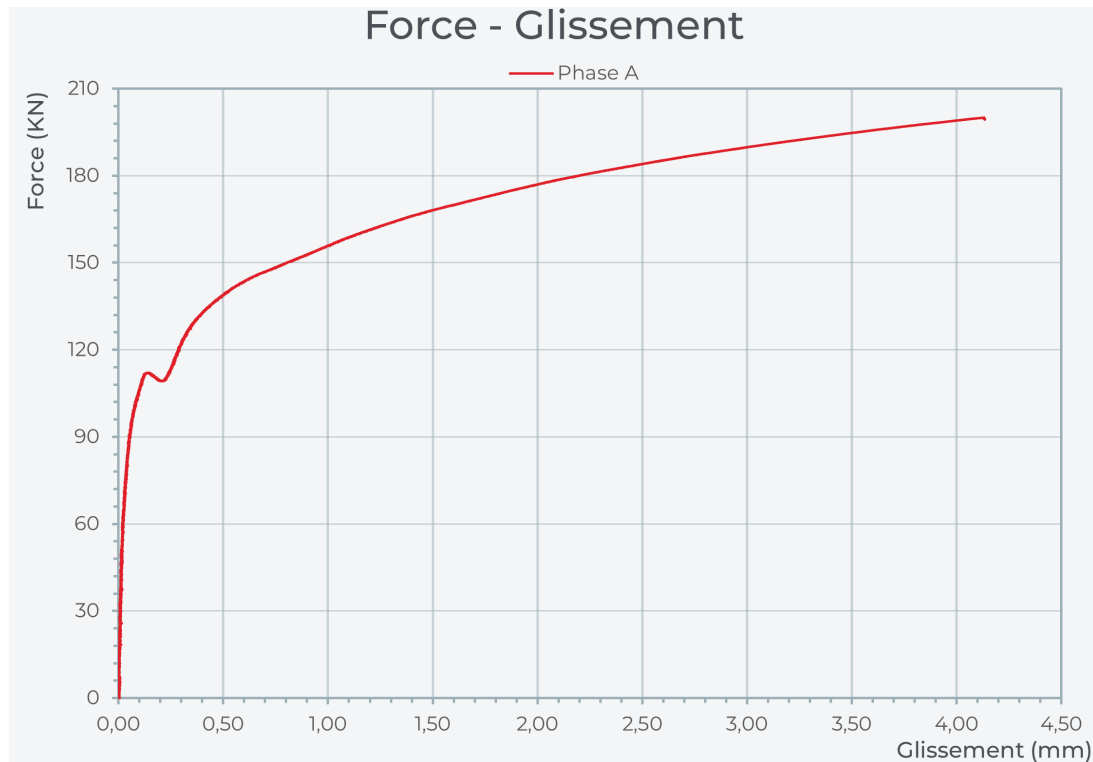


FIG. 5.30 : Courbe Force-Glisement Éprouvette 02

À partir des résultats de l'essai et des courbes tracées, on a pu avoir les données résumées dans le tableau 5.4.

TAB. 5.4 : Résultats de l'essai de cisaillement de rivet, poutrelles pont de Dallet

	Eprouvette 01	Eprouvette 02	Moyenne
Force de glissement (kN)	125,80	105,90	115,85
Force élastique (kN)	164,53	112,08	138,30
Force maximale (kN)	221,64	206,51	214,08
Pente initiale	118,70	119,16	118,93

Interprétation des résultats

En commençant par la force de glissement, l'éprouvette 01 présente une force supérieure de 18,8% à celle de l'éprouvette 02, ce qui se traduit par une force de serrage initiale plus élevée et ce qui confirme que les forces de serrage lors de la mise en place ne peuvent pas être identiques pour tous les rivets, ce qui revient à la méthode de mise en place à chaud très compliquée à contrôler parfaitement.

D'autre part, pour la résistance élastique, la différence est encore plus marquée, l'éprouvette 01 présentant une valeur 46,8% supérieure à celle de l'éprouvette 02. Cependant, pour l'éprouvette 02, il est compliqué de dire si la résistance élastique est due à la plastification du rivet ou bien si ça revient à l'effet de la pression diamétrale, car on peut remarquer sur la courbe qu'après la première diminution, la courbe a remonté puis elle a continué à changer d'allure.

Concernant la force maximale du cisaillement de rivet, l'écart se réduit, avec l'éprouvette 01 présentant une valeur 7,3% supérieure à celle de l'éprouvette 02. Cette différence moins prononcée suggère que, malgré les variations initiales, les deux rivets atteignent des capacités ultimes relativement proches. En terme de pente initiale de chargement, les valeurs obtenues pour les deux éprouvettes sont très proches avec une différence de seulement 0.39%, ce qui indique une rigidité initiale comparable des assemblages. Et avec ces valeurs, on peut confirmer que les différences observées sont principalement dues aux conditions de serrage et non à des variations significatives dans les propriétés mécaniques du matériau des rivets ou dans la géométrie globale de l'assemblage.

5.5.4 Essai de dureté Brinell

L'essai de dureté Brinell a été réalisé sur les éprouvettes précédemment testées en traction, et a pour objectif d'évaluer la dureté des différentes parties des poutrelles, d'estimer la résistance à la traction à partir des valeurs de dureté et la comparer avec celle de l'essai de traction et d'évaluer l'homogénéité des propriétés mécaniques au sein de chaque élément.

Principe et déroulement de l'essai

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer une force F sur une bille en acier dur qui laisse une empreinte permanente sur la surface de l'échantillon. La dureté Brinell (HB) est calculée selon la formule :

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

où F est la force appliquée (en N), D est le diamètre de la bille (en mm), et d est le diamètre moyen de l'empreinte (en mm).

Pour chaque partie des poutrelles (semelles 1 et 2, âmes 1 et 2), 15 mesures de dureté ont été effectuées à différents endroits pour évaluer la variabilité des propriétés.

Résultats et interprétation

Les résultats des essais de dureté Brinell sont les suivants :

TAB. 5.5 : Résultats des essais de dureté Brinell

Élément	Moyenne HB	Écart-type HB	Coefficient de variation
Semelle 1	34.3	6.4	18.7%
Semelle 2	33.0	4.8	14.5%
Âme 1	46.6	7.6	16.3%
Âme 2	47.0	4.8	10.2%

Les âmes présentent une dureté significativement plus élevée que les semelles, ce qui suggère des propriétés mécaniques différentes. La variabilité des mesures est relativement

importante, avec des coefficients de variation allant de 10 à 19%. Les deux semelles ont des duretés moyennes similaires, de même pour les deux âmes, ce qui indique une certaine homogénéité entre les éléments symétriques de la poutrelle.

Estimation de la résistance à la traction :

D'après la littérature, Pavlina et Van Tyne (2008) ont montré que la relation entre dureté et résistance à la traction peut varier significativement selon le type d'acier et son traitement thermique, Murakami et al. (2002) ont souligné que pour les aciers anciens, les relations standard entre dureté et résistance peuvent ne pas être applicables en raison de leur microstructure et composition chimique spécifiques, et enfin O'Neill (1967) a mis en évidence que la conversion de la dureté en résistance à la traction est plus précise pour les aciers modernes normalisés que pour les aciers anciens. On va nous-mêmes vérifier ces informations et voir si, pour le fer puddlé issu du pont de Dallet, l'essai de dureté peut être suffisant ou non.

Pour estimer la résistance à la traction à partir de la dureté Brinell, on peut utiliser la relation approximative suivante pour les aciers :

$$R_m \approx 3,45 \cdot HB$$

Où R_m est la résistance à la traction en MPa et HB est la dureté Brinell.

Appliquons cette relation à nos résultats, on obtient :

TAB. 5.6 : Estimation de la résistance à la traction à partir de la dureté pour chaque élément

Élément	Dureté moyenne HB	Résistance estimée (MPa)
Semelle 1	34.3	118.3
Semelle 2	33.0	113.9
Âme 1	46.6	160.8
Âme 2	47.0	162.2

D'après le tableau 5.6 on peut remarquer qu'il y a une différence significative entre les valeurs de la résistance estimée des éprouvettes de l'âme et celles des semelles. Pour pouvoir valider la fiabilité de l'essai, on doit comparer ces résultats avec les résultats obtenus pendant l'essai de traction.

TAB. 5.7 : Comparaison entre les résistances estimées par essai de dureté et mesurées par essai de traction

Élément	Résistance estimée par dureté (MPa)	Résistance mesurée par traction (MPa)	Écart relatif (%)
Semelle 1	118.3	287.98	-58.9%
Semelle 2	113.9	272.26	-58.2%
Âme 1	160.8	344.88	-53.4%
Âme 2	162.2	303.15	-46.5%
Moyenne	138.8	302.07	-54.1%

D'après le tableau comparatif, on observe une sous-estimation systématiquement de la résistance à la traction pour l'essai de dureté, avec des écarts relatifs allant de -46.5% à -58.9% . La sous-estimation est légèrement plus prononcée pour les semelles que pour les âmes, cela peut revenir aux dimensions minces de cette dernière. Malgré ces écarts importants, l'essai de dureté a correctement identifié que les âmes ont une résistance supérieure aux semelles, en cohérence avec les résultats de l'essai de traction.

La relation empirique utilisée ($R_m \approx 3.45 \times HB$) semble inadéquate pour ce type d'acier ancien, nécessitant probablement une calibration spécifique pour les aciers de construction historiques. L'essai de dureté reste utile pour une évaluation comparative rapide et non destructive des propriétés mécaniques relatives au sein d'une structure, surtout lorsqu'on va les réemployer, mais ne peut pas remplacer l'essai de traction pour une caractérisation précise des propriétés mécaniques.

En conclusion, cette étude comparative entre l'essai de dureté et l'essai de traction met en évidence les avantages et les limites de l'essai de dureté pour l'évaluation des propriétés mécaniques des aciers anciens pour leur réemploi. L'essai de dureté peut être utilisé pour obtenir une estimation de l'ordre de grandeur des résistances mécaniques, à condition d'avoir un échantillon de référence du même matériau testé en traction pour établir une corrélation spécifique. Cette approche combinatoire entre les deux essais permet d'obtenir rapidement des informations comparatives sur les propriétés relatives des différentes parties d'une structure et d'évaluer ou d'identifier des zones nécessitant une investigation plus approfondie. Cependant, il est très important aussi de tenir compte des hétérogénéités des matériaux, particulièrement prononcées dans les aciers anciens. Par conséquent, bien que l'essai de dureté offre une méthode non destructive et rapide pour une première évaluation, il ne peut pas remplacer entièrement les essais de traction pour une caractérisation précise et fiable des propriétés mécaniques.

5.6 Calcul analytique des poutrelles

5.6.1 Hypothèse et principe de base

Le calcul des poutres métalliques et mixtes repose sur plusieurs hypothèses fondamentales et principes établis en résistance des matériaux et en théorie des poutres. Ces hypothèses permettent de simplifier l'analyse tout en fournissant des résultats suffisamment précis pour la pratique. Les principales hypothèses sont les suivantes :

- **Modèle de Bernoulli-Euler :**

Également connu sous le nom de théorie des poutres classiques, c'est une simplification de la théorie de l'élasticité linéaire qui permet l'analyse du comportement des poutres sous flexion. Il repose sur les hypothèses suivantes :

- Les sections planes perpendiculaires à l'axe de la poutre avant déformation restent planes et perpendiculaires à cet axe après déformation.
- La déformation axiale de la fibre neutre de la poutre est négligeable.
- Les déplacements transversaux sont petits par rapport aux dimensions de la poutre.

Ces hypothèses permettent d'établir une relation linéaire entre le moment fléchissant M et la courbure κ de la poutre : $M = EI\kappa$ où E est le module de Young du matériau et I le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre.

- **Comportement élastique linéaire de l'acier :**

On considère que l'acier a un comportement élastique linéaire jusqu'à sa limite d'élasticité. La relation contrainte-déformation est donc supposée linéaire et régie par la loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \varepsilon$ où σ est la contrainte, E le module d'Young de l'acier, et ε la déformation.

- **Petites déformations :**

On suppose que les déformations et les déplacements restent petits par rapport aux dimensions de la poutre. Cette hypothèse permet de simplifier les équations d'équilibre et les relations cinématiques.

- **Adhérence parfaite entre l'acier et le béton (pour les poutres mixtes) :**

Pour les poutres mixtes acier-béton, on suppose une adhérence parfaite entre les deux matériaux au niveau de l'interface, assurée par les connecteurs. Cette hypothèse permet de considérer une section homogénéisée.

- **Coefficient d'équivalence acier-béton :**

Pour homogénéiser la section mixte, on utilise un coefficient d'équivalence $n = \frac{E_a}{E_c}$, où E_a et E_c sont respectivement les modules de Young de l'acier et du béton. Ce coefficient permet de ramener les propriétés du béton à celles de l'acier.

- **Résistance nulle du béton en traction :**

Dans les calculs de résistance, on néglige généralement la résistance à la traction du béton, celle-ci étant faible par rapport à sa résistance en compression.

5.6.2 Analyse de la poutrelle métallique seule

Caractéristiques géométriques de la section

Comme nous l'avons présenté précédemment, la section en I est composée d'une âme et de quatre cornières formant les semelles (voir figure 5.4). Cependant, lors des essais, nous avons constaté une variation dans les épaisseurs et les dimensions des éléments en général. Cette variabilité est courante dans les structures anciennes et peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment les tolérances de fabrication de l'époque et les éventuelles déformations ou corrosion survenues au cours de la vie de l'ouvrage.

Afin d'obtenir une représentation plus fidèle de la structure réelle, nous avons effectué plusieurs mesures sur les éléments de la poutrelle. Les valeurs moyennes résultant de ces mesures sont présentées dans la figure 5.31. Ces dimensions ajustées seront utilisées pour nos calculs subséquents,

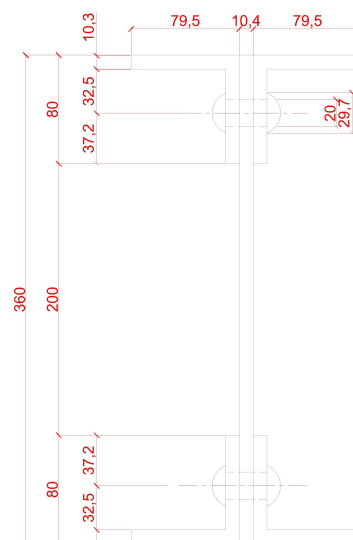


FIG. 5.31 : Section corrigée

nous permettant ainsi d'obtenir des résultats plus proches de la réalité de la structure existante.

L'utilisation de ces dimensions « as-built » est nécessaire non seulement pour l'évaluation précise de la capacité portante actuelle de la poutrelle, mais aussi pour notre proposition de renforcement par mixité. En effet, la conception d'une solution de renforcement adaptée nécessite une connaissance exacte de la géométrie de la structure existante.

Calcul des caractéristiques de la section :

L'aire de la section : $A = (10,4 \times 360) + 4 \times (79,5 \times 10,3 + 69,7 \times 10,3) = 9891,04 \text{ mm}^2$

Position du centre de gravité par rapport à la fibre inférieure : on peut calculer sa position en utilisant la formule $y_G = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i}$, mais vu qu'on a supposé la section doublement symétrique, alors la position de l'axe : $y_G = \frac{h}{2} = 180 \text{ mm}$.

Moment d'inertie de la section : le moment d'inertie, qui quantifie la résistance de la section transversale à la flexion, est calculé pour cette section en I en prenant les dimensions globales de la section comme celles d'un rectangle plein. On détermine d'abord le moment d'inertie de ce rectangle. Par la suite, on calcule le moment d'inertie des espaces vides ou des sections non pleines et on les soustrait du moment d'inertie total du rectangle plein pour obtenir le moment d'inertie de la section en I.

$$I = \frac{169,4 \times 360^3}{12} - 2 \times \left(\frac{69,2 \times 339,4^3}{12} + \frac{10,3 \times 200^3}{12} \right) = 193,98 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Module élastique de la section : $W_{el} = \frac{I}{y_{max}} = \frac{193,98 \times 10^6}{180} = 1,08 \times 10^6 \text{ mm}^3$

Module de section plastique : $W_{pl} = 2 \times S^* = 1,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$

Calcul du moment résistant élastique :

Le moment élastique est le moment fléchissant maximal que la section peut supporter sans dépasser la limite élastique du matériau. Il est calculé en utilisant la formule : $M_{el,Rd} = W_{el} \times \sigma_e$ Où σ_y est la contrainte de limite élastique du matériau, on prend pour la moyenne qu'on a trouvée précédemment dans l'essai de traction.

On aura donc : $M_{el,Rd} = W_{el} \times \sigma_e = 1,08 \times 10^6 \times 237,21 = 256,19 \text{ KNm}$

Calcul du moment résistant plastique :

Le moment plastique est le moment fléchissant auquel la section atteint une distribution de contrainte plastique complète sur toute la section. Il se calcule comme suit :

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \times \sigma_e = 1,3 \times 10^6 \times 237,21 = 308,37 \text{ KNm}$$

Calcul de la résistance au cisaillement de la section :

Après avoir déterminé le moment plastique, il est important de calculer l'effort tranchant plastique pour évaluer la capacité de la poutrelle à résister aux forces de cisaillement qui peuvent provoquer une rupture avant que la poutrelle atteigne sa pleine capacité de flexion plastique.

L'effort tranchant plastique V_p , est la valeur maximale de l'effort tranchant que la section peut supporter en régime plastique complet.

Pour des sections complexes comme la section de notre poutrelle, l'effort tranchant plastique peut être calculé en considérant l'aire de l'âme, qui est généralement la partie la plus sollicitée en cisaillement :

$$A_{ame} = 360 \times 10,4 = 3744 \text{mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{3744 \times 237,21}{\sqrt{3} \times 1} = 512,75 \text{kN}$$

Estimation de l'effort dans les rivets :

Selon l'EN 1993-1-8, la résistance des rivets en cisaillement est la même que celle en traction $F_{v,Rd} = F_{t,Rd}$ et se calcule selon la formule suivante : $F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_u A_0}{\gamma_{M2}}$

Où f_u est la résistance ultime du rivet, on prend la moyenne obtenue dans l'essai de cisaillement de rivet ; A_0 est l'aire de la section du trou, on a un trou de $d = 21 \text{mm}$ de diamètre, donc $A_0 = \pi d^2 / 4 = 346,36 \text{mm}^2$; et le coefficient de sécurité $\gamma_{M2} = 1.25$.

$$\text{Donc on aura } F_{v,Rd} = \frac{0,6 \times 214,18 \times 346,36}{1,25} = 35,61 \text{kN} \text{ par plan de cisaillement.}$$

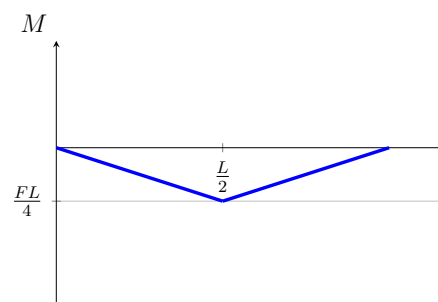
Notre section contient deux rivets où chaque rivet est doublement cisailé donc on aura pour les quatre plans de cisaillement :

$$F_{v,Rd} = 4 \times 35,61 = 142,44 \text{kN}$$

Estimation de la force maximale de rupture F_u :

On va déjà le calculer pour la poutrelle étant iso-statique (simplement supportée) avec une charge concentrée au milieu. Le moment fléchissant maximal se produit au point de l'application de la charge. Le diagramme du moment fléchissant pour une telle poutrelle est triangulaire avec le pic au centre de la poutrelle. Le moment fléchissant maximal est donné par la formule :

$$M_{max} = \frac{F_u \times L}{4} \Rightarrow F_u = \frac{4 \times M_{max}}{L}$$



Où F_u est la force maximale et L est l'entraxe d'appui de la poutrelle, pour notre cas $L = 2,74 \text{m}$.

