

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Génie civil**

Spécialité : Structures

Par : HAMDACHE ABDELKADER

Sujet

Étude de l'influence de la disposition des boulons ordinaires sur la détermination des sections brutes et nettes

Soutenu le 10/09/2023 , devant le jury composé de :

M ABOUBEKR NABIL	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M TABET DERRAZ MOULAY IDRIS	Docteur	Université de Tlemcen	Examinatrice
M MISSOUM ABDELGHANI	Docteur	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, MISSOUM ABDELGHANI, pour sa disponibilité, sa patience et la qualité de son accompagnement. Ses orientations et ses conseils avisés m'ont été d'une grande aide tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je remercie également Monsieur le Président du jury ainsi que l'ensemble des membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire, et pour l'attention et le temps qu'ils lui ont accordés.

Je souhaite enfin exprimer toute ma reconnaissance à l'ensemble du corps professoral et administratif du département de Génie Civil, pour les connaissances et les valeurs transmises durant mon parcours universitaire.

Ce travail, réalisé en monôme, représente non seulement l'aboutissement de plusieurs années d'études, mais aussi un effort personnel nourri par le soutien moral de ma famille, de mes proches et de mes amis.

Merci a Tous

Dédicace

À la mémoire de mon cher père, dont l'absence résonne chaque jour dans ma vie. Ton départ m'a privé de ta présence physique, mais jamais de ton amour, de tes valeurs et de tes enseignements qui continuent de me guider. Ce travail est aussi le tien, car il porte en lui l'empreinte de ce que tu m'as transmis.

À ma chère maman, pour ton affection infinie, tes sacrifices silencieux et ton soutien indéfectible. Tu es l'exemple vivant de la patience et du courage, et je ne saurais trouver de mots assez forts pour exprimer ma gratitude.

À mon oncle, que je considère comme un père, pour ta présence bienveillante et tes conseils précieux.

À mes frères sans oublier Benamar, mes cousines, ainsi qu'à tous mes oncles et tantes, hommes et femmes, pour votre amour et votre encouragement constant.

À mes amis de cœur : Abdellah Taibi, Aymen et Belkhiri Ismail, pour votre amitié sincère et votre fraternité tout au long de ce parcours.

Enfin, j'adresse mes meilleurs vœux de réussite à toute ma famille et à la promotion Structures 2024/2025, avec qui j'ai partagé tant de souvenirs.

Hamdache Abdelkader

RÉSUMÉ

Les assemblages constituent l'un des aspects les plus critiques de la conception des structures métalliques. Ce document présente une étude approfondie des assemblages métalliques selon les prescriptions de l'Eurocode 3, portant sur les deux types principaux : les assemblages soudés et les assemblages boulonnés.

Les assemblages soudés assurent la continuité métallurgique entre les pièces par fusion locale de l'acier. Bien qu'offrant une rigidité élevée et une continuité parfaite, ils nécessitent un personnel qualifié et présentent des contraintes résiduelles. Les assemblages boulonnés, distingués entre boulons ordinaires et précontraints, permettent quant à eux une mise en œuvre facilitée et un démontage possible.

L'étude examine particulièrement l'influence de la disposition des boulons sur la détermination des sections nettes. La formule historique de Cochrane ($s^2/4p$), développée en 1922 pour quantifier l'effet bénéfique du décalage des trous, est analysée théoriquement puis validée expérimentalement. Une campagne d'essais sur quatre configurations d'éprouvettes perforées révèle des résistances expérimentales proches des prédictions théoriques (écarts de -11% à +0,3%), confirmant la pertinence de cette approche des centaine pour le dimensionnement moderne des assemblages boulonnés.

Mots-clés : Assemblages métalliques, assemblages soudés, assemblages boulonnés, Eurocode 3, formule de Cochrane, section nette, disposition des boulons

ABSTRACT

Connections constitute one of the most critical aspects in the design of steel structures. This document presents a comprehensive study of metallic connections according to Eurocode 3 provisions, focusing on the two main types: welded connections and bolted connections.

Welded connections ensure metallurgical continuity between parts through local fusion of steel. While offering high rigidity and perfect continuity, they require qualified personnel and present residual stresses. Bolted connections, distinguished between ordinary and preloaded bolts, allow easier implementation and possible dismantling.

The study particularly examines the influence of bolt arrangement on net section determination. Cochrane's historical formula ($s^2/4p$), developed in 1922 to quantify the beneficial effect of staggered holes, is theoretically analyzed then experimentally validated. A test campaign on four perforated specimen configurations reveals experimental resistances close to theoretical predictions (deviations from -11% to +0.3%), confirming the relevance of this century-old approach for modern bolted connection design.

Keywords: Steel connections, welded connections, bolted connections, Eurocode 3, Cochrane formula, net section, bolt arrangement

الملخص

تُشكّل الوصلات أحد الجوانب الأكثر أهمية في تصميم الهياكل المعدنية. يقدم هذا المستند دراسة معمقة للوصلات المعدنية وفقاً لأحكام اليوروكود 3، مع التركيز على النوعين الرئيسيين: الوصلات الملحومة والوصلات المبرشمة. تضمن الوصلات الملحومة الاستمرارية المعدنية بين القطع من خلال الانصهار الموضعي للفلوآذ. على الرغم من توفيرها صلابة عالية واستمرارية كاملة، إلا أنها تتطلب عمالة مؤهلة وتنتج إجهادات متبقية. أما الوصلات المبرشمة، المُقسّمة بين البراغي العادية والمُسبقة الإجهاد، فتسمح بتنفيذ أسهل وإمكانية الفك. تدرس هذه الدراسة بشكل خاص تأثير ترتيب البراغي على تحديد المقاطع الصافية. تم تحليل صيغة كوكران التاريخية، المطورة عام 1922 لقياس الأثر الإيجابي لإزاحة الثقوب، نظرياً ثم التحقق منها تجريبياً. كشفت حملة اختبارات ($s^2/4p$) على أربعة تكوينات من العينات المثقوبة عن مقاومات تجريبية قريبة من التوقعات النظرية (انحرافات من -11% إلى +0.3%)، مما يؤكد صلاحية هذا النهج المئوي للتصميم الحديث للوصلات المبرشمة.

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	II
Dédicace.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
SOMMAIRE.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES NOTATIONS	XII
INTRODUCTION GENERAL.....	2
CHAPITRE 1 : Généralités sur les assemblages métalliques	
1. Introduction	7
2. TYPES D'ASSEMBLAGES MÉTALLIQUES.....	7
2.1 ASSEMBLAGES SOUDÉS.....	7
2.2 ASSEMBLAGES BOULONNÉS.....	8
2.3 COMPARAISON GÉNÉRALE.....	11
2.4 BOULONS ORDINAIRES VS PRÉCONTRAINTS.....	12
3. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES.....	13
3.1 JEUX DES TROUS DE PERÇAGE.....	13
3.2 ENTRAXES ET PINCES.....	14
4. SOLlicitATIONS DES ASSEMBLAGES.....	17
5. CONCLUSION.....	18

CHAPITRE 2 : Étude théorique des assemblages en cisaillement selon l'eurocode 3

1. Introduction.....	20
2. Description des assemblages en cisaillement	20
2.1.1 Définition générale	20
2.1.2 Types des configurations.....	20
2.1.2.1 Simples cisaillements.....	20
2.1.2.2 Doubles cisaillements.....	21
2.1.2.3 Cisaillement multiple.....	21
2.1.3 Hypothèses de calcul.....	21
2.2 Calcul des sections de la pièce.....	22
2.2.1 Section brute.....	22
2.2.2 Section nette.....	22
2.3 Origine et démonstration de la formule de cochrane.....	24
2.3.1 Contexte historique et problématique.....	24
2.3.2 Développement mathématique de la formule	25
2.3.2.1 Hypothèses fondamentales.....	25
2.3.2.2 Construction géométrique.....	25
2.3.2.3 Dérivation de la formule principale.....	26
2.3.2.4 expression de la section nette.....	26
2.3.3 Méthode alternative et comparaison.....	27
2.3.4 Limitations et domaine de validité	27
2.3.4.1 Hypothèses restrictives.....	27
2.3.4.2 Validité pour les matériaux modernes.....	28

2.3.4.3 Transition du revitage au boulonnage.....	28
2.3.5 intégration dans les codes modernes.....	29
2.3.5.1 Adoption par l'eurocode 3.....	29
2.3.5.2 dispositions de l'AISC.....	29
2.3.6 Evolution de la recherche scientifique.....	30
2.3.6.1 Débats contemporains à cochrane.....	30
2.3.6.2 Recherche récentes et validation numérique.....	30
2.3.6.3 Etat actuel de la connaissance	31
2.3.7 Application de la formule de cochrane.....	31
2.3.7.1 Exemple numériques.....	32
2.3.7.2 Comparaison avec les prescriptions de l'eurocode 3.....	33
2.3.8 synthèse.....	33
2.4 Conclusion.....	34
CHAPITRE 3 : Étude expérimentale	
3.1 Introduction.....	36
3.2 Description du dispositif d'essai.....	36
3.2.1 Machine utilisées.....	36
3.2.2 Systèmes de mesure.....	38
3.3 Présentation des éprouvettes.....	39
3.3.1 Géométries,dimensions,dispositions des trous.....	39
3.3.2 Configuration des pinces.....	41
3.4 Procédures d'essai.....	42
3.4.1 Chargement en traction.....	42

3.4.2 Conditions aux limites.....	42
3.4.3 Suivi des paramètres mesurés.....	42
3.5 Essais de caractérisation des matériaux.....	43
3.5.1 Essais de traction uniaxiale.....	43
3.5.2 Détermination de la limite élastique, limite de rupture et module d'young	43
3.6 Analyse et interprétation des résultats expérimentaux.....	45
3.6.1 Courbes force-déplacement et modes de rupture observés.....	45
3.6.3 influence de la disposition des trous.....	48
3.7 Comparaison avec la théorie.....	48
3.7.1 Calculs selon les sections nettes calculées.....	48
3.7.2 Analyse résistance expérimentale vs résistance théorique	51
3.8 Conclusion.....	54
Conclusion Générale	
Conclusion Générale.....	57
Bibliographie.....	59

Liste des Figures

Figure 1.1 : Boulons Ordinaires

Figure 1.2 : Boulons Précontraintes

Figure 1.3 : Normalisation du Boulon

Figure 1.4 : Pincés et entraxes, Entraxes pour trous en quinconce, Pince longitudinale et pince transversale pour trous oblongs

Figure 2.1 : Calcul de la section nette

Photo 3.1 – Machine de Traction

Photo 3.2 – Perceuse à colonne industrielle

Figure 3.1 – Forme de l'éprouvette initiale

Photo 3.3 – Différentes configurations d'éprouvettes testées

Figure 3.2- Courbe essai de traction sur éprouvette

Photo 3.4 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette A »

Photo 3.5 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette B »

Photo 3.6 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette C »

Photo 3.7 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette D »

Figure 3.3- Différentes hypothèse de ruptures, Eprouvette A

Figure 3.4- Différentes hypothèse de ruptures, Eprouvette B

Figure 3.8 : Récapitulatif des résultats d'essais

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : classe de qualité des boules

Tableau 1.2 : Jeux nominaux pour les boulons (mm).