En remplaçant le moment fléchissant maximal M_{max} par la valeur du moment plastique résistant qu'on a calculé, on aura :

$$F_u = \frac{4 \times 308,37}{2740} = 450,18 \text{kN}$$

Calcul de la flèche :

La flèche δ est la déformation verticale d'une poutre sous charge. Pour une poutre simplement supportée avec une charge concentrée au milieu, la flèche maximale δ_{max} peut être calculée par la formule suivante : $\delta_{max} = \frac{F_u L^3}{48EI}$

où : F est la charge concentrée appliquée au milieu de la poutrelle, L est l'entraxe des appuis de la poutrelle, E est le module d'élasticité du matériau, on prend la moyenne obtenue dans les essais de traction $209,49GPa$; et I est le moment d'inertie de la section transversale de la poutrelle.

$$\text{La flèche maximale sera donc : } \delta_{max} = \frac{450,18 \times 10^3 \times 2740^3}{48 \times 209,49 \times 10^3 \times 193,98 \times 10^6} = 4,75mm$$

Calcul de la raideur initiale de la poutrelle :

La rigidité d'une poutrelle représente sa capacité à résister à la déformation sous l'effet d'une charge appliquée. Elle est généralement exprimée par la relation entre la charge appliquée et la flèche (déplacement vertical) résultante.

Pour une poutrelle simplement appuyée soumise à une charge concentrée au milieu, la rigidité initiale k est donnée par : $k = \frac{F}{\delta} = \frac{48EI}{L^3}$.

$$\text{En remplaçant par nos valeurs, on aura : } k = \frac{48 \times 209,49 \times 10^3 \times 193,98 \times 10^6}{2740^3} = 94,82kN/mm$$

5.6.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux

La comparaison entre les valeurs analytiques et expérimentales permet l'évaluation de la fiabilité des méthodes de calcul utilisées. Elle nous permet, en confrontant les prédictions théoriques aux mesures réelles, d'évaluer la précision et la pertinence des hypothèses simplificatrices utilisées dans les calculs analytiques. Elle nous permet aussi d'identifier les limites des modèles : Les écarts entre la théorie et l'expérience peuvent révéler des phénomènes non pris en compte dans les modèles analytiques, comme les effets locaux, les non-linéarités matérielles ou géométriques.

En termes de force maximale de rupture, on est à $450,18kN$ pour le calcul analytique contre $490,11kN$ pour les résultats expérimentaux, avec un écart de $8,15\%$. La force maximale expérimentale est légèrement supérieure à la valeur analytique. Cela peut s'expliquer par le fait que le calcul analytique utilise la limite d'élasticité moyenne, alors que le matériau réel peut avoir une résistance légèrement supérieure. De plus, le calcul analytique ne prend pas en compte l'écroutissement du matériau, qui peut augmenter la résistance ultime.

En terme de rigidité, la valeur analytique de $94,82kN/mm$ est significativement supérieure à celle obtenue dans l'essai de $59,59kN/mm$ avec un écart de $37,15\%$. Cela peut être dû à plusieurs facteurs : Le calcul analytique suppose une poutrelle parfaitement homogène, alors que la poutrelle réelle est composée de plusieurs éléments assemblés ainsi

que l'assemblage qui n'est pas du tout continu (Rivets) et qui est supposé dans les calculs comme parfait ; Le calcul est fait en utilisant le modèle de Bernouli-Euler qui ne prend pas en compte les déformations dues à l'effort tranchant ; Les conditions d'appui réelles peuvent différer des hypothèses idéales utilisées dans le calcul analytique ; Les déformations locales aux points d'application de la charge et aux appuis, non prises en compte dans le calcul analytique, peuvent contribuer à une rigidité apparente plus faible.

Correction de la flèche et de la raideur initiale

Pour corriger la flèche et la raideur de la poutrelle calculées analytiquement, on doit sortir du modèle des poutrelles classiques qui néglige la déformation due à l'effort tranchant et utiliser plutôt le modèle de Timoshenko. Ce modèle prend en compte les effets de cisaillement, ce qui le rend plus précis pour les poutrelles courtes et épaisses où ces effets sont significatifs.

La déformation totale selon le modèle de Timoshenko est la somme de la déformation due à la flexion et de la déformation due au cisaillement :

$$\delta_{\text{Timoshenko}} = \delta_{\text{flexion}} + \delta_{\text{cisaillement}}$$

Et cela se dérive de la formule de l'énergie de déformation d'une poutre : L'énergie de déformation emmagasinée dans un tronçon de poutre de longueur dx est égale à :

$$dE_{\text{def}} = \underbrace{\frac{N^2}{2EA} dx}_{\text{Effort Normal}} + \underbrace{\frac{M_{fz}^2}{2EI_z} dx + \frac{T_y^2}{2G A \kappa_y} dx}_{\text{Flexion dans le plan (x, y)}} + \underbrace{\frac{M_{fy}^2}{2EI_y} dx + \frac{T_z^2}{2G A \kappa_z} dx}_{\text{Flexion dans le plan (x, z)}} + \underbrace{\frac{M_t^2}{2GJ} dx}_{\text{Torsion}}$$

Avec :

- E et ν sont respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau.
- A est l'aire de la section transversale.
- J est la constante de torsion de Saint-Venant.
- I_y et I_z sont les moments quadratiques centraux principaux de la section.
- k_y et k_z sont les coefficients de cisaillement de Timoshenko.
- N est l'effort normal.
- M_{fy} et M_{fz} sont les moments fléchissants.
- T_y et T_z sont les efforts tranchants.
- M_t est le moment de torsion.

Pour nous, on a une flexion dans le plan (x, y) , donc l'énergie de déformation devient :

$$dE_{\text{def}} = \frac{M_{fz}^2}{2EI_z} dx + \frac{T_y^2}{2GA \kappa_y} dx$$

On a d'autre part le moment fléchissant dans la poutrelle :

$$Mf_z(0 - \frac{L}{2}) = \frac{F}{2} x \quad ; \quad Mf_z(\frac{L}{2} - L) = \frac{F}{2} (L - x)$$

L'effort tranchant :

$$T_y(0 - \frac{L}{2}) = \frac{F}{2} \quad ; \quad T_y(\frac{L}{2} - L) = -\frac{F}{2}$$

L'énergie de la déformation est égale à :

$$\begin{aligned} E_{\text{def}} &= 2 \times E_{\text{def}}(0 - \frac{L}{2}) \\ &= 2 \times \frac{1}{2} \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{F^2}{4EI_z} x^2 dx + \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{F^2}{4GA\kappa_y} dx \\ &= \frac{1}{EI_z} \frac{F^2 L^3}{96} + \frac{1}{GA\kappa_y} \frac{F^2 L}{8} \end{aligned}$$

Et en appliquant le théorème de Castigliano, on obtiendra la formule de la flèche corrigée :

$$\delta = \frac{\partial E_{\text{def}}}{\partial F} = \underbrace{\frac{FL^3}{48EI_z}}_{\delta_{\text{flexion}}} + \underbrace{\frac{FL}{4GA\kappa_y}}_{\delta_{\text{cisaillement}}}$$

Pour pouvoir calculer la flèche due au cisaillement, on aura besoin du module de cisaillement G et du coefficient de cisaillement κ ,

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{209,49 \times 10^3}{2 \times 1 + 0.3} = 80,57 \text{ GPa}$$

Pour le calcul de κ , d'après "G. R. COWPER" pour une section en I, la formule du coefficient de cisaillement est :

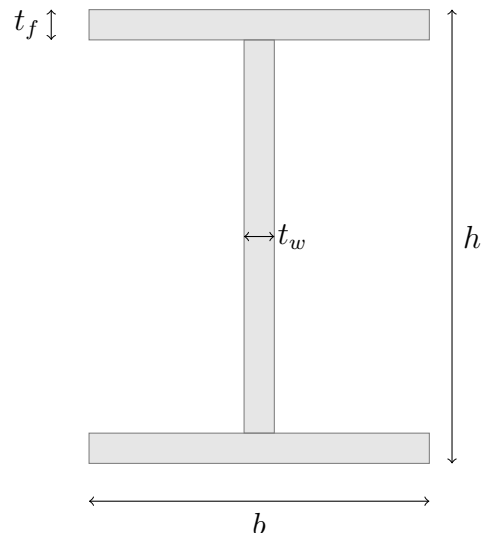
$$\kappa = \frac{10(1 + \nu)(1 + 3m)^2}{(12 + 72m + 150m^2 + 90m^3) + \nu(11 + 66m + 135m^2 + 90m^3) + 30n^2(m + m^2) + 5\nu n^2(8m + 9m^2)}$$

$$\text{Avec : } m = \frac{2bt_f}{ht_w} \quad ; \quad n = \frac{b}{h}$$

Pour notre cas et afin de simplifier le calcul, on va prendre notre poutrelle à une poutre I avec les dimensions : $t_f = 10,3 \text{ mm}$; $t_w = 10,4 \text{ mm}$; $h = 360 \text{ mm}$; $b = 169,4 \text{ mm}$ En utilisant un fichier Excel pour ce calcul on a obtenu : $\kappa = 0,5$

La raideur initiale de la poutrelle devient donc :

$$\begin{aligned} k &= \frac{F}{\delta} = \frac{F}{\frac{FL^3}{48EI_z} + \frac{FL}{4GA\kappa_y}} = \frac{1}{\frac{4L^3GA\kappa_y + 48LEI_z}{192EI_zGA\kappa_y}} \\ &= \frac{192EI_zGA\kappa_y}{4L^3GA\kappa_y + 48LEI_z} \end{aligned}$$



Application Numérique :

$$k = \frac{192 \times 209,49 \times 10^3 \times 193,98 \times 10^6 \times 80,57 \times 10^3 \times 9891,04 \times 0,5}{4 \times 2740^3 \times 80,57 \times 10^3 \times 9891,04 \times 0,5 + 48 \times 2740 \times 209,49 \times 10^3 \times 193,98 \times 10^6}$$

$$= 81,53 \text{ kN/mm}$$

Si on compare cette valeur avec la première valeur, on peut conclure qu'une importante déformation résulte de cisaillement, et ça, c'est dû à la grande hauteur de notre section avec un écart de 14% de rigidité. Cependant, on est toujours loin de la valeur expérimentale. Donc, pour la partie de calcul mixte, on va se concentrer sur les calculs analytiques pour la comparaison entre les deux structures (acier seul et poutrelles mixtes).

5.7 Calcul numérique des poutrelles

Dans le cadre de cette étude, une analyse par éléments finis a été effectuée à l'aide du logiciel ABAQUS afin de modéliser le comportement d'une poutrelle métallique. Trois approches de modélisation ont été explorées. La première approche consiste à modéliser la poutrelle dans sa totalité (3m de longueur). Dans la deuxième, seule la moitié de la poutrelle en longueur (1,5m) est modélisée, l'autre moitié étant obtenue par symétrie. Enfin, la troisième approche consiste à modéliser un quart de la poutrelle, en prenant à la fois la moitié de la longueur et de la largeur, le reste étant obtenu par symétrie, la poutrelle étant doublement symétrique. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients spécifiques. On peut résumer ces derniers dans le tableau 5.8 .

Les trois approches ont été explorées et pour chacune d'entre elles, on a eu des résultats qui seront présentés dans la suite de ce travail.

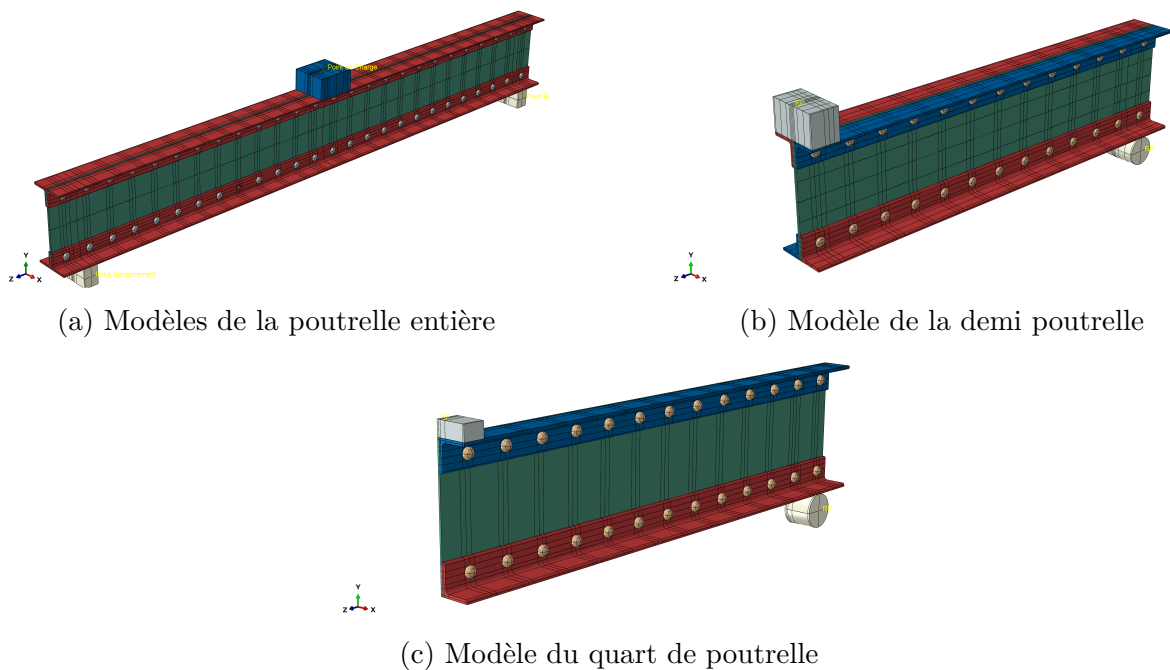


FIG. 5.32 : Modèle de calcul numérique

TAB. 5.8 : Comparaison des trois approches de modélisation

Modèle	Avantages	Inconvénients
Poutrelle entière	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation complète de la structure • Capture des effets de bord (déformations hors plan) • Prise en compte des instabilités géométriques • Meilleure précision globale • Modélisation de la précontrainte des rivets • Analyse des modes de flambement complexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de modélisation important • Temps de calcul très élevé • Interprétation complexe des résultats • Ressources informatiques importantes • Difficulté potentielle de convergence pour les calculs non linéaires
Demi-poutrelle	<ul style="list-style-type: none"> • Bon compromis précision/temps de calcul • Capture de la plupart des phénomènes importants • Modélisation de la précontrainte des rivets • Réduction du temps de calcul • Analyse des modes de flambement principaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte d'informations sur les effets asymétriques • Définition précise des conditions aux limites de symétrie • Temps de calcul encore élevé (section complexe) • Risque de manquer certains modes de flambement asymétriques
Quart de poutrelle	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de calcul très réduit • Utilisation minimale des ressources • Simplicité d'analyse et d'interprétation • Efficacité pour les études paramétriques • Convergence rapide (analyses non linéaires) 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte d'informations sur les phénomènes locaux • Limitations dans la représentation de certains modes de déformation • Impossibilité de modéliser la précontrainte des rivets sur l'axe de symétrie • Attention particulière aux conditions aux limites • Incapacité à capturer les modes de flambement complexes ou asymétriques

5.7.1 Hypothèses et propriétés des matériaux

On a modélisé les éléments de la poutrelles comme élément déformable « solid deformable body ». Les appuis et la plaque d'application de la force ont été modélisés comme élément rigide « solid discret rigid body ».

Pour des raisons de simplification et de convergence, nous avons utilisé le même acier pour les rivets que pour le reste de la structure, en raison également de l'indisponibilité des informations de traction spécifiques aux rivets. Les propriétés de l'acier utilisées sont les suivantes :

Élastiques :

- Module de Young : $E = 200GPa$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$

Plastiques : Le matériau a été modélisé comme élastoplastique avec écrouissage :

- Limite élastique : $f_y = 235MPa$
- Contrainte ultime : $f_u = 300MPa$

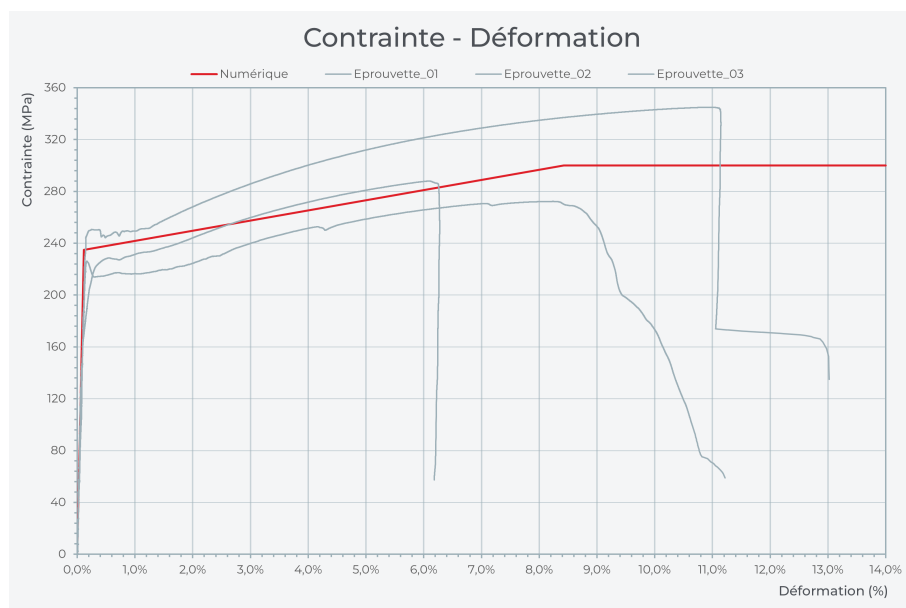


FIG. 5.33 : Comportement adopté, comparé aux résultats de recherches antérieures

5.7.2 Conditions aux limites et application de la charge

Pour chaque modèle, les conditions aux limites ont été définies comme suit :

- Encastrement des appuis (définis comme « Rigid Body »).
- Symétrie suivant l'axe Z (pour les modèles de demi-poutre et de quart de poutrelle).
- Symétrie suivant l'axe X (pour le modèle de quart de poutre).

La charge a été appliquée en définissant un point de référence sur l'élément rigide qui représente la plaque d'application de la charge, sur lequel une déformation $U2$ a été

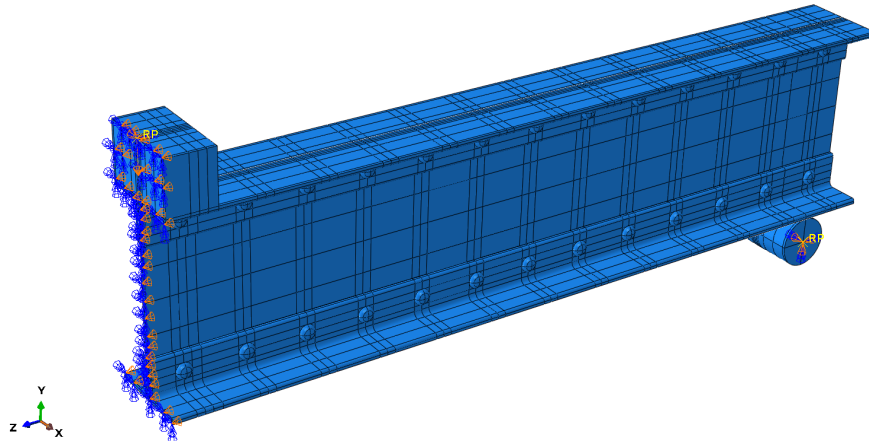


FIG. 5.35 : C.A.L Demi Poutre

imposée. On a deux étapes « Steps », la première, c'est « initial step » qui est défini par défaut par le logiciel, la deuxième, on l'a appelée « Loading step » et durant laquelle la charge est appliquée. Pour les tests où on a pris en compte la précontrainte des rivets, une phase supplémentaire pour la précontrainte a été ajoutée avant la phase de chargement.

Dans un premier essai du modèle de la poutre entière, on a précisé juste le déplacement $U_2 = -60$ (déplacement vertical) sans préciser U_1 et U_3 . Alors, on a eu une déformation qui n'était pas voulue : la plaque s'est déplacée dans l'espace. (figure 5.34)

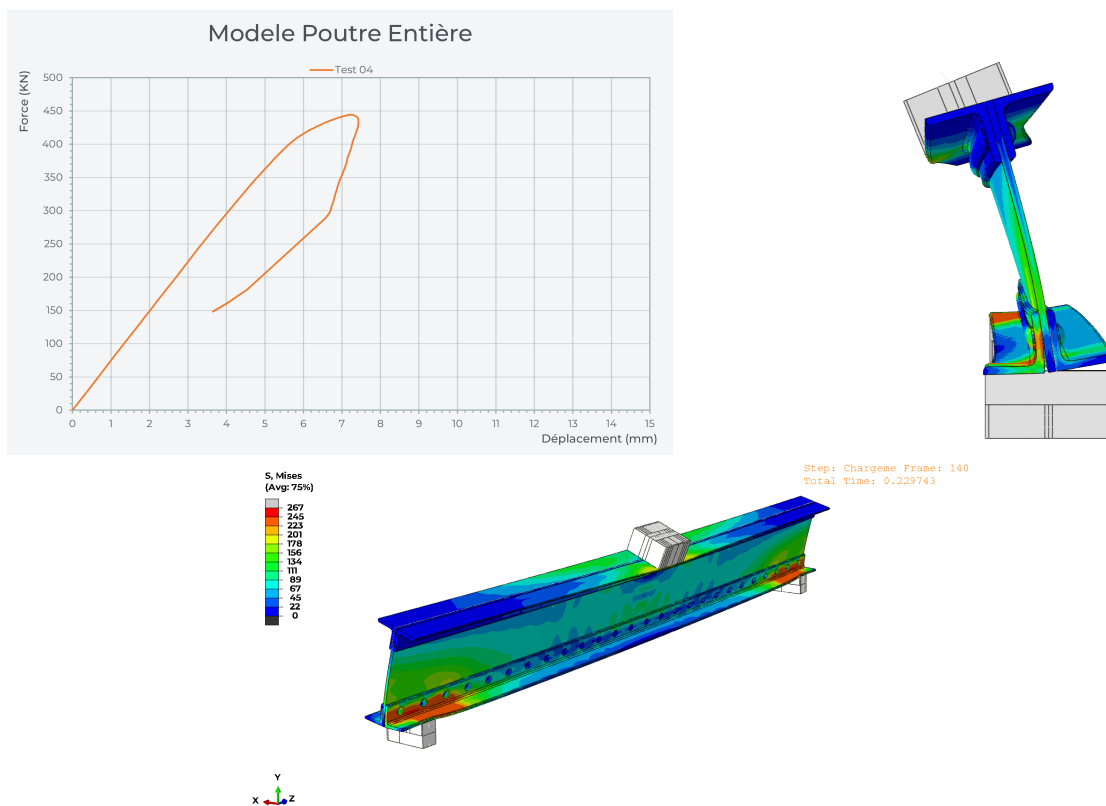


FIG. 5.34 : Essai 1 avec $U_1, U_3 \neq 0$

5.7.3 Interactions entre les éléments

Pour les interactions, on a mis « Général Contact » (Abaqus met automatiquement les propriétés des interactions qu'en va définir sur toutes les surfaces qui sont en contact) et on a pris les propriétés de contact comme suit :

On a pris « Contact Property » avec :

- Comportement tangentiel : frottement avec coefficient $\mu = 0,2$ (ce coefficient représente le coefficient de frottement entre les éléments métalliques dont la surface n'est pas traitée, selon l'Eurocode).
- Comportement normal : « Hard Contact », ce qui empêche la pénétration des éléments entre eux, avec la permission de la séparation après contact.

5.7.4 Maillage

Le maillage a été soigneusement conçu pour chaque élément de la structure modélisée. Pour tous les composants de la poutre, y compris l'âme, les cornières et les rivets, nous avons opté pour des éléments de forme hexaédrique « Hex » avec une technique de maillage structuré « Structured ». Ce choix permet d'obtenir un maillage régulier et de haute qualité, particulièrement adapté à la géométrie de ces éléments.

En ce qui concerne les appuis et la plaque de force, qui sont définis comme des corps rigides dans notre modèle, nous avons utilisé des éléments de forme quadrilatérale (Quad).

La densité du maillage a été ajustée en fonction de l'importance de chaque zone pour l'analyse. Les zones critiques, telles que les trous, les points de contact entre les rivets et les plaques et les bords, ont bénéficié d'un maillage plus fin pour capturer avec précision les concentrations de contraintes et les déformations locales. En revanche, les zones moins critiques ont été maillées avec des éléments plus grands pour optimiser le temps de calcul sans compromettre la précision globale du modèle.

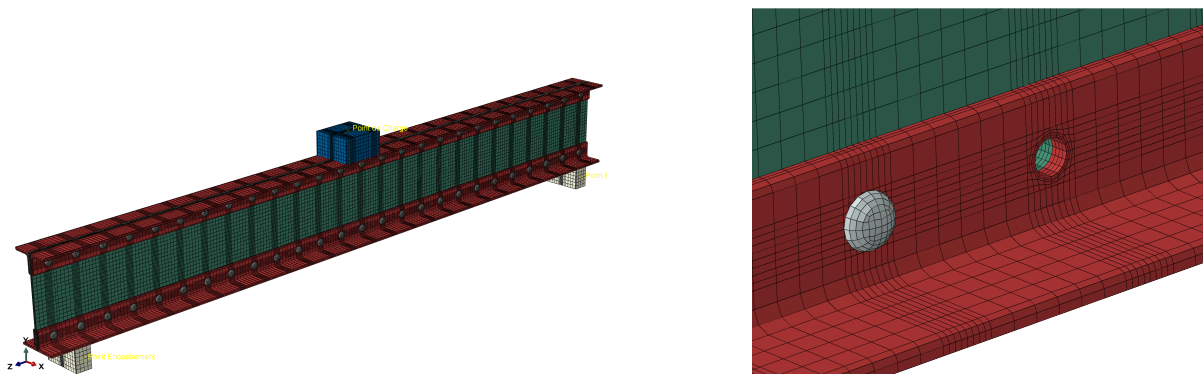


FIG. 5.36 : Maillage des poutrelles

5.7.5 Résultats du calcul numérique

Cette section présente les résultats obtenus à partir des trois modèles numériques développés pour l'étude de la poutre métallique. L'objectif principal était d'évaluer

l'influence de divers paramètres sur le comportement mécanique de la poutre, et d'avoir un modèle de la poutre qu'on peut utiliser pour des calculs futurs comme le calcul de la configuration mixte de la poutrelle par exemple, donc avoir un modèle qui reflète ou qui se rapproche du comportement réel de la poutrelle.

Modèle de la poutre entière

Au début, on a modélisé la poutre entière et on a utilisé ce modèle pour le calcul. Deux analyses ont été effectuées sur ce dernier : une avec une précontrainte dans les rivets de $50kN$ et une autre sans précontrainte. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

TAB. 5.9 : Résultats du modèle de la poutrelle entière

	Sans précontrainte	précontrainte 50kN	Écart
Rigidité initiale (kN/mm)	72,04	72,96	1,26%
Force élastique (kN)	403,50	404,91	0,35%

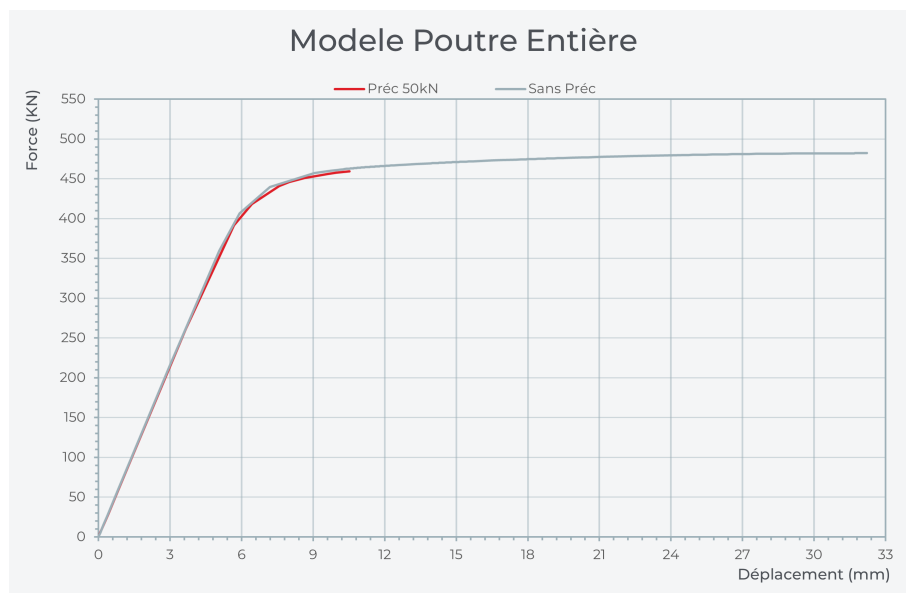
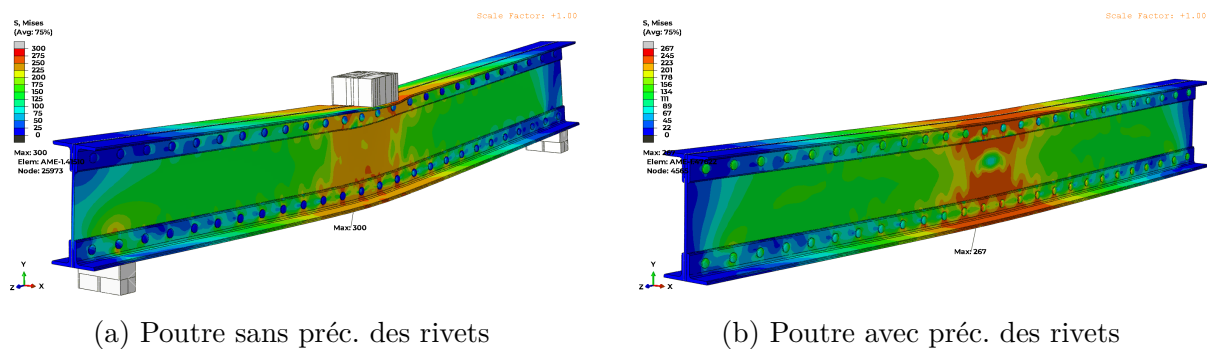


FIG. 5.37 : Graphe numérique poutre entière



(a) Poutre sans préc. des rivets

(b) Poutre avec préc. des rivets

FIG. 5.38 : Modèle poutre entière

Si on observe les résultats, l'écart en terme de force élastique est presque nul avec 0,35%, et en terme de rigidité, on a un écart de 1,26%, qui est très faible. Cela suggère que la précontrainte des rivets a un impact minimal sur la rigidité initiale de la poutre et n'a pas du tout d'impact sur la force élastique.

Modèle de la demi-poutre

Pour confirmer les résultats obtenus pour le modèle de la poutre entière, on a fait des analyses similaires sur le modèle de la demi-poutrelle. Le calcul pour ce modèle avec précontrainte n'a pas dépassé la phase élastique en raison de problèmes de convergence. Cependant, les rigidités initiales ont pu être récupérées et comparées :

TAB. 5.10 : Résultats du modèle de la demi-poutrelle

	Sans précontrainte	précontrainte 50kN	Écart
Rigidité initial (kN/mm)	68,26	68,74	0.7%

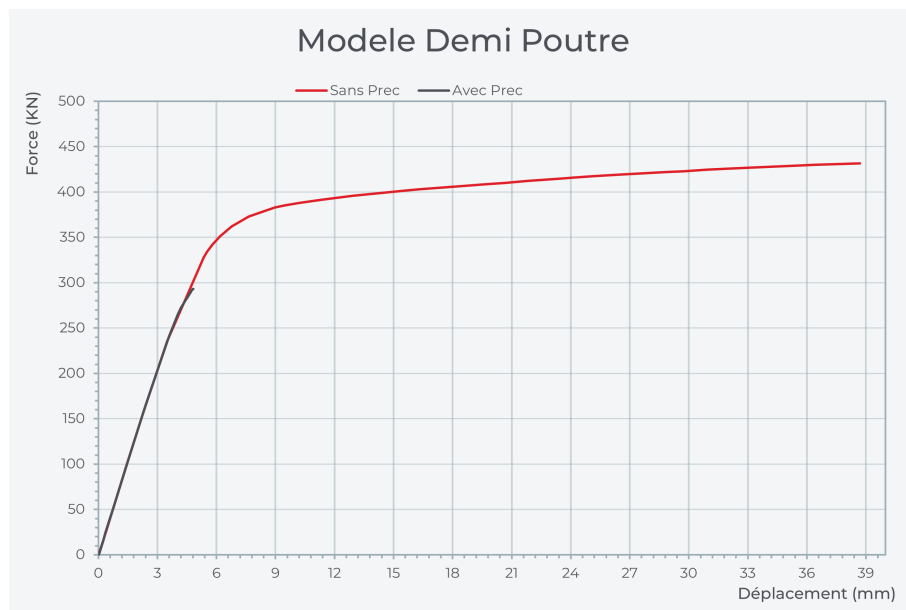


FIG. 5.39 : Graphe numérique demi poutre

L'écart de rigidité initiale est encore plus faible (0.7%), confirmant la conclusion précédente sur l'impact limité de la précontrainte des rivets sur la raideur initiale de la poutrelle.

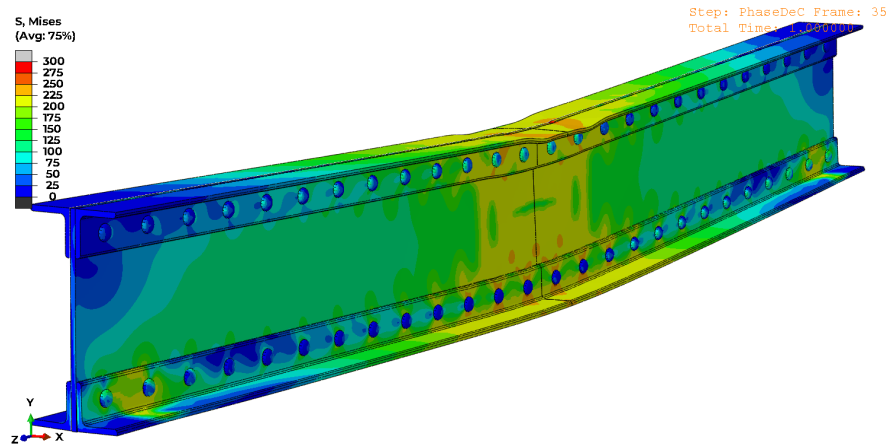


FIG. 5.40 : Déformation de la demi poutre sans préc.

Modèle du quart de poutre

Compte tenu des résultats précédents et de l'impossibilité de modélisation de la précontrainte des rivets pour le modèle à un quart de la poutrelle, les analyses suivantes se sont concentrées sur le modèle du quart de poutrelle sans précontrainte des rivets.

Dans un premier lieu, on a lancé le calcul de la poutre à un quart et on a obtenu les résultats suivants :

- Rigidité initiale : $69,43kN/mm$.
- Force élastique : $406,03kN$.
- Force à la rupture : $525,4kN$.