Tableaux 1.3 : Distance entre boulons

Tableau 2.1 : Calcul des sections de la pièce assemblée

Tableau 2.2 : Exemple numériques

Tableau 2.3 : Comparaison avec les prescriptions de l'Eurocode 3

Liste des Notations

Symboles généraux :

E : Module d'élasticité de l'acier

Fy : Limite d'élasticité de l'acier

Fu : charge maximale

. fu : la limite de rupture de l'acier utilisée

A nette : section nette

A : section brute

Assemblages boulonnés :

do : Diamètre du trou (généralement $d + 1$ à 3 mm)

d : Diamètre nominal du boulon

t: Épaisseur de la pièce la plus mince assemblée

e1 : Entraxe dans la direction de l'effort

e2 : Entraxe perpendiculaire à l'effort

P1 : Distance au bord dans la direction de l'effort

P2 : Distance au bord perpendiculaire à l'effort

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les structures métalliques constituent aujourd'hui l'un des piliers majeurs de l'ingénierie moderne, tant par leur efficacité que par leur adaptabilité à une grande variété d'applications, qu'elles soient industrielles, architecturales ou infrastructurelles. La sécurité, la durabilité et la performance de ces ouvrages reposent de manière décisive sur la qualité de leurs assemblages, véritables points névralgiques où se concentrent les transferts d'efforts et les mécanismes de rupture. Parmi les différentes techniques disponibles, les assemblages boulonnés occupent une place essentielle grâce à leur simplicité de mise en œuvre, leur démontabilité, leur comportement favorable face aux sollicitations dynamiques et leur maturité technologique, largement validée par l'expérience industrielle. Ils représentent ainsi une solution de choix pour les concepteurs soucieux de combiner efficacité structurelle, économie et fiabilité. Toutefois, malgré cette maturité apparente, certains aspects fondamentaux de leur dimensionnement demeurent encore insuffisamment explorés.

L'un des points centraux de la conception d'un assemblage boulonné est la détermination de la section nette, c'est-à-dire la section résistante qui reste disponible après percement des trous destinés aux boulons. Ce paramètre, en apparence simple, conditionne directement la capacité de l'assemblage à résister aux sollicitations appliquées et constitue une base incontournable pour les vérifications de sécurité. Historiquement, le calcul de cette section nette repose sur une formule ancienne, attribuée à Cochrane, et qui est encore intégrée, sous une forme ou une autre, dans les règlements modernes tels que l'Eurocode 3. Cette formule, introduite il y a plus d'un siècle, s'appuie sur des hypothèses simplificatrices qui ont certes résisté à l'épreuve du temps, mais qui n'ont jamais été réexaminées de manière critique à la lumière des outils analytiques, expérimentaux et numériques dont dispose aujourd'hui l'ingénieur. En particulier, un élément fondamental reste largement ignoré : l'influence de la disposition géométrique des trous sur la valeur effective de la section nette et, par conséquent, sur la résistance réelle de l'assemblage.

Cette absence d'investigation approfondie crée un paradoxe. Alors que la réduction de section due aux trous est évidente et inévitable, l'impact précis de leur agencement, qu'il soit longitudinal ou transversal, sur le chemin de rupture et sur la capacité portante de la section nette n'a jamais fait l'objet d'une étude systématique. Les règlements proposent des méthodes de calcul standardisées et sécuritaires, mais ne fournissent pas de recommandations explicites

permettant d'optimiser la disposition des boulons pour maximiser la résistance. En pratique, les concepteurs adoptent donc des configurations conventionnelles, qui, bien que sûres, ne garantissent pas nécessairement l'exploitation complète du potentiel résistant du matériau. Dans un contexte où les exigences de performance et de rationalisation des coûts deviennent de plus en plus fortes, cette lacune apparaît comme une réelle opportunité de recherche scientifique et d'innovation technique.

C'est précisément cette problématique qui fonde l'intérêt et l'originalité du présent travail. L'objectif est d'interroger en profondeur la formule de Cochrane, non pas seulement en l'appliquant mécaniquement, mais en la replaçant dans son cadre théorique et historique, afin d'en comprendre les fondements, les hypothèses et les limites. En parallèle, il s'agit de conduire une investigation expérimentale rigoureuse, basée sur des essais de traction réalisés sur des éprouvettes présentant des dispositions de trous variées, afin de quantifier l'effet réel des pinces longitudinales et transversales sur la résistance de l'assemblage.

L'enjeu de ce projet de fin d'études dépasse donc la simple validation d'une formule ancienne : il s'agit de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes qui gouvernent la résistance des assemblages boulonnés et d'apporter des éléments concrets permettant d'optimiser leur conception. En proposant une réflexion originale sur une question restée en suspens depuis plus de cent ans, ce travail s'inscrit pleinement dans la logique de progrès continu qui anime le domaine du génie civil. Il répond à une double exigence, scientifique et pratique : d'un côté, approfondir la connaissance théorique et expérimentale d'un phénomène clé, et de l'autre, fournir aux ingénieurs des recommandations utiles pour améliorer la performance et la fiabilité des structures métalliques. Cette double ambition confère à ce mémoire toute sa pertinence et son importance dans le cadre d'une formation de master, où il s'agit non seulement de démontrer des compétences d'analyse et de recherche, mais aussi de contribuer à l'avancement des pratiques professionnelles dans le domaine de la construction métallique.

Le chapitre 1 introductif établit les fondements théoriques nécessaires à la compréhension des assemblages métalliques. Il présente une typologie complète des assemblages (soudés, boulonnés) avec une analyse comparative de leurs avantages respectifs. Une attention particulière est accordée aux assemblages boulonnés, incluant la distinction entre boulons ordinaires et précontraints, les classes de qualité et les configurations possibles. L'étude des

sollicitations (traction, cisaillement, combinaisons) et des modes de rupture complète cette base théorique. Le chapitre se conclut par la présentation des prescriptions de l'Eurocode 3, notamment les dispositions géométriques minimales et les règles de calcul et de sécurité.

Le second chapitre constitue le cœur de l'analyse théorique. Il débute par une description détaillée des assemblages en cisaillement, incluant les différents types de configurations (simple cisaillement, double cisaillement) et les hypothèses de calcul associées. L'accent est mis sur le calcul des sections de la pièce, distinguant clairement la section brute de la section nette et analysant l'effet de la disposition des trous (pincés) sur ces grandeurs. Une partie importante est consacrée à l'origine et à la démonstration de la formule de Cochrane ($g^2/4p$), incluant la présentation de la formule, ses hypothèses fondamentales, ses limitations et sa démonstration mathématique rigoureuse. Le chapitre se termine par des applications numériques détaillées et une comparaison critique avec les prescriptions de l'Eurocode 3.

Le chapitre 3 présente la campagne expérimentale menée pour valider les approches théoriques. Après avoir défini les objectifs de la campagne d'essais, il décrit en détail le dispositif expérimental, incluant les machines utilisées et les systèmes de mesure (force, déplacement). La présentation des éprouvettes couvre leurs géométries, dimensions et les différentes dispositions de trous testées, avec une attention particulière aux configurations de pincés étudiées. Les procédures d'essai sont explicitées, notamment les conditions de chargement en traction, les conditions aux limites et le suivi des paramètres mesurés. Les procédures d'essai sont explicitées, notamment les conditions de chargement en traction, les conditions aux limites et le suivi des paramètres mesurés. Les essais de caractérisation des matériaux (traction uniaxiale) permettent de déterminer les propriétés mécaniques fondamentales. L'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux incluent les courbes force-déplacement, l'identification des modes de rupture observés et l'évaluation de l'influence de la disposition des trous. Une comparaison systématique avec les prédictions théoriques (Eurocode 3, formule de Cochrane) conclut ce chapitre.

En fin de mémoire, une conclusion générale viendra clore l'ensemble du travail. Elle aura pour rôle de résumer les principales étapes et résultats obtenus, tout en mettant en évidence les apports essentiels de cette recherche. Elle constituera également un espace d'ouverture, en proposant de nouvelles perspectives pour aborder la problématique de la section nette des

assemblages boulonnés dans sa globalité et envisager des prolongements possibles tant sur le plan théorique que pratique.

Chapitre 1 : Généralités sur les assemblages métalliques

1. INTRODUCTION

Les assemblages constituent un élément fondamental des structures métalliques, assurant la transmission des efforts entre les différents éléments d'une construction. Leur conception et leur dimensionnement revêtent une importance capitale dans la sécurité et la stabilité globale de l'ouvrage. Ce chapitre présente les concepts généraux relatifs aux assemblages métalliques, leurs classifications, et les prescriptions réglementaires qui régissent leur calcul selon l'Eurocode 3.

2. TYPES D'ASSEMBLAGES METALLIQUES

Les assemblages métalliques peuvent être classifiés selon différents critères : le mode de liaison, le comportement mécanique, ou encore les conditions de réalisation. Cette classification permet d'orienter le choix de la solution d'assemblage la plus adaptée aux contraintes du projet.

1.1. ASSEMBLAGES SOUDES

La soudure représente le mode d'assemblage le plus couramment utilisé en construction métallique moderne. Ce procédé consiste à apporter un métal à haute température qui, par refroidissement et transformation métallurgique des bords assemblés, assure la continuité mécanique des pièces.

Le soudage repose sur la fusion locale de l'acier avec ou sans apport de métal d'addition. Cette fusion crée une continuité métallurgique entre les pièces assemblées, permettant une transmission directe des efforts sans concentration de contraintes notables. Les soudures peuvent être classifiées selon leur géométrie. On trouve d'une part les Soudures bout à bout qui assurent la continuité complète des sections et permettent de transmettre tous types d'efforts. Elles constituent la solution optimale pour les assemblages sollicités en traction axiale. D'autre part, les soudures d'angle, plus faciles à réaliser, elles sont largement utilisées pour les assemblages d'éléments secondaires ou pour la transmission d'efforts de cisaillement. Leur section résistante est déterminée par la gorge de la soudure.

Avantages :

- ✓ Continuité parfaite de la matière

- ✓ Rigidité élevée de l'assemblage
- ✓ Encombrement réduit
- ✓ Étanchéité de la liaison
- ✓ Esthétique favorable

Inconvénients :

- ✓ Nécessité de personnel qualifié
- ✓ Contrôle qualité rigoureux
- ✓ Contraintes résiduelles
- ✓ Sensibilité aux défauts
- ✓ Difficultés de démontage

1.2. ASSEMBLAGES BOULONNES

Les assemblages boulonnés constituent une alternative importante aux assemblages soudés, particulièrement appréciée pour sa facilité de mise en œuvre et sa capacité de démontage. Les assemblages boulonnés transmettent les efforts soit par cisaillement du boulon et pression diamétrale sur les tôles (boulons ordinaires), soit par frottement entre les surfaces en contact sous l'effet de la précontrainte (boulons précontraints).

Boulons ordinaires :

Utilisés sans précontrainte contrôlée (figure 1), ils travaillent principalement au cisaillement et en pression diamétrale. Leur mise en place est simple mais leur résistance est limitée.



Figure 1.1 : Boulons Ordinaires

Boulons précontraints :

Serrés avec une précontrainte contrôlée, ils permettent la transmission des efforts par frottement. Ils offrent une meilleure résistance à la fatigue et évitent les glissements. Ces boulons doivent obligatoirement être à haute résistance « HR » (figure 2).



Figure 1.2 : Boulons Précontraints

Les boulons sont classifiés selon leur résistance mécanique (4.6, 5.6, 6.8, 8.8, 10.9) où les chiffres indiquent respectivement la résistance à la traction (en centaines de MPa) et le rapport entre la limite d'élasticité et la résistance à la traction (figure 3).

La désignation X.Y signifie :

$X \times 100$ = résistance à la traction en MPa

$Y \times 10 \times X$ = limite d'élasticité en MPa

Classe 4.6 :

- Résistance à la traction : 400 MPa
- Limite d'élasticité : 240 MPa
- Usage : assemblages légers, éléments secondaires

Classe 10.9 :

- Résistance à la traction : 1000 MPa
- Limite d'élasticité : 900 MPa

- Usage : assemblages précontraints haute performance



Figure 1.3 : Normalisation du Boulon

Avantages :

- ✓ Facilité de mise en œuvre
- ✓ Possibilité de démontage
- ✓ Contrôle qualité simple
- ✓ Adaptabilité aux tolérances de fabrication
- ✓ Montage réversible

Inconvénients :

- ✓ Encombrement plus important
- ✓ Coût des éléments de fixation
- ✓ Possibilité de desserrage
- ✓ Concentration de contraintes
- ✓ Maintenance périodique nécessaire

Classe	Résistance à la traction (Mpa)	Limite d'élasticité (MPa)	Application typique
4.6	400	240	Assemblages légers, éléments secondaires
5.6	500	300	Assemblages courants sans exigences particulières
6.8	600	480	Assemblages structuraux courants
8.8	800	640	Assemblages structuraux importants
10.9	1000	900	Assemblages précontraints haute performances

Tableau 1.1 : classe de qualité des boules

1.3. COMPARAISON GENERALE

Le choix entre assemblages soudés et boulonnés dépend de nombreux facteurs qu'il convient d'analyser lors de la conception :

Critères techniques :

- Résistance : Les soudures bout à bout offrent une continuité complète des sections, tandis que les assemblages boulonnés présentent des sections affaiblies par les perçages.