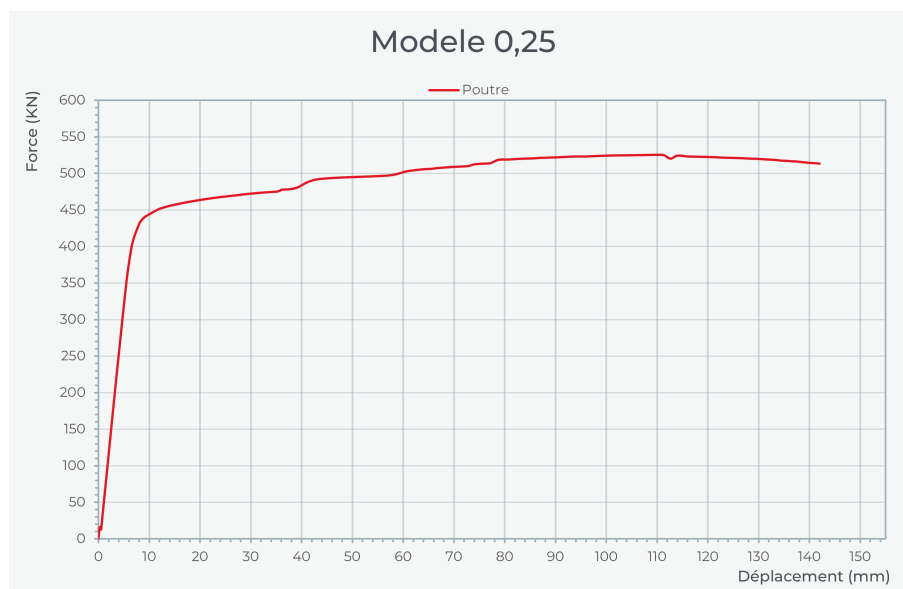


FIG. 5.41 : Graphe numérique quart de poutre

TAB. 5.11 : Comparaison avec les résultats analytiques et expérimentaux

Paramètre	Numérique	Analytique	Expérimental
Rigidité (kN/mm)	69,43	81,53	59,59
Force élastique (kN)	406,03	374,00	-
Force maximale (kN)	525,4	450,18	490,11

En comparant avec les résultats analytiques et les résultats expérimentaux obtenus précédemment, on observe des écarts significatifs entre les trois valeurs, particulièrement pour la rigidité. Ces différences peuvent s'expliquer par les hypothèses simplificatrices du calcul analytique, notamment la non-prise en compte des rivets et des trous, ainsi que l'hypothèse d'un contact parfait entre les éléments (la section est prise comme une seule section pour le calcul analytique).

Analyses de sensibilité

Pour mieux comprendre l'origine de ces écarts, des analyses de sensibilité ont été menées en modifiant certains paramètres du modèle numérique.

Modèle sans rivets, avec trous et contact parfait :

Dans ce modèle, les rivets ont été supprimés, les trous conservés, et un contact parfait entre les cornières et l'âme a été imposé à l'aide de l'option "Tie". Les résultats sont les suivants :

- Rigidité initiale : $67,88kN/mm$.
- Force élastique : $380,86kN$.
- Force à la rupture : $516,22kN$.

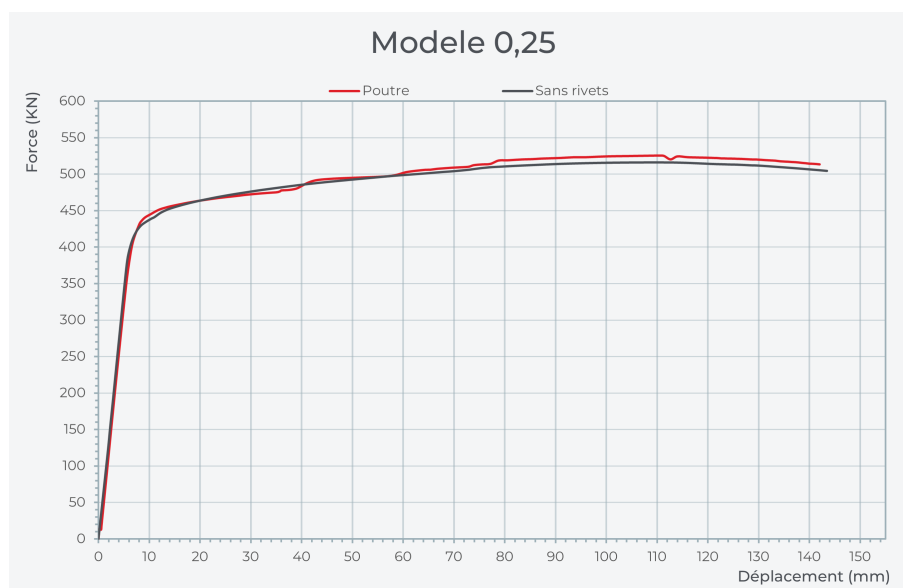


FIG. 5.42 : Graphe numérique quart de poutre

Ces résultats montrent un rapprochement avec les valeurs expérimentales, notamment pour la rigidité (écart de 12%) et la force de rupture (écart de 5,06%).

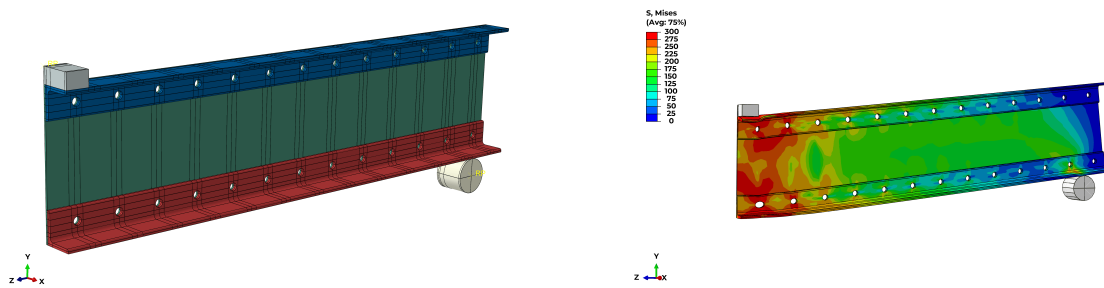


FIG. 5.43 : Modèle quart de poutre sans rivets

Modèle sans rivets, sans trous et avec contact parfait :

Dans cette configuration, les trous ont également été supprimés. Les résultats obtenus sont :

- Rigidité initiale : $78,7 \text{ kN/mm}$.
- Force élastique : $448,68 \text{ kN}$.
- Force à la rupture : $550,9 \text{ kN}$.

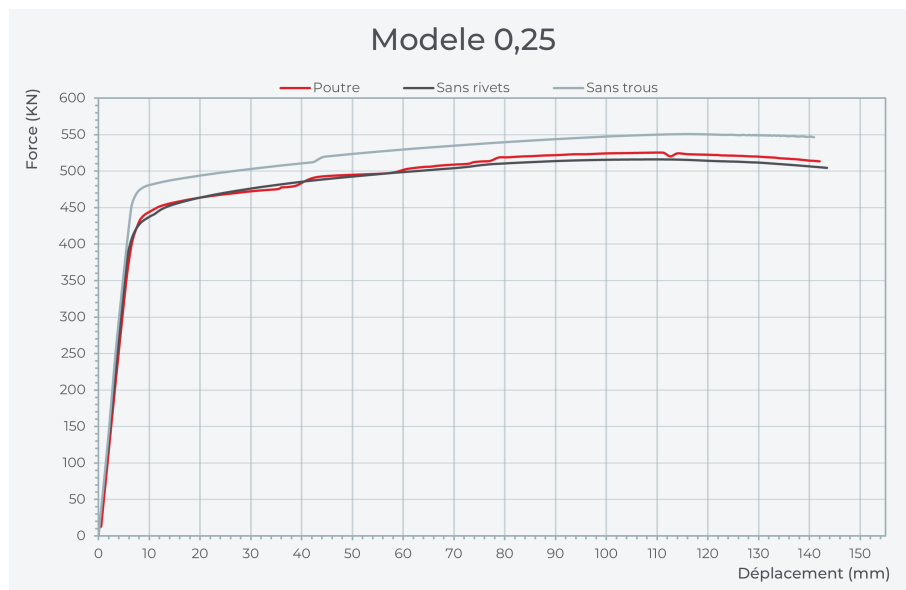


FIG. 5.44 : Graphe numérique quart de poutre

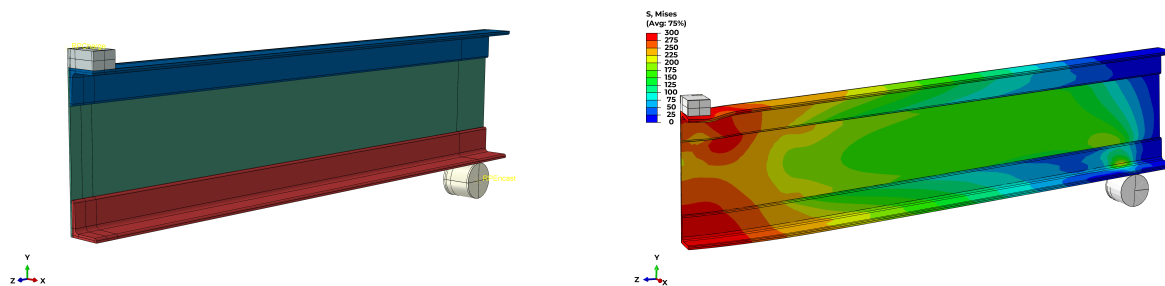


FIG. 5.45 : Modèle quart de poutre sans trous

On constate un rapprochement avec les valeurs analytiques pour la rigidité (écart de 3,47%), mais un éloignement pour les forces élastique et plastique (écarts de 21,4% et 18,28% respectivement).

Discussion des résultats

Influence de la précontrainte des rivets :

Les analyses sur les modèles de la poutre entière et de la demi-poutre ont montré que la précontrainte des rivets a un impact négligeable sur la rigidité initiale de la poutre. Cela suggère que, pour les analyses de comportement global de la structure, la modélisation précise de la précontrainte des rivets peut être omise sans affecter significativement les résultats.

Comparaison entre les modèles numériques et les résultats analytiques/expérimentaux :

Les écarts observés entre les résultats numériques initiaux et les valeurs analytiques et expérimentales peuvent être attribués aux facteurs suivants :

- Simplifications du modèle analytique : Le calcul analytique ne prend pas en compte les rivets, les trous, et suppose un contact parfait entre les éléments (section prise comme un seul élément). Ces hypothèses conduisent à une surestimation de la rigidité de la poutrelle.
- Propriétés des matériaux : Dans le modèle numérique initial, les propriétés de l'acier des rivets ont été considérées identiques à celles des autres éléments, ce qui peut ne pas refléter la réalité.
- Géométrie idéalisée : Le modèle numérique utilise des dimensions idéales, qui peuvent différer légèrement des dimensions réelles de la poutre testée expérimentalement.
- L'écart observé entre les valeurs expérimentales peut également s'expliquer par l'orientation du matériau. En effet, comme mentionné précédemment, le fer puddlé ne présente pas le même comportement en direction longitudinale qu'en direction transversale. Cette anisotropie peut entraîner des différences de rigidité (un f_y différent implique une rigidité différente) ainsi que des variations dans les forces limites atteintes.

Discussion des analyses de sensibilité :

Les analyses de sensibilité effectuées nous ont permis de mieux comprendre l'influence des paramètres testés sur le comportement de la poutrelle.

La suppression des rivets a rapproché les résultats numériques des valeurs expérimentales, notamment en terme de rigidité et de force à la rupture. Cela suggère que la modélisation des rivets dans leur état actuel pourrait ne pas représenter fidèlement leur comportement réel.

La suppression des trous a rapproché les résultats de rigidité des valeurs analytiques, mais a éloigné les résultats de force. Cela met en évidence l'importance de la modélisation précise de la géométrie, y compris les trous, pour obtenir des résultats cohérents avec la réalité.

5.8 Analyse de la poutrelle en configuration mixte

Les essais effectués sur la poutrelle métallique extraite du pont de Dallet ont révélé une conservation remarquable de ses propriétés mécaniques. Cette constatation ouvre la voie à des possibilités intéressantes de réemploi de ces éléments structuraux. Dans cette optique, nous avons décidé d'explorer le potentiel d'amélioration des performances de la poutrelle en la transformant en une structure mixte acier-béton.

L'objectif de cette analyse est d'évaluer les bénéfices et l'apport de l'ajout d'une dalle mince en béton sur les capacités de la poutrelle dans sa nouvelle configuration mixte. Pour ce faire, nous envisageons l'ajout d'une dalle de béton de 6 cm d'épaisseur (figure 5.46, connectée à la poutrelle métallique existante à l'aide de connecteurs appropriés.

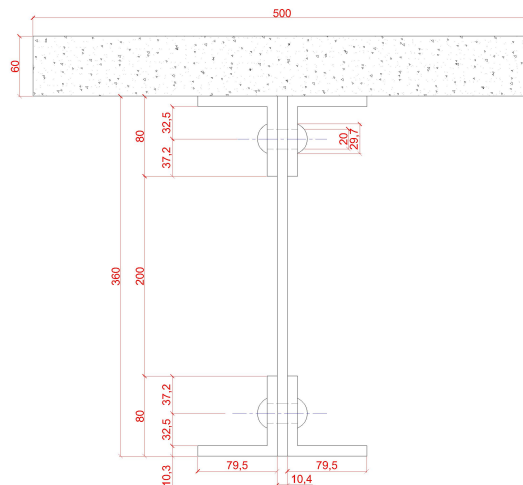


FIG. 5.46 : Dimensions de la configuration mixte

Dans les sections suivantes, nous présenterons les calculs analytiques effectués pour évaluer les performances de cette nouvelle configuration mixte. Nous comparerons ensuite ces résultats avec ceux de la poutrelle métallique seule, afin de quantifier les améliorations apportées par cette solution de réhabilitation innovante.

Caractéristiques des matériaux

Acier :

Pour la poutrelle métallique, nous utilisons les propriétés déterminées précédemment :

- Limite d'élasticité : $f_y = 237,21MPa$, valeur moyenne en traction.
- Module d'Young : $E_a = 209,49GPa$

Béton :

Nous considérons un béton de classe C25/30 :

- Résistance caractéristique en compression : $f_{ck} = 25MPa$
- Module d'élasticité sécant : $E_{cm} = 31GPa$ (selon l'Eurocode 2)
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,2$

Géométrie de la section mixte

poutrelle métallique :

Rappel des dimensions de la poutrelle métallique :

- Âme : $10,4 \times 360mm$
- Cornières : $4 \times (79,5 \times 80 \times 10,3mm)$

Dalle en béton :

On va prendre pour la section du béton la géométrie suivante :

- Largeur : $b_c = 500mm$ (largeur efficace donnée)
- Épaisseur : $h_c = 60$

Position de l'axe neutre

Pour déterminer la position de l'axe neutre, nous utilisons la méthode de la section homogénéisée. Le coefficient d'équivalence n est calculé comme suit : $n = \frac{E_a}{E_{cm}}$

En première approximation, on prend $E_{cm} = E_c$ pour les actions de courte durée.

$$n = \frac{E_a}{E_{cm}} = \frac{E_a}{E'_c} = \frac{2094900}{31000} = 6,76$$

Pour les actions de longue durée, le fluage (déformation différée) du béton va intervenir. Dans le cadre de la construction mixte, ce fluage va provoquer une redistribution des sollicitations, la dalle se déchargeant d'une partie de ses efforts sur la poutrelle métallique. Il convient de prendre en compte cet effet en utilisant un coefficient d'équivalence n_L pour le béton, dépendant du chargement : $n_L = n \cdot (1 + \psi_L \cdot \varphi_t)$

Où ψ_L est un multiplicateur dépendant du chargement (égal à 1,1 pour des charges permanentes) et φ_t le coefficient de fluage, environ égal à 2 pour un cas courant. Une manière simplifiée pour prendre en compte les effets du fluage est de réduire forfaitairement

la valeur du module d'élasticité E_{cm} , soit $E'_c = \frac{E_{cm}}{3}$, ou encore (ce qui revient au même) de choisir une autre valeur du coefficient d'équivalence, n' , telle que : $n' = 3n$

Pour les bâtiments usuels (et notamment ceux qui ne sont pas destinés au stockage), il est admis de mener tous les calculs avec un seul coefficient d'équivalence, n'' , valable aussi bien pour les actions à court terme que pour les actions à long terme, soit $E'_c = \frac{E_{cm}}{2}$, ou encore : $n'' = 2n$

Pour notre cas, on va utiliser pour le calcul à long terme $n'' = 2n$

Nous calculons ensuite les aires et les moments statiques par rapport à la fibre inférieure :

poutrelle métallique :

$$A_a = 9891,04 \text{ mm}^2 \text{ (calculé précédemment)}$$

$$S_a = A_a \times 180 = 1780387,2 \text{ mm}^3$$

Dalle en béton homogénéisée :

$$A'_c = \frac{b_c \times h_c}{n} = \frac{500 \times 60}{6,76} = 4437,87 \text{ mm}^2$$

$$S'_c = A'_c \times (360 + 30) = 1730769,231 \text{ mm}^3$$

L'aire totale homogénéisée est : $A_{tot} = A_a + A'_c = 9891,04 + 4437,87 = 14328,91 \text{ mm}^2$

La position de l'axe neutre par rapport à la fibre inférieure est :

$$y_G = \frac{S_a + S'_c}{A_{tot}} = \frac{1780387,2 + 1730769,231}{14328,91} = 245,04 \text{ mm}$$

Moment d'inertie de la section mixte

poutrelle métallique :

$$I_a = 193,98 \times 10^6 \text{ mm}^4 \text{ (calculé précédemment)}$$

$$I_{a,G} = I_a + A_a \times (245,10 - 180)^2 = 235,9 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Dalle en béton homogénéisée :

$$I'_c = \frac{b_c \times h_c^3}{12n} + A'_c \times (360 + 30 - 245,10)^2 = 162,28 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Le moment d'inertie total de la section mixte est : $I_{tot} = I_{a,G} + I'_c = 398,19 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Moment élastique Module de section élastique

Module de section élastique par rapport à la fibre supérieure du béton :

$$W_{el,sup} = \frac{I_{tot}}{360+60-245,10} = 2,28 \times 10^6 mm^3$$

Module de section élastique par rapport à la fibre inférieure de l'acier :

$$W_{el,inf} = \frac{I_{tot}}{245,10} = 1,62 \times 10^6 mm^3$$

Moment résistant élastique :

Le moment résistant élastique est le minimum entre :

Compression du béton :

$$M_{el,Rd,c} = \frac{f_{ck}}{1,5} \times W_{el,sup} = \frac{25}{1,5} \times 2,28 \times 10^6 = 38 kN.m$$

Et traction de l'acier :

$$M_{el,Rd,a} = f_y \times W_{el,inf} = 237,21 \times 1,62 \times 10^6 = 384 kN.m$$

$$\Rightarrow M_{el,Rd} = M_{el,Rd,c} = 38 kN.m$$

Moment plastique et module plastique de la section mixte

Pour calculer le module de section plastique, nous devons d'abord déterminer la position de l'axe neutre plastique. Nous supposons en premier lieu que l'axe neutre plastique se trouve dans l'âme de la poutrelle métallique. On commence par calculer les forces élémentaires.