- Rigidité : Les assemblages soudés sont généralement plus rigides, modifiant moins la répartition des efforts dans la structure.
- Fatigue : Les assemblages boulonnés précontraints présentent souvent un meilleur comportement en fatigue.

Critères économiques :

- Coût de fabrication : Variable selon la complexité géométrique et les moyens disponibles.
- Coût de montage : Les assemblages boulonnés permettent souvent un montage plus rapide sur chantier.
- Maintenance : Les assemblages boulonnés permettent les interventions de maintenance.

Critères de mise en œuvre :

- Qualification du personnel : Le soudage nécessite des soudeurs qualifiés.
- Conditions climatiques : Le soudage est plus sensible aux conditions météorologiques.
- Accessibilité : Les assemblages boulonnés s'adaptent mieux aux espaces confinés.

1.4. BOULONS ORDINAIRES VS PRECONTRAINTS BOULONS ORDINAIRES

Les boulons ordinaires sont mis en place sans contrôle spécifique de la précontrainte. Le serrage s'effectue « à la main ferme » ou avec un serrage modéré. Le mécanisme de transmission des efforts se fait par :

- Cisaillement de la tige du boulon
- Pression diamétrale sur les parois des trous
- Frottement résiduel limité

Ils sont généralement utilisés pour :

- Assemblages d'éléments secondaires
- Structures faiblement sollicitées
- Assemblages provisoires ou de montage

Les Boulons précontraints, forcément à haute résistance, sont serrés avec une précontrainte contrôlée, créant un effort de compression dans les pièces assemblées. Les efforts sont transmis par :

- Frottement entre les surfaces en contact
- Transmission des efforts sans glissement relatif
- Préservation de l'intégrité du boulon

Utilisés pour leur :

- Résistance élevée à la fatigue
- Comportement élastique de l'assemblage
- Absence de jeu dans l'assemblage
- Rigidité supérieure

3. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Les dispositions géométriques des boulons influencent directement l'efficacité et le comportement de l'assemblage, d'où l'étude de ces paramètres sur la résistance de la connexion dans ce mémoire d'étude.

3.1 JEUX DES TROUS DE PERÇAGE

Les trous peuvent être réalisés selon différentes techniques telles que le forage, le poinçonnage, ou toute autre méthode. Ils sont néanmoins tenus de respecter les caractéristiques géométriques et les tolérances définies dans la norme EN 1090-2.

Le jeu nominal est défini comme étant :

- ✓ la différence entre le diamètre nominal du trou et le diamètre nominal du boulon pour
- ✓ les trous ronds ;
- ✓ la différence entre respectivement la longueur ou la largeur du trou et le diamètre nominal du boulon, pour les trous oblongs.

Les jeux des trous de perçage des boulons sont indiqués dans le tableau 1

Diamètre nominal d du boulon	12	14	16	18	20	22	24	27	30	33	36
Jeux des trous ronds normaux	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Jeux des trous ronds surdimensionnés	3	3	4	4	4	4	6	8	8	8	8
Trous oblongs courts :											
- jeux sur la longueur	4	4	6	6	6	6	8	10	10	10	10
- jeux sur la largeur	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Trous oblongs longs :											
- jeux sur la longueur	18	21	24	27	30	33	36	40	45	50	54
- jeux sur la largeur	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3

Tableau 1.2- Jeux nominaux pour les boulons (mm).

3.2 ENTRAXES ET PINCES

Les boulons d'un assemblage sont placés sur des lignes et des rangées. Les boulons peuvent être en quinconce, c'est à dire décalés entre les rangées.

Ces prescriptions visent à :

- Éviter les ruptures prématurées
- Assurer une transmission efficace des efforts
- Permettre une mise en œuvre correcte
- Éviter les phénomènes d'instabilité locale

La disposition constructive de ce type d'assemblage dépende de deux paramètres, l'entraxe et la pince.

Entraxes (appelé Pas) :

- Entraxe minimal : éviter la rupture en bloc
- Entraxe maximal : assurer la transmission des efforts
- *Optimisation selon la répartition des contraintes*

Pinces (distance du centre du trou jusqu'à une rive) :

- Pince longitudinale : distance au bord parallèle à l'effort
- Pince transversale : distance au bord perpendiculaire à l'effort
- *Influence sur les modes de rupture*

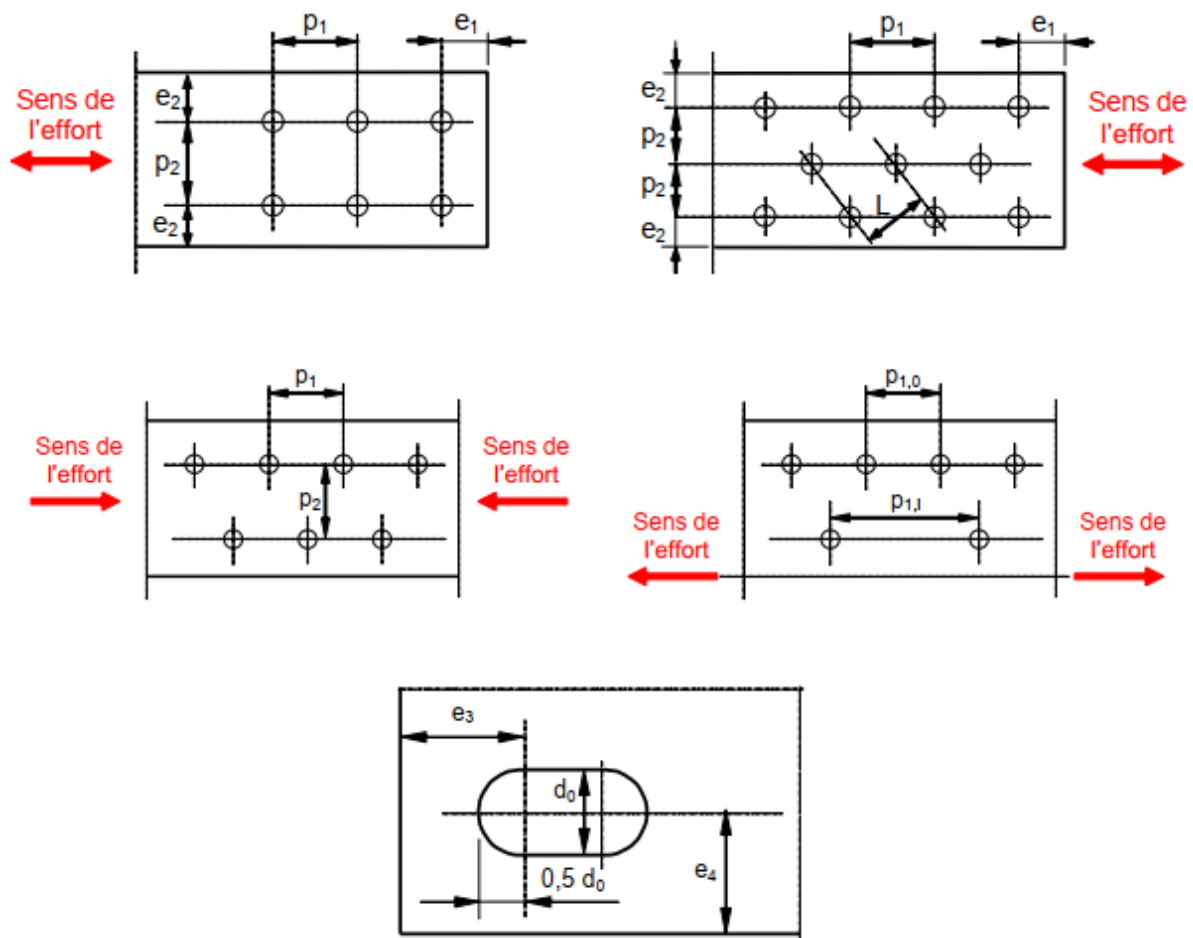


Figure 1.4 : Pincés et entraxes, Entraxes pour trous en quinconce, Pince longitudinale et pince transversale pour trous oblongs

- p_1 : entraxe des fixations dans une rangée, mesuré dans la direction de la transmission des efforts,
- p_2 : entraxe entre des rangées de fixations adjacentes, mesuré perpendiculairement à la direction de la transmission des efforts,
- $p_{1,0}$: entraxe des fixations dans une rangée de rive d'une pièce tendue avec trous en quinconce, mesuré dans la direction de la transmission des efforts,
- $p_{1,i}$: entraxe des fixations dans une rangée intérieure d'une pièce tendue avec trous en quinconce, mesuré dans la direction de la transmission des efforts,
- e_1 : pince longitudinale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce quelconque, mesurée dans la direction de l'effort transmis,

- e_2 : pince transversale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce quelconque, mesuré perpendiculairement à la direction de l'effort transmis,
- e_3 : distance entre l'axe d'un trou oblong et l'extrémité ou bord adjacent d'une pièce quelconque,
- e_4 : distance entre le centre de l'arrondi d'extrémité d'un trou oblong et l'extrémité ou bord adjacent d'une pièce quelconque,
- t : épaisseur de la pièce attachée extérieure la plus mince

Les conditions minimales sont destinées à laisser suffisamment de place entre les organes d'assemblage pour permettre une pose correcte (encombrement des clés de serrage notamment).

Dans le cas d'un **chargement statique prédominant** (EN 1993-1-8) :

- Entraxes :

$$2,2 d_0 \leq p_1 \leq \text{Min} (14 t \text{ ou } 200 \text{ mm})$$

$$2,4 d_0 \leq p_2 \leq \text{Min} (14 t \text{ ou } 200 \text{ mm})$$

$$p_{1,0} \leq \text{Min} (14 t \text{ ou } 200 \text{ mm})$$

$$(28 \text{ ou } 400 \text{ mm})$$

$$p_{1,i} \leq \text{Min } t$$

Pour les rangées de fixations en quinconce, un espacement minimum entre rangées

$p_2 = 1,2 d_0$ peut être utilisé, à condition que la distance minimum, L , entre deux fixations quelconques soit telle que $L \geq 2,4 d_0$.

- Pincés pour des pièces non exposées aux intempéries :

$$1,2 d_0 \leq (e_1 \text{ ou } e_2)$$

- Pincés pour des pièces exposées aux intempéries ou à d'autres influences corrosives :

$$1,2 d_0 \leq (e_1 \text{ ou } e_2) \leq 4 t + 40 \text{ mm}$$

- Pincés pour trous oblongs :

$$1,5 d_0 \leq (e_3 \text{ ou } e_4)$$

Type de distance	Notation	Distance minimale	Distance maximale	Remarques
Entraxe longitudinale	E1	2,2d0	14 t ou 200 mm	Dans le sens de l'effort
Entraxe transversale	E2	2,4d0	14 t ou 200 mm	Perpendiculaire à l'effort
Pinces longitudinale	P1	1,2d0	4 t + 40 mm ou 200 mm	Au bord Charge
Pinces transversale	P2	1,2d0	4 t + 40 mm ou 200 mm	Au bord Non chargé

Tableaux 1.3 : Distance entre boulons

4. SOLLICITATIONS DES ASSEMBLAGES

Nous nous intéressant uniquement aux pièces constituant l'assemblage, objet principale de notre étude

Pour nos pièces, la vérification de leur résistance est :

✓ Pression diamétrale

C'est une déformation puis une rupture de la paroi du trou. La vérification à la pression diamétrale est donnée par la formule :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- f_u : Résistance ultime à la traction de l'acier des pièces assemblées
- f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon

- d : diamètre de la partie lisse (non fileté) de la tige du boulon, et d_0 : diamètre nominale du trou (tolérance normalisée).
- t : l'épaisseur la plus mince des pièces assemblées
- $\gamma_{M2} = 1.25$

✓ Résistance en section brute

La formule est :

$$N_{Pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

✓ Résistance en section nette

La formule est :

$$N_{u,Rd} = 0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

La section nette est déterminée selon la disposition des trous

Pour nos pièces : **La rupture des pièces est une rupture en traction en section nette**

Conclusion

L'étude des assemblages métalliques, et en particulier des assemblages boulonnés, présente une complexité importante. En effet, la présence des boulons implique la réalisation de perçages, ce qui entraîne une réduction de la section résistante des pièces constituant la connexion. Cette section réduite est désignée sous le terme de section nette. Sa détermination constitue une étape délicate, ce qui justifie le traitement détaillé qui lui sera consacré dans les chapitres suivants.

Chapitre 2 :

Étude théorique des assemblages en cisaillement selon l'Eurocode 3

Introduction

Les assemblages boulonnés constituent l'un des éléments fondamentaux de la construction métallique moderne. Leur comportement sous sollicitations de cisaillement représente un enjeu majeur pour la sécurité et l'économie des structures. L'Eurocode 3, norme européenne de référence pour le calcul des structures en acier, propose un cadre méthodologique rigoureux pour l'analyse et le dimensionnement de ces assemblages.

Ce chapitre présente une étude théorique approfondie des assemblages boulonnés soumis à des efforts de cisaillement, en s'appuyant sur les prescriptions de l'Eurocode 3. L'objectif principal consiste à établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du comportement mécanique de ces assemblages, en particulier à travers l'étude de la formule de Cochrane et de ses applications pratiques.

2.1 Description des assemblages en cisaillement

2.1.1 Définition générale

Les assemblages en cisaillement constituent l'un des modes de liaison les plus couramment utilisés dans les structures métalliques. Ils permettent de transmettre les efforts entre les différents éléments de la structure par l'intermédiaire de boulons sollicités principalement en cisaillement.

Dans ce type d'assemblage, les efforts de traction appliqués à la pièce assemblée sont transmis aux boulons qui les reprennent par cisaillement de leur fût. La transmission des efforts s'effectue par pression diamétrale entre les boulons et les parois des trous dans les pièces assemblées.

2.1.2 Types de configurations

2.1.2.1 Simple cisaillement

Le simple cisaillement se produit lorsque le boulon traverse deux pièces superposées. Dans cette configuration :

- Le boulon est sollicité sur un seul plan de cisaillement
- L'effort tranchant est repris entièrement sur une section du fût du boulon

- Cette configuration est la plus simple mais aussi la moins résistante

Caractéristiques du simple cisaillement :

- Nombre de plans de cisaillement : $m = 1$
- Résistance au cisaillement : $F_v, R_d \approx = (f_{vb} \times A) / \gamma_{M2}$
- Application typique : assemblages de barres de treillis, platines d'about

2.1.2.2 Double cisaillement

Le double cisaillement se produit lorsque le boulon traverse trois pièces, la pièce centrale étant prise en sandwich entre deux pièces extérieures :

- Le boulon est sollicité sur deux plans de cisaillement
- L'effort est réparti sur deux sections du fût du boulon
- Cette configuration offre une résistance supérieure au simple cisaillement

Caractéristiques du double cisaillement :

- Nombre de plans de cisaillement : $m = 2$
- Résistance au cisaillement : $F_v, R_d = 2 \times (f_{vb} \times A) / \gamma_{M2}$
- Application typique : assemblages de poutres sur poteaux, assemblages de contreventements

2.1.2.3 Cisaillement multiple

Dans certains cas complexes, le boulon peut traverser plus de trois pièces, créant ainsi un cisaillement multiple avec $m > 2$ plans de cisaillement.

2.1.3 Hypothèses de calcul

Selon l'Eurocode 3, le calcul des assemblages en cisaillement repose sur plusieurs hypothèses fondamentales :

- **Hypothèses sur le comportement des matériaux :**
 - Comportement élasto-plastique parfait de l'acier
 - Résistance uniforme des boulons sur toute leur section
 - Négligence des effets de fatigue pour les calculs statiques

➤ **Hypothèses sur la répartition des efforts :**

- Répartition uniforme des efforts entre tous les boulons de l'assemblage
- Transmission directe des efforts par cisaillement du fût des boulons
- Négligence de l'effet de levier dans les calculs simplifiés

➤ **Hypothèses géométriques :**

- Ajustement parfait entre les pièces assemblées
- Trous percés avec une précision suffisante (tolérances normalisées)
- Serrage correct des boulons selon les spécifications

2.2 Calcul des sections de la pièce

Dans un assemblage métallique sous cisaillement, la section brute est la section d'un élément telle qu'elle est définie avant la création des trous, tandis que la section nette est la section effective de cet élément une fois les trous des boulons percés, réduisant ainsi la surface de résistance et influençant directement sa capacité à résister aux forces de cisaillement. Le calcul de la contrainte de cisaillement prend en compte la section nette, car c'est cette surface réduite qui est sollicitée et qui détermine la résistance de l'assemblage.

2.2.1 Section brute

Il s'agit de la surface complète d'une pièce (par exemple, un profilé métallique) avant que des ouvertures, comme des trous pour des boulons ou des rivets, ne soient pratiquées.

2.2.2 Section nette

Une fois les trous percés, la section brute est réduite. La section nette est la surface restante de l'élément, qui est la partie réellement apte à supporter la charge de cisaillement.

La détermination de la section nette est cruciale. Afin d'évaluer la capacité de l'assemblage à résister au cisaillement, il faut calculer la contrainte maximale admissible, qui dépend de la surface sur laquelle la force est répartie.

L'aire nette est égale à l'aire brute diminuée des aires des trous et autres ouvertures. Elle est notée A_{net}

Lorsque les trous sont en quinconce, l'aire à déduire est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Adédution} = n \times d_o \times t - \Sigma(s^2t/(4p))$$

Où :

- **S** est le pas en quinconce ou l'entraxe de deux trous consécutifs dans la ligne
- **P** est l'entraxe de deux mêmes trous mesuré perpendiculairement à l'axe de la barre
- **T** est l'épaisseur
- **N** est le nombre de trous situés sur toute ligne diagonale ou en zigzag s'étendant sur la largeur de la barre
- **D_o** est le diamètre de trou

Cette valeur forfaitaire $s^2t/(4p)$ est issue des travaux de Cochrane. Elle présente l'avantage d'une formulation simple en sachant que l'erreur commise comparativement à une théorie plus fine ne dépasse pas 10 à 15%.

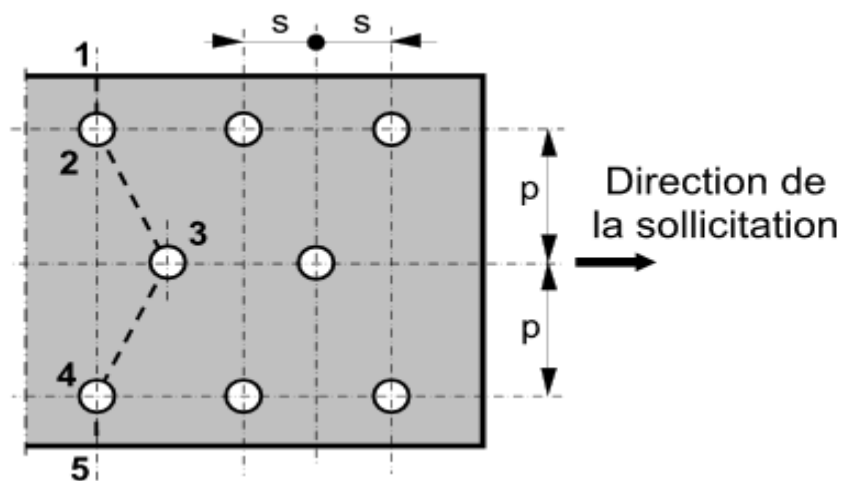


Figure 2.1 : Calcul de la section nette

Section	Formule	Paramètres	Remarques
Section brute	$A = b \times t$	B : largeur : épaisseur	Section totale de l'élément

Section nette	$A_{\text{net}} = A - n \times d_o \times t$	N : nombre de trous d_o : diamètre du trou	Section réduite par les trous de boulons
Section nette effective	$A_{\text{net,eff}} = \beta \times A_{\text{net}}$	B : coefficient de réduction	Prend en compte l'effet des pinces

Tableau 2.1 : Calcul des sections de la pièce assemblée

2.3. Origine et démonstration de la formule de Cochrane

2.3.1. Contexte historique et problématique

Au début du XX^e siècle, la construction métallique reposait principalement sur l'assemblage par rivetage. Les rivets, chauffés puis forgés à chaud, constituaient le système d'assemblage standard pour les structures permanentes telles que les ponts et les bâtiments industriels. Dans ce contexte, la détermination précise de la section nette éléments en traction percés de trous de rivets représentait un défi majeur pour les ingénieurs, particulièrement lorsque ces trous étaient disposés en quinconce (staggered rivet holes).

En 1922, Victor H. Cochrane publie dans l'Engineering News-Record un article intitulé "Rules for Rivet-Hole Deductions in Tension Members" qui propose une approche simplifiée pour le calcul de la déduction de section nette. À cette époque, deux méthodes principales s'opposaient dans la communauté scientifique :

La méthode de la contrainte égale (equal-stress method) :

Cette approche suppose que les contraintes sont réparties de manière uniforme dans toutes les sections, qu'elles soient transversales ou diagonales. Elle considère que la rupture peut se produire selon différents chemins et que tous ces chemins doivent présenter une résistance équivalente.

La méthode de l'aire égale (equal-area method) :

Cette méthode postule que les sections transversales et en zigzag possèdent des aires équivalentes après déduction des trous, impliquant ainsi une réduction identique de la capacité portante.

L'objectif de Cochrane était de développer une formule simple, pratique et rigoureuse qui puisse être adoptée uniformément par les ingénieurs en pratique tout en conservant une base théorique solide.

2.3.2. Développement mathématique de la formule

2.3.2.1. Hypothèses fondamentales

La démonstration de Cochrane repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

- Le matériau est homogène et isotrope, présentant les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions
- La résistance à la rupture est identique pour les chemins de rupture transversaux et diagonaux
- Les rivets (ou boulons) sont uniformément espacés avec un décalage longitudinal constant s et un entraxe transversal p
- Le comportement mécanique peut être approché par une relation quadratique

2.3.2.2. Construction géométrique

Considérons une plaque perforée avec deux files de trous décalés. Le chemin de rupture potentiel peut suivre une trajectoire en zigzag reliant les trous de files adjacentes. Pour caractériser ce chemin diagonal, Cochrane introduit les paramètres suivants :

- **S** : le pas en quinconce ou décalage longitudinal entre deux trous consécutifs de files différentes, mesuré parallèlement à l'axe de la barre
- **P (ou g dans certaines notations)** : l'entraxe transversal entre les deux files de trous, mesuré perpendiculairement à l'axe de la barre

- d_o : le diamètre du trou

La longueur développée du segment diagonal reliant deux trous consécutifs en quinconce s'exprime par le théorème de Pythagore. Cependant, pour les besoins du développement théorique, Cochrane utilise une approximation simplifiée lorsque s est petit devant g .

2.3.2.3. Dérivation de la formule principale

Cochrane postule que la perte effective de section nette w (largeur à déduire) varie de manière quadratique avec la distance s . En considérant l'équilibre des contraintes le long des chemins de rupture transversal et diagonal, et en imposant l'égalité des contraintes maximales (principe de la contrainte égale), Cochrane établit la formule fondamentale pour la déduction de largeur effective :

Formule de base :

$$w = d_o - s^2/(4p)$$

où :

- w est la largeur effective à déduire
- d_o est le diamètre du trou
- s est le pas en quinconce
- P est l'entraxe transversal entre files

2.3.2.4. Expression de la section nette

Pour une plaque de largeur B , d'épaisseur t , comportant n trous alignés ou en quinconce sur un chemin de rupture potentiel, la section nette s'exprime par :

$$A_{net} = t[B - n \cdot d_o + \Sigma(s^2/(4p))]$$

Le terme positif $\Sigma(s^2/(4p))$ représente la "récupération" de section grâce au décalage des trous. Plus le décalage s est important et plus l'entraxe g est faible, plus cette récupération est significative.