Force de compression dans le béton :

$$F_c = 0,85 \times f_{ck} \times b_c \times h_c = 0,85 \times 25 \times 500 \times 60 = 637,5 kN$$

Force de traction dans l'acier :

$$F_a = f_y \times A_a = 237,21 \times 9891,04 = 2,35 \times 10^3 kN$$

La force de traction dans l'acier F_a étant très élevée par rapport à la force de compression dans le béton F_c . Donc, l'axe neutre élastique se situe dans le profilé métallique.

Vérifions si ce dernier se situe dans la semelle :

$$\begin{aligned} F_c + F_{semelle} &= F_c + (t \times b) \times \frac{f_{ck}}{\gamma_a} \\ &= 637,5 \times 10^3 + (10,3 \times 169,4) \times \frac{237,21}{1} \\ &= 1,05 \times 10^3 kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_a - F_{semelle} &= F_a - (t \times b) \times \frac{f_{ck}}{\gamma_a} \\ &= 1,94 \times 10^3 kN \end{aligned}$$

$F_c + F_{semelle} \ll F_a - F_{semelle} \Rightarrow$ L'axe neutre n'est pas dans la semelle.

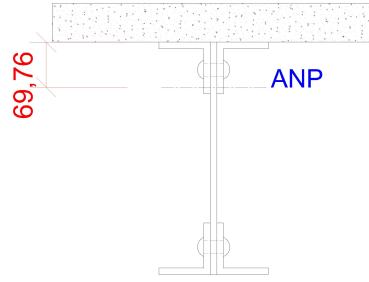


FIG. 5.47 : Position de l'axe neutre plastique

Vérifions si ce dernier se situe dans la partie verticale de la cornière :

$$\begin{aligned} F_c + F_{semelle} + F_{corn} &= F_c + F_{semelle} + (80 - t_f)(2 \times t_f + t_w) \times \frac{f_{ck}}{\gamma_a} \\ &= 1,05 \times 10^6 + (80 - 10,3)(2 \times 10,3 + 10,4) \times \frac{237,21}{a} \\ &= 1,56 \times 10^3 kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_a - F_{semelle} - F_{corn} &= F_a - F_{semelle} - (80 - t_f)(2 \times t_f + t_w) \times \frac{f_{ck}}{\gamma_a} \\ &= 1,43 \times 10^3 kN \end{aligned}$$

On a trouvé que : $F_c + F_{semelle} + F_{corn} \gg F_a - F_{semelle} - F_{corn}$, ce qui signifie que l'axe neutre plastique pour notre section se trouve dans la partie verticale de la cornière.

Afin de trouver z , il faut avoir l'équilibre. On utilise la formule suivante pour le calcul :

$$\begin{aligned} F_a - F_{semelle} - F_{corn} &= F_c + F_{semelle} + F_{corn} \\ \Rightarrow 2 \times (80 - t_f - z_w)(2 \times t_f + t_w) \times f_{ck} &= F_a - 2F_{semelle} - F_c \\ \text{Ce qui nous donne } z_w &= t_f - 80 - \frac{F_a - 2F_{semelle} - F_c}{2 \times (2 \times t_f + t_w) \times f_{ck}} \\ z_w &= -69,76 mm \end{aligned}$$

La position de l'axe neutre plastique par rapport à la fibre inférieure du profilé est $z = 360 - 69,76 mm = 290,24 mm$

Module de section plastique :

Le module de section plastique est calculé comme étant la somme des moments statiques des aires en compression et en traction par rapport à l'axe neutre plastique : $W_{pl} = W_{pl,c} + W_{pl,t}$ Où : $W_{pl,c}$ est le module plastique de la partie en compression ; $W_{pl,t}$ est le module plastique de la partie en traction.

Pour la partie en traction, on n'a que la partie du profilé sous l'ANP :

$$W_{pl,t} = f_y \times A_{t,acier} \times (290,24 - y_{t,acier})$$

Pour la partie en compression, on n'a que la partie supérieure du profilé ainsi que le béton qui est comprimé :

$$\text{Partie supérieure du profilé métallique : } W_{pl,c2} = f_y \times A_{c,acier} \times (360 - 290,24 - y_{c,acier})$$

$$\text{Dalle en béton : } W_{pl,c1} = 0,85 \times f_{ck} \times b_c \times h_c \times (360 + 60 - 290,24)$$

Où $A_{c,acier}$ et $A_{t,acier}$ sont les aires des parties en compression et en traction du profilé métallique respectivement, et $y_{c,acier}$ et $y_{t,acier}$ sont les distances entre leurs centres de gravité et l'axe neutre plastique.

Application numérique :

$$W_{pl,c1} = 0,85 \times 25 \times 500 \times 60 \times (360 + 60 - 290,24) = 8,29 \times 10^7 N.mm$$

Pour $W_{pl,c2}$ et $W_{pl,t}$, nous devons calculer les aires et les positions des centres de gravité des parties en compression et en traction du profilé métallique.

$$A_{c,acier} = (10,3 \times 169,4) + (69,76 - 10,3) \times (2 \times 10,3 + 10,4) = 3588,08 mm^2$$

$$y_{c,acier} = 69,76 - 25,71 = 44,05 mm$$

$$W_{pl,c2} = 237,21 \times 3588,08 \times (360 - 290,24 - (44,05)) = 2,19 \times 10^7 N.mm$$

$$A_{t,acier} = 9891,04 - 3588,08 = 6302,96 mm^2$$

$y_{t,acier}$ est calculer appart et on a trouver la valeur 90,38 mm

$$W_{pl,t} = 237,21 \times 6302,96 \times (290,24 - 90,38) = 29,82 \times 10^7 N.mm$$

Donc, le module de section plastique total est :

$$W_{pl} = 8,29 \times 10^7 + 2,19 \times 10^7 + 29,82 \times 10^7 = 40,3 \times 10^7 N.mm = 403 \times 10^3 kN.mm$$

Moment résistant plastique de la section :

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} = 403 \times 10^3 kN.mm$$

Calcul de la force de rupture

Pour calculer la force de rupture, nous considérons la poutrelle simplement appuyée de longueur $L = 2,74$ m, soumise à une charge ponctuelle au milieu de la portée.

Force de rupture élastique :

$$F_{el,Rd} = \frac{4 \times M_{el,Rd}}{L} = \frac{4 \times 38 \times 10^3}{2,74} = 55,47 kN$$

Force de rupture plastique :

$$F_{pl,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{L} = \frac{4 \times 403 \times 10^3}{2,74} = 588,32 kN$$

Raideur initiale et flèche de la poutrelle en configuration mixte

Raideur initiale :

Pour calculer la raideur initiale de la poutrelle, nous aurons besoin de la même formule utilisée précédemment pour le calcul de la section seule ; $k = \frac{F}{\delta} = \frac{48EI}{L^3}$.

$$k = \frac{48 \times 209,49 \times 10^3 \times 398,19 \times 10^6}{2740^3} = 182,5 \text{ kN.m}$$

Flèche maximale :

$$\delta_{\max} = \frac{F_u L^3}{48EI} = \frac{588,32 \times 2740^3}{48 \times 209,49 \times 10^3 \times 398,19 \times 10^6} = 3,02 \text{ mm}$$

5.9 Comparaison avec la poutrelle métallique seule

TAB. 5.12 : Comparaison des performances structurelles

Paramètre	Poutrelle métallique	Configuration mixte
Moment résistant élastique ($kN \cdot m$)	256,19	38,00
Moment résistant plastique ($kN \cdot m$)	308,37	384,00
Force de rupture élastique (kN)	-	55,47
Force de rupture plastique (kN)	450,18	588,32
Raideur (kN/mm)	94,82	182,50
Flèche maximale (mm)	4,75	3,02

Résistance en flexion :

La configuration mixte présente une augmentation significative du moment résistant plastique (+24,5%), passant de 308,37 $kN \cdot m$ à 384 $kN \cdot m$. Cette amélioration substantielle de la capacité portante en flexion permet d'envisager une augmentation des charges d'exploitation ou une extension de la durée de vie de l'ouvrage.

Cependant, on note une diminution du moment résistant élastique dans la configuration mixte. Cela s'explique par la limitation de la résistance en traction du béton, qui devient le facteur limitant dans le domaine élastique. Néanmoins, cette réduction n'est pas préoccupante, car le dimensionnement des structures mixtes se base généralement sur leur comportement plastique.

Capacité portante :

La force de rupture plastique augmente de 30,7%, passant de 450,18 kN à 588,32 kN . Cette amélioration considérable de la capacité portante ultime est un argument majeur en faveur de la solution mixte, offrant une marge de sécurité accrue et une meilleure résistance aux surcharges exceptionnelles.

Rigidité :

La rigidité de la poutrelle est pratiquement doublée (+92,5%) dans la configuration mixte. Cette augmentation spectaculaire de la raideur est un avantage pour le comportement en service de la structure. Elle se traduit par une réduction des déformations sous charge, une meilleure répartition des efforts, et une diminution des vibrations, améliorant ainsi le confort des usagers et la durabilité de l'ouvrage.

Flèche :

La flèche maximale est réduite de 36,4% dans la configuration mixte. Cette diminution significative des déformations est directement liée à l'augmentation de la rigidité.

Elle permet de mieux respecter les critères de déformation en service, d'améliorer l'aspect esthétique de l'ouvrage et de réduire les risques de fissuration des éléments non structuraux.

5.10 Conclusion du chapitre

L'examen de la poutrelle métallique originale du pont de Dallet, combinant analyses expérimentales, calcul analytique et modélisation numérique, a révélé des caractéristiques mécaniques remarquablement préservées malgré ses années de service. Cette robustesse inhérente témoigne de la qualité de sa conception et de sa fabrication initiales, offrant une base solide pour envisager une prolongation de sa durée de vie. Les analyses expérimentales ont démontré que la structure existante possède encore une capacité portante significative et une rigidité appréciable. La modélisation numérique, utilisant la méthode des éléments finis avec le logiciel ABAQUS, a permis d'approfondir notre compréhension du comportement de la poutrelle. Les différents modèles (poutre entière, demi-poutre et quart de poutre) ont fourni des insights précieux sur l'influence de paramètres tels que la précontrainte des rivets et les conditions de contact entre les éléments.

Les résultats numériques ont généralement corroboré les observations expérimentales, tout en mettant en lumière l'importance de certains facteurs de modélisation. Notamment, l'étude de sensibilité a révélé l'impact significatif de la modélisation précise de la géométrie, y compris les trous et les rivets, sur la précision des résultats.

Face à ces constatations, la solution de transformation en structure mixte acier-béton s'est imposée comme une option particulièrement attractive. L'ajout d'une dalle de béton de seulement 6 cm d'épaisseur a engendré des améliorations structurelles considérables, avec une augmentation de la capacité portante de 30,7%, un doublement de la rigidité (+92,5%), et une réduction des déformations de 36,4%. Cette amélioration ouvre la voie à plusieurs scénarios bénéfiques :

- La possibilité d'augmenter les charges d'exploitation sans nécessiter de renforcements supplémentaires coûteux.
- Une extension significative de la durée de vie de l'ouvrage.
- Une diminution des coûts de maintenance à long terme, grâce à une meilleure performance en service.

Du point de vue économique, la solution mixte présente un avantage indéniable par rapport au remplacement complet de la poutrelle. L'ajout d'une fine dalle de béton représente une fraction du coût qu'impliquerait la fabrication, le transport et l'installation d'une nouvelle poutrelle métallique. De plus, cette approche minimise les perturbations du trafic et réduit l'impact environnemental lié à la production et au transport de nouveaux éléments structurels. En conclusion, la transformation de la poutrelle en structure mixte acier-béton s'avère être une solution technique et économique optimale pour la réhabilitation du pont de Dallet.

Conclusion générale

Cette étude a exploré le potentiel de réemploi des éléments métalliques de construction, en se concentrant sur les poutres du pont de Dallet, dans le contexte des défis environnementaux du secteur du BTP.

Le premier chapitre a mis en lumière l'impact considérable du secteur du BTP sur l'environnement, soulignant l'urgence d'agir pour réduire ses effets néfastes. Trois enjeux majeurs ont été identifiés : l'épuisement des ressources naturelles, la génération de déchets, et les émissions de gaz à effet de serre. Cette analyse a posé les bases de la réflexion sur l'importance du réemploi dans la construction.

Le deuxième chapitre a fourni une analyse détaillée des matériaux de construction métalliques existants, de leurs propriétés mécaniques et de leurs caractéristiques essentielles. Cette étude historique et technique a permis de mieux comprendre les matériaux à réemployer et a servi de base bibliographique pour les caractéristiques des aciers, élément primordial pour évaluer le potentiel de réemploi. Le troisième chapitre a renforcé cette analyse en se concentrant sur l'impact de la corrosion sur les structures métalliques, mettant en évidence les défis techniques liés à la durabilité des structures réemployées.

Le quatrième chapitre a présenté un état de l'art complet sur le réemploi, explorant son histoire, son évolution, ainsi que la réglementation et les défis actuels. Cette partie a permis de contextualiser le réemploi dans une perspective plus large, mettant en évidence les obstacles et les opportunités dans ce domaine.

Le cinquième chapitre, cœur de cette étude, a présenté l'étude de cas du pont de Dallet, offrant une évaluation concrète du potentiel de réemploi. Cette analyse a été enrichie par une approche combinant expérimentation et modélisation numérique avancée. Les essais mécaniques ont révélé que les poutres métalliques conservaient une résistance mécanique significative malgré des années d'utilisation. Les calculs analytiques ont corroboré ces résultats expérimentaux, démontrant la fiabilité des méthodes d'évaluation utilisées.

La modélisation numérique, utilisant la méthode des éléments finis avec le logiciel ABAQUS, a permis d'approfondir notre compréhension du comportement de la poutrelle. Les différents modèles (poutre entière, demi-poutre et quart de poutre) ont fourni des insights précieux sur l'influence de paramètres tels que la précontrainte des rivets et les conditions de contact entre les éléments. Cette approche numérique a non seulement confirmé les observations expérimentales, mais a également mis en lumière l'importance de certains facteurs de modélisation, notamment la précision de la géométrie, y compris les trous et les rivets.

Un résultat majeur de cette étude a été la mise en évidence des avantages de la

transformation des poutres en structure mixte acier-béton, montrant une amélioration significative des performances mécaniques. L'ajout d'une dalle de béton de seulement 6 cm d'épaisseur a engendré des améliorations structurelles considérables, avec une augmentation de la capacité portante, un doublement de la rigidité et une réduction des déformations.

Bien que limitée à un seul ouvrage, cette étude ouvre des perspectives prometteuses pour le secteur du BTP. Elle souligne le potentiel du réemploi pour réduire l'impact environnemental, la nécessité d'adapter les normes et réglementations, ainsi que l'importance de la formation des acteurs du secteur à ces nouvelles pratiques. Cette recherche démontre la viabilité et les avantages du réemploi des éléments métalliques dans la construction. Les résultats encourageants obtenus appellent à poursuivre les efforts de recherche et d'innovation dans ce domaine, afin de faire du réemploi une pratique courante et efficace dans le secteur de la construction, contribuant ainsi à un avenir plus durable.

Bibliographie

- AKESSON, Bjorn (1994). "Fatigue life of riveted railway bridges". Thèse de doct. Chalmers University of Technology.
- "Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique" (s. d.). fr. In : () .
- BARON, Frank et Edward W LARSON (1955). *The effect of certain rivet patterns on the fatigue and static strengths of joints*. Rapp. tech. Department of Civil Engineering, Northwestern University.
- BERTIN, Ingrid (2020). "Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi, méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie". Soutenue le 8 décembre 2020. PhD thesis. École des Ponts ParisTech, Laboratoire NAVIER - Équipe MSA : Université Paris-Est.
- CROLET, J. L. et Gérard BÉRANGER (1998). "Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages". In : *Corrosion Vieillissement*. URL : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:171118236>.
- DENG, Hongda et al. (2019). "Effect of microstructure on corrosion of welded joints of X80 steel in water saturated supercritical CO₂". In : *Anti-Corrosion Methods and Materials*. URL : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199904049>.
- DOBROTA, M., D. G. PĂUN et I. I. MIRICA (2018). "Corrosion Behavior of Some Stainless Steels in Aqueous Media". In : *Bulletin of the Chemical Society of Romania* 54.9. Accessed : 2024-10-06, p. 181-186. URL : <https://bch.ro/pdfRC/54%20DOBROTA%209%2018.pdf>.
- DOE, J. et M. SMITH (2020). "Influence of Heat Treatment on the Pitting Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel 2205 in Chloride Environments". In : *Journal of Materials Science* 45.12, p. 1234-1245. DOI : [10.1007/s10853-020-12345](https://doi.org/10.1007/s10853-020-12345).
- EICH, Louise (sept. 2023). "Économie circulaire dans le secteur de la construction : Aide à la structuration de la pratique du réemploi de matériaux de construction par l'analyse de retours d'expériences - Cas de l'Eurométropole de Strasbourg". Financé par le Campus des Métiers et des Qualifications et accueilli par l'unité de recherche AMUP de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg. Mémoire de fin d'études. IMT Nord Europe.
- LEONETTI, Davide et al. (2020). "Rivet clamping force of as-built hot-riveted connections in steel bridges". In : *Journal of Constructional Steel Research* 167, p. 105955.
- MISA, Thomas J. (1995). *A Nation of Steel : The Making of Modern America, 1865-1925*. Baltimore, MD : Johns Hopkins University Press.

- NAME, Author (1987). "Title of the Article". In : *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 65.4. Accessed : 2024-10-06, p. 121-125. DOI : [10.1179/000705987798271514](https://doi.org/10.1179/000705987798271514). URL : <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1179/000705987798271514>.
- SAMIHA, Hambli Samiha (2018). "Dépôt de films zéolitiques sur des surfaces métalliques et études de leurs effets inhibiteurs de corrosion dans un milieu NaCl". In : URL : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195426184>.
- SHIRI, M. et D. REZAKHANI (2020). "Estimated and Stationary Atmospheric Corrosion Rate of Carbon Steel, Galvanized Steel, Copper and Aluminum in Iran". In : *Metalurgical and Materials Transactions A* 51, p. 342-367. DOI : [10.1007/s11661-019-05509-1](https://doi.org/10.1007/s11661-019-05509-1). URL : <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05509-1>.
- WILLIAMS, Alan R. (2003). *The Knight and the Blast Furnace : A History of the Metallurgy of Armour in the Middle Ages & the Early Modern Period*. Illustrated. T. 12. History of Warfare. BRILL, p. 954. ISBN : 9004124985, 9789004124981.
- WILSON, Wilbur M et Frank P THOMAS (1938). *Fatigue tests of riveted joints*. Rapp. tech. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- YAVUZ, G., Y. DUYSAK et H. ARISOY (2022). "Corrosion effect on structural behaviour of bolted steel connections under axial tension loads". In : *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 27.3, p. 1351-1366. DOI : [10.1080/19648189.2022.2081262](https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2081262). URL : <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2081262>.
- ZHOU, Y Eddy et al. (1995). "Examination of fatigue strength (Sr-N) curves for riveted bridge members". In : *Proceedings of the 12th Annual Bridge Conference*. Pittsburgh, PA, p. 102-109.