2.3.3. Méthode alternative et comparaison

Parallèlement à la méthode de Cochrane, certains auteurs proposaient une formulation alternative basée sur le principe de l'aire égale. Cette approche conduit à une expression légèrement différente pour la déduction de largeur :

$$w = d_o - s^2/(2p + d_o)$$

Cochrane a effectué une analyse comparative détaillée entre les deux formulations. Les résultats montrent que :

- Les différences numériques entre les deux méthodes sont généralement inférieures à 3% pour les configurations courantes
- La méthode de la contrainte égale (formule $s^2/(4p)$) s'avère plus simple à appliquer en pratique
- Les validations expérimentales disponibles à l'époque tendaient à confirmer la pertinence de la formule $s^2/(4p)$
- La méthode de Cochrane présente un caractère légèrement plus conservateur, ce qui constitue un avantage du point de vue de la sécurité structurale

C'est principalement en raison de sa simplicité mathématique et de sa validation expérimentale que la formule de Cochrane a été retenue par les codes de calcul successifs. L'erreur introduite par les simplifications reste acceptable, généralement comprise entre 10 et 15% dans le sens de la sécurité.

2.3.4. Limitations et domaine de validité

2.3.4.1. Hypothèses restrictives

La formule de Cochrane repose sur plusieurs simplifications qui en limitent le domaine d'application :

- **Comportement élastique linéaire** : La dérivation suppose un comportement purement élastique, alors que l'acier présente en réalité une plastification significative avant

rupture. La redistribution des contraintes due à la plasticité n'est pas prise en compte explicitement.

- **Négligence des effets tridimensionnels** : L'analyse reste bidimensionnelle et ne considère pas les effets de l'épaisseur de la plaque ni les concentrations de contraintes locales autour des trous.
- **Uniformité de la sollicitation** : La formule suppose une traction pure uniforme, sans moment de flexion ni excentricité.

2.3.4.2. Validité pour les matériaux modernes

Les recherches récentes ont examiné la validité de la formule $s^2/(4p)$ pour les aciers à haute résistance et les aciers inoxydables. Les principales conclusions sont :

- Pour les aciers à haute résistance (S700, S900), la formule reste raisonnablement fiable, avec des écarts généralement inférieurs à 10%
- Le ratio de ductilité f_u/f_y influence la redistribution plastique des contraintes ; pour des matériaux peu ductiles, la formule peut devenir légèrement non-conservative
- Pour les aciers inoxydables, caractérisés par un comportement non-linéaire marqué, l'application de la formule nécessite des précautions supplémentaires

2.3.4.3. Transition du rivetage au boulonnage

Il convient de noter que la formule de Cochrane a été développée à une époque où le rivetage constituait le mode d'assemblage dominant. Les boulons existaient certes déjà en 1922, mais ils n'étaient pas standardisés pour les structures permanentes et leur fiabilité était jugée insuffisante.

Le bouleversement majeur s'est produit après la Seconde Guerre mondiale, avec le développement des boulons haute résistance (ASTM A325 aux États-Unis, classes 8.8 et 10.9 en Europe) dans les années 1950. Ces nouveaux organes de fixation, associés à des méthodes de serrage contrôlé, ont progressivement supplanté les rivets.

Continuité de la formule :

Du point de vue du calcul de la section nette, la nature de l'organe de fixation (rivet ou boulon) n'influe pas sur la validité de la formule $s^2/(4p)$. Ce qui importe est uniquement la géométrie du trou percé et la disposition des perforations. Ainsi, les formules développées pour le rivetage ont été naturellement héritées par le boulonnage moderne, puis intégrées dans les codes contemporains (AISC, Eurocode 3, CSA).

2.3.5. Intégration dans les codes modernes

2.3.5.1. Adoption par l'Eurocode 3

L'Eurocode 3, norme européenne de référence pour le calcul des structures en acier, a intégré la formule de Cochrane dans sa section consacrée au calcul de la section nette. La prescription normative s'énonce ainsi :

Lorsque les trous sont disposés en quinconce perpendiculairement à l'axe de l'effort, l'aire nette doit être calculée en considérant tous les chemins de rupture possibles. Pour chaque chemin comprenant des segments en zigzag, la section nette se calcule par :

$$A_{\text{net}} = t[B - \sum d_o + \sum (s^2/(4p))]$$

où :

- t est l'épaisseur de la pièce
- B est la largeur brute
- $\sum d_o$ représente la somme des diamètres des trous sur le chemin considéré
- $\sum (s^2/(4p))$ est la somme des termes de récupération pour tous les segments en zigzag
- s est le pas longitudinal entre trous décalés
- p est l'entraxe transversal entre files

2.3.5.2. Dispositions de l'AISC

Le code américain AISC (American Institute of Steel Construction) adopte une formulation équivalente dans son chapitre consacré aux éléments en traction. L'approche américaine insiste particulièrement sur la nécessité d'examiner tous les chemins de rupture potentiels et de retenir celui qui conduit à la section nette minimale.

2.3.6. Évolution de la recherche scientifique

2.3.6.1. Débats contemporains à Cochrane

Dès la publication de son article en 1922, Cochrane a dû faire face à plusieurs contradicteurs :

- **C.R. Young** défendait la méthode de l'aire égale et affirmait que la formule de Cochrane surestimait la déduction de section, conduisant à un dimensionnement excessivement conservateur.
- **T.A. Smith et E. Godfrey**, en revanche, ont apporté des validations expérimentales qui tendaient à confirmer la pertinence de l'approche de Cochrane.

Ces débats ont contribué à affiner la compréhension du comportement mécanique des assemblages et ont jeté les bases des méthodes modernes d'analyse.

2.3.6.2. Recherches récentes et validation numérique

Au cours des dernières décennies, l'avènement de la modélisation par éléments finis a permis de revisiter les hypothèses de Cochrane avec des outils d'analyse beaucoup plus sophistiqués.

- **Validation pour les aciers à haute résistance :**

Une étude approfondie menée sur des assemblages en acier S700 a examiné les modes de rupture en section nette avec trous en quinconce. Les résultats expérimentaux et numériques ont été comparés aux prédictions des codes (AISC, Eurocode 3, normes australiennes). La conclusion principale indique que la formule $s^2/(4p)$ conserve une bonne précision globale, bien que certains codes présentent ponctuellement des sur-estimations ou sous-estimations selon les configurations géométriques testées.

- **Remise en question du facteur de réduction 0,90 :**

Certaines recherches expérimentales (Université du Michigan, Université de Waterloo) ont contesté l'application systématique d'un facteur de réduction de 0,90 aux assemblages à trous décalés. Les résultats suggèrent que ce facteur pourrait ne pas être nécessaire pour certaines gammes d'épaisseurs, la formule de base $s^2/(4p)$ étant déjà suffisamment conservatrice.

➤ **Analyse du bloc-cisaillement :**

Des études récentes publiées dans le Journal of Constructional Steel Research utilisent la modélisation par éléments finis pour analyser les interactions entre rupture en section nette et rupture par bloc-cisaillement. Ces travaux montrent que l'optimisation de la disposition des boulons doit considérer simultanément ces deux modes de rupture concurrents.

➤ **Connexions spécifiques :**

Des recherches portant sur des configurations particulières (connexions à deux boulons décalés pour pylônes de transmission) révèlent des écarts significatifs entre les modes de rupture observés expérimentalement et ceux prédits par les normes actuelles, conduisant à des recommandations pour améliorer la fiabilité des méthodes de conception.

2.3.6.3. État actuel de la connaissance

Les développements récents de la recherche permettent de dresser le bilan suivant concernant la formule de Cochrane :

➤ **Validité confirmée mais sensibilité à la ductilité :**

La règle $s^2/(4p)$ reste globalement valide pour la plupart des applications courantes, mais la ductilité du matériau (caractérisée par le ratio f_u/f_y) influence la redistribution plastique des contraintes. Pour des aciers peu ductiles, des corrections peuvent s'avérer nécessaires.

➤ **Facteur de réduction discutable :**

L'application systématique d'un facteur de réduction (0,90 ou autre) n'est pas toujours justifiée sur le plan expérimental pour certaines gammes d'épaisseurs.

➤ **Nécessité d'une approche globale :**

L'optimisation de la disposition des boulons ne peut se limiter à la maximisation de la section nette. Il convient de considérer simultanément la résistance au bloc-cisaillement, la pression diamétrale (bearing) et l'arrachement (tear-out).

➤ **Apport de la modélisation numérique :**

Les méthodes par éléments finis permettent aujourd'hui d'affiner considérablement la compréhension des mécanismes de rupture et d'explorer des configurations complexes difficiles à traiter analytiquement.

2.3.7 Application de la formule de Cochrane :

2.3.7.1 Exemple numériques

Paramètre	Valeur	Unité
	Données géométriques	
Largeur de la plat	$B = 200$	mm
Épaisseur	$T = 10$	mm
Diamètre boulon	$D = 20$	mm
Diamètre trou	$D_o = 22$	mm
Entraxe longitudinal	$P = 60$	mm
Entraxe transversal	$G = 4p$	mm
Nombre de boulons	$N = 4 (2 \times 2)$	
	Calculs	
Section brute	$A = 200$	mm ²

Espacement diagonal	$S = \sqrt{60^2 + 50^2} = 78,1$	mm
Chemin direct	$A_{\text{net},1} = 2000 - 2 \times 22 \times 10 = 1560$	mm^2
Chemin diagonal	$A_{\text{net},2} = 2000 - 2 \times 22 \times 10 + (78,1^2)/(4 \times 60) \times 10 = 1813$	mm^2
Section nette critique	$A_{\text{net}} = \min(1560, 1813) = 1560$	mm^2

Tableau 2.2 : Exemple numérique

2.3.7.2 Comparaison avec les prescriptions de l'Eurocode 3

Critère	Formule de Cochrane	Eurocode 3 (EN 1993-1-8)	Observations
théorique	Chemin de rupture critique avec récupération	Approche simplifiée avec coefficients β	EC3 plus conservateur
Disposition en ligne	$A_{\text{net}} = A - n \times d_o \times t$	$A_{\text{net,eff}} = 0,75 \text{ à } 1,0 \times A_{\text{net}}$	Résultats similaires
Disposition en quinconce	Prend en Base compte $s^2/4p$	Non considéré explicitement	Cochrane plus précis
Complexité	Calcul détaillé requis	Application directe	EC3 plus simple

Domaine d'application	Tous assemblages boulonnés/rivés	Assemblages courants	EC3 plus restrictif
Sécurité	Dépend du calcul précis	Coefficients de sécurité intégrés	EC3 garantit une marge

Tableau 2.3 : Comparaison avec les prescriptions de l'Eurocode 3

2.3.8. Synthèse

La formule de Cochrane, développée il y a plus d'un siècle, demeure un outil fondamental du calcul des assemblages métalliques. Sa simplicité mathématique et sa cohérence avec les observations expérimentales expliquent sa pérennité dans les codes de calcul modernes.

Néanmoins, l'évolution des matériaux (aciers à haute résistance, aciers inoxydables), des méthodes de calcul (simulation numérique avancée) et de la compréhension des phénomènes physiques (plasticité, effets tridimensionnels) invite à une application raisonnée de cette formule, en tenant compte de ses limitations et en la combinant avec les vérifications complémentaires imposées par les normes contemporaines.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements théoriques des assemblages boulonnés sollicités en cisaillement selon l'Eurocode 3. Trois aspects essentiels ont été développés : les configurations d'assemblages (simple et double cisaillement), le calcul des sections brute et nette, et l'origine de la formule de Cochrane.

La disposition des boulons, notamment en quinconce, influence significativement la section nette résistante. La formule $s^2/(4p)$, développée par Cochrane en 1922 pour les assemblages rivetés, quantifie cet effet bénéfique et demeure valide pour le boulonnage moderne. Cette formule repose sur la méthode de la contrainte égale et a été validée expérimentalement.

Malgré certaines limitations (hypothèse élastique, analyse bidimensionnelle), les recherches récentes confirment la pertinence de cette approche pour les aciers modernes, y compris à haute résistance. Son intégration dans l'Eurocode 3 et l'AISC témoigne de sa robustesse théorique.

Le dimensionnement des assemblages requiert toutefois une approche globale considérant simultanément la résistance en section nette, le bloc-cisaillement et la pression diamétrale. Le chapitre suivant illustrera ces concepts par des applications numériques concrètes.

Chapitre 3 : Étude expérimentale

3.1. Introduction

L'objectif principal de cette campagne d'essais est d'étudier expérimentalement l'influence de la disposition des boulons ordinaires sur la détermination des sections brutes et nettes des plaques métalliques soumises à la traction uniaxiale. Plus spécifiquement, cette étude vise à :

- ✓ Analyser le comportement mécanique des plaques perforées avec différentes configurations de trous de boulons
- ✓ Déterminer les sections critiques et leur influence sur la résistance ultime
- ✓ Comparer les résultats expérimentaux avec les prédictions théoriques des codes de construction (Eurocode 3, Cochrane)
- ✓ Évaluer l'effet de la disposition géométrique des perforations sur les modes de rupture
- ✓ Quantifier la réduction de résistance en fonction du nombre et de l'arrangement des trous

Ces objectifs s'inscrivent dans une démarche d'optimisation du dimensionnement des assemblages boulonnés et de validation des méthodes de calcul réglementaires.

3.2. Description du dispositif d'essai

3.2.1. Machines utilisées

Le dispositif expérimental principal consiste en une machine d'essai de traction hydraulique universelle de capacité maximale 600 kN (**photo 3.1**). Cette machine est équipée d'un système de pilotage informatique permettant le contrôle précis de la vitesse de chargement et l'acquisition automatique des données.



Photo 3.1 – Machine de Traction

Caractéristiques techniques :

- Capacité maximale : 600 kN
- Précision de mesure : $\pm 0.5\%$ de la charge appliquée
- Vitesse de chargement : 0.1 à 10 mm/min (réglable)
- Course maximale : 200 mm

Pour la préparation des éprouvettes, une perceuse à colonne industrielle a été utilisée pour réaliser les perforations avec une précision dimensionnelle élevée.



Photo 3.2 – Perceuse à colonne industrielle

3.2.2. Systèmes de mesure

Mesure de force :

- Capteur de force intégré à la machine d'essai
- Précision : ± 0.1 kN
- Acquisition continue avec fréquence d'échantillonnage de 10 Hz

Mesure de déplacement :

- Capteur de déplacement LVDT intégré
- Précision : ± 0.01 mm
- Plage de mesure : 0-50 mm

Système d'acquisition :

- Interface graphique permettant la visualisation en temps réel des courbes force-déplacement
- Sauvegarde automatique des données
- Calcul automatique des paramètres caractéristiques (charge maximale, déplacement à rupture)

Les essais sont réalisés en appliquant une force et on mesure un déplacement appelé « Pilotage en Force »

3.3. Présentation des éprouvettes

3.3.1. Géométries, dimensions, dispositions des trous

Quatre configurations d'éprouvettes ont été testées, toutes présentant les mêmes dimensions géométriques externes mais avec des dispositions différentes des perforations :

Dimensions communes :

- Longueur totale (L) : 505 mm
- Largeur (B) : 100 mm
- Épaisseur (t) : 3 mm
- Entraxe des trous : 50 mm (lorsque applicable)

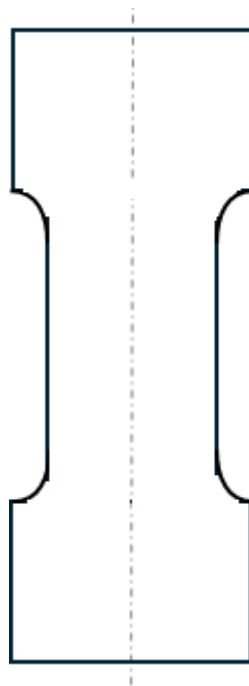


Figure 3.1 – Forme de l'éprouvette initiale

L'ensemble des trous percés ont un diamètre $d \square$ égale à 13 mm et correspondant à l'utilisation d'un boulon de diamètre M12.

			
Configuration A (Éprouvette témoin) : - 4 trous disposés en carré (2x2) - Arrangement symétrique - Distance au bord : 25 mm	Configuration B : - 4 trous disposés en quinconce - Arrangement décalé pour optimiser la section nette - Distance au bord : 25 mm	Configuration C : - 2 trous alignés verticalement - Disposition centrée - Distance au bord : 25 mm	Configuration D : - 2 trous alignés horizontalement - Disposition centrée - Distance au bord : 25 mm

Photo 3.3 – Différentes configurations d'éprouvettes testées

3.3.2. Configuration des pinces

Les éprouvettes sont fixées dans les mors de la machine d'essai par l'intermédiaire de pinces hydrauliques auto-serrantes. La longueur de serrage est de 50 mm de chaque côté, garantissant une transmission uniforme des efforts et évitant le glissement pendant l'essai.

Caractéristiques du système de fixation :

- Pression hydraulique de serrage : 200 bars
- Surface de contact : 5000 mm²
- Répartition uniforme de la contrainte de serrage

3.4. Procédures d'essai

3.4.1. Chargement en traction

Préparation de l'éprouvette

1. Nettoyage et marquage de l'éprouvette
2. Vérification des dimensions et de la qualité des perforations
3. Installation dans les mors avec alignement soigneux
4. Vérification de l'absence de jeu

Procédure de chargement :

- Mise en charge progressive jusqu'à 10% de la charge attendue pour vérification du montage
- Remise à zéro des capteurs
- Chargement continu à vitesse constante de 2 mm/min
- Suivi en temps réel de l'évolution force-déplacement
- Arrêt automatique à la rupture complète

3.4.2. Conditions aux limites

Conditions de fixation :

- Encastrement total dans les mors sur 50 mm de longueur
- Liberté de déformation dans la zone d'essai (longueur utile : 405 mm)
- Alignement parfait pour éviter la flexion parasite
- Température ambiante stabilisée ($20 \pm 2^\circ\text{C}$)

3.4.3. Suivi des paramètres mesurés

Paramètres enregistrés en continu :

- Force appliquée $F(t)$ en kN
- Déplacement total $\delta(t)$ en mm
- Temps d'essai t en minutes
- Température ambiante

3.5. Essais de caractérisation des matériaux

3.5.1. Essais de traction uniaxiale

Des essais de caractérisation ont été réalisés sur des éprouvettes plates pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau de base.

3.5.2. Détermination de la limite élastique, limite de rupture et module d'Young

Protocole d'essai :

- 3 éprouvettes normalisées selon EN 10002-1
- Vitesse de déformation : 0.00025 s^{-1} jusqu'à f_y , puis 0.008 s^{-1}
- Extensomètre sur base de mesure 50 mm
- Acquisition à 50 Hz

Résultats de caractérisation :

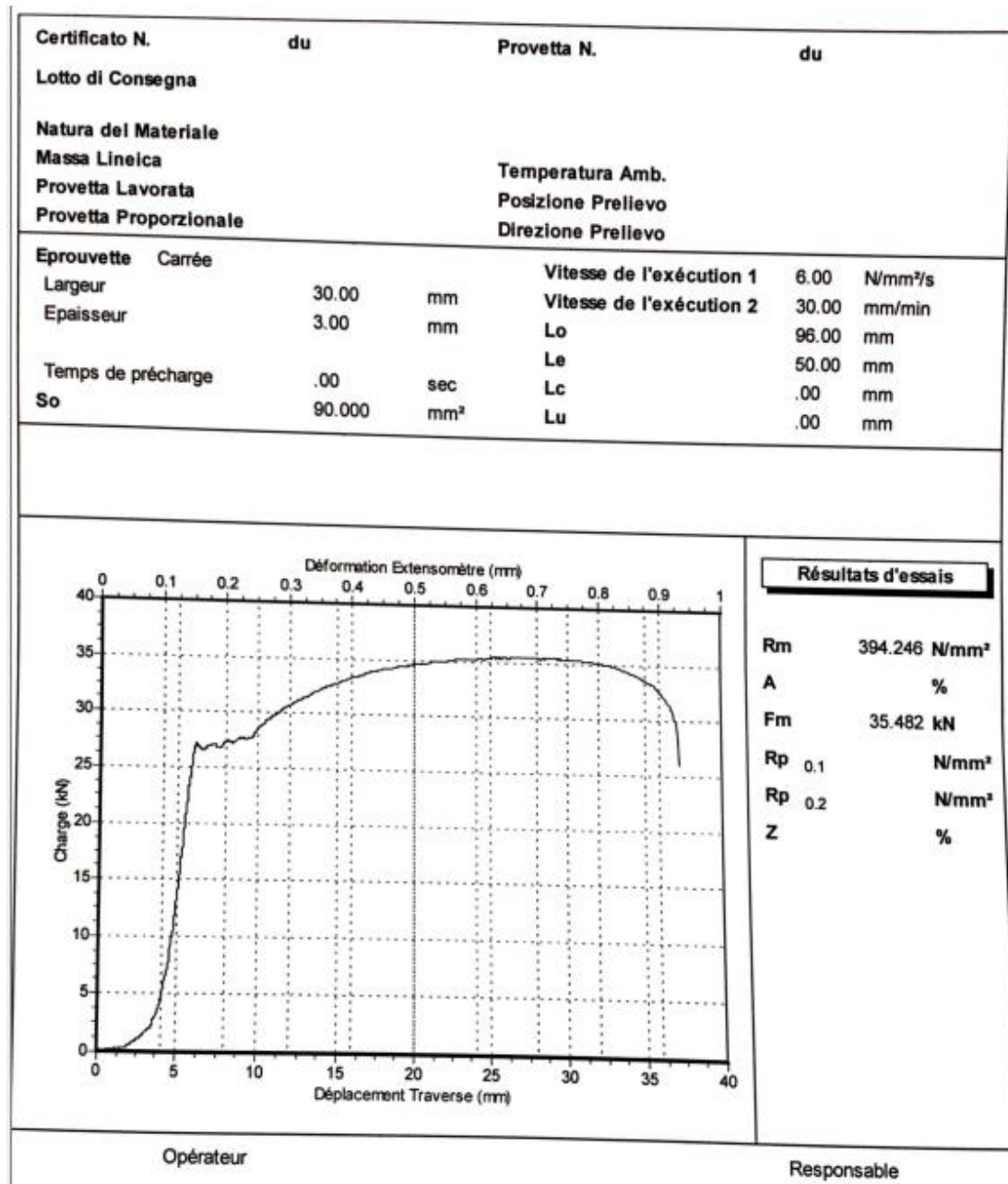


Figure 3.2- Courbe essai de traction sur éprouvette

- Module d'élasticité : $E = 205\,000\text{ MPa}$
- Limite d'élasticité : $f_y = 355\text{ MPa}$
- Résistance ultime : $f_u = 510\text{ MPa}$

- → Limite d'élasticité°: $f_y = 300\text{ MPa}$ ¶
 - → Résistance ultime°: $f_u = 400\text{ MPa}$ ¶

Le matériau présente un comportement élasto-plastique typique des aciers de construction avec un palier de plasticité bien défini.