Webographie

- 1987: *Le Rapport Brundtland* (1987). <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/publications/developpement-durable/brundtland-report.html>. Accessed : 2024-10-06.
- Article L541-1-1 du Code de l'environnement (2024). <https://www.codes-et-lois.fr/code-de-l-environnement/article-1541-1-1>. Accessed : 2024-10-06.
- Article L541-4-2 du Code de l'environnement (2024). <https://www.codes-et-lois.fr/code-de-l-environnement/article-1541-4-2>. Accessed : 2024-10-06.
- Caractérisation mécanique des fers puddlés (s. d.). Accessed : 2024-10-13. URL : <https://123dok.net/document/caracterisation-mecanique-des-fers-puddles.html>.
- CLERMONTINFOS63.FR (2024). *Le pont métallique de Dallet réhabilité - Info Clermont Métropole*. fr. URL : <https://www.clermontinfos63.fr/actualite-20616-le-pont-metallique-de-dallet-rehabilite.html> (visité le 18/11/2024).
- Consommation de ressources du BTP - Chiffres clés du logement (2022). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-logement-2022/30-consommation-de-ressources-du-btp>. Accessed : 2024-10-06.
- Déchets - Chiffres Clés, Édition 2023 (2023). <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6108-dechets-chiffres-cles-edition-2023.html>. Accessed : 2024-10-06.
- Décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à la mise sur le marché des emballages (1997). <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000345400/>. Accessed : 2024-10-06.
- Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098>. Accessed : 2024-10-06.
- Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>. Accessed : 2024-10-06.
- EUROSTAT (s. d.). *Waste Statistics - Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics. Accessed : 2024-10-12.
- Gestion des Déchets (2024). <https://univalom.fr/gestion-des-dechets/>. Accessed : 2024-10-06.
- GHYOOT, Michaël (août 2017). *Objectif réemploi : Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale*.

- Report for asbl Rotor, Brussels. Accessed : 2024-10-06. asbl Rotor, Union Européenne, Université catholique de Louvain, Vrije Universiteit Brussel, CSTC.
- Le réemploi : une nouvelle filière pour réduire nos déchets* (2024). <https://www.b2e.bzh/le-reemploi-une-nouvelle-filiere-pour-reduire-nos-dechets>. Accessed : 2024-10-06.
- Les ressources du futur pour la construction de demain* (2024). <https://www.bouygues-construction.com/blog/fr/dossier-special/ressources-avenir-batiment/>. Accessed : 2024-10-06.
- LOI n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement (1)* (1992). <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000345400>. Accessed : 2024-10-06.
- PUY-DE-DÔME, Conseil Départemental du (s. d.). *Site officiel du Conseil Départemental du Puy-de-Dôme*. <https://www.puy-de-dome.fr/conseil-departemental-du-puy-de-dome.html>. Accessed : 2024-10-12.
- Steel Beam : Reuse Toolkit - Gros-oeuvre et enveloppe - Structure acier* (2021). https://vb.nweurope.eu/media/16622/230-en-steel-beam_v01.pdf. Produced as part of the Interreg FCRBE project by Rotor vzw/asbl. Accessed : 2024-10-06. Interreg North-West Europe FCRBE.

Annexes

.1 Annexe A : Tableaux résumant l'historique des propriétés mécaniques des matériaux métalliques de construction

.2 Annexe B : Détail de calcul de la corrosion atmosphérique

.2.1 Principe Fondamental

La vitesse de corrosion des métaux exposés à des atmosphères extérieures varie avec le temps. Au début, la corrosion est plus rapide, mais au fur et à mesure que les produits de corrosion (comme la rouille pour l'acier) se forment, ils agissent comme une barrière protectrice, ralentissant le processus. Ce ralentissement est modélisé par une relation décrite par une formule exponentielle (Équation 1), et le taux de corrosion est calculé en fonction de la première année d'exposition.

.2.2 Application de la méthode

Cette méthode est appropriée lorsqu'on connaît la corrosion de la première année $r_{corr}(1an)$ et que nous voulons estimer la corrosion à long terme. L'ISO 9223 vous aide à déterminer cette valeur si vous ne l'avez pas mesurée directement. Dans notre cas, la corrosion de la première année est prédéfinie.

.2.3 Équation de la corrosion à long terme

L'attaque par corrosion est donnée par la relation suivante

$$D = r_{corr} \times t^b \quad (1)$$

Où :

D : est la corrosion totale (en m),

r_{corr} : est le taux de corrosion de la première année (en m/an),

t : est la durée d'exposition en années,

b : est l'exposant temporel spécifique au couple métal-environnement.

N.B. : Cette équation est valide pour des expositions allant jusqu'à 20ans.

Détermination de b :

Cas idéal : Si nous avons des données de corrosion à long terme pour notre acier et notre environnement spécifiques, nous pouvons calculer " b " à partir de ces données.

TAB. 13 : Limite élastique R_e ("Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique" s. d.)

		Epaisseurs (mm)																		
		5<e 16	16<e 25	25<e 30	30<e 35	35<e 40	40<e 50	50<e 60	60<e 63	63<e 70	70<e 80	80<e 100	100<e 110	110<e 120	120<e 150	150<e 200	200<e 250	250<e 400		
CCG	Fer puddlé	varie de 250 à 340MPa																		
	Aciers laminés	137 sous mention d'épaisseur maximale																		
CCG (annexe CCG 1913)	Aciers laminés	235 sous mention d'épaisseur maximale																		
	Ae54	353 sous mention d'épaisseur maximale																		
	Ae42	235																		
	Ae51	353																		
	A42R	235																		
	A42S	235	226																216	
	A52R	353	343																334	
	A52S	353	343																334	
	E24																			
	E26																			
	E30																			
	E36A																			
	E36B																			
	E24	235	235	215																185
	E26	255	255	235																205
	E30*	295	295	275																245
	E36	355	355	335																305
	E355	355	345	335																305
	E460	460	450	440																Epaisseurs non disponibles dans la norme
	NFA36-201																			
	NFA35-502																			
	E24	235	275	215																185
	E28	275	345	255																225
	E36	355	345	335																315
	E355	355	345	335																325
	E420	420	410	400																370
	E460	460	450	440																410
	E36WB	355	345	335																315
	S235J0 ou J2	235	225	215																195
	S275J0 ou J2	275	265	255																225
	S355K2	355	345	335																295
	S355N	355	345	335																295
	S420N	420	400	390																340
	S460N	460	440	430																400
	S355M	355	345	335																295
	S420M	420	400	390																340
	S460M	460	440	430																400
	S235WJ0 ou J2	235	225	215																195
	S355WK2	355	345	335																295
	S235J0 ou J2	235	225	215																195
	S275J0 ou J2	275	265	255																225
	S355K2	355	345	335																295
	S355N	355	345	335																295
	S420N	420	400	390																340
	S460N	460	440	430																400
	S355M	355	345	335																295
	S420M	420	400	390																340
	S460M	460	440	430																400
	S235WJ0 ou J2	235	225	215																195
	S355WK2	355	345	335																295
	S235J0 ou J2	235	225	215																195
	S275J0 ou J2	275	265	255																225
	S355K2	355	345	335																295
	S355N	355	345	335																295
	S420N	420	400	390																340
	S460N	460	440	430																400
	S355M	355	345	335																295
	S420M	420	400	390																340
	S460M	460	440	430																400
	S235WJ0 ou J2	235	225	215																195
	S355WK2	355	345	335																295

TAB. 14 : Limite plastique R_m ("Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique" s. d.)

		Epaisseurs (mm)																	
		5<e 16	16<e 25	25<e 30	30<e 35	35<e 40	40<e 50	50<e 60	60<e 63	63<e 70	70<e 80	80<e 100	100<e 110	110<e 120	120<e 150	150<e 200	200<e 250	250<e 400	
CCG CCG (annexe CCG 1913)	For puddlé	Hors capacité des outils de production de l'époque																	
	Aciers laminés	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	Ac54	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	Ac42	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	Ac54	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	A42R	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	A42S	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	A52R	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	A52S	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
E26	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E30	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36A	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36B	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E26	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E30*	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E355	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E460	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
NFA36-201	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
NFA35-502	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E28	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E28	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E355	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E420	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E460	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
NFA35-502	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
E36WB	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S235J0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S275J0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355K2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S420N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S460N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S420M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S460M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S235WJ0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355WK2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S235J0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S275J0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355K2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S420N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S460N	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S420M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S460M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S235WJ0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355WK2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S420M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S460M	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S235WJ0 ou J2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		
S355WK2	Epaisseurs non disponibles dans la norme																		

TAB. 15 : Allongement % (“Annexe A 5 - Evolution des caractéristiques des métaux pour construction métallique” s. d.)

		Epaisseurs (mm)																	
		5<e 16	16<e 25	25<e 30	30<e 35	35<e 40	40<e 50	50<e 60	60<e 63	63<e 70	70<e 80	80<e 100	100<e 110	110<e 120	120<e 150	150<e 200	200<e 250	250<e 400	
CCG CCG (annexe CCG 1913)	Fer puddlé	8 (L) , 35 (T)																	
	Aciers laminés	22, Pas de mention d'épaisseur max																	
	Aciers laminés	20, Pas de mention d'épaisseur max																	
	Ac54	24 (L) , 20 à 22 (T)**																	
	Ac42	25 (L) , 23 (T)																	
	Ac51	20 (L) , 16 à 18 (T)**																	
	A42R	27	26	25															
	A42S	30	27	25															
	A52R	22	21	20															
	A52S	24	22	20															
NFA 35-502	E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E26	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E30	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E36A	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E36B	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E24	24 à 28 ***	24 à 27 ***	24 à 26 ***	23 à 25 ***	20 à 23 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E26	21 à 27 ***	20 à 25 ***	21 à 24 ***	20 à 23 ***	17 à 21 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E30*	21 à 23 ***	20 à 22 ***	19 à 21 ***	18 à 20 ***	15 à 18 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E36	20 à 22 ***	19 à 21 ***	18 à 20 ***	17 à 19 ***	14 à 17 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E355	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
E460	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
NFA 36-201 NFA 35-502	E355	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E36w	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E24	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E28	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E36	Epaisseurs non disponibles dans la norme																	
	E24	26 à 28 ***	25 à 27 ***	24 à 26 ***	23 à 25 ***	20 à 23 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E28	22 à 25 ***	21 à 23 ***	20 à 22 ***	19 à 21 ***	16 à 19 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E36	20 à 22 ***	19 à 21 ***	18 à 20 ***	17 à 19 ***	15 à 17 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	E355	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	E420	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
E460	17	17	16	Epaisseurs non disponibles dans la norme															
NFA 35-502	E36WB	20 à 22 ***	19 à 21 ***	18 à 20 ***	17 à 19 ***	Epaisseurs non disponibles dans la norme													
	S235J0 ou J2	26L-24T	25L-23T	24L-22T	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S275J0 ou J2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355K2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355N	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420N	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S460N	17	17	16	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S355M	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420M	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S460M	17	17	16	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
S235W J0 ou J2 S355WK2 S235J0 ou J2 S275J0 ou J2 S355K2 S355N S420N S460N S355M S420M S460M	S235W J0 ou J2	26L-24T	25L-23T	24L-22T	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355WK2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S235J0 ou J2	26L-24T	25L-23T	24L-22T	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S275J0 ou J2	23L-21T	22L-20T	21L-19T	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355K2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355N	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420N	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S460N	17	17	16	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S355M	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420M	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
S235W J0 ou J2 S355WK2	S235W J0 ou J2	26L-24T	25L-23T	24L-22T	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355WK2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S235J0 ou J2	26L-24T	25L-23T	24L-22T	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S275J0 ou J2	23L-21T	22L-20T	21L-19T	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355K2	22L-20T	21L-19T	20L-18T	18	17	Epaisseurs non disponibles dans la norme												
	S355N	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420N	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S460N	17	17	16	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S355M	22	22	21	Epaisseurs non disponibles dans la norme														
	S420M	19	19	18	Epaisseurs non disponibles dans la norme														

Cas courant (sans données long terme) : Comme nous n'avons pas de données à long terme, nous utilisons la valeur B_1 du Tableau 2 de l'ISO 9224 pour l'acier au carbone, soit $b = 0,523$. Cette valeur est dérivée de l'analyse statistique des données du programme ISO CORRAG. Il est important de comprendre que B_1 est une valeur générique et non spécifique à notre situation exacte.

Cas des durées d'exposition supérieures à 20ans :

Au-delà de *20ans*, la corrosion ne suit plus la même relation exponentielle. À partir de cette période, la vitesse de corrosion devient linéaire, car l'épaisseur des produits de corrosion se stabilise. Pour estimer la corrosion sur des périodes prolongées (comme *50ans*), on utilise l'équation (2) :

$$D = r_{corr} \times (20^b + b(20^{(b-1)})(t - 20)) \quad (2)$$

.3 Annexe C : Essai de flexion-pont de Dallet

.3.1 Courbes force-déplacement

L'essai de flexion réalisé sur les poutrelles provenant du pont de Dallet a commencé par une phase de chargement et de déchargement cyclique. Cette phase permet d'observer le comportement des poutrelles face à des sollicitations répétées, simulant un usage réel où les charges fluctuent au fil du temps. Une fois cette étape terminée, les poutres ont été soumises à une charge continue, poussée jusqu'à leur rupture, afin de déterminer leur résistance ultime et leurs déformations maximales avant la ruine complète.

Pour l'essai de la première poutre, nous avons initialement utilisé une machine ayant une capacité de $400kN$. Cependant, n'ayant pas atteint la rupture, nous avons dû passer à une machine plus puissante $600kN$ pour continuer l'essai (Essai 1-bis). Pour les autres poutres, elles ont été directement testées avec la machine de $600kN$ afin de garantir que la charge appliquée serait suffisante pour provoquer la rupture et obtenir les résultats attendus.

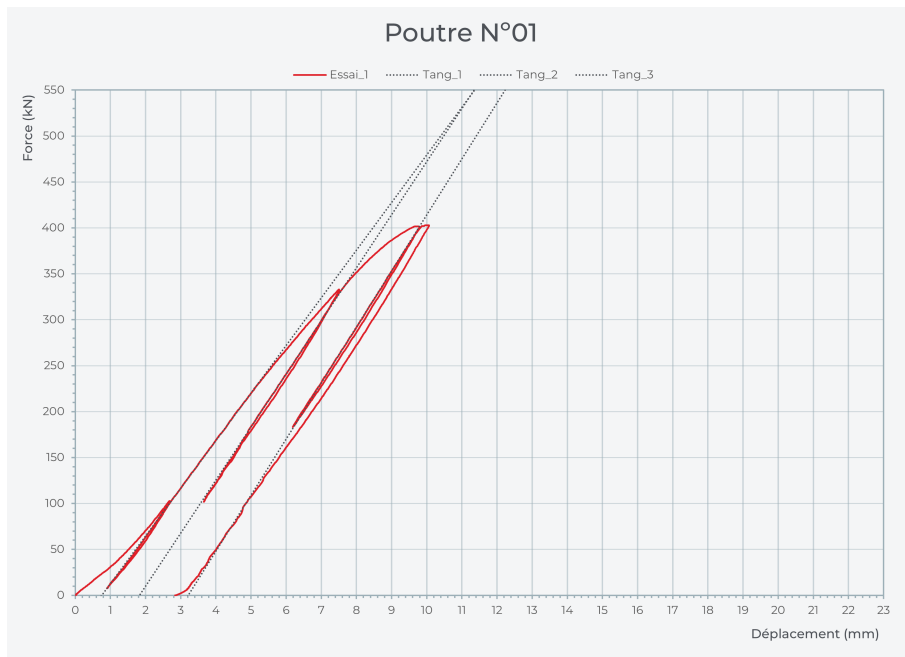


FIG. 48 : Essai 1

[H]