3.6. Analyse et interprétation des résultats expérimentaux

- 3.6.1. Courbes force-déplacement et Modes de rupture observés

Configuration A (4 trous en carré) :

- Charge maximale : $F_{u,A} = 90,0 \text{ kN}$
- Déplacement à rupture : $\delta_{u,A} = 21,56 \text{ mm}$
- Comportement : rupture nette brutale
- Mode de rupture : section nette critique perpendiculaire

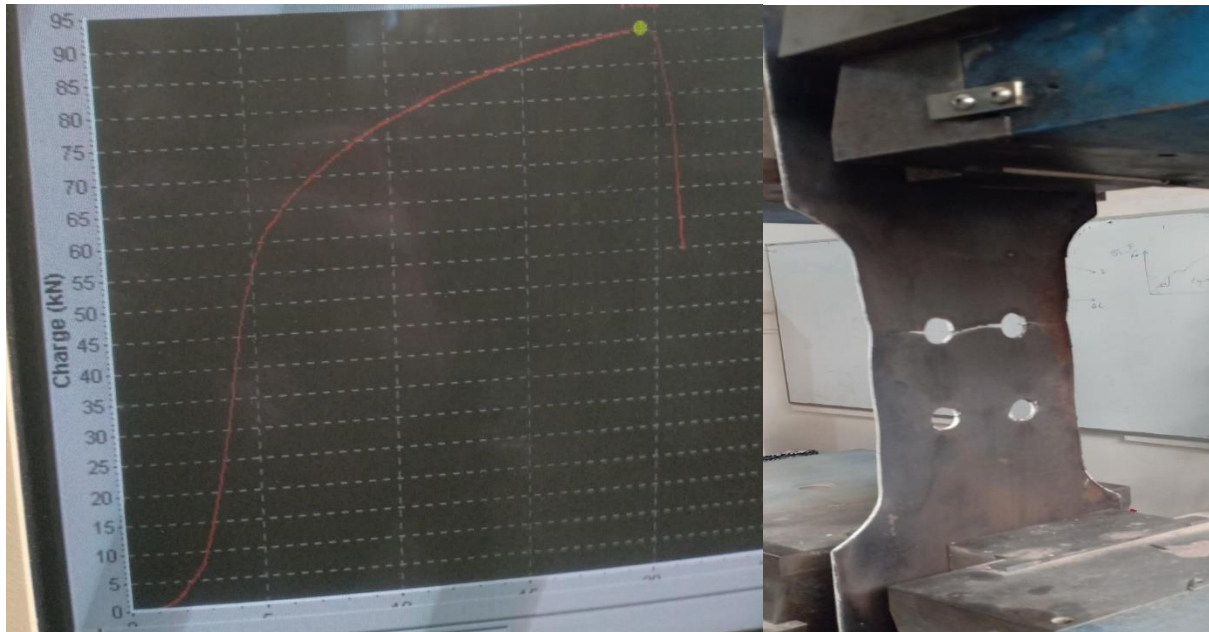


Photo 3.4 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette A »

Analyse des faciès de rupture :

La rupture s'est produite suivant une ligne droite passant par les trous, créant une section nette minimale. Le faciès présente une surface de rupture plane avec très peu de déformation plastique visible, caractéristique d'une rupture fragile.

Configuration B (4 trous en quinconce) :

- Charge maximale : $F_{u,B} = 93,15 \text{ kN}$
- Déplacement à rupture : $\delta_{u,B} = 21,88 \text{ mm}$
- Comportement : rupture progressive avec striction
- Mode de rupture : section nette en zigzag

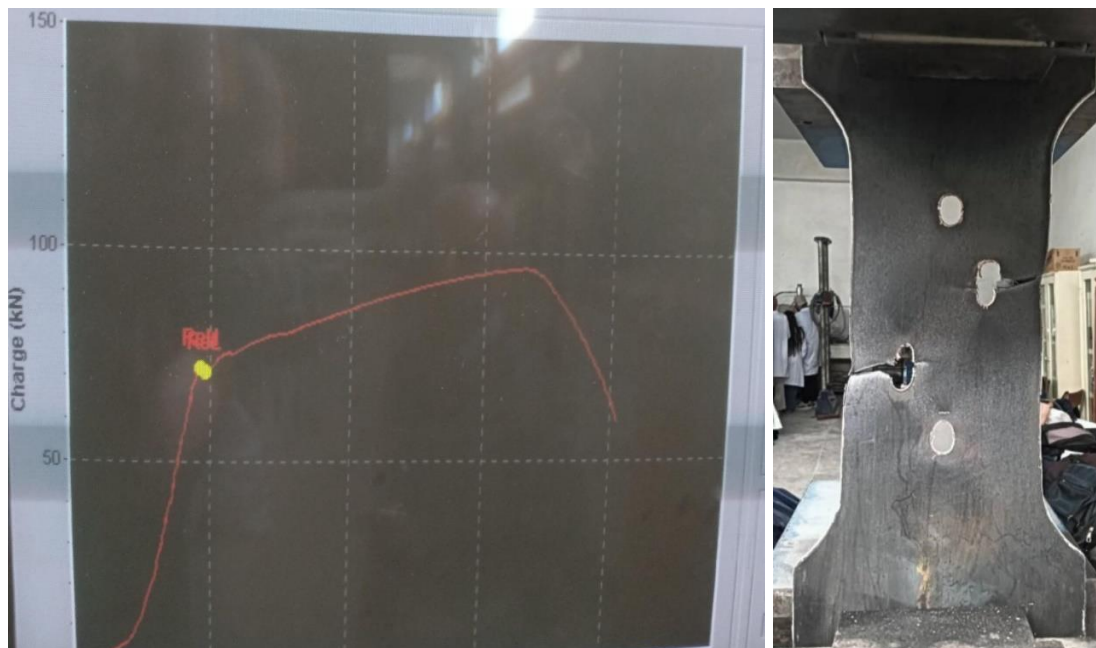


Photo 3.5 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette B »

La disposition en quinconce a favorisé une rupture en zigzag, mobilisant une section nette effective supérieure. Le faciès montre des zones de striction entre les trous, indiquant une plastification locale avant rupture.

Configuration C (2 trous alignés) :

- Charge maximale : $F_{u,C} = 96,20 \text{ kN}$
- Déplacement à rupture : $\delta_{u,C} = 22,56 \text{ mm}$
- Comportement : rupture nette avec déformation plastique locale
- Mode de rupture : section nette droite

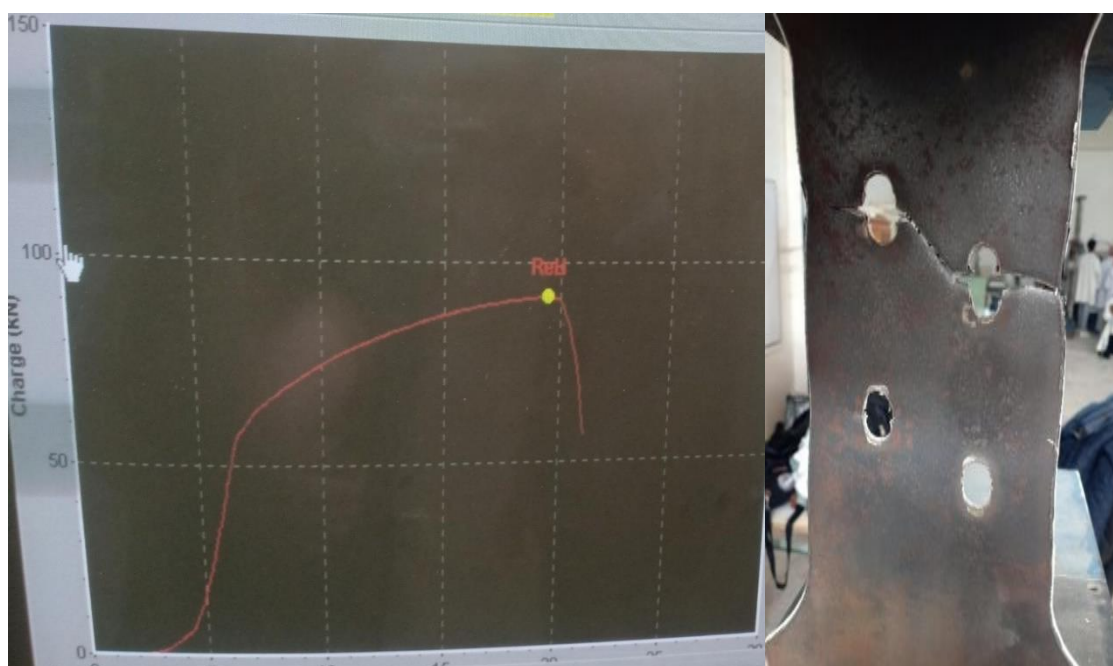


Photo 3.6 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette C »

La rupture s'est développée perpendiculairement à l'axe de sollicitation, avec une légère déviation pour contourner le trou central. Des signes de plastification sont visibles autour des perforations.

Configuration D (2 trous alignés) :

- Charge maximale : $F_{u,D} = 94,47 \text{ kN}$
- Déplacement à rupture : $\delta_{u,D} = 21,85 \text{ mm}$
- Comportement : rupture ductile avec striction importante
- Mode de rupture : section nette droite



Photo 3.7 – Courbe d'essai de traction et Mode de rupture « Eprouvette D »

La rupture droite entre les deux trous présente un faciès ductile avec striction marquée, témoignant d'une plastification importante avant rupture finale.

3.6.3. Influence de la disposition des trous

Analyse comparative :

L'analyse des résultats révèle que la disposition des trous influence significativement la résistance ultime :

1. Configuration C (2 trous): Résistance maximale (96,20 kN)
2. Configuration D (2 trous) : Résistance intermédiaire (94,47 kN)
3. Configuration B (quinconce) : Résistance modérée (93,15 kN)
4. Configuration A (carré) : Résistance minimale (90,0 kN)

Facteurs explicatifs :

- La section nette effective varie selon la disposition
- L'arrangement en quinconce permet une meilleure distribution des contraintes
- Le nombre de trous n'est pas le seul paramètre déterminant
- La géométrie de la section critique joue un rôle prépondérant

3.7. Comparaison avec la théorie

3.7.1. Calculs selon les sections nettes calculées

Sections nettes théoriques :

L'épaisseur de l'ensemble des plaques est égale à 3 mm

Configuration A :

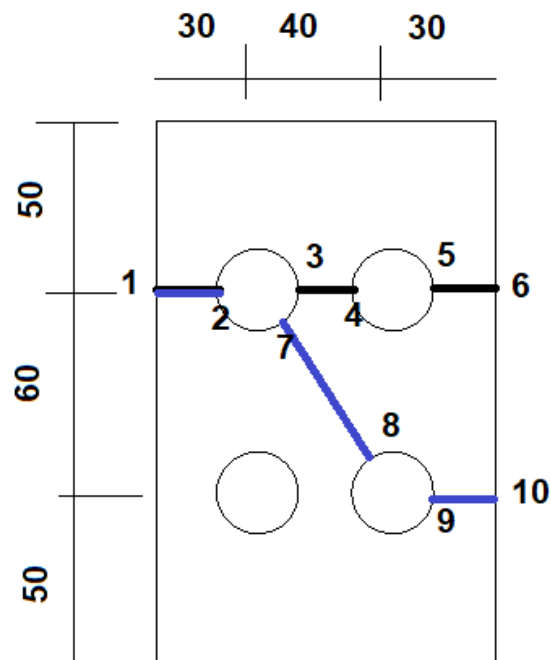


Figure 3.3- Différentes hypothèses de ruptures, Eprouvette A

- Section brute $A_0 = 102 \times 3 = 306 \text{ mm}^2$
- Section brute A_1 (123456): $A_1 = A_0 - 2d_0 \cdot t = 306 - 2 \times 26 \times 3 = 228 \text{ mm}^2$
- Section nette : A_2 (1278910) = $A_0 - t \left[n \cdot d_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right]$

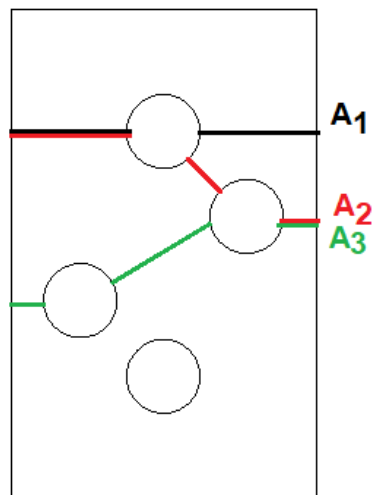
Avec $n=2$ (2 trous), $s=60\text{mm}$ et $p=40\text{mm}$

$$= 306 - 3 \left[2 \times 26 - \frac{60^2}{4 \times 40} \right] = 295,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{nette}} = \min (A_i) = A_1 = 228 \text{ mm}^2$$

$$\text{Résistance théorique : } N_{u,th,A} = f_u \times A_{\text{nette}} = 400 \times 228 = 91,2 \text{ kN}$$

Configuration B :



- Section brute $A_0 = 102 \times 3 = 306 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_1 = 306 - 3 \times 13 = 267 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_2 = 306 - 3 \left[2 \times 13 - \frac{30^2}{4 \times 20} \right] = 261,75 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_3 = 306 - 3 \left[2 \times 13 - \frac{40^2}{4 \times 40} \right] = 258 \text{ mm}^2$

$$A_{\text{nette}} = \min (A_i) = 258 \text{ mm}^2$$

$$\text{Résistance théorique : } N_{u,th} = 400 \times 258 = 103,20 \text{ KN}$$

Configuration C :

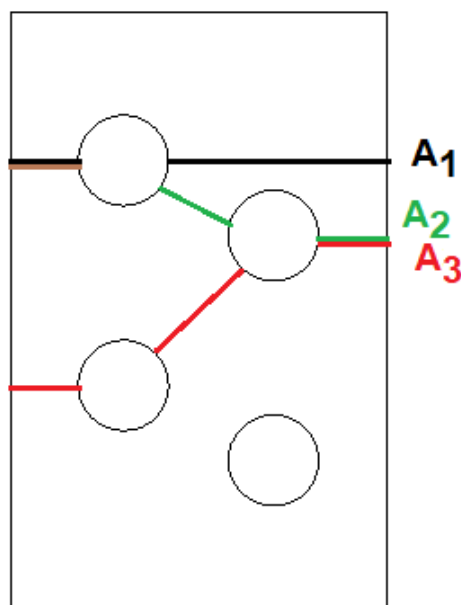


Figure 3.4- Différentes hypothèses de ruptures, Epreuve B

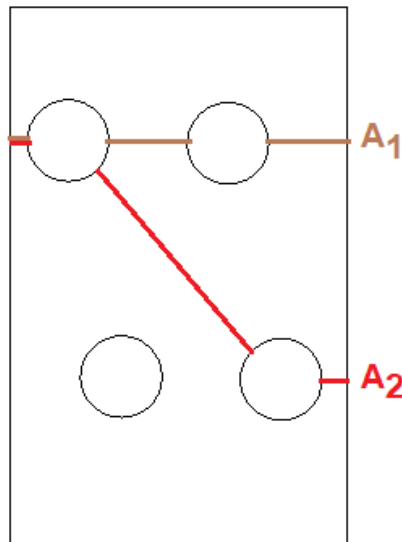
- Section brute $A_0 = 102 \times 3 = 306 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_1 = 306 - 3 \times 13 = 267 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_2 = 306 - 3 \left[2 \times 13 - \frac{20^2}{4 \times 40} \right] = 235,5 \text{ mm}^2$

- Section nette : $A_3 = 306 - 3 \left[2 \times 13 - \frac{40^2}{4 \times 40} \right] = 258 \text{ mm}^2$

$$A_{\text{nette}} = \min (A_i) = 235,5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Résistance théorique : } N_{u,\text{th}} = 400 \times 235,5 = 94,20 \text{ kN}$$

Configuration D :



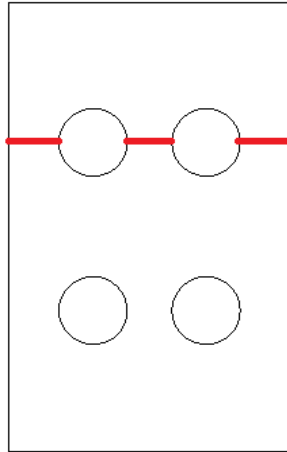
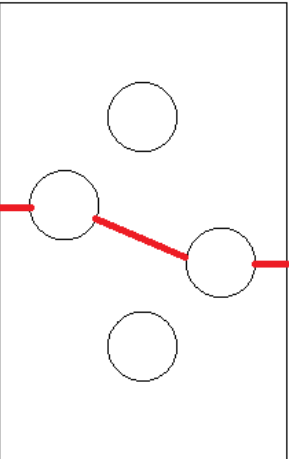
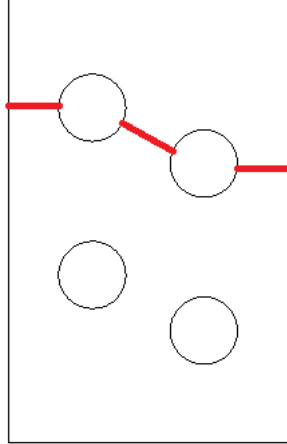
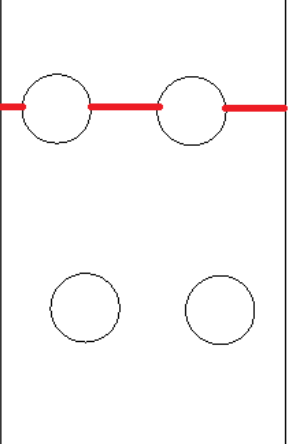
- Section brute $A_0 = 102 \times 3 = 306 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_1 = 306 - 3 \times 2 \times 13 = 228 \text{ mm}^2$
- Section nette : $A_2 = 306 - 3 \left[2 \times 13 - \frac{60^2}{4 \times 40} \right] = 295,5 \text{ mm}^2$

$$A_{\text{nette}} = \min (A_i) = 228 \text{ mm}^2$$

$$\text{Résistance théorique : } N_{u,\text{th}} = 400 \times 228 = 91,2 \text{ kN}$$

3.7.2. Analyse résistance expérimentale vs résistance théorique

Observations importantes :

			
Eprouvette A $A_{\text{nette}} = 222 \text{ mm}^2$ $N_{u,Th} = 91,2 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} = 90 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} / N_{u,Th} = -0,61 \%$		Eprouvette B $A_{\text{nette}} = 261,8 \text{ mm}^2$ $N_{u,Th} = 103,2 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} = 93,15 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} / N_{u,Th} = -10,78 \%$	
			
Eprouvette C $A_{\text{nette}} = 268 \text{ mm}^2$ $N_{u,Th} = 94,2 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} = 96,20 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} / N_{u,Th} = 2,08 \%$		Eprouvette D $A_{\text{nette}} = 228 \text{ mm}^2$ $N_{u,Th} = 91,2 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} = 91,46 \text{ kN}$ $N_{u,Exp} / N_{u,Th} = 0,28 \%$	
Photo 3.8 : Récapitulatif des résultats d'essais			

Hypothèses explicatives :

Les résultats expérimentaux sont considérablement égaux aux valeurs calculer par la formule de de Cochrane. Les rapports expérimental/théorique sont relativement différents (0.28 % - 10,78 %) sauf pour l'éprouvette B avec une différence de 11%. Malgré des arrangements différents, les résistances expérimentales restent dans une fourchette restreinte (90-96 kN)

- **Concentrations de contraintes** : Les perforations créent des concentrations importantes non prises en compte dans les calculs simplifié
- **Effets d'échelle** : Les dimensions réduites des éprouvettes amplifient les effets locaux
- **Conditions aux limites** : Le mode de fixation peut influencer la distribution des contraintes
- **Critère de rupture** : La rupture peut être contrôlée par des phénomènes locaux plutôt que par la résistance moyenne de la section

Certains facteurs contribuent aux écarts observés, à savoir :

1. **Modélisation simplifiée** : Les codes de calcul utilisent des modèles simplifiés qui ne capturent pas toute la complexité du comportement local autour des perforations.
2. **Conditions d'essai** : Les conditions de laboratoire diffèrent des conditions réelles d'utilisation, notamment en termes de vitesse de chargement et de température.
3. **Qualité d'exécution** : Le perçage des trous peut introduire des défauts locaux (bavures, fissures microscopiques) non pris en compte dans les calculs.

Conclusion

Cette étude expérimentale a permis de quantifier l'influence de la disposition des boulons sur la résistance des plaques perforées. L'impact de la disposition est modéré bien que théoriquement différentes, les configurations testées présentent des résistances expérimentales relativement proches. En effet, la disposition des trous influence le mode de rupture, avec des implications sur la ductilité du comportement

La principale information de cette étude est que la disposition des trous joue un rôle important sur la résistance de l'assemblage et que les ingénieurs doivent en tenir en compte afin d'optimiser leur connections et faire des économies.

Ces résultats appellent à une réflexion approfondie sur les méthodes de dimensionnement actuelles et ouvrent des perspectives pour des études complémentaires avec des configurations géométriques différentes sur des assemblages boulonnés cette fois-ci.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent travail a porté sur l'étude théorique et expérimentale de la résistance des assemblages boulonnés, en s'intéressant plus particulièrement à l'influence de la disposition géométrique des trous sur la section nette et sur la capacité portante des plaques métalliques. À travers une approche progressive — de la théorie à l'expérimentation — ce mémoire a permis de revisiter une problématique ancienne, mais toujours d'actualité, sous l'éclairage des normes modernes et des exigences actuelles du dimensionnement.

Sur le plan théorique, l'analyse de la formule de Cochrane a permis de comprendre ses fondements, ses limites et les hypothèses simplificatrices sur lesquelles elle repose. Si cette formule demeure intégrée dans l'Eurocode 3 et largement utilisée dans la pratique, elle montre aujourd'hui certaines limites face aux configurations géométriques variées et aux matériaux à hautes performances. Ces constats appellent à une actualisation du modèle à travers des approches plus fines, capables de mieux représenter la réalité mécanique des assemblages.

Sur le plan expérimental, la campagne d'essais menée sur différentes configurations de plaques perforées a confirmé que la disposition des trous influence notablement la résistance ultime et le mode de rupture. Les résultats ont montré que la configuration à trois trous alignés offre la meilleure performance, tandis que la disposition en carré s'avère la plus défavorable. Ces écarts, bien que contenus, démontrent que la résistance dépend non seulement du nombre de trous mais aussi de leur arrangement spatial et de la répartition des contraintes qui en découle.

Cependant, il convient de souligner que cette étude constitue un premier essai exploratoire, réalisé avec des moyens expérimentaux limités. Les résultats obtenus, bien que cohérents, ne permettent pas à ce stade de formuler des conclusions définitives. Il reste un travail complémentaire considérable à accomplir pour affiner ces observations. Dans le cadre d'une recherche doctorale, il serait nécessaire de recourir à des équipements de mesure plus précis, d'isoler l'influence de chaque paramètre de manière indépendante, et d'appuyer l'expérimentation par une modélisation numérique avancée par éléments finis, afin de combler les lacunes de l'approche expérimentale et d'obtenir une compréhension plus globale du phénomène.

Enfin, l'intégration future de méthodes d'intelligence artificielle pourrait ouvrir de nouvelles perspectives, en permettant d'optimiser automatiquement la géométrie et la section nette des assemblages, dans le but d'accroître leur résistance et leur efficacité sous cisaillement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Eurocode 3, EN 1993-1-8. Calcul des structures en acier - Partie 1-8 : Calcul des joints. Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, 2005.
- [2] Eurocode 3, EN 1993-1-1. Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, 2005.
- [3] Cochrane, V.H. Règles pour les déductions des trous de rivets dans les éléments en tension. Engineering News-Record, Vol. 89, n° 20, pages 847-848, 1922.
- [4] AISC 360-16. Spécification pour les bâtiments de construction en acier. Institut américain de la construction métallique, Chicago, Illinois, 2016.
- [5] Morel, J. Calcul des structures métalliques selon l'Eurocode 3. 4ème édition, Éditions Eyrolles, Paris, 2005.
- [6] Muzeau, J.-P. La construction métallique avec les Eurocodes - Interprétation et exemples de calcul. Éditions Eyrolles, Paris, 2013.
- [7] Kulak, G.L., Fisher, J.W., Struik, J.H.A. Guide des critères de conception pour les joints boulonnés et rivetés. 2e édition, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2001.
- [8] Teh, L.H., Clements, D.D.A. Bloquer la capacité de cisaillement des assemblages boulonnés dans les tôles d'acier réduites à froid. Journal d'ingénierie structurelle, ASCE, Vol. 138, n° 4, pp. 459-467, 2012.
- [9] Kim, H.J., Yura, J.A. Effet du rapport limite d'élasticité sur la résistance à la charge des assemblages boulonnés. Revue de recherche sur l'acier de construction, vol. 49, n° 3, pp. 255-269, 1999.
- [10] Salman, W.D., Driver, R.G., Grondin, G.Y. Comportement des assemblages de poutres à double cornière à résistance à la charge critique. Revue canadienne de génie civil, vol. 31, n° 2, pp. 238-249, 2004.