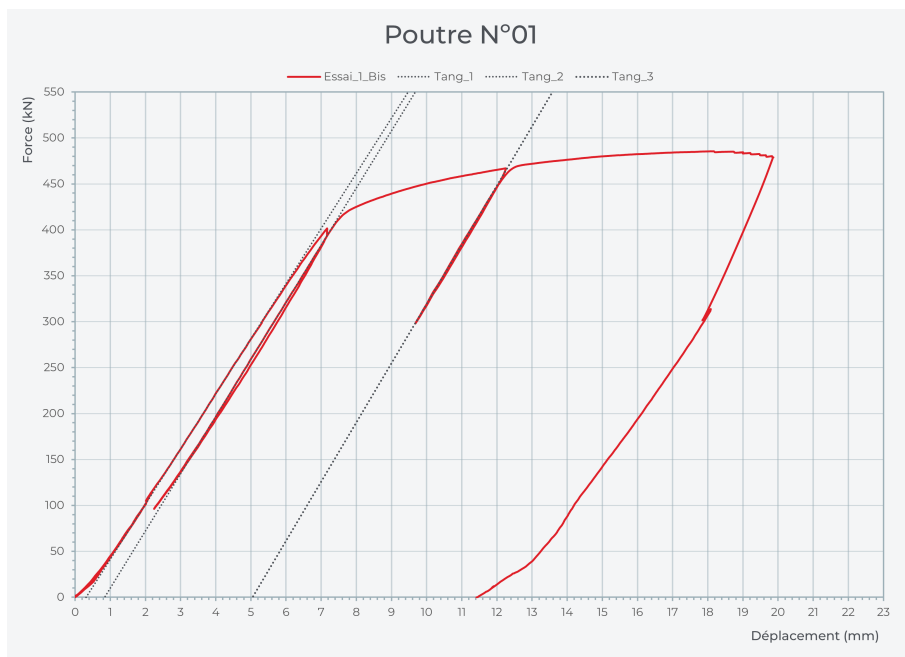


FIG. 49 : Essai 1-bis

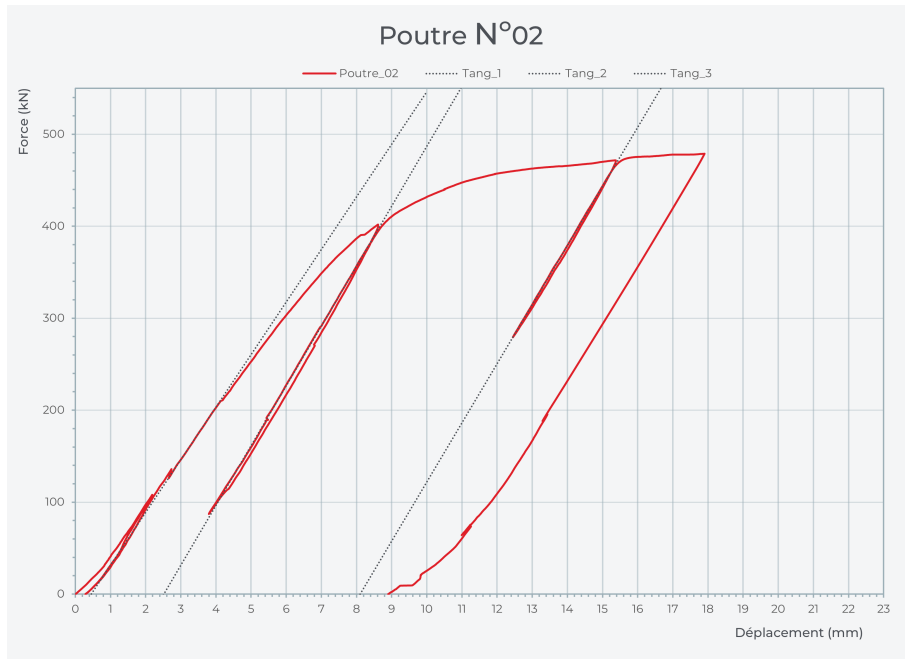


FIG. 50 : Essai 2

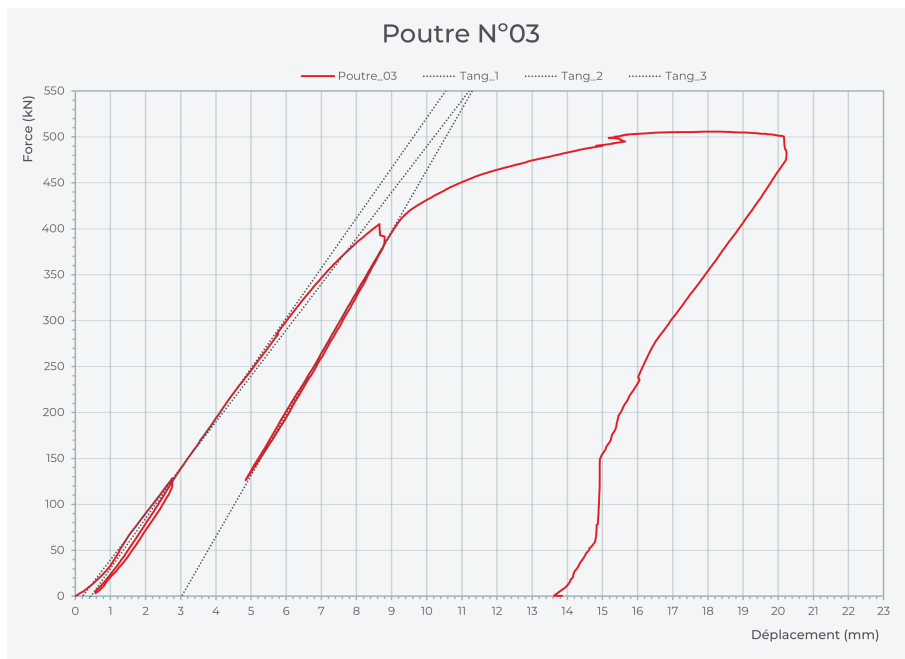


FIG. 51 : Essai 3

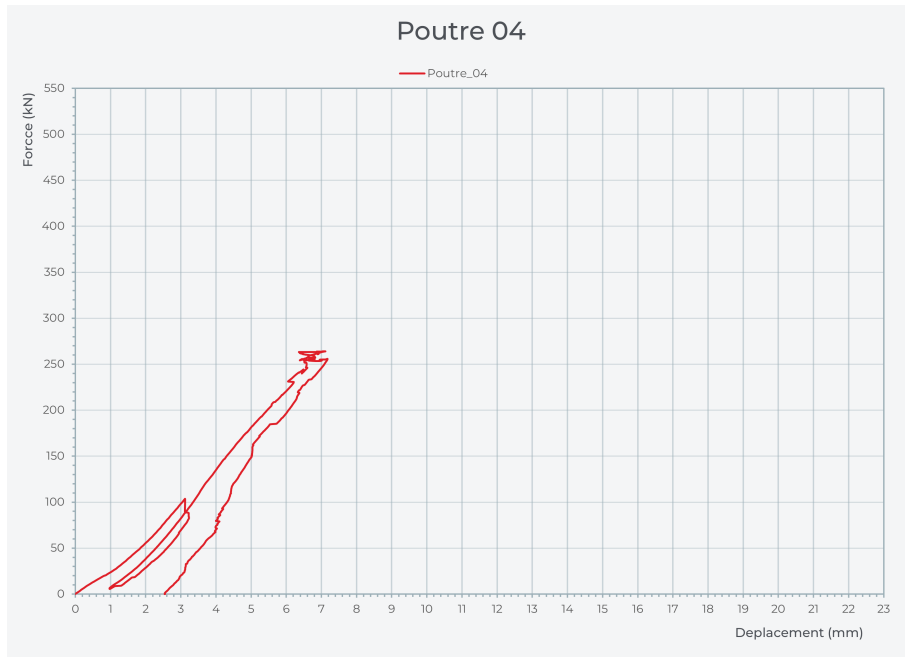


FIG. 52 : Essai 4

Lors de l'essai 4, la poutre fortement endommagée a présenté un comportement anormal, ce qui se reflète dans la courbe de force en fonction du déplacement du vérin. On peut observer des irrégularités sur cette courbe, indiquant une réponse inhabituelle de la poutre sous la charge appliquée. Ces anomalies sont probablement dues à son état de dégradation avancée, qui affecte sa capacité structurelle et rend ses résultats moins fiables comparés aux autres essais.

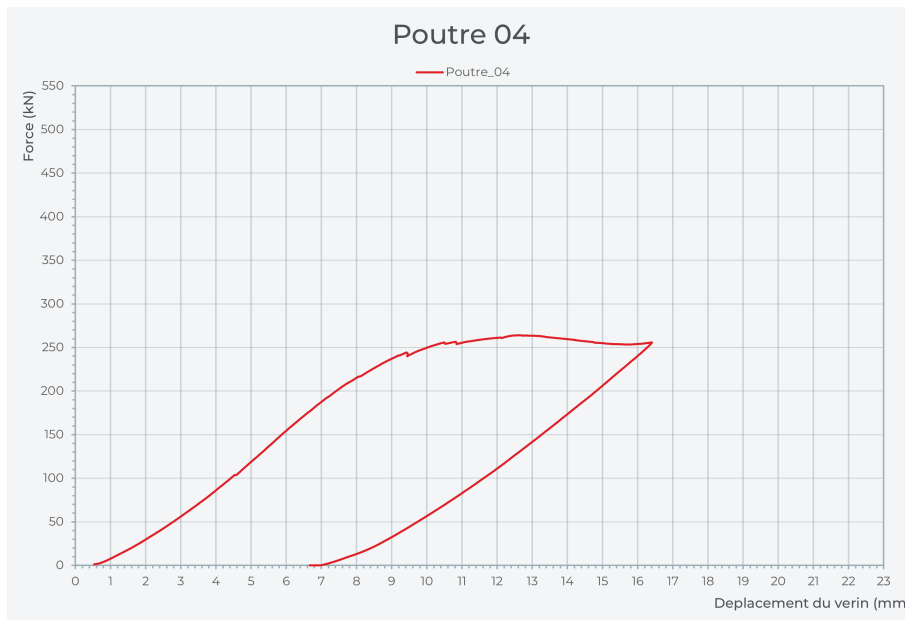


FIG. 53 : Essai 4-force déplacement du vérin

Les résultats obtenus pour les différents cycles de charge et de décharge, notamment en ce qui concerne les raideurs (pentes des courbes), sont résumés dans le tableau suivant.

Ces valeurs permettent d'observer l'évolution du comportement élastique des poutres à mesure que la charge augmente.

	Ch1	Dech1	Ch2	Dech2	Ch3	Dech3	Moyenne chargement	Moyenne décharge	Moyenne
Essai 01	51,85	56,80	57,77	62,77	61,06	63,64	56,89	61,07	58,05
Essai 01-bis	60,04	62,63	62,22	65,48	64,46	60,80	62,24	62,97	62,97
Essai 02	57,24	64,12	65,06	62,81	64,29	62,55	62,20	63,16	62,70
Essai 03	50,00	56,76	54,52	66,62	66,56	51,97	57,03	58,45	58,89

TAB. 16 : Pentés de chargement et déchargement de la poutre

.4 Annexe D : Essai de traction-pont de Dallet

.4.1 Photos des éprouvettes post-essai

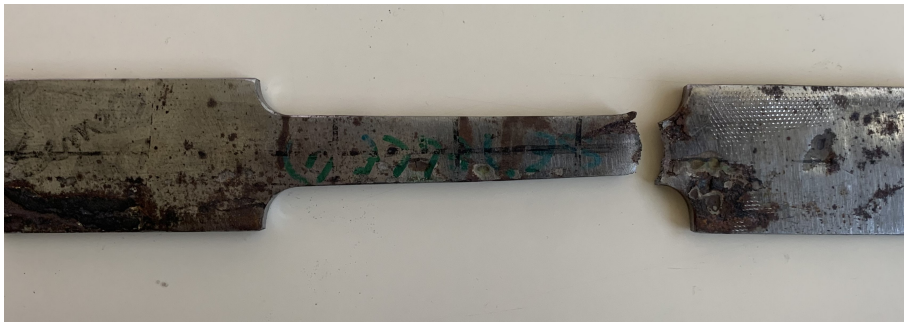


FIG. 54 : Eprouvette 01 - semelle supérieur



FIG. 55 : Eprouvette 02 - ame



FIG. 56 : Éprouvette 03 - semelle inférieure



FIG. 57 : Éprouvette 04 - âme feuillée

.4.2 Remarques particulières

La rupture observée sur l'ensemble des éprouvettes était de nature fragile, sans rétrécissement notable de la section transversale, une caractéristique typique du fer puddlé.



FIG. 58 : Rupture fragile des éprouvettes

Pour la majorité des éprouvettes, la rupture s'est produite dans la zone la plus proche du mors de la machine. En particulier, pour l'éprouvette de la semelle 3, la rupture est survenue en dehors de la zone de référence suivie par la caméra, rendant ainsi les résultats d'allongement à la rupture de cette éprouvette non exploitables.

Toutes les éprouvettes ont montré un feuillement marqué, un phénomène directement lié à la faible résistance à la corrosion du fer puddlé, conséquence de son processus de fabrication. Le feuillement observé s'explique par la présence d'inclusions de scories et de la stratification inhérente à ce type de fer, ce qui le rend plus vulnérable à la corrosion en milieu humide ou oxydant. Cette caractéristique affecte non seulement la résistance mécanique du matériau, mais peut également influencer son comportement lors des tests de traction et de flexion. Pour l'éprouvette 04, qui provient de l'âme, la rupture s'est produite en deux parties distinctes, probablement due à la distribution inégale de ces inclusions et des zones de faiblesse dans la structure interne.



FIG. 59 : Feuillement de la section des éprouvettes



FIG. 60 : Éprouvette 04 - âme feuilltée

.5 Annexe E : Essai de cisaillement des rivets-pont de Dallet

.5.1 Prise des échantillons

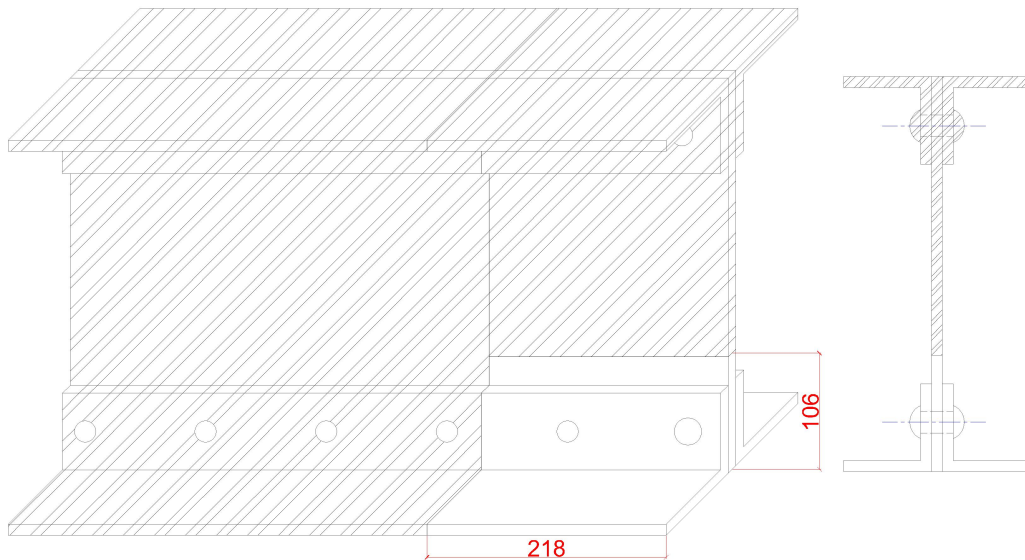


FIG. 61 : Prise des échantillons pour l'essai de cisaillement

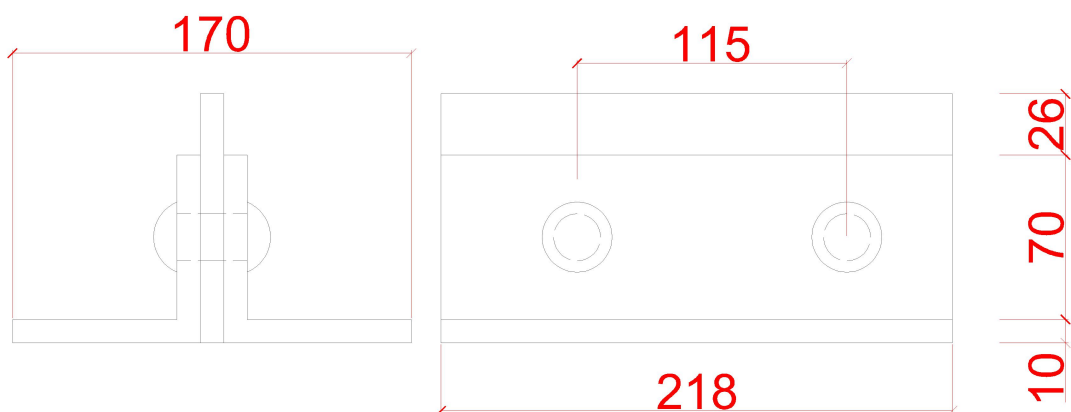


FIG. 62 : Prise des échantillons pour l'essai de cisaillement

Pour l'essai de cisaillement, nous avons deux éprouvettes. Pour l'éprouvette 01, la rupture s'est produite sur un seul plan de cisaillement, avec le deuxième plan très proche de la rupture. En revanche, l'éprouvette 02 a présenté une rupture simultanée sur les deux plans de cisaillement. Cette différence dans le mode de rupture peut être attribuée à des variations dans la distribution des contraintes ou à des différences dans l'intégrité structurelle des deux éprouvettes.

.5.2 Éprouvette 01

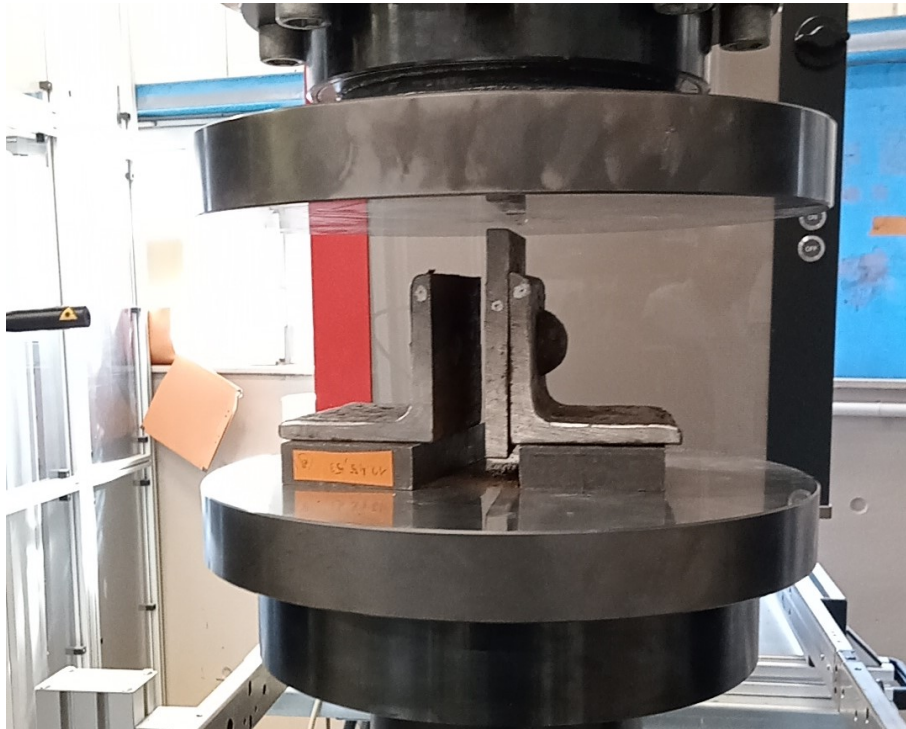


FIG. 63 : Éprouvette 01 en fin de l'essai



FIG. 64 : Âme et rivet après cisaillement



FIG. 65 : Évolution des X_i éprouvette 01 Phase A

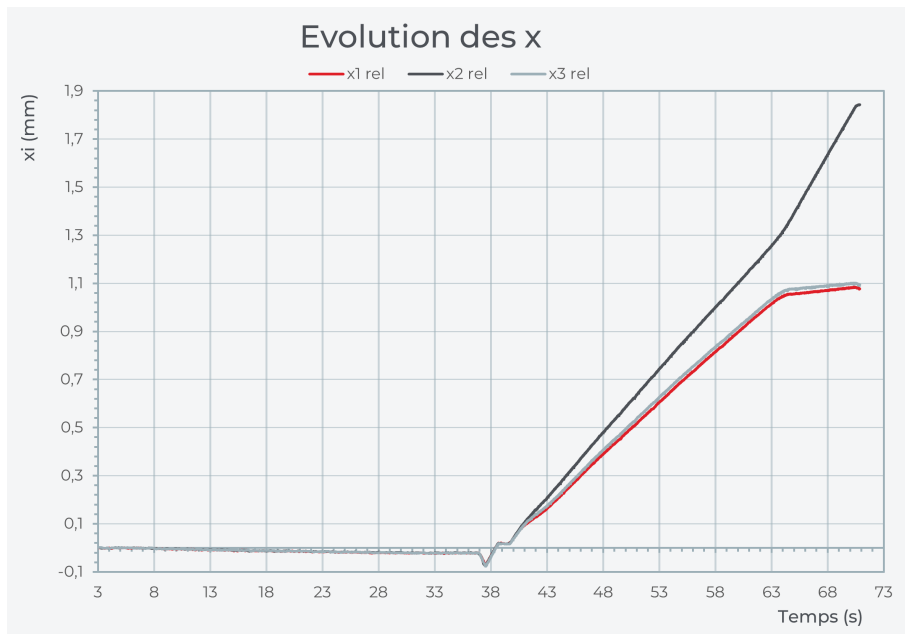


FIG. 66 : Évolution des Xi éprouvette 01 Phase B

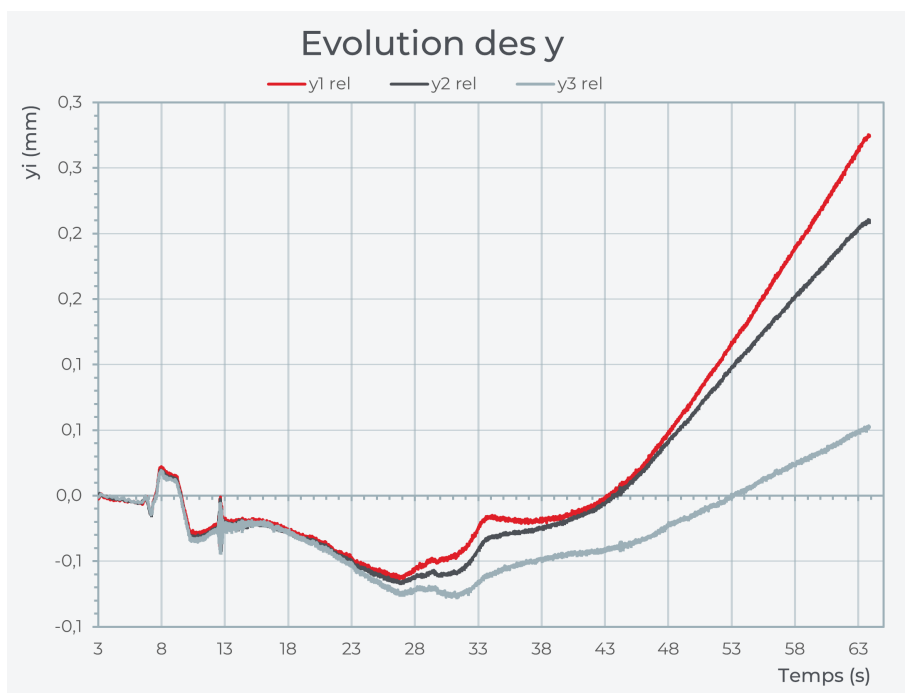


FIG. 67 : Évolution des Yi éprouvette 01 Phase A

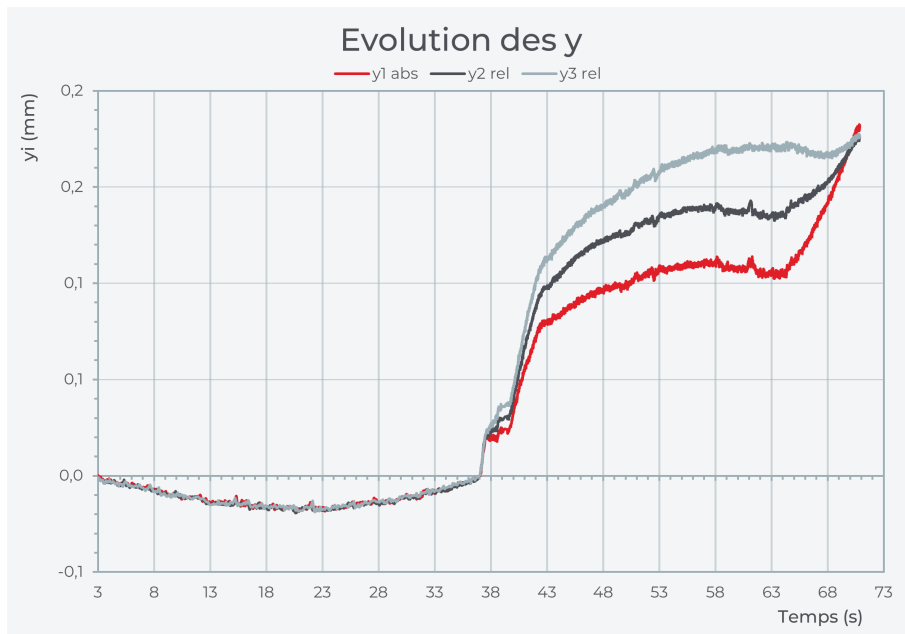


FIG. 68 : Évolution des Y_i éprouvette 01 Phase B

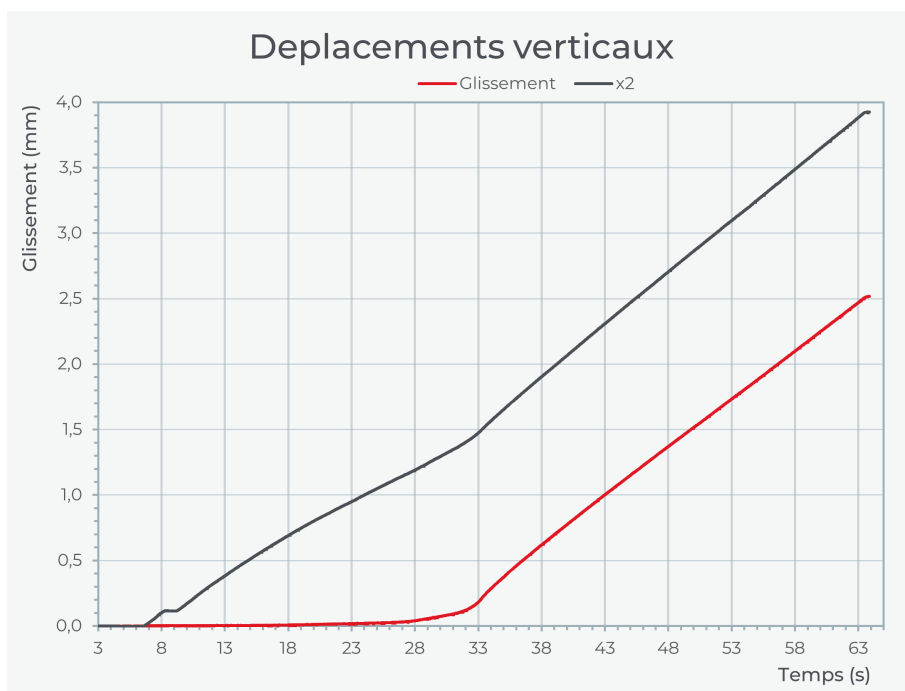


FIG. 69 : Déplacements verticaux Éprouvette 01 Phase A

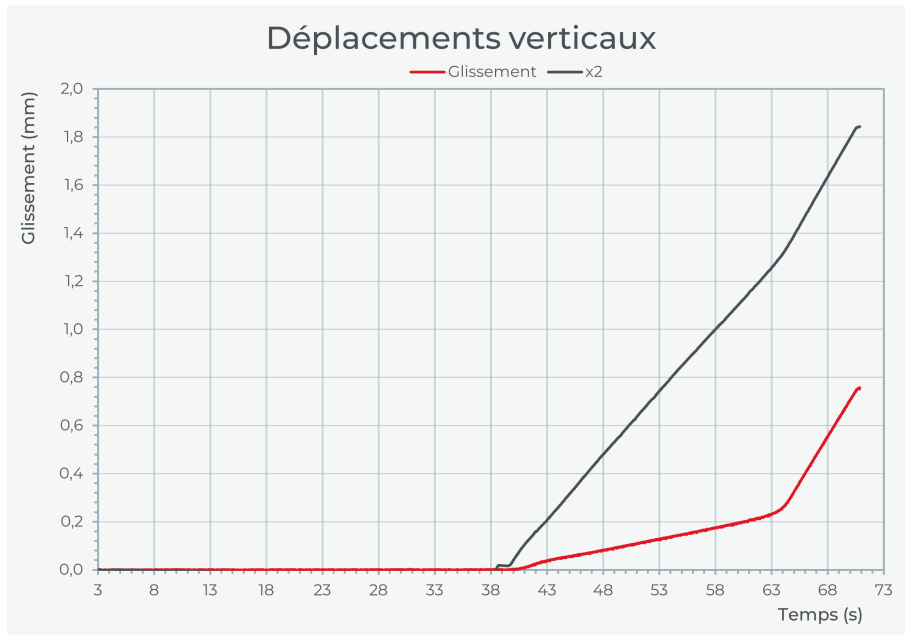


FIG. 70 : Déplacements verticaux Éprouvette 01 Phase B

.5.3 Éprouvette 02

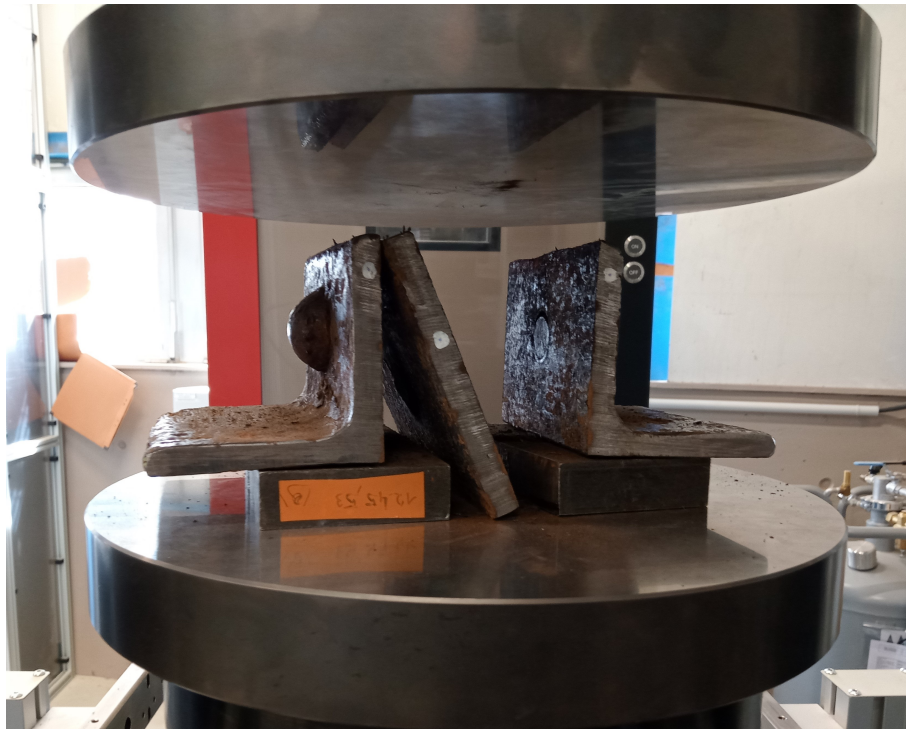


FIG. 71 : Éprouvette 02 en fin de l'essai

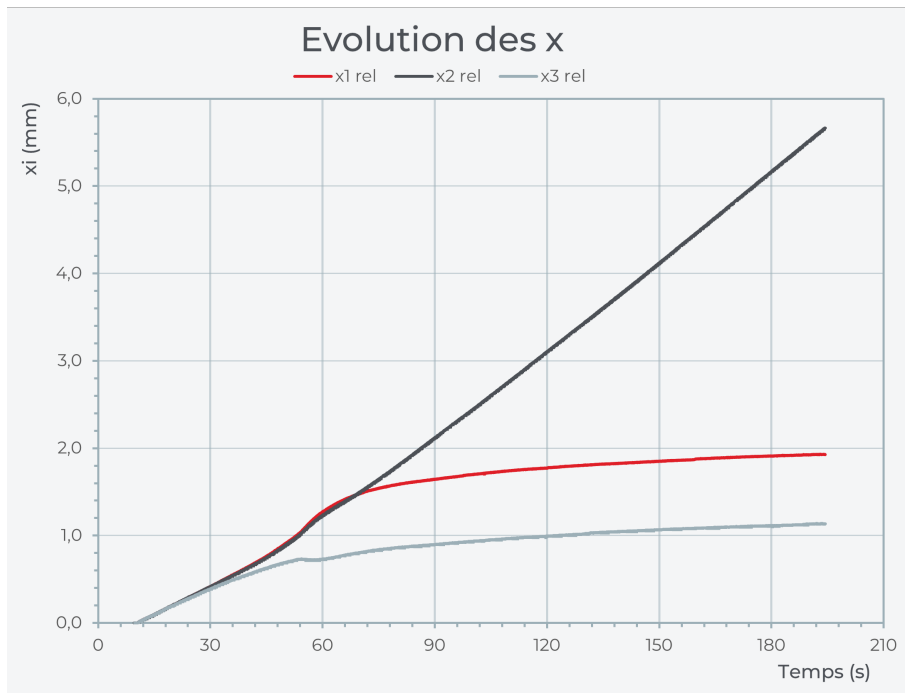


FIG. 72 : Évolution des X_i éprouvette 02

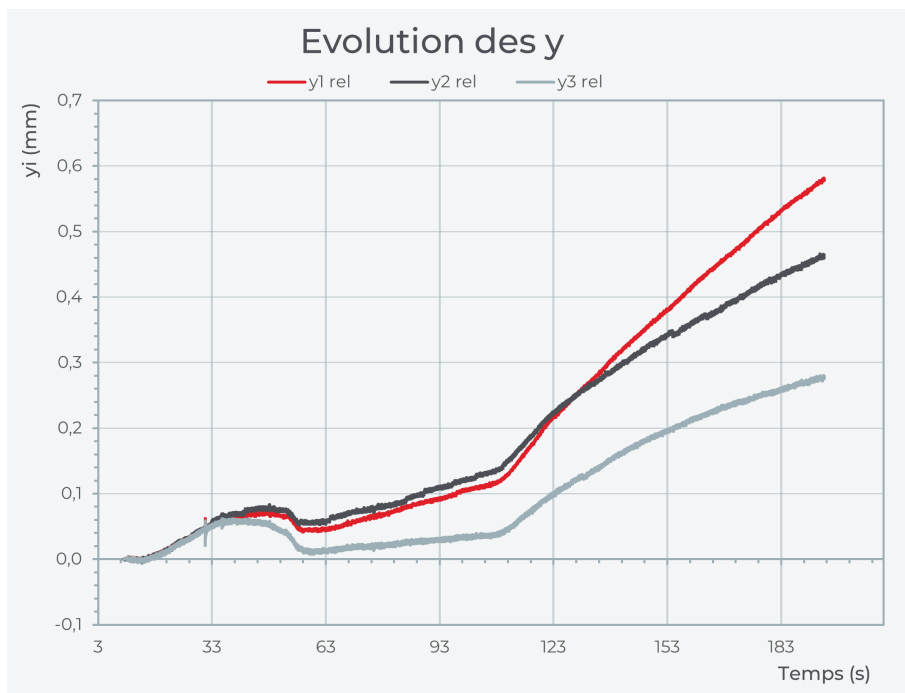


FIG. 73 : Évolution des Y_i éprouvette 02

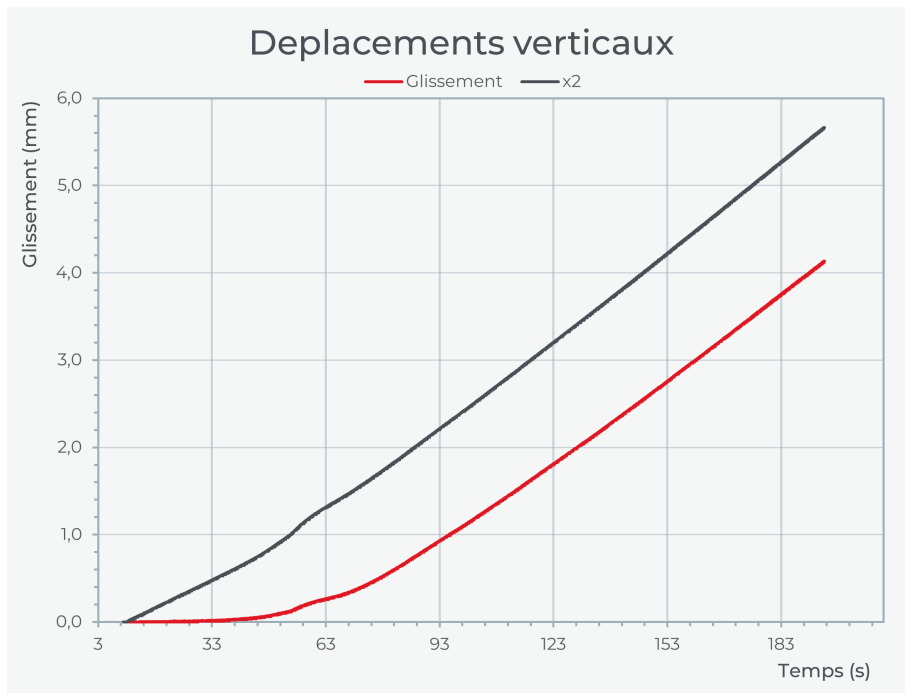


FIG. 74 : Déplacements verticaux Éprouvette 02

.6 Annexe F : Calcul du coefficient de cisaillement de Timoshenko κ

Pour le calcul de κ , d'après "G. R. COWPER" pour une section en I la formule du coefficient de cisaillement est :

$$\kappa = \frac{10(1 + \nu)(1 + 3m)^2}{(12 + 72m + 150m^2 + 90m^3) + \nu(11 + 66m + 135m^2 + 90m^3) + 30n^2(m + m^2) + 5\nu n^2(8m + 9m^2)}$$

On a créer un fichier Excel pour ce calcul afin de faciliter la tache vu la complexité de ce dernier.

Shear Deformation and Coefficient			
Inputs		Outputs	
Material			
Young's modulus E	209	Gpa	
Poisson's ratio ν	0,3		
Geometry			
Total Height h	360	mm	
Flange Width b	169	mm	
Web Thickness tw	10,4	mm	
Flange Thickness tf	10,3	mm	
Beam Length L	2740	mm	
Applied Force F		kN	
Area A	7,02E+03	mm ²	
Moment Of Inertia I	1,41E+08	mm ⁴	
Shear Modulus G	80,57	Gpa	
n	0,47		
m	0,93		
Shear coefficient κ	0,50		
Shear Deformation δ	0,00	mm	
Initial Stiffness K	58,84	kN/mm	

FIG. 75 : Excel pour calcul de officient de cisaillement de Timoshenko κ